

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté de science et technologie  
Département de génie mécanique  
Laboratoire de Mécanique Appliquée des Nouveaux Matériaux (LMANM)

**THÈSE**  
**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE**  
**DOCTORAT EN 3<sup>ème</sup> CYCLE**

**Domaine :** Science et Technologie **Filière :** Génie mécanique  
**Spécialité :** Génie mécanique et matériaux avancés

**Présentée par**

**KHELLAF Ahmed**

*Intitulée*

**MODELISATION ET OPTIMISATION AVANCEES DU  
PROCESSUS DE TOURNAGE DES PIECES DIFFICILEMENT  
USINABLES**

Soutenu le : 14/07/2022 Devant le Jury composé de :

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>		
Mr. HADDAD Abdelkrim	Pr	Université 8 Mai 1945 Guelma	Président
Mr. BOUTABBA Smaïl	Pr	Université 8 Mai 1945 Guelma	Rapporteur
Mr. YALLESE Med Athmane	Pr	Université 8 Mai 1945 Guelma	Co-Rapporteur
Mr. BEY Kamel	Pr	Université Badji Mokhtar Annaba	Examineur
Mr. BELHADI Salim	Dr	Université 8 Mai 1945 Guelma	Examineur

**Année Universitaire : 2022/2021**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
السَّلَامُ عَلَيْكُمْ وَرَحْمَةُ اللَّهِ وَبَرَكَاتُهُ

## Dédicaces

*Je tiens à dédier cette thèse :*

*A ma très chère **Mère** et à mon cher **Père**, en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leur soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite.*

*A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance :*

*Ma femme*

*Mes enfants Mohamed et Amine ;*

*Mes sœurs et mon frère ;*

*Toute ma famille ;*

*Mes chers amis*

## Remerciements

*En premier lieu, nous tenons à remercier notre DIEU, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.*

*Ce travail a été effectué sous la direction de Monsieur Yaltese Mohamed Athmane et Monsieur BOUTABBA Smaïl, Professeurs au département de Génie Mécanique, Université 8 Mai 1945 de Guelma, à qui je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour la confiance qu'ils m'ont témoigné, pour leur encouragements, conseils et leur aide qu'il n'a pas cessé de me prodiguer tout au long de cette période.*

*Mes remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté de juger ce travail. Ainsi, Je remercie Monsieur HADDAD Abdelkrim, Professeur au département de Génie Mécanique, Université 8 Mai 1945 Guelma d'avoir accepté de présider le jury.*

*J'exprime aussi ma gratitude à Messieurs : BEY Kamel, Professeur à l'Université Badji Mokhtar Annaba et BELHADI Salim, Docteur au département de Génie Mécanique, Université 8 Mai 1945 de Guelma, qui ont accepté d'examiner mon travail et participer au jury de thèse.*

*Je tiens à remercier tout le personnel du centre de métrologie du Centre Technique des Industries Mécaniques « CETIM » à Senlis France ainsi que la société « LISI AEROSPACE », France pour m'avoir aidé à utiliser des machines de mesure très avancées, ce qui m'a permis d'enrichir mes résultats scientifiques.*

*J'adresse mes remerciements également à tous les membres, les thésards et les techniciens du Laboratoire de Mécanique et Structure (LMS) et du Laboratoire de Mécanique Appliquée des Nouveaux Matériaux (LMAANM).*

## ملخص

تعد عملية تشكيل المواد الصلبة عملية مطلوبة تتطلب مهارات متخصصة وتقنية متطورة للحصول على أجزاء دقيقة عالية الجودة. تكمن صعوبة تشكيل المواد الصلبة في صلابتها ومقاومتها للحرارة والتآكل ، وكذلك في تعدد المعلمات المشاركة في العملية. لم تعد الطرق التقليدية للنمذجة والتحسين كافية لتحقيق أفضل أداء، ولذلك من الضروري تطوير وتطبيق تقنيات نمذجة وتحسين متطورة، تستند على خوارزميات الذكاء الاصطناعي. تعتبر هذه التقنيات أدوات لا غنى عنها لتحسين جودة الأجزاء المشكلة بشكل مستمر مع تقليل تكاليف الإنتاج. في هذا السياق ، يهدف العمل المقدم إلى تطوير نماذج رياضية لتوقع عملية تشكيل المواد الصلبة وتحسين شروط القطع بطريقة موضوعية ومتعددة الأهداف. تم إنشاء هذه النماذج باستخدام تقنيات النمذجة والتحسين المتطورة التي تعتمد على خوارزميات الذكاء الاصطناعي لتحقيق أفضل أداء في تشكيل الفولاذ الصلب. لتحقيق هذا الهدف، أجريت دراسة تجريبية لدراسة تأثير مختلف معلمات القطع على مؤشرات أداء تشكيل الفولاذ الصلب. تم استخدام منهجية تصميم التجارب لدراسة تأثير مختلف معلمات القطع ، بما في ذلك المادة والطلاء وهندسة الأداة (المسح والتقليدي) ، بالإضافة إلى شروط القطع مثل سرعة القطع والتقدم وعمق المرور وشعاع حافة الأداة. الهدف هو توفير أدوات تمكن من اختيار شروط القطع بطريقة ذكية من خلال عدد كافٍ من التجارب لتحسين اهتراء الأداة وجهود القطع والنسيج السطحي.

### كلمات البحث:

تصميم التجارب والتحسين المتقدم ؛ هدف واحد ؛ هدف متعدد ؛ تحول صعب ؛ هندسة الأداة ؛ طلاء الأدوات

## **Abstract**

Machining hard materials is a demanding process that requires specialized skills and advanced technology to achieve high precision and superior quality parts. The difficulty of machining hard materials lies in their hardness, heat resistance, wear resistance, and the complexity of the parameters involved in the process. Conventional modeling and optimization methods are no longer sufficient to achieve optimal performance. In this case, it is necessary to develop and apply advanced modeling and optimization techniques based on artificial intelligence algorithms. These techniques are considered indispensable tools for the continuous improvement of the quality of machined parts while reducing production costs. In this context, the doctoral work presented aims to develop mathematical models to predict the hard material turning process and optimize cutting conditions both in mono-objective and multi-objective ways. These models are created using advanced modeling and optimization techniques based on artificial intelligence algorithms to achieve optimal performance in hard steel turning. To do this, an experimental study was conducted to investigate the impact of various cutting parameters on the machining performance indicators of hard steels. The methodology of experimental plans was used to study the influence of various cutting parameters, including material, coating, tool geometry (Wiper and conventional), as well as cutting conditions such as cutting speed, feed, depth of cut, and tool nose radius. The goal is to provide tools for intelligently selecting cutting conditions from a sufficient number of experiments to optimize tool wear, cutting forces, and surface roughness.

**Keywords:** Advanced Modeling and Optimization; Mono-objective; Multi-objective; Hard turning; Tool geometry; Coating of tools.

## Résumé

L'usinage de matériaux durs est un processus exigeant qui requiert des compétences spécialisées ainsi qu'une technologie de pointe pour obtenir des pièces de haute précision et de qualité supérieure. La difficulté d'usiner des matériaux durs réside dans leur dureté, leur résistance à la chaleur et à l'usure, ainsi que dans la multiplicité des paramètres impliqués dans le processus. Les méthodes conventionnelles de modélisation et d'optimisation ne sont plus suffisantes pour atteindre une performance optimale. Dans ce cas, il est nécessaire de développer et d'appliquer des techniques de modélisation et d'optimisation avancées, fondées sur des algorithmes d'intelligence artificielle. Ces techniques sont considérées comme des outils incontournables pour l'amélioration continue de la qualité des pièces usinées tout en réduisant les coûts de production. Dans ce contexte le travail doctoral présenté a pour objectif de développer des modèles mathématiques pour prédire le processus de tournage de matériaux durs et optimiser les conditions de coupe à la fois de manière mono-objective et multi-objective. Ces modèles ont été créés en utilisant des techniques de modélisation et d'optimisation avancées basées sur des algorithmes d'intelligence artificielle pour obtenir des performances optimales en matière de tournage d'aciers durs. Pour ce faire, une étude expérimentale a été menée pour étudier l'impact des différents paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage des aciers durs. La méthodologie des plans d'expériences a été utilisée pour étudier l'influence des différents paramètres de coupe, notamment le matériau, le revêtement, la géométrie de l'outil (Wiper et conventionnel), ainsi que les conditions de coupe telles que la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe et le rayon du bec de l'outil. L'objectif est de fournir des outils permettant de choisir les conditions de coupe de manière intelligente à partir d'un nombre suffisant d'expériences pour optimiser l'usure de l'outil, les efforts de coupe et la rugosité de surface.

**Mots clés** : Modélisation et Optimisation avancées ; Mono-objective ; Multi-objective ; Tournage dur ; Géométrie de l'outil ; Revêtement des outils.

## Index des figures

### CHAPITRE I ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

<b>Figure I.1:</b> Récapitulatif des paramètres d'entrée et des critères d'évaluation de l'usinabilité [1] ....	2 -
<b>Figure I.2:</b> Tournage des pièces dures.....	3 -
<b>Figure I.3 :</b> Angles caractéristiques de coupes.....	6 -
<b>Figure I.4 :</b> Représentation de la pointe de l'outil (plan et angle en main sur un outil de chariotage)-	6 -
<b>Figure I.5 :</b> L'application de la géométrie de l'insert wiper sur la texture de surface résultante lors du tournage de finition.....	7 -
<b>Figure I.6:</b> Revêtement en PVD et CVD d'une plaquette de coupe.....	10 -
<b>Figure I.7:</b> Les différentes zones de déformation lors de la formation d'un copeau [9].....	10 -
<b>Figure I.8:</b> Copeaux de types (a) continu et (b) discontinu [1] .....	11 -
<b>Figure I.9:</b> Exemples de couches blanches obtenues en usinage dur (100Cr6/55HRC). (a) couche blanche observée au niveau de la surface usinée et (b) couche blanche observée sur un copeau [9].....	12 -
<b>Figure I.10:</b> Mécanismes d'usure en fonction de la température [12].....	13 -
<b>Figure I.11:</b> Paramètres d'usure selon la norme ISO 3685.....	14 -
<b>Figure I.12:</b> Principaux défauts macro et micro- géométriques de surface.....	16 -
<b>Figure I.13:</b> Représentation d'un profil 2D mesuré .....	17 -
<b>Figure I.14:</b> Composantes des efforts de coupe .....	19 -
<b>Figure I.15:</b> Géométrie du modèle de (Merchant, 1945) [20].....	21 -
<b>Figure I.16:</b> Simulation par éléments finis de la coupe orthogonale [20]. .....	22 -
<b>Figure I.17:</b> Différentes techniques de modélisation empirique .....	23 -
<b>Figure I.18:</b> Procédure de méthodologie de surface de réponse .....	24 -
<b>Figure I.19:</b> Structure neurone biologique et modélisation simplifiée d'un neurone Artificiel.....	25 -
<b>Figure I.20:</b> Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou [29]. .....	26 -
<b>Figure I.21:</b> L'architecture de l'ANFIS [32].....	27 -
<b>Figure I.22:</b> $\varepsilon$ - zones de précision pour SVR linéaire [35].....	28 -
<b>Figure I.23:</b> Méthodes d'optimisation .....	29 -
<b>Figure I.24:</b> L'organigramme du processus d'algorithme génétique [40].....	32 -
<b>Figure I.25:</b> (a) Schéma de banc de poissons, (b) Essaim d'oiseaux troupeau ciel noir.....	33 -
<b>Figure I.26:</b> Déplacement d'une particule [44]. .....	34 -
<b>Figure I.27:</b> Principe de fonctionnement de l'algorithme NSGA-II [45].....	34 -
<b>Figure I.28:</b> Procédure de l'algorithme de tri génétique non dominé (NSGA-II).....	35 -
<b>Figure I.29:</b> Évaluation des inserts avec (a) Wiper et (b) géométrie conventionnelle [60].....	37 -
<b>Figure I.30:</b> Comparaison entre les outils de géométries Wiper (CC6050WH) et géométrie conventionnelle (CC6050) pour la rugosité de surface Ra [62]. .....	38 -
<b>Figure I.31:</b> (a) Image BSE d'un insert en céramique wiper montrant deux types de couche de transfert sur la face du râteau. 1 - masse compacte, 2 - patch dispersé. (b) Image optique de la face de râteau montrant la configuration wiper constituée de la partie de lissage avec un rayon $r_{bo}$ entre les coins avec des rayons $r_{e1}$ et $r_{e2}$ [63]. .....	38 -
<b>Figure I.32:</b> Image ESB du flanc (a) avec spectre EDS au point 1 [63]. .....	39 -
<b>Figure I.33:</b> (a), Évolution de l'usure des flancs CBN (VB) en fonction du temps de coupe et de l a vitesse. (b), Durée de vie de l'outil CBN à différentes vitesses de coupe [64]. .....	39 -
<b>Figure I.34:</b> $V_c = 150$ m / min, $f = 0,11$ mm / tr (a) et (b), formation d'usure du cratère dans l'outil de coupe en céramique mixte revêtu de TiN et non revêtue respectivement (CL: longueur de coupe) [65]. .....	40 -
<b>Figure I.35:</b> Schéma de la méthodologie proposée suivi sur la procédure expérimentale, $v = 50$ m / min, $f = 0,30$ tr / min, $d = 1$ mm [69]. .....	41 -
<b>Figure I.36:</b> Topographie de la surface de la lame de coupe après tournage avec l'utilisation de la méthode MQCL + EP / AW pour $E = 26,4$ g / h: a) pointe d'outil T1 - P = 5,8 l/min	

et $l = 0,3$ m; b) Pointe d'outil T2 - $P = 2,4$ l / min et $l = 0,2$ m [71].....	42 -
<b>Figure I.37:</b> Quatre étapes de formation de copeaux dans l'usinage de l'acier trempé [74]. .....	43 -
<b>Figure I.38:</b> Section de copeaux formée à la vitesse de coupe de 180 m/min, vitesse d'avance 0,2 mm/tr, profondeur de coupe 1,5 mm: a) nouvelle plaquette d'outil, b) plaquette d'outil usée [77]. .....	44 -
<b>Figure I.39:</b> Surface des copeaux libres obtenue avec des plaquettes de coupe neuf (a , b) et usé (c , d) à un grossissement 50x et 1000x sur SEM respectivement [77]. .....	44 -
<b>Figure I.40:</b> Topographie 3D et profils de surface 2D obtenu après tournage oblique, (a) C45, (b) 41Cr4, (c) X6CrNiTi18-10, (d) EN-GJS 500-7 [82]. .....	46 -

---

## CHAPITRE II

### APPROCHE EXPERIMENTALES

---

<b>Figure II.1:</b> L'environnement du système.....	58 -
<b>Figure II.2:</b> Domaine de variation du « facteur ».....	61 -
<b>Figure II.3:</b> (a) Espace expérimental à deux dimensions définies par deux facteurs. (b) Les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux. (c) les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur. ....	61 -
<b>Figure II.4:</b> Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse.-	62 -
<b>Figure II.5:</b> Eprouvettes en acier X38CrMoV5-1 utilisées. ....	75 -
<b>Figure II.6:</b> Four à chambre électrique pour le traitement thermique des échantillons. ....	76 -
<b>Figure II.7:</b> Types de plaquettes de coupes utilisées.....	77 -
<b>Figure II.8:</b> Portes outils utilisées .....	78 -
<b>Figure II.9:</b> Tour parallèle modèle SN 40C .....	79 -
<b>Figure II.10:</b> Dimensions du dynamomètre type « 9257 B » avec porte-outil type « 9403 ».....	80 -
<b>Figure II.11:</b> Principe de fonctionnement du dynamomètre .....	81 -
<b>Figure II.12:</b> Mesure de rugosité avec un rugosimètre 2D .....	81 -
<b>Figure II.13:</b> Station de topographie de surface sans contact micrométrique « AltiSurf 500 ».....	82 -
<b>Figure II.14:</b> Machine pour la mesure d'usure (machine Visual 250).....	83 -
<b>Figure II.15:</b> Microscope Numérique : KEYENCE VHX-6000.....	84 -
<b>Figure II.16:</b> Microscope à balayage électronique de type «QUANTA FEG 250».....	85 -
<b>Figure II.17:</b> Appareil de mesure optique 3D : Infinite Focus G5 plus .....	87 -
<b>Figure II.18:</b> Mesurer l'usure de la plaquette en 3D avec la technologie d'infinite Focus .....	88 -

## CHAPITRE III

### ETUDE DE L'IMPACT DU REVETEMENT DE L'OUTIL SUR LA COUPE D'UN ACIER DUR

<b>Figure III.1 :</b> Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur la rugosité Ra pour les deux plaquettes de coupe testées (revêtue et non revêtue).....	96 -
<b>Figure III.2:</b> Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur la rugosité Rt pour les deux plaquettes de coupe testées (revêtue et non revêtue).....	97 -
<b>Figure III.3 :</b> Evolution de la rugosité Ra en fonction de $V_c$ , $r$ , $f$ et $a_p$ pour les deux plaquettes de coupe testées (revêtue et non revêtue) .....	99 -
<b>Figure III.4:</b> Evolution de la rugosité Rt en fonction de $V_c$ , $r$ , $f$ et $a_p$ pour les deux plaquettes de coupe testées.....	100 -
<b>Figure III.5 :</b> Courbes des valeurs de comparaison entre les critères de la rugosité pour les deux plaquettes testées .....	101 -
<b>Figure III.6 :</b> Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur l'effort tangentiel pour les deux plaquettes de coupe testées.....	103 -
<b>Figure III.7:</b> Evolution de l'effort tangentiel en fonction de $V_c$ , $r$ , $f$ et $a_p$ pour les deux plaquettes de coupe testées .....	104 -
<b>Figure III.8:</b> Courbes des valeurs de comparaison entre les composantes des efforts de coupe pour les deux plaquettes testées.....	105 -
<b>Figure III.9:</b> Paramètres d'amplitude (ISO 4287) et profils de surface 2D réalisés en tournage	

	dur à sec avec les deux plaquettes de coupe testées à $r = 0.8$ mm et 1.2mm.....	107 -
<b>Figure III.10:</b>	Analyse de l'aire et de la profondeur des creux et des crêtes des profils de surface 2D réalisés en tournage dur à sec avec les deux plaquettes de coupe testées à $r = 0.8$ mm et 1.2mm .....	108 -
<b>Figure III.11:</b>	Paramètres (ISO 25178) et topographie 3D de surface réalisés en tournage dur à sec avec les deux plaquettes de coupe testées à $r = 0.8$ mm et 1.2mm.....	110 -
<b>Figure III.12:</b>	Représentation dans le plan XY de la topographie de surface et de la courbe Abbott-Firestone réalisés avec les deux plaquettes de coupe testées à $r = 0.8$ mm et 1.2mm.....	111 -
<b>Figure III.13:</b>	Paramètres fonctionnels « Sk » et courbe d'Abbott-Firestone pour les surfaces réalisées avec les deux plaquettes de coupe testées à $r = 0.8$ mm et 1.2mm. ....	113 -
<b>Figure III.14:</b>	Paramètres volumiques des surface réalisées avec les deux plaquettes de coupe testées à $r = 0.8$ mm et 1.2mm.....	114 -
<b>Figure III.15:</b>	Evolution de l'usure des plaquettes de coupe testées en fonction du temps de coupe à différents rayons de bec .....	116 -
<b>Figure III.16:</b>	Progression de la durée de vie lors du tournage de l'acier X38CrMoV5-1 avec des plaquettes de coupe revêtues et non revêtues à différents rayons de nez (0,8 et 1,2), pour [VB]=0,3mm.....	116 -
<b>Figure III.17:</b>	Micrographies et images au MEB de l'usure en dépouille VB des plaquettes revêtus et non revêtus à $V_c=150$ m/min, $f=0,08$ mm/tour et $a_p=0,30$ mm pour $r=1,2$ min. ....	118
<b>Figure III.18:</b>	Morphologie de l'usure en dépouille VB et en cratère par MEB. (a) Plaquette non revêtue ; (b) plaquette revêtue avec un rayon de bec de $r=1.2$ mm. ....	119 -
<b>Figure III.19:</b>	Influence du temps d'usinage sur la rugosité moyenne arithmétique $R_a$ , à différents rayons de bec des plaquettes de coupe testées pour $V_c = 150$ m / min, $f = 0,08$ mm et $a_p = 0,30$ mm.....	121 -
<b>Figure III.20:</b>	Influence du temps d'usinage sur la rugosité totale $R_t$ , à différents rayons de bec des plaquettes de coupe testées pour $V_c = 150$ m / min, $f = 0,08$ mm et $a_p = 0,30$ mm.-	121 -
<b>Figure III.21:</b>	Influence de l'usure des flancs sur $F_c$ , à différents rayons de nez pour $V_c=150$ m/min, $f = 0,08$ mm et $a_p = 0,30$ mm (inserts revêtus et non revêtus) .....	122 -

#### CHAPITRE IV

#### ETUDE DE L'EFFET DE LA GEOMETRIE DE L'OUTIL ET DES CONDITIONS DE COUPE EN TOURNAGE DUR

<b>Figure IV.1 :</b>	Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour les géométries wiper et conventionnelle à $f = 0.14$ mm/rev, $r = 0.8$ mm et $a_p = 0.2$ mm .....	127 -
<b>Figure IV.2 :</b>	Evolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe pour deux céramiques de géométries wiper et conventionnelle à $V_c = 160$ m/min, $f = 0.14$ mm/rev et $r = 0.8$ mm .....	128 -
<b>Figure IV.3 :</b>	Evolution des efforts de coupe en fonction de l'avance pour deux plaquettes de géométries wiper et conventionnelle à $V_c = 160$ m/min, $a_p = 0.2$ mm et $r = 0.8$ mm.....	130 -
<b>Figure IV.4 :</b>	Evolution de la rugosité de surface en fonction de la vitesse de coupe pour deux céramiques de géométries wiper et conventionnelle à $V_c = 160$ m/min, $a_p = 0.2$ mm et $r = 0.8$ mm .....	131 -
<b>Figure IV.5 :</b>	Evolution de la rugosité de surface en fonction de la profondeur de passe pour deux céramiques de géométries wiper et conventionnelle à $V_c = 160$ m/min, $a_p = 0.2$ mm et $r = 0.8$ mm .....	132 -
<b>Figure IV.6 :</b>	Evolution de la rugosité de surface en fonction de la vitesse d'avance pour deux céramiques de géométries wiper et conventionnelle à $V_c = 160$ m/min, $a_p = 0.2$ mm et $r = 0.8$ mm .....	134 -
<b>Figure IV.7 :</b>	Diagramme circulaire des effets des paramètres de coupe sur la rugosité (a) $R_a$ et (b) $R_z$ .....	138 -
<b>Figure IV.8 :</b>	Evolution de la rugosité $R_a$ en fonction de $V_c$ , $r$ , $f$ et $a_p$ pour les deux plaquettes de coupe testées de géométrie wiper et standard .....	139 -
<b>Figure IV.9 :</b>	Evolution de la rugosité $R_z$ en fonction de $V_c$ , $r$ , $f$ et $a_p$ pour les deux plaquettes de coupe .....	

	testées de géométrie wiper et standard .....	140 -
<b>Figure IV.10 :</b>	Courbes des valeurs de comparaison entre les critères de la rugosité (Ra et Rz) pour les deux plaquettes testées .....	141 -
<b>Figure IV.11 :</b>	Diagramme circulaire des effets des paramètres de coupe sur la rugosité (a) Fx, (b) Fy et (c) Fz.....	145 -
<b>Figure IV.12 :</b>	Evolution de l'effort de coupe axial Fx en fonction de Vc, r, f et ap pour les deux plaquettes de coupe testées de géométrie wiper et standard.....	147 -
<b>Figure IV.13 :</b>	Evolution de l'effort de coupe radial Fy en fonction de Vc, r, f et ap pour les deux plaquettes de coupe testées de géométrie wiper et standard.....	148 -
<b>Figure IV.14 :</b>	Evolution de l'effort de coupe tangentiel Fz en fonction de Vc, r, f et ap pour les deux plaquettes de coupe testées de géométrie wiper et standard.....	149 -
<b>Figure IV.15 :</b>	Courbes des valeurs expérimentales et estimées des efforts de coupe .....	150 -
<b>Figure IV.16 :</b>	Paramètres d'amplitude (ISO 4287) et profils de surface 2D réalisés en tournage dur à sec avec les deux plaquettes de coupe testées (conventionnelle et wiper) .....	153 -
<b>Figure IV.17 :</b>	Analyse de l'aire et la profondeur des creux et des crêtes des profils de surface 2D réalisés en tournage dur à sec avec les deux plaquettes de coupe testées (conventionnelle et wiper).....	154 -
<b>Figure IV.18 :</b>	Paramètres (ISO 25178) et topographie 3D de surface réalisés en tournage dur à sec.....	155 -
<b>Figure IV.19 :</b>	Représentation de la courbe Abbott-Firestone réalisée avec les deux plaquettes de coupe testées .....	156 -
<b>Figure IV.20 :</b>	Paramètres fonctionnels « Sk » et courbe d'Abbott-Firestone pour les surfaces réalisées avec les deux plaquettes de coupe testées .....	157 -
<b>Figure IV.21 :</b>	Paramètres volumiques des surfaces réalisées avec les deux plaquettes de coupe testées .....	158 -
<b>Figure IV.22 :</b>	Evolution de l'usure des plaquettes de coupe testées en fonction du temps de coupe	- 159 -
<b>Figure IV.23 :</b>	Progression de la durée de vie lors du tournage de l'acier X38CrMoV5-1 avec des plaquettes de coupe wiper et conventionnelle, pour [VB]=0,3mm .....	161 -
<b>Figure IV.24 :</b>	Micrographies et images de l'évolution de l'usure en dépouille VB et de la forme des copeaux en fonction du temps d'usinage de la plaquette conventionnelle .....	162 -
<b>Figure IV.25 :</b>	Micrographies et images de l'évolution de l'usure en dépouille VB et de la forme des copeaux en fonction du temps d'usinage de la plaquette wiper .....	164 -
<b>Figure IV.26 :</b>	Images de l'usure en dépouille VB et en cratère par un microscope numérique des deux plaquettes de coupe wiper et conventionnelle à la fin de l'usinage.....	166 -
<b>Figure IV.27 :</b>	Morphologie de l'usure en dépouille VB, en cratère et un copeau par MEB de la plaquette de coupe de géométrie Wiper à la fin de l'usinage « T=36.53min » .....	169 -
<b>Figure IV.28 :</b>	Analyse EDS et micrographie au MEB de l'usure en cratère de la plaquette de coupe de géométrie conventionnelle à la fin de l'usinage « T=31.97min » .....	170 -
<b>Figure IV.29 :</b>	Morphologie de l'usure en dépouille VB, en cratère et un copeau par MEB de la plaquette de coupe de géométrie conventionnelle à la fin de l'usinage «T=31.97min».....	171 -
<b>Figure IV.30 :</b>	Analyse EDS et micrographie au MEB de l'usure en cratère de la plaquette de coupe de géométrie conventionnelle à la fin de l'usinage « T=31.97min » .....	172 -
<b>Figure IV.31 :</b>	Influence du temps d'usinage sur des critères de rugosité (a) Ra et (b) Rz, des deux plaquettes de coupe testées pour Vc = 160 m / min, f = 0,08 mm, ap = 0,20 mm et r=1.2mm .....	174 -
<b>Figure IV.32 :</b>	Influence du temps d'usinage sur des efforts de coupe (a) Ra et (b) Rz et (c) Rz, des deux plaquettes de coupe testées pour Vc = 160 m / min, f = 0,08 mm, ap = 0,20 mm et r=0.8mm .....	176 -
<b>Figure IV.33 :</b>	Illustration de la méthodologie utilisée pour identifier le volume d'usure t tridimensionnel.....	179 -
<b>Figure IV.34 :</b>	Topographie 3D des zones d'usure des deux plaquettes de coupe testées (conventionnelle et wiper).....	181 -
<b>Figure IV.35 :</b>	Micro-géométrie d'arête de la plaquette de coupe à géométrie standard avant et après	

**CHAPITRE V**  
**MODELISATION ET OPTIMISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES**  
**D'USINAGE**

---

<b>Figure V.1:</b> Courbes des valeurs de comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (a) Ra, (b) Kc et (c) MRR de la plaquette de coupe non revêtue.....	- 193 -
<b>Figure V.2:</b> Tracés de surface 3D pour les effets d'interaction des paramètres de coupe sur Ra....	- 194 -
<b>Figure V.3:</b> Tracés de surface 3D pour les effets d'interaction des paramètres de coupe sur Kc....	- 195 -
<b>Figure V.4:</b> Tracés de surface 3D pour les effets d'interaction des paramètres de coupe sur MRR-	- 196 -
<b>Figure V.5:</b> Architecture graphique d'un réseau de neurone artificiel.....	- 197 -
<b>Figure V.6:</b> Architecture neurale choisie pour la rugosité de surface Ra.....	- 198 -
<b>Figure V.7:</b> Corrélation entre les données prédites et expérimentales en utilisant les données d'apprentissage, de validation et de test pour Ra.....	- 201 -
<b>Figure V.8:</b> Architecture neurale choisie pour l'effort de coupe spécifique Kc.....	- 202 -
<b>Figure V.9:</b> Corrélation entre les données prédites et expérimentales en utilisant les données d'apprentissage, de validation et de test pour Kc.....	- 203 -
<b>Figure V.10:</b> Architecture neurale choisie pour l'effort de coupe spécifique MRR.....	- 204 -
<b>Figure V.11:</b> Corrélation entre les données prédites et expérimentales en utilisant les données d'apprentissage, de validation et de test pour Kc.....	- 205 -
<b>Figure V.12:</b> Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées par RSM et ANN.....	- 210 -
<b>Figure V.13:</b> Graphiques de bar de désirabilité pour les trois cas d'optimisation.....	- 213 -
<b>Figure V.14:</b> Diagramme d'optimisation de réponses multiples de (Ra, Kc et MRR). .....	- 214 -
<b>Figure V.15:</b> Qualité Relationnelle Grise (GRG).....	- 219 -
<b>Figure V.16:</b> L'organigramme du processus d'algorithme génétique [40]. .....	- 221 -
<b>Figure V.17:</b> Graphe 3D de front de Pareto des trois fonctions objectifs (minimiser Ra et Kc et maximiser MRR).....	- 225 -
<b>Figure V.18:</b> Graphe de front de Pareto des trois fonctions objectifs (minimiser Ra et Kc et maximiser MRR).....	- 226 -
<b>Figure V.19:</b> Principe de fonctionnement de l'algorithme NSGA-II [45] .....	- 227 -
<b>Figure V.20:</b> Procédure de l'algorithme de tri génétique non dominé (NSGA-II).....	- 228 -
<b>Figure V.21:</b> Graphe 3D de front non dominé des trois fonctions objectifs (minimiser Ra et Kc et maximiser MRR) pour différentes représentations.....	- 229 -
<b>Figure V.22:</b> Graphes de front non dominé des trois fonctions objectifs (minimiser Ra et Kc et maximiser MRR) pour différentes représentations.....	- 230 -

---

## Index des tableaux

---

### CHAPITRE I ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

---

### CHAPITRE II APPROCHE EXPERIMENTALE

---

<b>Tableau II.1:</b> Matrice d'expérience- plan à un seul facteur à la fois (méthode unifactorielle).....	- 59 -
<b>Tableau II.2:</b> Conditions de coupe pour les essais d'effort de coupe et de rugosité des plaquettes de coupes revêtues et non revêtues (plan de Taguchi L36).....	- 67 -
<b>Tableau II.3:</b> Conditions de coupe pour les essais d'usure des plaquettes de coupes revêtues et non revêtues.....	- 67 -
<b>Tableau II.4:</b> Conditions de coupe pour les essais d'effort de coupe et de rugosité des plaquettes de géométrie wiper et conventionnelle (plan de Taguchi L54).....	- 67 -
<b>Tableau II.5:</b> Conditions de coupe pour les essais d'usure des plaquettes de géométrie wiper et conventionnelle.....	- 67 -
<b>Tableau II.6:</b> Paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 36 essais.....	- 68 -
<b>Tableau II.7:</b> Matrice de planification pour un plan de 36 essais .....	- 68 -
<b>Tableau II.8:</b> Paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 54 essais.....	- 69 -
<b>Tableau II.9:</b> Matrice de planification pour un plan de 54 essais .....	- 69 -
<b>Tableau II.10:</b> Composition chimique de l'acier X38CrMoV5-1 .....	- 74 -
<b>Tableau II.11:</b> Propriétés mécaniques, thermiques et physiques de l'acier X38CrMoV5-1 .....	- 74 -
<b>Tableau II.12:</b> Équivalence d'X38CrMoV5-1 en fonction des normes et des pays .....	- 75 -
<b>Tableau II.13:</b> Conditions de traitement thermique.....	- 76 -
<b>Tableau II.14:</b> Informations relatives aux plaquettes utilisées .....	- 77 -
<b>Tableau II.15:</b> Caractéristiques des portes plaquettes utilisées.....	- 78 -

### CHAPITRE III

#### ETUDE DE L'IMPACT DU REVETEMENT DE L'OUTIL SUR LA COUPE D'UN ACIER DUR

---

<b>Tableau III.1:</b> Valeurs expérimentales de Ra, Rt et Fz, pour les deux types de plaquettes de coupe-	93 -
<b>Tableau III. 2:</b> Analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité Ra pour les deux plaquettes de coupe testées (revêtue et non revêtue).....	- 94 -
<b>Tableau III.3:</b> Analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité Rt pour les deux plaquettes de coupe testées (revêtue et non revêtue).....	- 95 -
<b>Tableau III.4:</b> Analyse de la variance (ANOVA) de l'effort tangentiel pour les deux plaquettes de céramique testées .....	- 102 -

### CHAPITRE IV

#### ETUDE DE L'EFFET DE LA GEOMETRIE DE L'OUTIL ET DES CONDITIONS DE COUPE EN TOURNAGE DUR

---

<b>Tableau IV.1:</b> Matrice d'expérience unifactorielle : résultats de l'effet de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe pour les deux géométries wiper et conventionnelle .....	- 126 -
<b>Tableau IV.2:</b> Matrice d'expérience unifactorielle : résultats de l'effet de la profondeur de passe sur les efforts de coupe pour les deux géométries wiper et conventionnelle .....	- 128 -
<b>Tableau IV.3:</b> Matrice d'expérience unifactorielle : résultats de l'effet de l'avance sur les efforts de coupe pour les deux géométries wiper et conventionnelle .....	- 129 -
<b>Tableau IV.4:</b> Matrice d'expérience unifactorielle : résultats de l'effet de la vitesse de coupe sur les critères de rugosité pour les deux géométries wiper et conventionnelle .....	- 131 -
<b>Tableau IV.5:</b> Matrice d'expérience unifactorielle : résultats de l'effet de la profondeur de passe sur les critères de rugosité pour les deux géométries wiper et conventionnelle .....	- 132 -
<b>Tableau IV.6:</b> Matrice d'expérience unifactorielle : résultats de l'effet de l'avance sur les critères de rugosité pour les deux géométries wiper et conventionnelle.....	- 133 -

<b>Tableau IV.7:</b> Valeurs expérimentales de Ra, Rz, Fx, Fy et Fz, pour les deux types de plaquettes de coupe .....	- 135 -
<b>Tableau IV. 8:</b> Analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité Ra .....	- 136 -
<b>Tableau IV. 9:</b> Analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité Rz .....	- 137 -
<b>Tableau IV. 10:</b> Analyse de la variance (ANOVA) de l'effort axial Fx .....	- 142 -
<b>Tableau IV. 11:</b> Analyse de la variance (ANOVA) de l'effort radial Fy .....	- 143 -
<b>Tableau IV. 12:</b> Analyse de la variance (ANOVA) de l'effort tangentiel Fz .....	- 144 -
<b>Tableau V.13 :</b> Paramètres d'usure tridimensionnels (3D).....	- 178 -
<b>Tableau 14 :</b> Paramètres statistiques extraits de ce processus avec le logiciel « MEASURE SUITE » des deux plaquettes de coupe testées (conventionnelle et wiper) .....	- 181 -
<b>Tableau 15 :</b> Paramètres 3D d'usure des deux plaquettes de coupe testées (conventionnelle et wiper) .-	182 -

---

**CHAPITRE V**  
**MODELISATION ET OPTIMISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES**  
**D'USINAGE**

---

<b>Tableau V.1 :</b> Paramètres d'usinage avec la conception expérimentale et leurs résultats (Ra, Kc et MRR).....	- 188 -
<b>Tableau V.2 :</b> Analyse de la variance (ANOVA) de la force de coupe spécifique (Kc) de la plaquette en céramique non revêtues.....	- 190 -
<b>Tableau V.3 :</b> Analyse de la variance (ANOVA) du taux d'enlèvement de matière de la plaquette de coupe en céramique non revêtue. ....	- 191 -
<b>Tableau V.4 :</b> Conditions de la modélisation de l'effort de coupe par la méthode (ANN).....	- 200 -
<b>Tableau V.5:</b> Conditions de la modélisation de l'effort de coupe spécifique par la méthode (ANN)-	202 -
<b>Tableau V.6:</b> Conditions de la modélisation de l'effort de coupe spécifique par la méthode (ANN)-	205 -
<b>Tableau V.7 :</b> Comparaison entre les résultats mesurés et prédits par RSM et ANN pour la rugosité de surface Ra .....	- 206 -
<b>Tableau V.8 :</b> Comparaison entre les résultats mesurés et prédits par RSM et ANN pour l'effort de coupe spécifique Kc.....	- 207 -
<b>Tableau V.9 :</b> Comparaison entre les résultats mesurés et prédits par RSM et ANN pour le taux d'enlèvement de matière MRR.....	- 207 -
<b>Tableau V.10 :</b> Fonction d'erreur et ses équations.....	- 209 -
<b>Tableau V.11 :</b> Performances des modélisations RSM et ANN. ....	- 209 -
<b>Tableau V.12 :</b> Conditions d'optimisation.....	- 213 -
<b>Tableau V.13 :</b> Résultats d'optimisation par DF .....	- 214 -
<b>Tableau V.14 :</b> Valeurs normalisées pour les résultats expérimentaux (Ra, Kc et MRR) (génération relationnelle grise).....	- 216 -
<b>Tableau V.15 :</b> Évaluation des coefficients relationnels $\theta_i$ et Gray $\xi_i(k)$ avec $\alpha = 0,5$ pour chacune des réponses.....	- 217 -
<b>Tableau V.16 :</b> Qualité Grise GRG et son ordre. ....	- 218 -
<b>Tableau V.17 :</b> Quelques régimes optimaux obtenues par GA avec le même degré d'importance entre les trois réponses Ra, Kc et MRR.....	- 225 -

---

## Nomenclature

<b>Vc</b>	Vitesse de coupe (m/min).
<b>ap</b>	Profondeur de passe (mm).
<b>f</b>	Avance par tour (mm/tr).
<b>r<sub>c</sub></b>	Rayon de bec de l'outil (mm).
<b>F<sub>x</sub></b>	Effort de coupe axial (N).
<b>F<sub>y</sub></b>	Effort de coupe radial (N).
<b>F<sub>z</sub></b>	Effort de coupe tangentiel (N).
<b>K<sub>c</sub></b>	Pression (effort spécifique) de coupe (N/mm <sup>2</sup> ).
<b>R<sub>a</sub></b>	Rugosité moyenne arithmétique (μm).
<b>R<sub>t</sub></b>	Rugosité totale (μm).
<b>R<sub>z</sub></b>	Profondeur moyenne de la rugosité (μm).
<b>VB</b>	Usure en dépouille (mm).
<b>VN</b>	Usure en entaille
<b>ANOVA</b>	Analyse de variance.
<b>MSR</b>	Méthodologie de surface de réponse.
<b>ANN</b>	Réseaux de neurones artificiels
<b>GRA</b>	Analyse Relationnelle Grise
<b>FL</b>	Logique Floue
<b>ANFIS</b>	Méthode hybride neuro-flou de prédiction
<b>SVM / SVR</b>	Méthode de Machine à vecteurs de support
<b>GA</b>	Algorithmes Génétiques
<b>PSO</b>	Optimisation des essaims de particules
<b>NSGA-II</b>	Algorithme de tri génétique non dominé
<b>HRC</b>	Dureté Rockwell
<b>α</b>	Angle de dépouille principal (degré).
<b>γ</b>	Angle d'attaque (degré).
<b>λ</b>	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante (degré).
<b>χ<sub>r</sub></b>	Angle de direction principal (degré).
<b>G<sub>p</sub></b>	Géométrie des plaquettes de coupe
<b>DF</b>	Degrée de liberté
<b>MC</b>	Moyenne des carrés.
<b>Mr<sub>1</sub>, Mr<sub>1</sub></b>	Taux de longueur portante
<b>Prob.</b>	Probabilité
<b>R<sup>2</sup></b>	Coefficient de détermination (%)
<b>Adj R<sup>2</sup></b>	R <sup>2</sup> ajusté
<b>Pred R<sup>2</sup></b>	R <sup>2</sup> prédit
<b>SS</b>	Somme des carrés
<b>MS</b>	Moyenne des carrés
<b>F</b>	Valeur de Fisher
<b>P</b>	Probabilité d'obtenir du résultat par hasard
<b>DL</b>	Degrés de libertés
<b>Con%</b>	Pourcentage de contribution [%]
<b>TD</b>	Tournage dur
<b>TTH</b>	Traitement thermique
<b>MSR</b>	Méthodologie de surface de réponse
<b>R<sub>k</sub></b>	Core Roughness depth (μm)
<b>R<sub>pk</sub></b>	Profondeur réduite des pics (μm)
<b>R<sub>vk</sub></b>	Profondeur réduite des vallées (μm)
<b>S<sub>k</sub></b>	Profondeur de rugosité centrale (μm)
<b>S<sub>pk</sub></b>	Hauteur de crête réduite (μm)
<b>S<sub>vk</sub></b>	Hauteur de vallée éliminée (μm)
<b>V<sub>mc</sub></b>	Volume matériel central (ml/m <sup>2</sup> )
<b>V<sub>mp</sub></b>	Volume matériel de crête (ml/m <sup>2</sup> )
<b>V<sub>vc</sub></b>	Volume vide central
<b>V<sub>vv</sub></b>	Volume vide de vallée

# TABLE DES MATIÈRES

Dédicace	III
Remerciements	IV
ملخص	V
Abstract	VI
Résumé	VII
Index des figures	IX
Index des tableaux	XIV
Nomenclature	XVI
Introduction générale	XXII

---

## CHAPITRE I ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

---

I. 1. Introduction.....	- 1 -
I. 2. Usinage des matériaux durs .....	- 1 -
I. 2. 1. Définition de l'usinage des matériaux durs .....	- 1 -
I. 2. 2. Usinabilité des matériaux durs.....	- 1 -
I. 2. 3. Présentation du procédé d'usinage étudié – le tournage dur.....	- 3 -
I. 2. 3. 1. Définition du tournage dur.....	- 3 -
I. 2. 3. 2. Avantages et limitations du tournage dur .....	- 4 -
I. 2. 4. Outils de coupe utilisés en tournage dur.....	- 5 -
I. 2. 4. 1. Géométrie des outils de tournage.....	- 5 -
I. 2. 4. 1. 1 Caractéristiques géométriques de la pointe d'outil.....	- 5 -
a) Angles caractéristiques de coupe .....	- 5 -
b).Rayon de bec de l'outil.....	- 6 -
I. 2. 4. 1. 2 Technologie WIPER.....	- 6 -
I. 2. 4. 2. Matériaux des outils de coupe utilisés en tournage dur .....	- 7 -
I. 2. 4. 2. 1 Carbure cimenté.....	- 8 -
I. 2. 4. 2. 2 Cermets.....	- 8 -
I. 2. 4. 2. 3 Céramiques .....	- 8 -
I. 2. 4. 2. 4 Nitrure de bore cubique .....	- 9 -
I. 2. 4. 2. 5 Diamant polycristallin .....	- 9 -
I. 2. 4. 3. Les revêtements .....	- 9 -
I. 2. 5. Théorie de la formation des copeaux en usinage dur.....	- 10 -
I. 2. 6. Usure de l'outil de coupe.....	- 12 -
I. 2. 6. 1. Principaux mécanismes d'usure des outils de coupe.....	- 12 -
I. 2. 6. 1. 1 Mécanisme d'usure mécanique.....	- 13 -
a). Usure par abrasion .....	- 13 -
b). Usure par adhérence.....	- 13 -
c). Usure par déformation plastique (Fatigue) .....	- 13 -
I. 2. 6. 1. 2 Mécanisme d'usure physico -chimique .....	- 13 -
a). Usure par diffusion.....	- 13 -
b). Usure par oxydation.....	- 14 -
I. 2. 6. 2. Les différentes formes d'usure des outils .....	- 14 -
I. 2. 6. 2. 1 Usure en cratère .....	- 14 -
I. 2. 6. 2. 2 Usure en dépouille .....	- 14 -
I. 2. 6. 2. 3 Usure en entaille .....	- 15 -
I. 2. 6. 2. 4 Usure par déformation plastique.....	- 15 -
I. 2. 6. 2. 5 Usure par écaillage et fissuration d'arête .....	- 15 -
I. 2. 7. Intégrité de surface .....	- 15 -
I. 2. 7. 1. Paramètres de profil (2D) d'état de surface .....	- 16 -
I. 2. 7. 1. 1 Paramètres de profil 2D de la norme « ISO 4287 ».....	- 17 -

---

---

I. 2. 7. 1. 2 « ISO 13565 -2 et 3- » Surface ayant des propriétés différentes selon la hauteur .....	- 18 -
I. 2. 7. 2. Paramètres surfaciques 3D d'état de surface .....	- 18 -
I. 2. 8. Efforts de coupe .....	- 19 -
I. 3. Méthodes d'intelligence artificielle pour la modélisation et l'optimisation.....	- 20 -
I. 3. 1. Méthodes de Modélisations avancées.....	- 20 -
I. 3. 1. 1. Modélisation analytique.....	- 20 -
I. 3. 1. 2. Modélisation numérique .....	- 21 -
I. 3. 1. 3. Modélisation empirique .....	- 22 -
I. 3. 1. 3. 1 Méthodologie de surface de réponse (RSM) .....	- 23 -
I. 3. 1. 3. 2 Les réseaux de neurones artificiels (ANN).....	- 24 -
I. 3. 1. 3. 3 Logique floue (FL) .....	- 25 -
I. 3. 1. 3. 4 La méthode hybride neuro-flou de prédiction « ANFIS » .....	- 26 -
I. 3. 1. 3. 5 La méthode de Machine à vecteurs de support (SVM / SVR).....	- 28 -
I. 3. 2. Méthodes d'optimisations avancées .....	- 29 -
I. 3. 2. 1. Approche basée sur la méthode RMS .....	- 31 -
I. 3. 2. 2. Analyse relationnelle grise (Grey).....	- 31 -
I. 3. 2. 3. Algorithmes Génétiques (GA) .....	- 32 -
I. 3. 2. 4. Optimisation des essaims de particules (PSO) .....	- 33 -
I. 3. 2. 5. Algorithme de tri génétique non dominé (NSGA-II).....	- 34 -
I. 4. Etat de l'art.....	- 35 -
I. 4. 1. Usinage des matériaux durs .....	- 35 -
I. 4. 2. Méthodes de modélisations et d'optimisations avancées appliquées en usinage dur .....	- 46 -
I. 5. Conclusion .....	- 53 -

---

**CHAPITRE II**  
**APPROCHE EXPERIMENTALES**

---

II. 1. Introduction.....	- 56 -
II. 2. Approche expérimentale .....	- 56 -
II. 2. 1. Introduction .....	- 56 -
II. 2. 2. Planification des expériences .....	- 57 -
II. 2. 2. 1. Méthode unifactorielle « Stratégie traditionnelle » .....	- 58 -
II. 2. 2. 2. Méthode multifactorielle « méthode de plan d'expériences ».....	- 59 -
(a) Définitions et concepts de base .....	- 60 -
(b) Les principaux types des plans expérimentaux à plusieurs variables .....	- 63 -
II. 2. 3. Démarche expérimental réalisée.....	- 65 -
II. 2. 3. 1. Présentation de l'étude réalisée et ses objectifs.....	- 65 -
(a) Sélection des variables d'entrée et de sortie .....	- 66 -
(b) Choix du type de plan d'expérience.....	- 67 -
(c) Réalisation des essais .....	- 71 -
(d) Analyse des résultats expérimentales.....	- 71 -
(e) Modélisation des réponses .....	- 72 -
(f) Recherche des paramètres optimaux .....	- 72 -
II. 3. Equipements utilisés .....	- 73 -
II. 3. 1 Matériau à utilisé.....	- 73 -
II. 3. 2. Traitement thermique des éprouvettes.....	- 76 -
II. 3. 3. Plaquettes de coupe .....	- 77 -
II. 3. 4. Porte outil .....	- 78 -
II. 3. 5. Machine-outil .....	- 79 -
II. 3. 6. Instruments de mesures utilisés .....	- 79 -
II. 3. 6. 1. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe .....	- 79 -
II. 3. 6. 2. Equipements utilisés pour la mesure de l'état de surface.....	- 81 -
(a) Mesure des états de surface 2D : méthode à contact.....	- 81 -
(a) Mesure des états de surface 3D : méthode sans contact.....	- 81 -

---

II. 3. 6. 3. Equipements de mesure de l'usure et la forme des copeaux.....	- 83 -
(a) Microscope Visual 250 .....	- 83 -
(b) Microscope Numérique : KEYENCE VHX-6000 .....	- 83 -
(c) Microscope à balayage électronique MEB : QUANTA FEG 250 .....	- 85 -
(d) Appareil de mesure optique 3D : Infinite Focus G5 plus.....	- 87 -
II. 3. 6. 4. Duromètre pour la mesure de la dureté .....	- 89 -
II. 4. Conclusion.....	- 89 -

---

### CHAPITRE III

#### ETUDE DE L'IMPACT DU REVETEMENT DE L'OUTIL SUR LA COUPE D'UN ACIER DUR

---

III. 1. Introduction.....	- 92 -
III. 2. Résultats expérimentaux et discussions .....	- 92 -
III. 2. 1. Analyse et modélisation de la rugosité de surface (Ra et Rt).....	- 94 -
III. 2. 1. 1. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface .....	- 94 -
(a) Facteurs influents (Graphe de Pareto).....	- 96 -
III. 2. 1. 1. Analyse de régression de la rugosité de surface Ra et Rt.....	- 97 -
III. 2. 1. 2. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées.....	- 101 -
III. 2. 2. Analyse et modélisation de l'effort de coupe (Ft).....	- 101 -
III. 2. 2. 1. Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort tangentiel .....	- 101 -
(a) Facteurs influents (Graphe de Pareto).....	- 102 -
III. 2. 2. 2. Analyse de régression de l'effort tangentiel Ft .....	- 103 -
III. 2. 3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées.....	- 105 -
III. 3. Analyse de l'intégrité de la surface .....	- 106 -
III. 3. 1. Paramètres de profil (2D) d'état de surface .....	- 106 -
III. 3. 1. 1. Paramètres d'amplitude de profil 2D .....	- 106 -
III. 3. 2. Paramètres surfaciques 3D d'état de surface .....	- 109 -
III. 3. 2. 1. Paramètres d'amplitude.....	- 109 -
III. 3. 2. 2. Paramètres fonctionnels .....	- 110 -
(a) Paramètres de taux de portance.....	- 111 -
(b) Les paramètres Sk .....	- 113 -
(a) Paramètres de volume .....	- 114 -
III. 4. Analyse de l'usure de l'outil de coupe.....	- 115 -
III. 4. 1. Evolution de l'usure en fonction du temps de coupe .....	- 115 -
III. 4. 2. Evolution de la rugosité de surface en fonction du temps d'usinage .....	- 120 -
III. 4. 3. Évolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage.....	- 122 -
III. 5. Conclusion .....	- 122 -

---

### CHAPITRE IV

#### ETUDE DE L'EFFET DE LA GEOMETRIE DE L'OUTIL ET DES CONDITIONS DE COUPE EN TOURNAGE DUR

---

IV. 1. Introduction.....	- 126 -
IV. 2. Analyse des résultats uni-factorielles.....	- 126 -
IV. 2. 1. Influence des paramètres de coupe sur les efforts de coupe .....	- 126 -
IV. 2. 1. 1. Influence de la vitesse de coupe.....	- 126 -
IV. 2. 1. 2. Influence de la profondeur de passe.....	- 127 -
IV. 2. 1. 3. Influence de l'avance .....	- 129 -
IV. 2. 2. Influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface .....	- 130 -
IV. 2. 2. 1. Influence de la vitesse de coupe.....	- 130 -
IV. 2. 2. 2. Influence de la profondeur de passe.....	- 131 -
IV. 2. 2. 3. Influence de l'avance par tour.....	- 132 -
IV. 3. Analyse et discussion des résultats multifactoriels .....	- 134 -
IV. 3. 1. Analyse et modélisation de la rugosité de surface (Ra et Rz).....	- 136 -

---

---

IV. 3. 1. 1. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface.....	- 136 -
IV. 3. 1. 2. Analyse de régression de la rugosité de surface Ra et Rz.....	- 138 -
IV. 3. 1. 3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées .....	- 141 -
IV. 3. 2. Analyse de l'effet des paramètres de coupe sur les efforts de coupe.....	- 142 -
IV. 3. 2. 1. Analyse de la variance (ANOVA) pour les efforts de coupe.....	- 142 -
IV. 3. 2. 2. Analyse de régression pour des efforts de coupe.....	- 145 -
IV. 3. 2. 3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées .....	- 150 -
IV. 4. Analyse de l'intégrité surface .....	- 151 -
IV. 4. 1. Paramètres de profil (2D) d'état de surface .....	- 152 -
IV. 4. 1. 1. Paramètres d'amplitude de profil 2D .....	- 152 -
IV. 4. 2. Paramètres surfaciques 3D d'état de surface .....	- 154 -
IV. 4. 2. 1. Paramètres d'amplitude .....	- 154 -
IV. 4. 2. 2. Paramètres fonctionnels.....	- 156 -
a) Paramètres de taux de portance.....	- 156 -
b) Les paramètres Sk .....	- 157 -
c) Les paramètres de volume.....	- 158 -
IV. 5. Analyse de l'usure de l'outil de coupe.....	- 159 -
IV. 5. 1. Evolution de l'usure en fonction du temps de coupe .....	- 159 -
IV. 5. 2. Evolution de la rugosité de surface en fonction de temps d'usinage .....	- 173 -
IV. 5. 3. Évolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage.....	- 175 -
IV. 5. 4. Analyse tridimensionnelle 3D de l'usure des outils .....	- 176 -
IV. 5. 4. 1 Procédures de numérisation 3D et de post-traitement .....	- 177 -
IV. 6. Conclusion .....	- 184 -

---

**CHAPITRE V**  
**MODELISATION ET OPTIMISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES**  
**D'USINAGE**

---

V. 1.Introduction.....	- 188 -
V. 2.Résultats des expériences.....	- 188 -
V. 1.Modélisation des paramètres technologique d'usinage.....	- 189 -
V. 1. 1. Modélisation par la méthode de surface de réponse (RSM) .....	- 189 -
V. 1. 1. 1 Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface Ra.....	- 189 -
V. 1. 1. 2. Analyse de la variance de la force de coupe spécifique (Kc).....	- 190 -
V. 1. 1. 3. Analyse de variance du taux d'enlèvement de matière (MRR) .....	- 190 -
V. 1. 1. 4. Modélisation mathématique à base de RSM .....	- 191 -
V. 1. 1. 5. Effet des paramètres d'usinage sur les facteurs de réponse de surface.....	- 193 -
(a) La rugosité de surface Ra.....	- 193 -
(b) Force de coupe spécifique (Kc).....	- 194 -
(c) Taux d'enlèvement de matière (MRR).....	- 195 -
V. 1. 2. Modélisation par la méthode des réseaux de neurones artificiel (ANN).....	- 196 -
V. 1. 2. 1. Modélisation mathématique à base d'ANN de Ra .....	- 198 -
(a) Architecture neurale du Ra .....	- 198 -
(b) Modèles mathématiques du Ra .....	- 199 -
V. 1. 2. 2. Modélisation mathématique à base d'ANN de Kc .....	- 201 -
(a) Architecture neurale du Kc .....	- 201 -
(b) Modèles mathématiques du Kc .....	- 202 -
V. 1. 2. 3. Modélisation mathématique à base d'ANN du MRR .....	- 203 -
(a) Architecture neurale du MRR .....	- 203 -
(b) Modèles mathématiques du MRR.....	- 204 -
V. 1. 2. 4. Résultats comparatifs des modèles ANN et RSM.....	- 205 -
V. 2.Optimisation multi-objectif des paramètres d'usinage.....	- 211 -
V. 2. 1. Optimisation MO des paramètres d'usinage par la méthode de fonction de désirabilité... -	211 -
V. 2. 2. Optimisation MO des paramètres d'usinage par la méthode d'Analyse Relationnelle Grise-	215 -

---

---

V. 2. 3. Optimisation MO des paramètres d'usinage par la méthode des Algorithmes Génériques (GA)-	
220 -	
V. 2. 3. 1. Définition et concept de base de GA.....	- 220 -
V. 2. 3. 2. Fonction objective .....	- 223 -
V. 2. 3. 3. Résultats de l'optimisation MO par GA.....	- 224 -
V. 2. 4. Optimisation MO des paramètres d'usinage par la méthode d'Algorithme de tri génétique non dominé (NSGA-II) .....	- 227 -
V. 2. 4. 1 Résultats de l'optimisation MO par NSGAI	- 228 -
V. 2. 5. Conclusion .....	- 231 -

---

# Introduction Générale

---

*« All progress, all success springs from thinking. »*

---

Thomas Edison

*« On donne généralement le nom de découverte à la connaissance d'un fait nouveau ; mais je pense que c'est l'idée qui se rattache au fait découvert qui constitue en réalité la découverte. »*

---

Claude Bernard

Les industries manufacturières d'aujourd'hui sont confrontées à des défis majeurs liés aux besoins en constante évolution, aux cycles de vie des produits plus courts et aux demandes des clients. Dans un marché caractérisé par une concurrence intense, tous les secteurs de la fabrication doivent se préparer à survivre dans un environnement concurrentiel en prenant toutes les mesures nécessaires pour proposer des variétés de produits à des prix abordables et de meilleure qualité, tout en respectant l'environnement. Pour répondre à cette demande, il est essentiel de choisir les paramètres de réglage du processus de fabrication de manière optimale.

Le succès du processus de fabrication repose sur la sélection appropriée des paramètres de processus. Le choix des paramètres de processus optimaux joue un rôle crucial pour garantir la qualité du produit, réduire les coûts de fabrication et augmenter la productivité. Cependant, l'optimisation des processus de fabrication présente souvent des défis majeurs en raison de la nature fortement contrainte et hautement non linéaire des procédures. De plus, les modèles de processus de fabrication peuvent être discontinus, non explicites ou non différenciables analytiquement en ce qui concerne les variables de conception.

La modélisation et l'optimisation des paramètres de processus de fabrication sont généralement des tâches complexes qui exigent une connaissance approfondie du processus de fabrication, des équations empiriques reliant les paramètres technologiques de performance aux paramètres d'entrée contrôlables pour développer des contraintes réalistes, des spécifications des

capacités de la machine, ainsi que la mise au point d'un critère d'optimisation efficace et l'utilisation de techniques d'optimisation mathématiques et numériques appropriées.

La fabrication intelligente est considérée comme la prochaine révolution de l'industrie manufacturière, connue sous le nom d'industrie 4.0. Dans cette approche, les systèmes de fabrication sont optimisés au plus haut niveau pour tirer parti des avantages économiques, de qualité et de temps. L'utilisation de technologies avancées telles que les capteurs, les matériaux intelligents, la planification de la production et des processus, les systèmes en nuage, etc., et leur interaction avec l'homme déterminent le succès d'une unité de fabrication intelligente. En raison de la complexité extrême du processus de fabrication intelligent et du grand nombre de paramètres déterminants, les approches classiques de modélisation et d'optimisation ne sont plus suffisantes. Il est nécessaire de développer et d'utiliser des techniques de modélisation et d'optimisation avancées basées sur des algorithmes d'intelligence artificielle tels que la régression statistique, l'apprentissage automatique, les métaheuristiques, etc., afin d'obtenir les meilleures performances possibles.

Conformément aux exigences de la fabrication intelligente, telles que dans les systèmes de « tournage », les paramètres de coupe, tels que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe, doivent être optimisés. Ces informations peuvent être synchronisées avec la base de données de l'unité de fabrication, permettant ainsi une optimisation en temps réel des facteurs de contrôle en fonction des besoins instantanés. Dans ce domaine spécifique, l'apprentissage des méthodes de modélisation (telles que l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique) peut améliorer la fabrication en fonction des exigences, réduisant ainsi les interventions humaines.

Les procédés de fabrication de pièces mécaniques par enlèvement de matière, tels que le tournage, le fraisage, le perçage, etc., sont largement utilisés dans l'industrie. Ils sont fréquemment employés dans divers secteurs d'activité tels que l'aéronautique et l'automobile. Les pièces produites par ces procédés doivent répondre à des critères de géométrie, de métallurgie et de qualité spécifiques. L'usinage des aciers durs est une technologie récente de mise en forme des pièces mécaniques par enlèvement de matière, qui consiste à usiner des pièces présentant une dureté supérieure à 45 HRC (pièces difficiles à usiner) en utilisant des outils de coupe extra-durs dotés d'arêtes de coupe géométriquement définies. L'usinage dur présente plusieurs avantages par rapport aux méthodes traditionnelles, permettant notamment de remplacer des opérations coûteuses telles que la finition par abrasion, de réduire l'impact environnemental en éliminant la lubrification (usinage à sec) et d'augmenter les taux de matière enlevée jusqu'à quatre fois par rapport à la rectification, tout en consommant trois fois moins d'énergie.

Malgré les progrès réalisés dans ce domaine, notamment grâce à l'utilisation de matériaux d'outils extra-durs, l'usinage dur n'est pas encore largement adopté dans l'industrie. Le coût des plaquettes et le domaine de fonctionnement mal défini pour un couple outil-matière à usiner rendent ce procédé difficilement exploitable. Afin de répondre à ces exigences, plusieurs essais expérimentaux basés sur le choix des conditions de coupe sont souvent nécessaires avant d'obtenir une pièce satisfaisante.

Dans ce contexte global, l'objectif de cette thèse est double :

D'une part, il s'agit de mener une étude expérimentale afin d'analyser l'influence des différents paramètres de coupe sur les indicateurs de performance de l'usinage des aciers durs, en particulier lors de l'opération de tournage dur. L'objectif est de fournir des outils permettant de choisir de manière intelligente les conditions de coupe en utilisant la méthodologie des plans d'expériences, qui consiste à étudier uniquement certains points du domaine expérimental tout en appréhendant le phénomène physique sur l'ensemble du domaine considéré. Un plan d'expérience peut être défini comme une organisation rationnelle d'essais. La méthode des plans d'expériences permet ainsi d'obtenir un maximum d'informations à un coût minimal.

D'autre part, l'objectif est de développer des modèles mathématiques prédictifs du processus de coupe pour optimiser les conditions de coupe. Cela sera réalisé en utilisant des techniques de modélisation et d'optimisation avancées basées sur des algorithmes d'intelligence artificielle tels que la régression statistique, l'apprentissage automatique, les métaheuristiques, etc. L'objectif est d'obtenir les meilleures performances possibles dans le tournage des aciers durs. On rencontre deux types de problèmes d'optimisation. Le premier est un problème d'optimisation mono-objectif, dans lequel on cherche une seule solution optimale. Le deuxième est un problème d'optimisation multi-objectifs, où l'on recherche un ensemble de solutions optimales, également connu sous le nom d'ensemble optimal.

Ainsi, cette thèse vise à combler les lacunes actuelles en fournissant une compréhension approfondie des effets des paramètres de coupe sur les performances d'usinage des aciers durs, ainsi que des outils de modélisation et d'optimisation avancées pour améliorer ces performances. Les résultats obtenus permettront aux industriels de sélectionner de manière intelligente les conditions de coupe et d'optimiser le processus de tournage des aciers durs, en vue d'une meilleure qualité des pièces, de réductions des coûts de fabrication et d'augmentations de la productivité.

Le manuscrit est organisé en cinq chapitres :

Le premier chapitre présente une étude bibliographique approfondie sur l'usinage des matériaux durs de manière générale, ainsi que sur les techniques de modélisation et d'optimisation basées sur l'intelligence artificielle. La première partie du chapitre aborde en détail les concepts fondamentaux de l'usinage des aciers durs, tels que l'usinabilité, le tournage dur, les outils de coupe utilisés et les phénomènes impliqués dans le processus d'usinage, tels que les forces de coupe, l'intégrité de surface, l'usure de l'outil et les mécanismes de formation des copeaux. De plus, les techniques de modélisation (réponse statistique, réseaux de neurones artificiels) et d'optimisation (frontière de Pareto, méthode des nuages gris, algorithme génétique, NSGA II) basées sur l'intelligence artificielle sont décrites. Le chapitre se conclut par une synthèse des travaux de recherche pertinents sur le tournage des aciers durcis et l'utilisation de méthodes avancées de modélisation et d'optimisation.

Le deuxième chapitre expose les équipements et les techniques expérimentales utilisés lors de cette recherche. Après avoir expliqué la méthodologie scientifique adoptée, le chapitre présente en détail les équipements de mesure, la sélection des couples outil-matière, les conditions de

coupe, la méthodologie de planification des expériences et les plans d'expériences utilisés. Toutes les informations nécessaires à la réalisation d'une étude expérimentale de l'usinage des métaux sont fournies.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de l'impact du revêtement des outils de coupe sur différents paramètres technologiques liés au couple outil-matière lors du tournage à sec de l'acier X38CrMoV5-1 traité à 50 HRC. Deux types de plaquettes de coupe, toutes deux en céramique mixte à base d'alumine avec ajout de carbure de titane ( $70\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{TiC}$ ), ont été utilisées. La première plaquette est non revêtue, tandis que la deuxième est revêtue d'une fine couche de nitrure de titane (TiN) déposée par la technique PVD (dépôt physique en phase vapeur). La méthodologie des surfaces de réponse (RSM) a été utilisée pour développer des modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés en utilisant un plan d'expérience incomplet de Taguchi L36 ( $1^2 \times 3^3$ ). Ces modèles permettent d'établir la relation entre les paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$  et  $r$ ) et les paramètres technologiques étudiés (force de coupe et rugosité de surface). L'analyse de la variance (ANOVA) a été utilisée pour déterminer et classer les paramètres de coupe qui influencent les réponses étudiées. L'évolution de l'usure en dépouille ( $V_b$ ) des outils dans le temps ainsi que l'analyse de la topographie des surfaces usinées en 2D et 3D ont également été réalisées.

Ce troisième chapitre constitue une étape essentielle dans la compréhension des effets du revêtement des outils de coupe sur les performances d'usinage des aciers durs et permettra d'optimiser les conditions de coupe pour obtenir des résultats améliorés en termes de force de coupe et de rugosité de surface. Les résultats obtenus fourniront des informations précieuses pour les professionnels de l'industrie qui cherchent à améliorer leurs processus d'usinage et à atteindre une meilleure qualité des pièces, tout en réduisant les coûts de fabrication et en augmentant la productivité.

Le quatrième chapitre est dédié à l'effet de la géométrie de l'outil et des conditions de coupe dans le tournage dur. Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons les résultats de l'analyse des observations expérimentales réalisées pour étudier et caractériser l'influence de la géométrie de l'outil sur l'usinabilité de l'acier X38CrMoV5-1 traité à 50 HRC, en utilisant des plaquettes de coupe en céramique avec des géométries d'outil de forme wiper et conventionnelle. Ces résultats ont été obtenus en utilisant une approche de planification expérimentale utilisant des méthodes unifactorielles et multifactorielles. L'objectif est de définir le domaine de fonctionnement approprié pour le couple outil/matière (plaquettes de céramique de forme wiper CC6050WH et conventionnelle CC6050WG / acier X38CrMoV5-1), qui sont usinées à sec. La méthodologie des surfaces de réponse (RSM) a été utilisée pour développer des modèles mathématiques qui permettent d'exprimer la relation entre les paramètres de coupe et les paramètres technologiques étudiés. L'objectif est de quantifier l'effet de ces facteurs variables sur les réponses étudiées.

La deuxième partie du chapitre expose les résultats de l'étude de la micro-géométrie de l'intégrité de surface par l'analyse de la topographie de surface en 2D et 3D. De plus, les résultats de l'évolution de l'usure des outils en fonction du temps d'usinage sont présentés, mettant en

évidence son impact sur les composantes de l'effort de coupe, la rugosité de surface et la caractérisation de la formation du copeau et de ses différents mécanismes.

La première partie du cinquième chapitre est consacrée à la présentation des modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés, développés à l'aide de techniques de modélisation avancées basées sur des algorithmes d'intelligence artificielle, notamment la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) et les réseaux de neurones artificiels (ANN). Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les paramètres de coupe et les paramètres technologiques d'usinage étudiés. Une étude statistique basée sur l'analyse de la variance (ANOVA) est réalisée sur les résultats obtenus afin d'explorer l'influence des différents paramètres de coupe sur les indicateurs de performance de l'usinage et de déterminer les facteurs et les interactions ayant un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés. À la fin de ce chapitre, une analyse des différentes méthodes de modélisation est réalisée.

La deuxième partie de ce chapitre présente les résultats de l'étude d'optimisation mono et multi-objectif basée sur un plan d'expérience de Taguchi ( $L_{36}$ ) afin de déterminer le régime optimal. Cette étude est réalisée en utilisant différentes méthodes d'optimisation avancées, telles que la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) en utilisant l'approche de la fonction désirabilité (DF), l'analyse relationnelle grise (Grey), la méthode des algorithmes génétiques (GA) et l'algorithme de tri génétique non dominé (NSGA-II). Les valeurs optimales des paramètres de coupe par rapport aux objectifs d'optimisation sont calculées pour chacun des paramètres technologiques d'usinage. À la fin de ce chapitre, une analyse des différentes méthodes d'optimisation est réalisée.

Enfin, le manuscrit se termine par une conclusion générale qui présente une synthèse des résultats obtenus dans ces travaux de recherche, ainsi que les perspectives éventuelles, suivies d'une liste de références bibliographiques et d'annexes.

# Chapitre

# I

## Etude Bibliographique

---

*« Une étude bibliographique rigoureuse est essentielle pour bâtir une recherche solide et crédible. Elle permet de découvrir les idées des autres, de mieux comprendre les lacunes de la recherche et de mettre en contexte les résultats de sa propre étude. »*

---

Jean-Yves Dubois

### Sommaire

---

<b>I. 1.</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>- 1 -</b>
<b>I. 2.</b>	<b>Usinage des matériaux durs .....</b>	<b>- 1 -</b>
I. 2. 1.	Définition de l'usinage des matériaux durs.....	- 1 -
I. 2. 2.	Usinabilité des matériaux durs.....	- 1 -
I. 2. 3.	Présentation du procédé d'usinage étudié – le tournage dur.....	- 3 -
I. 2. 3. 1.	Définition du tournage dur.....	- 3 -
I. 2. 3. 2.	Avantages et limitations du tournage dur .....	- 4 -
I. 2. 4.	Outils de coupe utilisés en tournage dur .....	- 5 -
I. 2. 4. 1.	Géométrie des outils de tournage.....	- 5 -
I. 2. 4. 1. 1	Caractéristiques géométriques de la pointe d'outil .....	- 5 -
a).	Angles caractéristiques de coupe .....	- 5 -
b).	Rayon de bec de l'outil .....	- 6 -
I. 2. 4. 1. 2	Technologie WIPER .....	- 6 -
I. 2. 4. 2.	Matériaux des outils de coupe utilisés en tournage dur .....	- 7 -
I. 2. 4. 2. 1	Carbure cimenté .....	- 8 -
I. 2. 4. 2. 2	Cermets .....	- 8 -
I. 2. 4. 2. 3	Céramiques.....	- 8 -
I. 2. 4. 2. 4	Nitrure de bore cubique.....	- 9 -
I. 2. 4. 2. 5	Diamant polycristallin .....	- 9 -
I. 2. 4. 3.	Les revêtements .....	- 9 -
I. 2. 5.	Théorie de la formation des copeaux en usinage dur.....	- 10 -
I. 2. 6.	Usure de l'outil de coupe .....	- 12 -

---

---

I. 2. 6. 1.	Principaux mécanismes d'usure des outils de coupe .....	- 12 -
I. 2. 6. 1. 1	Mécanisme d'usure mécanique .....	- 13 -
a).	Usure par abrasion .....	- 13 -
b).	Usure par adhérence.....	- 13 -
c).	Usure par déformation plastique (Fatigue) .....	- 13 -
I. 2. 6. 1. 2	Mécanisme d'usure physico -chimique.....	- 13 -
a).	Usure par diffusion .....	- 13 -
b).	Usure par oxydation.....	- 14 -
I. 2. 6. 2.	Les différentes formes d'usure des outils .....	- 14 -
I. 2. 6. 2. 1	Usure en cratère.....	- 14 -
I. 2. 6. 2. 2	Usure en dépouille.....	- 14 -
I. 2. 6. 2. 3	Usure en entaille.....	- 15 -
I. 2. 6. 2. 4	Usure par déformation plastique .....	- 15 -
I. 2. 6. 2. 5	Usure par écaillage et fissuration d'arête.....	- 15 -
I. 2. 7.	Intégrité de surface.....	- 15 -
I. 2. 7. 1.	Paramètres de profil (2D) d'état de surface .....	- 16 -
I. 2. 7. 1. 1	Paramètres de profil 2D de la norme « ISO 4287 » .....	- 17 -
I. 2. 7. 1. 2	« ISO 13565 -2 et 3- » Surface ayant des propriétés différentes selon la hauteur- 18 -	
I. 2. 7. 2.	Paramètres surfaciques 3D d'état de surface .....	- 18 -
I. 2. 8.	Efforts de coupe .....	- 19 -
<b>I. 3.</b>	<b>Méthodes d'intelligence artificielle pour la modélisation et l'optimisation .....</b>	<b>- 20 -</b>
I. 3. 1.	Méthodes de Modélisations avancées .....	- 20 -
I. 3. 1. 1.	Modélisation analytique.....	- 20 -
I. 3. 1. 2.	Modélisation numérique .....	- 21 -
I. 3. 1. 3.	Modélisation empirique .....	- 22 -
I. 3. 1. 3. 1	Méthodologie de surface de réponse (RSM).....	- 23 -
I. 3. 1. 3. 2	Les réseaux de neurones artificiels (ANN) .....	- 24 -
I. 3. 1. 3. 3	Logique floue (FL).....	- 25 -
I. 3. 1. 3. 4	La méthode hybride neuro-flou de prédiction « ANFIS » .....	- 26 -
I. 3. 1. 3. 5	La méthode de Machine à vecteurs de support (SVM / SVR) .....	- 28 -
I. 3. 2.	Méthodes d'optimisations avancées.....	- 29 -
I. 3. 2. 1.	Approche basée sur la méthode RMS .....	- 31 -
I. 3. 2. 2.	Analyse relationnelle grise (Grey) .....	- 31 -
I. 3. 2. 3.	Algorithmes Génétiques (GA) .....	- 32 -
I. 3. 2. 4.	Optimisation des essaims de particules (PSO).....	- 33 -
I. 3. 2. 5.	Algorithme de tri génétique non dominé (NSGA-II).....	- 34 -
<b>I. 4.</b>	<b>Etat de l'art.....</b>	<b>- 35 -</b>
I. 4. 1.	Usinage des matériaux durs .....	- 35 -
I. 4. 2.	Méthodes de modélisations et d'optimisations avancées appliquées en usinage dur -	46 -
<b>I. 5.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>- 53 -</b>

---

## **I. 1. Introduction**

Ce chapitre a pour objet de présenter une étude bibliographique sur l'usinage des matériaux durs en général ainsi que les techniques de modélisation et d'optimisation d'intelligence artificielle. En premier lieu, les concepts de base de la coupe des métaux durs à savoir, le tournage dur avec ses avantages et limitations, l'usinabilité et les performances des outils de coupe appropriés à ce type de procédé sont présentés. Par la suite, l'intégralité de surface, les efforts de coupe et les mécanismes d'usures et de formation de copeaux en tournage dur sont exposés. Également, les techniques de modélisation (RSM et ANN) et d'optimisation (DF, Grey, GA et NSGA II) d'intelligence artificielle sont décrites. Le chapitre se termine par une synthèse des différentes contributions scientifiques relatifs au tournage des aciers durcis et l'utilisation des méthodes de modélisation et d'optimisation avancées en usinage dur.

## **I. 2. Usinage des matériaux durs**

### **I. 2. 1. Définition de l'usinage des matériaux durs**

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

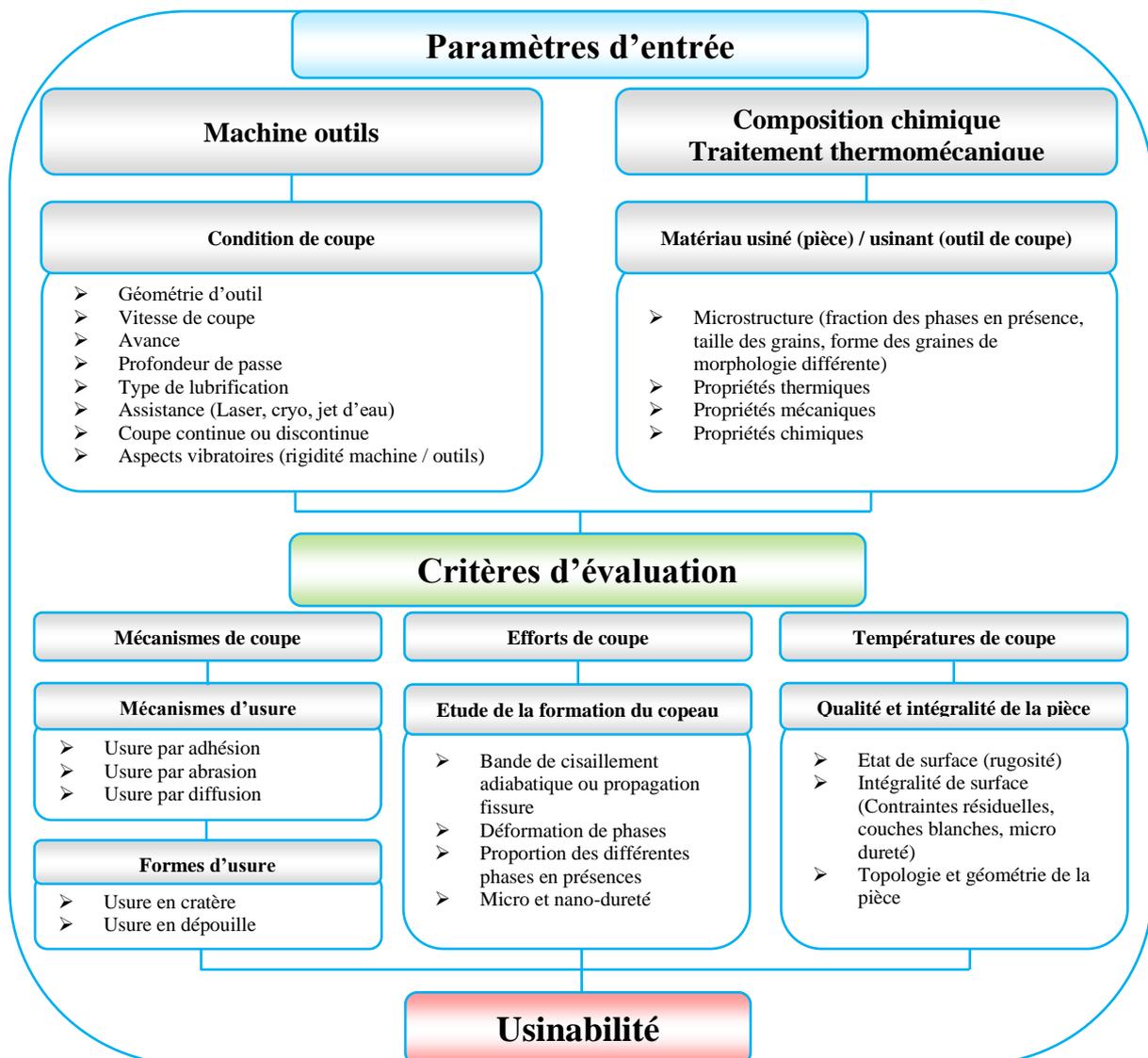
Dans sa définition large, l'usinage dur est l'usinage de pièces d'une dureté supérieure à 45 HRC, bien que le procédé concerne le plus souvent des duretés comprises entre 58 et 68 HRC. Les matériaux utilisés pour les pièces comprennent divers aciers alliés durcis, aciers à outils, aciers de cémentation, superalliages, fers niturés et aciers chromés durs, ainsi que des pièces de métallurgie des poudres traitées thermiquement. Il s'agit principalement d'un procédé de finition ou de semi-finition nécessitant une grande précision des dimensions, de la forme et de la finition de surface.

Depuis son introduction plus large au milieu des années 1980 sous la forme de tournage dur, l'usinage dur a considérablement évolué dans diverses opérations d'usinage telles que le fraisage, l'alésage, le brochage, le rodage, etc. Les développements de machines-outils rigides appropriées, de matériaux pour outils de coupe extra-durs et de conceptions d'outils spéciaux (porte-outils), ainsi que de montages complets, ont rendu la coupe au métal de pièces trempées facilement accessible pour tout atelier d'usinage.

### **I. 2. 2. Usinabilité des matériaux durs**

L'usinabilité n'est pas une propriété du matériau qui peut se définir avec un seul paramètre caractéristique, c'est en fait, un terme complexe qui dépend à la fois des propriétés physique et chimique du matériau, du procédé de fabrication utilisé et des propriétés liées à la coupe et au process. En général, l'usinabilité peut être décrite comme l'aptitude d'un matériau à subir une

mise en forme par enlèvement de matière pour une opération donnée avec relativement peu de puissance, bonne finition et à faible coût. Il n'existe pas de critère universel pour caractériser l'usinabilité. Le besoin industriel se traduit par une notion plus ou moins claire de « facile à usiner ». Les critères pouvant permettre d'évaluer l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'objectif de l'usineur.



**Figure I.1:** Récapitulatif des paramètres d'entrée et des critères d'évaluation de l'usinabilité [1]

L'usinabilité des aciers durs peut se définir en termes d'efforts de coupe, d'énergie dépensée, d'usure ou durée de vie d'outil, de qualité de surface usinée, de fragmentation des copeaux, ou autres. Dans ce sens, un acier bas carbone est plus facile à usiner qu'un acier traité thermiquement. Les aciers faiblement alliés sont généralement considérés comme ayant une meilleure usinabilité que les aciers durs. Le concept de « bonne usinabilité » renvoie généralement à une action de coupe sans problèmes avec une durée de vie d'outil correcte. Le plus souvent, l'évaluation de l'usinabilité d'une matière donnée est faite à partir d'essais et les résultats sont exprimés par rapport à d'autres tests effectués sur d'autres matières dans des conditions comparables. D'autres facteurs tels que la microstructure, la tendance au collage, la machine-outil utilisée, la stabilité, le bruit, la durée de vie d'outil, etc. sont aussi pris en compte.

L'usinabilité peut s'appliquer à un matériau, un couple outil/matière, un système d'usinage complet dans une configuration définie. Les critères d'évaluation de l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et différents paramètres sont à prendre en compte. En effet, on peut représenter l'usinabilité d'un matériau par une fonction de plusieurs variables, comme le montre la **Figure I.1**, l'usinabilité est régie par des paramètres d'entrée. Ces paramètres peuvent être macroscopiques tels que les paramètres de la machine-outil ou bien vu à une échelle plus méso/microscopique tels que les paramètres thermo- mécano-métallurgique des matériaux usinant et usiné. Ces paramètres d'entrée ont des conséquences sur les mécanismes, les efforts et les températures de coupe qui vont eux même agir sur la santé matière de l'outil, de la pièce ainsi que sur la formation du copeau [1].

Il est possible d'évaluer quantitativement l'influence des paramètres d'entrée grâce aux critères d'évaluation cités ci-dessus. L'évaluation peut se faire au niveau de l'outil durant l'usinage avec la mesure des efforts et des températures de coupe mais aussi indirectement avec la mesure de l'usure de l'outil. Elle peut se faire également avec la surveillance de l'intégrité de la pièce, c'est-à-dire l'état de surface (rugosité), intégrité de surface (couches blanches, contraintes résiduelles, micro dureté), la topologie et la géométrie de la pièce finale et également avec la morphologie du copeau (continu ou fractionné).

### I. 2. 3. Présentation du procédé d'usinage étudié – le tournage dur

#### I. 2. 3. 1. Définition du tournage dur

Le procédé d'enlèvement de matière par une opération de tournage sur des aciers traités d'une dureté supérieure à 45HRC est défini comme étant le tournage dur (**Figure I.2**). Ce procédé s'impose comme un concurrent sérieux de la rectification. Il vient compléter, et parfois remplacer, la rectification conventionnelle qui est considérée comme opération très coûteuse. En effet, le tournage dur offre la possibilité de remplacer plusieurs opérations de rectification consécutives par une seule opération de tournage dur. Il permet d'enlever des taux de matière quatre fois supérieures à ceux de la rectification tout en consommant trois fois moins d'énergie.



**Figure I.2:** Tournage des pièces dures

De nombreux composants de la machine sont fabriqués en acier trempé et leur comportement fonctionnel est influencé de manière significative par les processus de finition fins utilisés au cours des dernières étapes de la fabrication. La séquence de fabrication habituelle pour un arbre en acier trempé, par exemple, serait le tournage grossier, le tournage de finition et le

durcissement suivi du meulage de finition. Avec le développement de matériaux pour outils durs modernes (céramique et CBN), un procédé de fabrication alternatif consiste à tourner le matériau dans son état durci (tournage dur ou usinage dur). L'usinage dur a augmenté la flexibilité par rapport à la rectification et a la capacité de fabriquer une géométrie complexe en une seule configuration. Ainsi, pour des applications appropriées, l'usinage dur est une alternative compétitive à la rectification de finition. Un virage difficile présente de nombreux avantages potentiels. Les taux d'enlèvement de matière sont beaucoup plus élevés que ceux de meulage et les temps d'usinage peuvent être considérablement réduits. Il y a une réduction du nombre de machines distinctes requises, ainsi qu'une réduction du temps de production perdu dû aux installations et au transfert entre les postes de travail.

### I. 2. 3. 2. Avantages et limitations du tournage dur

Aujourd'hui, les composants trempés sont largement usinés dans de nombreuses industries différentes. Dans la fabrication moderne, l'usinage dur n'est plus considéré comme l'alternative à toutes les opérations de meulage, bien que de nombreux articles scientifiques de chercheurs universitaires maintiennent toujours cette notion dépassée. Les fabricants recherchent continuellement des moyens de fabriquer leurs pièces à moindre coût, de meilleure qualité, avec des montages rapides, un investissement plus faible et un stock d'outils plus petit tout en éliminant les activités sans valeur ajoutée. La migration du traitement des rectifieuses vers les tours peut satisfaire chacun de ces objectifs.

De nos jours, le tournage dur gagne en importance en tant qu'alternative économique au meulage en raison des améliorations significatives de la rigidité des machines-outils et des matériaux d'outils de coupe avancés. Parmi les avantages et les limitations du tournage dur issus de l'expérience des utilisateurs du processus trouvés dans la littérature [2], [3] et [4] nous citons :

<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Usinage facile des pièces à contour complexe et de très grandes dimensions.</li> <li>▪ Gamme d'usinage plus courte car la phase de rectification est éliminée.</li> <li>▪ L'aptitude à réaliser des opérations différentes avec une seule prise.</li> <li>▪ Le taux d'enlèvement de matière est plus élevé que celui de la rectification.</li> <li>▪ Le tournage dur peut être réalisé sur un tour de tournage conventionnel.</li> <li>▪ Il peut s'appliquer de la petite à la grande série.</li> <li>▪ L'investissement n'est pas lourd.</li> <li>▪ Grace à l'élimination de la lubrification, Les déchets sont recyclables tels que les copeaux.</li> <li>▪ L'élimination des boues de rectification chargées d'hydrocarbures qui sont nocive à la nature.</li> </ul>
<b>Limites</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le cout d'outillage par unité est plus élevé que celui de la rectification [2].</li> <li>▪ Dans certains cas, les opérations de tournage dur ne sont pas réalisables à cause de la géométrie ou la dimension de la pièce qui peut générer le broutement.</li> </ul>

- Dans le cas où des tolérances de pièces très étroites, et des états de surface plus fine sont exigés, des machines rigides spéciales sont nécessaires pour réussir l'usinage dur.
- L'usure de l'outil de coupe, qui a une durée de vie limitée, détériore la rugosité de surface des pièces usinées.
- Le risque de la formation de la couche blanche est particulièrement aigu lors de l'usinage de l'acier à roulement. C'est une couche très fine, invisible à l'œil nu et d'une dureté élevée à celle de la pièce usinée. Lors de la vie fonctionnelle de la pièce, la couche blanche peut se détacher à cause des fortes pressions de contact et par conséquent, provoquer la défaillance de la pièce. [5]. La formation de cette couche est causée par l'augmentation de la température dans la zone de contact entre la surface usiné et la plaquette, ou par l'emploi d'une avance très grande [6].

## I. 2. 4. Outils de coupe utilisés en tournage dur

### I. 2. 4. 1. Géométrie des outils de tournage

Le choix des paramètres technologiques de la coupe dépend principalement de l'outil de coupe utilisé (géométries et caractéristiques de la partie active de l'outil, nuances, revêtement, etc.), du type de matériau à usiner, de la nature d'opération à réaliser et de la caractéristique de produit final (qualité de surface, précisions dimensionnelles, productivité, contraintes internes, etc.).

#### I. 2. 4. 1. 1 Caractéristiques géométriques de la pointe d'outil

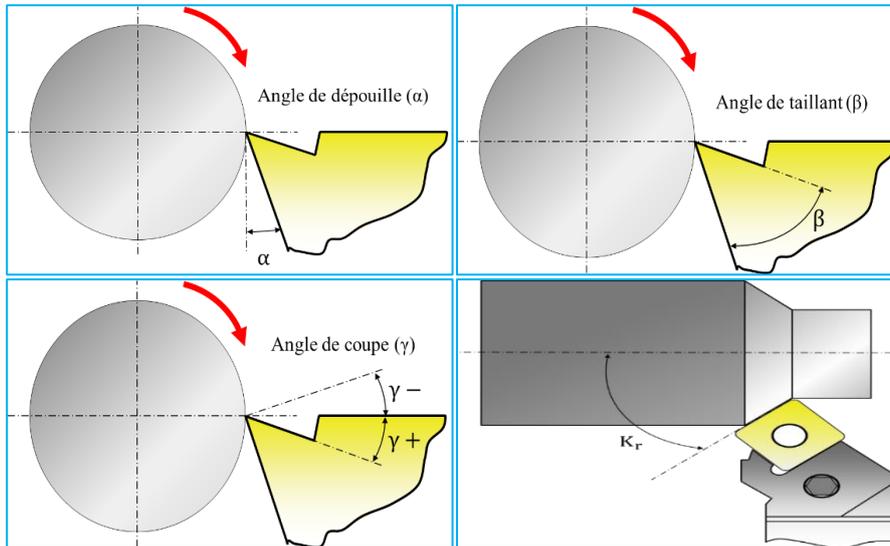
La plaquette de coupe est la partie active dans une opération d'usinage, par l'intermédiaire de ses arêtes de coupe, est la seule partie en contact avec la pièce. Il doit donc assurer l'ensemble des fonctions nécessaires à la formation du copeau. La pointe d'outil de coupe en contact avec la matière est la zone la plus sollicitée mécaniquement et thermiquement. À cet effet, pour assurer un enlèvement de matière fluide, une formation aisée des copeaux, offrir une arête de coupe robuste et fragmenter les copeaux en éléments d'une longueur acceptable, il est important de bien choisir les caractéristiques géométriques de la pointe de l'outil. Ces dernières sont définies principalement par les angles caractéristiques de coupe (angle de coupe, de dépouille, de taillant et de direction principale), l'arrondi d'arête et le rayon de bec de l'outil.

#### a). Angles caractéristiques de coupe

Les angles de coupe sont repérés dans différents plans de projection. Il est important de comprendre l'influence des différents angles de coupe, de dépouille, ou de direction principale. Un outil de coupe est défini par deux plans : la face de coupe et la face de dépouille. L'intersection de ces deux plans constitue l'arête de coupe. Trois angles, dont la somme est égale à  $90^\circ$  ( $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$ ), sont nécessaires pour définir les caractéristiques géométriques :

- **Angle de dépouille ( $\alpha$ )** : c'est l'angle entre la face de dépouille et la surface à usinée.
- **Angle de taillant ( $\beta$ )** : c'est l'angle entre la face de coupe et la face de dépouille.

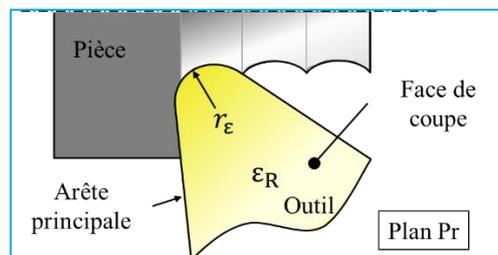
- **Angle de coupe ( $\gamma$ )** : c'est l'angle entre la face de coupe et un plan de référence.
- **Angle de direction principale ( $\kappa_r$ )** : c'est l'angle formé par l'arête de coupe et la direction de l'avance



**Figure I.3** : Angles caractéristiques de coupes.

#### b). Rayon de bec de l'outil

Le rayon de la pointe de l'outil de la plaquette est particulièrement important dans toute opération de tournage, car c'est le facteur clé en ce qui concerne la résistance inhérente aux opérations d'ébauche et l'état de surface résultant des opérations de finition.



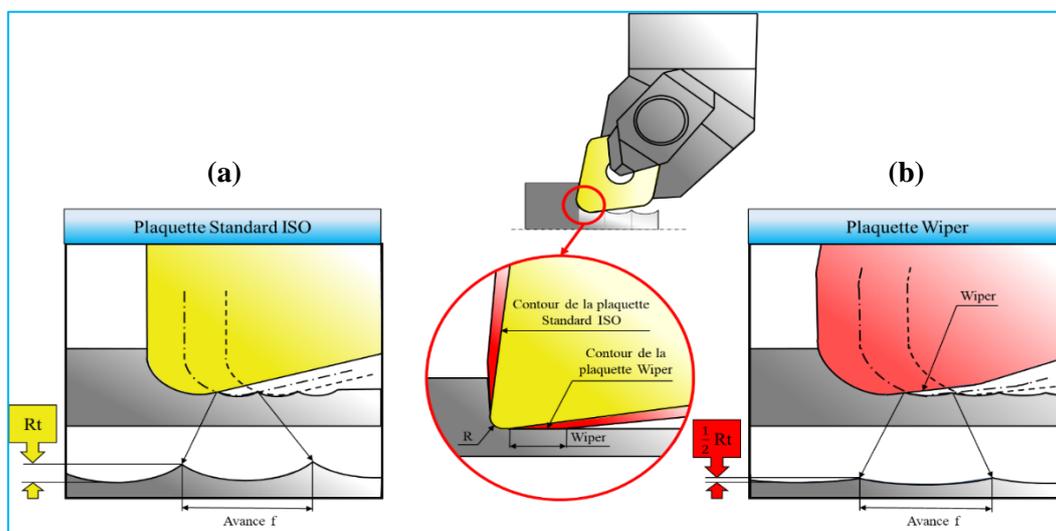
**Figure I.4** : Représentation de la pointe de l'outil (plan et angle en main sur un outil de chariotage)

La figure I.4 représente un schéma d'une pointe d'outil dans le plan (Pr) Le rayon de bec ( $r_\epsilon$ ) est essentiel dans le choix d'un outil de coupe, car il conditionne la rugosité de la surface à usiner et détermine la résistance du bec de l'outil (plus le rayon de bec est élevé, plus l'outil résiste aux efforts de coupe dans les limites admises par la géométrie).

#### I. 2. 4. 1. 2 Technologie WIPER

Dans le processus de tournage dur, non seulement les paramètres de fonctionnement et la géométrie de l'outil sont importants, mais aussi la composition du matériau et le type d'outil sont les éléments qui influencent l'état de surface du produit. Afin d'accroître l'efficacité en termes de durée de vie, la rugosité de la surface, la géométrie de l'outil et l'intégrité de surface sont les paramètres qui doivent être pris en considération.

Le tournage dur avec l'outil ayant une géométrie Wiper possède ces avantages par rapport au processus de tournage conventionnel suivi d'un processus de meulage. La technologie de la géométrie wiper utilisée pour les opérations de tournage dur est réalisée par des séries de rayons soigneusement développés qui constituent l'arête de coupe. Dans l'insert conventionnel, le nez du bord de l'outil n'a qu'un seul rayon tandis qu'en géométrie wiper, l'arête de coupe de wiper a un grand rayon principal complété par un certain nombre de rayons plus petits. Les plaquettes wiper permettent d'obtenir de meilleurs états de surface avec des conditions de coupe standard, ou d'augmenter l'avance de manière significative sans détériorer l'état de surface. Comme la géométrie wiper est en contact avec la surface de la pièce pendant une durée supérieure à celle du rayon de nez de plaquette standard équivalent, elle a tendance à essuyer ou à polir la surface usinée, produisant une texture de surface plus lisse [3].



**Figure I.5 :** L'application de la géométrie de l'insert wiper sur la texture de surface résultante lors du tournage de finition.

Les formes wipers (Figure I.5) ne sont pas un nouveau concept de géométrie des plaquettes, ils ont longtemps été utilisés pour les opérations de surfacage en fraisage, mais ce n'est que ces dernières années qu'ils sont utilisés pour le tournage de finition. Le principe sous-jacent d'une plaquette wiper pour les opérations de tournage concerne l'application d'un rayon de nez d'outil modifié (Figure I.5 a et b). Lorsqu'une plaquette de géométrie de nez d'outil standard est utilisée (Figure I.5 a), il crée une série de pics et de vallées après le passage du nez de la plaquette sur la surface usinée. Inversement, une plaquette de coupe avec une géométrie wiper (Figure I.5 b), a des rayons qui se mélange (au-delà du point de tangence) avec le rayon de nez d'outil qui reste en contact avec la pièce, lui permettant d'essuyer les pics, laissant une texture de surface usinée supérieure [8].

#### I. 2. 4. 2. Matériaux des outils de coupe utilisés en tournage dur

En termes d'usinabilité, les matériaux durs sont difficiles à usiner parce qu'ils sont soumis à des grandes charges mécaniques et à des températures très élevées, dans certains cas la température à l'interface outil / copeau dépasse les 700 °C vu les frottements permanent entre l'outil/pièce et l'outil/matière enlevé. Alors, l'usinage des matériaux durs nécessite l'utilisation

de matériaux coupants ayant des propriétés mécanique et chimiques excellentes à savoir, une grande résistance à l'usure pour l'ensembles des mécanismes (abrasion, adhésion,), une ténacité suffisante pour résister la rupture d'outil (lorsque l'opération à effectuer nécessite une coupe interrompue ou intermittente), une dureté maintenue et une stabilité chimique/physique à des températures élevées [7]. Ces propriétés sont interdépendantes, la modification ou l'amélioration sur l'une d'entre elle peut se réaliser sur la détérioration des autres propriétés.

#### I. 2. 4. 2. 1 Carbure cimenté

Les matériaux d'outil de coupe probablement les plus largement utilisés aujourd'hui sont la famille des outils en carbure cimenté. Ils sont fabriqués selon la technique de métallurgie de poudres par frittage et sont constitués de particules dures (à base de carbure de tungstène WC) et d'un liant fusible lors du frittage (cobalt). La popularité de ce matériau de coupe est due autant à sa ténacité et sa résistance à l'usure qu'à sa capacité à être formé en géométries complexes et peut être utilisée à des températures supérieures à celles de l'acier rapide, ce qui permet des vitesses de coupe très élevées [7].



#### I. 2. 4. 2. 2 Cermets

Le terme Cermets vient de céramique -métal. Ce sont des matériaux élaborés par la métallurgie des poudres, constitués par des particules de composés métalliques durs (carbures, nitrides, carbonitrides) liées par un métal (cobalt, nickel, nickel - fer, nickel - chrome, etc.). Ils ont par rapport aux métaux durs conventionnels une densité faible avec une dureté et une résistance à l'usure plus élevées. La taille des particules dures a également une grande influence sur les propriétés des cermets. Des grains fins améliorent la ténacité et la résistance aux chocs thermiques [7].



#### I. 2. 4. 2. 3 Céramiques

Les céramiques sont des matériaux frittés sans liant métallique chimiquement stable (moulés à des pressions supérieures à 25 MPa et ensuite frittés autour de 1700 ° C), principalement composés d'oxyde d'aluminium  $Al_2O_3$  ou de nitrure de silicium ( $Si_3N_4$ ) et de sialon (une combinaison de Si, Al, O et N). Elles sont très dures (offrent une dureté à chaud très élevée) réfractaires (résistent à des températures qui dépassent 1500 ° C) et peuvent être utilisés à des vitesses de coupe très élevées. Leur application est principalement orientée vers l'usinage des métaux très durs (fonte grise, l'acier trempé et certains alliages exotiques) à des vitesses de coupe élevées et dans des conditions d'usinage à sec. Ils ont également l'avantage d'être une alternative économique par rapport aux outils de nitrure de bore cubique. Il existe toute une gamme de nuances céramiques pour une grande variété d'applications à savoir, les céramiques à base d'oxyde, les céramiques mixtes, les céramiques à whiskers, les céramiques au nitrure de silicium et les nuances Sialon [7].



#### I. 2. 4. 2. 4 Nitrure de bore cubique

Le nitrure de bore cubique (CBN) est l'un des matériaux les plus durs disponibles pour les opérations d'usinage. Avec une dureté inférieure (<4500 HV) à celle du diamant (> 9000 HV), il est le deuxième matériau synthétique le plus dur. Sous l'effet de la température très élevée et de la pression importante, le nitrure de bore cubique subit une transformation structurale (passage d'une structure hexagonale à une structure cubique). Ses propriétés mécaniques élevées sont dues à sa structure cristalline et à sa liaison covalente. Il est très stable à des températures élevées et possède une excellente résistance à l'usure par abrasion meilleur que les céramiques ou les carbures métalliques. Son coût élevé le limite principalement à la production en série [7].



#### I. 2. 4. 2. 5 Diamant polycristallin

Le diamant naturel monocristallin est le matériau le plus dur connu à l'heure actuelle. Il permet la production d'arêtes de coupe géométriquement définies avec des flûtes absolument sans entailles. Les diamants naturels contiennent souvent de l'azote qui peut produire une dureté et une conductivité thermique variables. Ce matériau très coûteux convient à la réalisation de très hauts états de surface pour des surfaces brillantes comme un miroir. Cependant, le diamant s'oxyde dans l'air et réagit chimiquement avec des métaux ferreux. Pour cette raison, il est utilisé pour l'usinage des métaux non ferreux [7].



#### I. 2. 4. 3. Les revêtements

Un revêtement d'outil est une couche d'épaisseur allant de 2 à 15  $\mu\text{m}$  déposée solidement et liée au substrat d'outil (Figure I.6) pour améliorer les performances de l'outil de coupe, et appliquée après la mise en forme de l'outil. Les revêtements fournissent une surface dure et chimiquement stable et une protection thermique aux outils, améliorant leurs performances lors de la coupe en termes de résistance à l'usure (adhésion, abrasion, oxydation, diffusion), l'inertie chimique et thermique, ainsi que le glissement du copeau sur la plaquette. Il existe de nombreux types de matériaux de revêtement utilisés pour des applications spécifiques, les matériaux les plus fréquents rencontrés sont : le carbure de titane (TiC), nitrure de titane (TiN), alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et leurs associations TiCN (carbonitrure de titane), AlTiN, ...etc. Il y a deux types de dépôt de revêtement, les méthodes de dépôt physique en phase vapeur (PVD) et d'élimination chimique de la vapeur (CVD). Le dépôt de type CVD est créé par réaction chimique à haute température, 700 à 1050°C. Ses revêtements ont une grande résistance à l'usure et une forte adhérence au substrat.

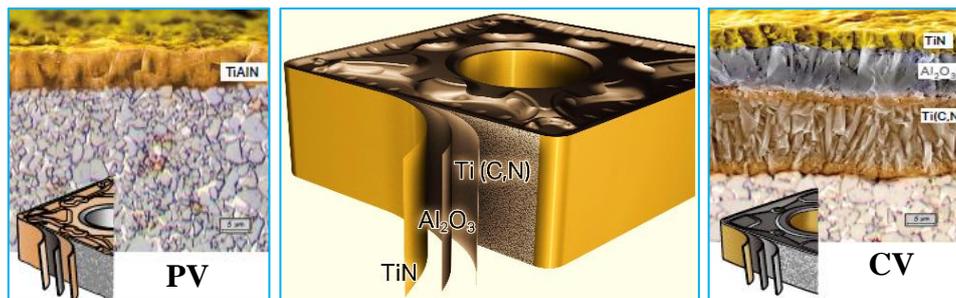


Figure I.6:: Revêtement en PVD et CVD d'une plaquette de coupe

### I. 2. 5. Théorie de la formation des copeaux en usinage dur

Au cours d'une opération d'usinage par enlèvement de matière, le processus de formation des copeaux implique de fortes interactions entre l'outil coupant et la matière usinée. Le copeau est le résultat d'une action mécanique complexe (figure I.7). Le mouvement relatif outil/matière provoque une compression entre la face de coupe de l'outil et la pièce. L'évacuation de cette compression se fait par la pénétration de l'arête de coupe dans la matière et la formation des copeaux où les déformations dépendent du frottement entre la face de coupe de l'outil et le copeau. Une nouvelle surface métallique est engendrée lors de la formation du copeau. Ce processus est directement conditionné par le comportement du matériau de la pièce, par la géométrie de l'outil, et aussi par les conditions de coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance, lubrification, etc.) [1].

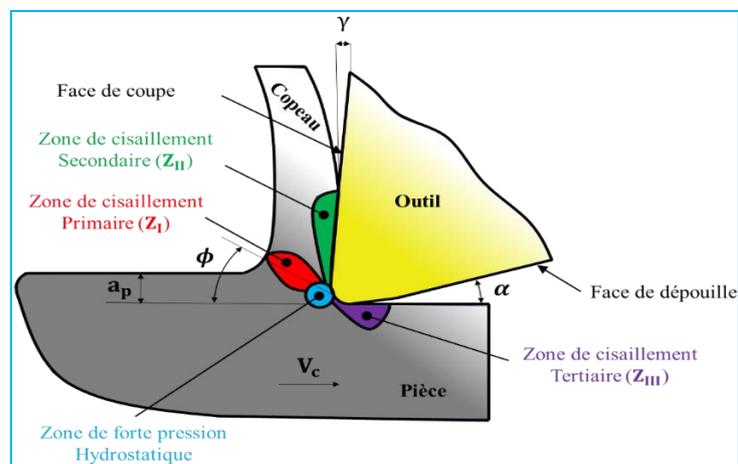


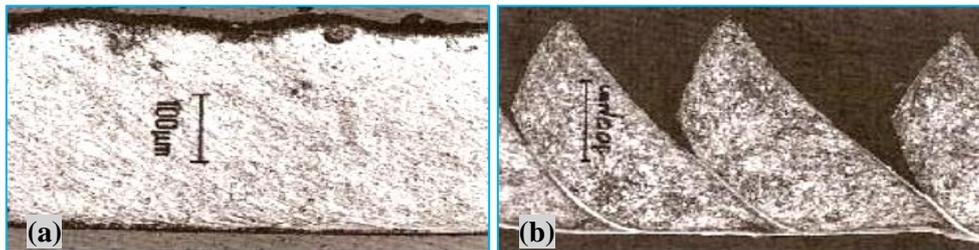
Figure I.7:: Les différentes zones de déformation lors de la formation d'un copeau [9].

On peut distinguer trois zones qui gouvernent la formation du copeau et l'intégrité de surface. La figure I.7 illustre ces trois zones ainsi que les différents angles de coupe.

- **Zone de cisaillement primaire (ZI)** : elle est caractérisée par la formation d'une bande de cisaillement qui fait un angle  $\phi$  avec la surface usinée. Cette bande de cisaillement est caractérisée par une localisation de la déformation et par un échauffement très intense qui peut engendrer des changements de phases [9];

- **Zone de cisaillement secondaire (ZII) :** l'écoulement de la matière sur la face de coupe de l'outil engendre la formation de cette zone. Elle est caractérisée par un fort écrouissage de la matière qui subit de grandes déformations. C'est une zone de frottement et de glissement intenses entraînant une forte génération de chaleur [9];
- **Zone de cisaillement tertiaire (ZIII) :** lorsque l'outil avance, sa face de dépouille frotte sur la surface générée ce qui engendre de grandes déformations et un échauffement important de la surface de la pièce usinée. La génération importante de chaleur, peut conduire à des changements microstructuraux et affecter l'intégrité de surface (rugosité et contraintes résiduelles) [9].

La coupe dépend directement des actions mécaniques de l'outil mais aussi de sa géométrie et de l'évolution de cette géométrie par usure. Généralement le copeau est de forme courbe, sa morphologie est fortement influencée par les paramètres de coupe (essentiellement l'avance, la profondeur de passe). Il se forme par refoulement du métal devant la surface d'attaque de l'outil suivie d'un cisaillement d'un élément de copeau et du glissement de cet élément cisailé sur la face d'attaque. Il existe deux morphologies de copeaux (figure I.8) : les copeaux continus (formés dans un état de déformation plastique stationnaire) et les copeaux discontinus (formés dans un état de déformation plastique non stationnaire et influencée par le phénomène de fissuration et de rupture) dits également copeaux festonnés ou copeaux en dents de scie [1].

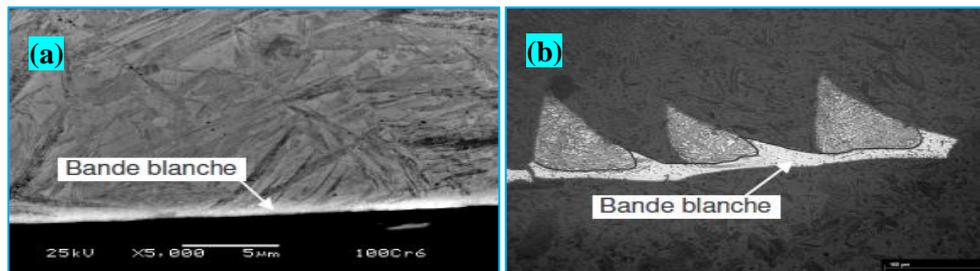


**Figure I.8::** Copeaux de types (a) continu et (b) discontinu [1]

En usinage des matériaux durs, Les mécanismes de formation des copeaux sont assez différents de ceux des aciers plus tendres. En général, la coupe des aciers très durs entraîne la formation de copeaux discontinus appelés aussi en dents de scie (copeaux dentelés). L'instabilités de cette géométrie des copeaux dépend des conditions de coupe, de la rhéologie, des propriétés thermoplastiques du matériau, du cisaillement variable produit dans la zone de cisaillement, de la nature du contact outil copeau et de la réponse vibratoire de la structure de la machine-outil. La formation de copeaux segmentés en tournage dur est causée par une concentration de l'énergie thermique dans les zones de cisaillement, cette concentration des bandes très fines pourrait être due à un temps trop court de dissipation de chaleur [1].

Lors du processus de fabrication par enlèvement de matière des matériaux durs (précisément les aciers traités) et pour des conditions de coupe spécifiques, une bande blanche qui apparaît au niveau de la couche superficielle de la pièce usinée et du copeau obtenu (Figure I.9, (a) et (b)). Cette couche blanche est causée par la présence d'une intense énergie mécanique et thermique, localisée et rapide ayant pour résultat la transformation métallurgique. Le premier facteur qui provoque cette couche blanche et l'augmentation de la température dans la zone de

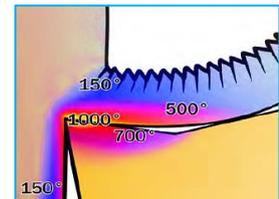
coupe qui atteint un niveau supérieur à la température de transformation de phase martensite ( $\alpha$ )  $\rightarrow$  austénite ( $\gamma$ ), le deuxième facteur et les fortes énergies générées par les frottements (amenée à la surface de la pièce et la face arrière du copeau) appliqués par l'outil sur les zones de cisaillement secondaire (copeau) et tertiaire (pièce). La couche blanche formée pendant l'usinage est généralement une phase dure et fragile elle peut influencer le comportement en fatigue et en rupture, ce qui peut provoquer la présence de craquelures et d'autres défauts de surface. Ces défauts posent problème dans la phase de mise en service de ces pièces et plus particulièrement pour les industries aérospatiales et automobiles [9].



**Figure I.9:** Exemples de couches blanches obtenues en usinage dur (100Cr6/55HRC). (a) couche blanche observée au niveau de la surface usinée et (b) couche blanche observée sur un copeau [9].

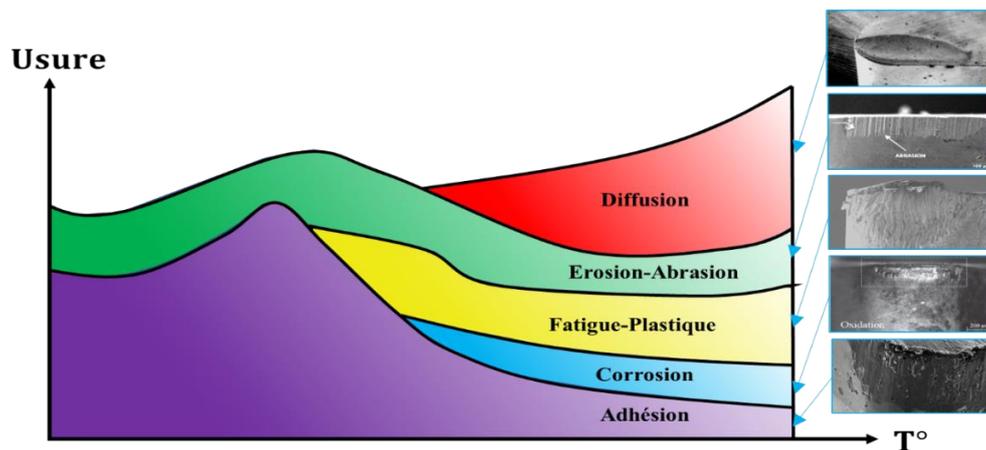
## I. 2. 6. Usure de l'outil de coupe

L'usure de l'outil est due aux contraintes qu'on lui fait subir lors de l'usinage. En effet, la coupe des métaux est une opération de déformation plastique qui doit obtenir la rupture de la matière. Les sollicitations mécaniques et thermiques subies par l'outil sont donc très importantes (La température peut monter jusqu'à 1000°C.). Il s'ensuit une usure de l'outil qui peut être d'origine thermomécanique ou chimique. Cette usure est provoquée par la concentration de contraintes en divers endroits de l'outil qui dépend des paramètres de l'usinage, mais aussi de la géométrie de la plaquette (angle de coupe, présence de brise copeau, etc.) et du revêtement et de son comportement mécanique et thermique.



### I. 2. 6. 1. Principaux mécanismes d'usure des outils de coupe en usinage

Les contraintes mécaniques et thermique exercées sur l'arête de coupe en cours d'usinage donnent naissance à un certain nombre de mécanismes d'usure dominants d'ordre mécanique et physico-chimique. Ces derniers sont responsables de la dégradation de l'outil de coupe et différents modes d'usure coexistent. Leur importance dépend de la température mise en jeu dans la zone de coupe (figure I.10) et de la vitesse de défilement du copeau sur la plaquette. La figure I.10 montre que l'usure adhésive est le mécanisme le plus actif sur une large plage de la température de coupe [12].



**Figure I.10:** Mécanismes d'usure en fonction de la température [12].

### I. 2. 6. 1. 1 Mécanisme d'usure mécanique

#### a). Usure par abrasion

Ce mécanisme s'opère lorsque la pièce et le copeau frottent avec des pressions de contact importantes sur l'outil. La constitution physico-chimique (nature, composition et proportion des phases) et la structure (répartition des composants de l'alliage : forme, dimension, arrangement) conditionnent l'abrasion de la matière [12].

#### b). Usure par adhérence

Cette usure est due aux états de surface de la pièce et de l'outil durant l'usinage. Ces entités frottent les unes contre les autres. A cause des fortes pressions engendrées par l'usinage il y a des microsoudures qui se créent et se rompent très rapidement au cours de l'usinage. Ce processus conduit soit à l'apparition de l'arête rapportée si ces microsoudures sont plus résistantes que celles de l'outil, soit à l'usure de l'outil, si la microsoudure sur le copeau est plus résistante que celle de l'outil [12].

#### c). Usure par déformation plastique (Fatigue)

Ce type d'usure est lié à la fissuration parallèle de l'arête de coupe. La combinaison des hautes températures à l'interface (outil/copeau), de la pression exercée sur l'outil au niveau de l'arête, de choc brutal à l'entrée de la matière et de vibration, provoque la déformation plastique d'une partie de l'outil (arête de coupe) [10].

### I. 2. 6. 1. 2 Mécanisme d'usure physico -chimique

#### a). Usure par diffusion

Ce phénomène apparaît pour des températures élevées où la structure de l'outil change sous l'effet de migrations de ses constituants chimiques vers le copeau. Les hautes températures et les pressions exercées permettent de donner suffisamment d'énergie aux atomes pour que ceux-

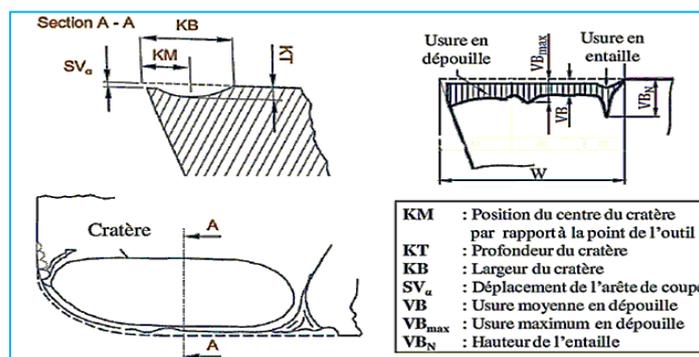
ci puissent migrer de l'outil vers le copeau ou vice versa. Ce processus est grandement accentué par les phénomènes d'affinités chimiques entre les atomes de la matière usinée et de l'outil [10].

### b). Usure par oxydation

L'environnement de l'usinage est constitué d'oxygène dans l'air, de hautes températures, de l'eau provenant des liquides de lubrification. L'augmentation de température dans la zone de coupe au niveau de l'arrête de l'outil conduit à la vaporisation de l'eau. Cet environnement est propice au phénomène d'oxydation et peut provoquer localement une fragilisation de l'outil.

### I. 2. 6. 2. Les différentes formes d'usure des outils

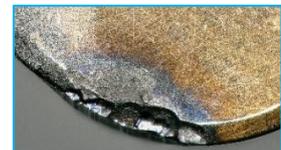
La géométrie de l'outil évolue au cours de son utilisation. Au-delà de certaines modifications, la géométrie ne permet plus de produire des pièces conformes. Des paramètres de quantification de l'usure de l'outil sont donc nécessaires afin de connaître son état et pour prévenir son changement. D'après la littérature et d'une façon globale, l'outil est soumis à six modes de dégradation (Figure I.11) [10] :



**Figure I.11:** Paramètres d'usure selon la norme ISO 3685

#### I. 2. 6. 2. 1 Usure en cratère

Caractérisée par une cuvette sur la face de coupe de l'outil. Elle est le résultat du frottement des copeaux sur la face de coupe. L'élévation de la température provoque une réaction chimique ou une diffusion importante. Cette usure peut jouer un rôle important à l'enroulement et la fragmentation du copeau. Réduire la vitesse de coupe et choisir une plaquette (outil) avec la bonne géométrie et un revêtement plus résistant à l'usure augmentera la durée de vie de l'outil [10].



#### I. 2. 6. 2. 2 Usure en dépuille

L'usure en dépuille est l'un des types d'usure les plus courants et elle se produit sur la face en dépuille de la plaquette de coupe. C'est le modèle d'usure préféré. Elle résulte du frottement de la pièce contre la face en dépuille de l'outil et se présente sous la forme d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête. Ce type d'usure influe sur l'état de surface de la pièce et sur sa précision dimensionnelle [10].



### I. 2. 6. 2. 3 Usure en entaille

L'usure d'entaille est caractérisée par des dommages localisés excessifs à la profondeur de coupe maximale, mais peut également se produire sur l'arête secondaire. Elle se produit sur l'arête de coupe à la hauteur du diamètre périphérique de la pièce (limite de la largeur de coupe). Elle est la conséquence des forts taux d'écroûissage dans cette zone. Selon que l'usure chimique domine ou non l'usure de l'entaille, qui se déroule plus régulièrement, par rapport à une croissance irrégulière de l'adhésif ou à l'usure thermique. Dans ce dernier cas, l'écroûissage et la formation de bavures sont des facteurs importants d'usure des entailles [10].



### I. 2. 6. 2. 4 Usure par déformation plastique

La déformation plastique est un changement permanent de la forme du bec de l'outil de coupe, où le bord a subi une déformation manifeste par un refoulement sur les faces de dépouille (vers l'intérieur « impression de bec » ou une déformation vers le bas « dépression de bec »). L'arête de coupe est soumise à des forces de coupe et à des températures élevées entraînant un état de contrainte dépassant la limite d'élasticité et la température des matériaux de l'outil.



### I. 2. 6. 2. 5 Usure par écaillage et fissuration d'arête

La fracture est définie comme l'éclatement d'une grande partie de l'arête de coupe, là où la plaquette de coupe ne peut plus être appliqué. L'arête de coupe a été exposée à une charge plus importante qu'elle ne peut résister. Cela pourrait être le résultat de permettre à l'usure de progresser trop loin, entraînant une augmentation des forces de coupe. Cela peut également être causé prématurément en raison de données de coupe erronées ou de problèmes de stabilité dans la configuration. Ce cas est relatif à la coupe discontinue caractérisée par des efforts cycliques.



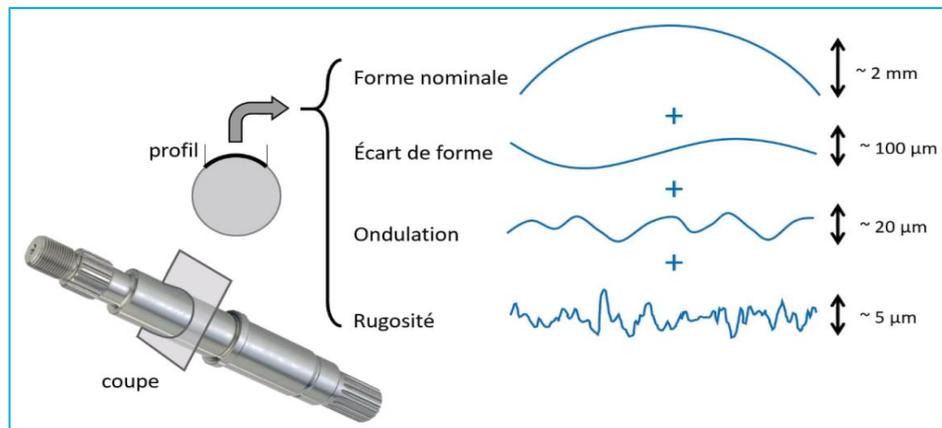
## I. 2. 7. Intégrité de surface

Une surface se définit comme l'interface entre la pièce et son environnement. Cette surface doit donc posséder les caractéristiques adaptées à l'usage à laquelle elle est destinée. L'intégrité de surface est définie comme l'état altéré ou amélioré d'une surface produite par un procédé de génération de surface. Cette altération peut faire référence à différentes propriétés à savoir ; Géométrique (état de surface), Mécanique (dureté, résistance à la fatigue, à l'usure, ...), Physico-chimique (tribologiques, résistance à la corrosion,...) et Visuelles (apparence,...) [13].

La géométrie réelle d'une pièce mécanique produite en usinage diffère de sa géométrie dite nominale, cette différence et du aux défauts inévitable induits pendant l'usinage. On distingue différents ordres de grandeur de ces défauts :

- **Macro-géométrie** : défauts d'ordre 1 « **Ecart de forme** » et d'ordre 2 « **Ondulation** »
- **Micro-géométrie** : défauts d'ordre 3 et 4 « **Rugosité** »

Quand on souhaite vérifier l'état de surface d'une pièce, on effectue une mesure à un endroit indiqué sur le plan. En général une portion limitée jugée représentative de la surface à vérifier, par exemple, on mesure un profil sur une portion d'un arbre de transmission (figure I.12).



**Figure I.12:** Principaux défauts macro et micro- géométriques de surface

Dans les années 1930, la mesure des états de surface s'est faite uniquement par profilomètre à contact en mesurant la hauteur le long de profils rectilignes. Ensuite, les instruments de mesure de surfaces en 3D, tels que des interféromètres en lumière blanche ou des profilomètres 3D sont apparus à partir de l'année 1980.

### I. 2. 7. 1. Paramètres de profil (2D) d'état de surface

Les paramètres d'état de surface utilisés en profilomètre sont séparés en trois groupes selon le type de profil : les paramètres (de préfixe) P qui sont calculés sur le profil primaire ; les paramètres R qui sont calculés sur le profil de rugosité ; et les paramètres W qui sont calculés sur le profil d'ondulation.

Les premiers rugosimètres enregistraient les variations de hauteur à l'aide d'un point en diamant en contact avec la surface et déplacée à l'aide d'une unité d'avance linéaire. Le profil mesuré était tracé sur un papier carboné et la valeur du paramètre Ra était affichée sur le cadran d'un galvanomètre. Pendant longtemps, un seul paramètre était connu et utilisé, sous le nom de Ra (*Roughness average*). D'autres paramètres comme le RMS ou le Rq, le Rz ou le Rmax ont ensuite été utilisés. Aujourd'hui, les paramètres d'état de surface sont définis dans une poignée de normes internationales définissent la manière d'analyser les états de surface à l'aide de filtrage et de paramètres [15] :

- **La norme NF EN ISO 4287-** Méthode du profil - Termes, définitions et paramètres d'état de surface, Norme décrivant les paramètres les plus utilisés sur les profils définit les paramètres communs, dit de rugosité, d'ondulation ou sur profil primaire tels que le Ra, le Rz ou le RSm [15].
- **La norme NF EN ISO 1302** définit la façon d'exprimer les spécifications d'état de surface sur les plans.

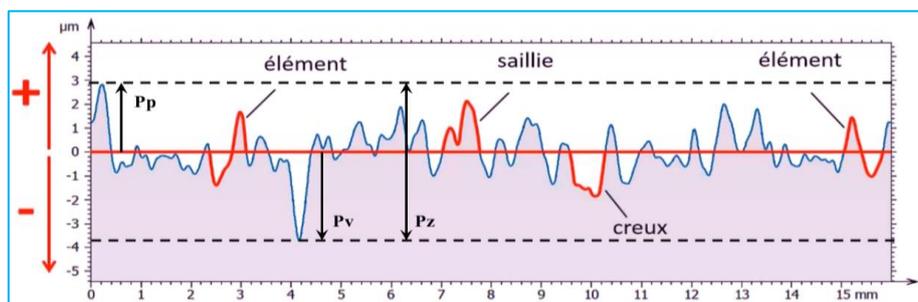
- **La norme NF EN ISO 13565** - Méthode du profil - Surfaces ayant des propriétés différentes selon la hauteur définit des méthodes d'analyse de surfaces dites stratifiées obtenues par usinage multi-passe. Célèbres paramètres fonctionnels, utilisés dans l'automobile, les  $R_k$ , caractérisant différentes parties de la courbe d'Abbott [15].
- **La norme NF EN ISO 12085** - Méthode du profil - Paramètres de motifs, issue d'une norme française 3CNOMO, le consortium regroupant PSA Peugeot Citroën et Renault, durant les années 1980 et 1990. La méthode est basée sur une construction graphique permettant de segmenter le profil en motifs qui sont ensuite quantifiés en hauteur et largeur. La méthode R&W de l'ISO 12085 permet de caractériser les structures périodiques sur un profil. Cette méthode est maintenant étendue grâce à une segmentation plus robuste issue de l'analyse surfacique [15].

Les paramètres désignant la rugosité de surface présentés dans ces normes et sont nombreux, on se limite à présenter les paramètres de surface fréquemment utilisées dans le domaine de la fabrication mécanique, définis selon les normes **ISO 4287** et **ISO 12085** :

#### I. 2. 7. 1. 1 Paramètres de profil 2D de la norme « ISO 4287 »

La norme ISO 4287, publiée en 1996, est la plus importante norme pour les profils, définissant le vocabulaire et les paramètres. Ils sont en passe d'être modernisés et remplacés par ceux de la norme ISO 21290. Il s'agit de la norme principale pour les paramètres de profil dans le système GPS. Elle définit les termes et les équations des paramètres généraux. Ci-dessous, les définitions sont données pour les paramètres R mais elles s'appliquent également aux paramètres P et W. Les paramètres de profil 2D de la norme ISO 4287 sont détaillés en **Annexe I** [15] :

- Paramètres d'amplitude** :  $R_t$ ,  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_z$ ,  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$ ,  $R_c$ ,  $P_{sk}$  et  $P_{ku}$ .
- Paramètres spatiaux** :  $R_{Sm}$ .
- Paramètres hybrides** :  $R_{dq}$  et  $R_{pk}$ .
- Paramètres fonctionnels** :  $R_{mr}$  et  $R_{dc}$ .



**Figure I.13::** Représentation d'un profil 2D mesuré

Une fois le profil mesuré, il est représenté par une courbe des hauteurs Z en fonction de la position X (figure I.13). On représente parfois le côté de la matière avec un remplissage de

couleurs sous le profil. Les hauteurs sont référencées, par convention, par rapport à la ligne moyenne, qui est calculée comme la moyenne de toutes les hauteurs du profil. On met cette moyenne à zéro, les hauteurs sont comptées positivement pour les points situés au-dessus de la ligne moyenne et négativement pour les points situés dessous. Une portion du profil située au-dessus de la ligne moyenne et entre deux passages à zéro est appelée une saillie du profil. Le point le plus haut d'une saillie est un pic. Une portion du profil située en dessous de la ligne moyenne et entre deux passages à zéro est appelée un creux du profil. Le point le plus bas d'un creux est une vallée. La succession d'un creux et d'une saillie ou d'une saillie et d'un creux est appelée un élément du profil [15].

#### **I. 2. 7. 1. 2 « ISO 13565 -2 et 3- » Surface ayant des propriétés différentes selon la hauteur**

Cette série de normes est spécialement conçue pour les surfaces stratifiées produites avec un procédé en deux étapes comme par exemple un pierrage suivi d'un polissage. La première partie de la norme, l'ISO 13565-1, définit un filtre spécial en deux passes apportant une certaine robustesse contre les vallées profondes qui sont caractéristiques des surfaces stratifiées. Ce filtre est désormais remplacé avantageusement par le filtre gaussien robuste défini dans l'ISO 16610-31. La partie 2 de la norme ISO 13565 définit un jeu de paramètres  $R_k$  qui sont dérivés d'une construction graphique sur la **courbe d'Abbott-Firestone**. Les paramètres de de profil 2D de la norme ISO 13565-2 et 3 sont exposés en **Annexe I [15]** :

- a. **Paramètres de l'ISO 13565-2** :  $R_k$ ,  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$  MR1 et MR2.
- b. **Paramètres de l'ISO 13565-2** :  $R_{pq}$ ,  $R_{vq}$  et  $R_{mx}$ .

#### **I. 2. 7. 2. Paramètres surfaciques 3D d'état de surface**

Dans la norme ISO 25178, tous les paramètres surfaciques commencent par la lettre capitale S ou la lettre capitale V. Contrairement aux paramètres 2D, il n'y a pas de préfixe reflétant la nature de la surface filtrée permettant de savoir si on a affaire à un paramètre de rugosité, d'ondulation ou de profil primaire. Sur un profil, on a  $P_a$ ,  $R_a$  et  $W_a$ , mais sur une surface on a seulement  $S_a$ , qui peut donc être tantôt un paramètre de rugosité ou d'ondulation, selon les opérations de filtrage appliquées en amont. Ce choix s'explique par la multiplicité des méthodes de filtrage à la disposition des métrologues, définies dans [ISO 16610]. Ces filtres ne servent pas toujours à séparer l'ondulation de la rugosité mais altèrent parfois la surface de façon plus subtile. Les paramètres surfaciques 3D d'état de surface de la norme ISO 25178 sont présentés en détail en **Annexe I [15]** :

- a. **Les paramètres d'amplitude** :  $S_q$ ,  $S_{sk}$ ,  $S_{ku}$ ,  $S_p$ ,  $S_v$ ,  $S_z$  et  $S_a$ .
- b. **Les paramètres spatiaux.**
- c. **Les Paramètres d'espacement** :  $S_{al}$  et  $S_{tr}$ .
- d. **Paramètres hybrides** :  $S_{dq}$  et  $S_{dr}$ .

### e. Paramètres fonctionnels d'état de surface :

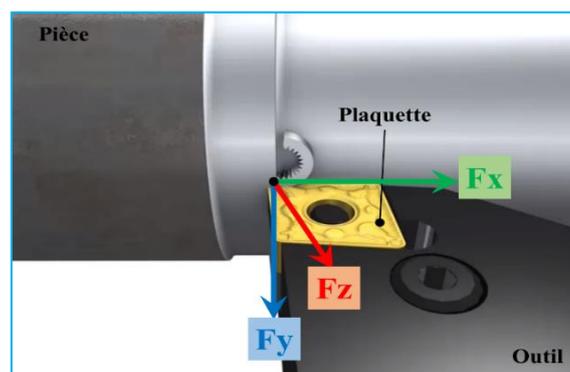
1. Paramètres de taux de portance :  $S_{mr}$ ,  $S_{mc}$  et  $S_{xp}$ .
2. Les paramètres SK :  $S_k$ ,  $S_{pk}$ ,  $S_{vk}$ ,  $S_{mr1}$  et  $S_{mr2}$ .
3. Paramètres de volume :  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vc}$ , et  $V_{vv}$ .

### I. 2. 8. Efforts de coupe

Les forces agissant sur un outil sont un aspect important de l'usinage dur. La connaissance des forces de coupe est essentielle pour estimer les besoins en puissance et pour s'assurer que les éléments de la machine-outil, la géométrie des outils, les porte-outils et les montages sont suffisamment rigides et exempts de vibrations. Les efforts de coupe sont à la base de l'évaluation de la puissance nécessaire à la coupe. Ils servent au dimensionnement des organes de la machine-outil et du corps de l'outil. Ils influent sur la déformation de la pièce usinée, sur la formation du copeau, sur la précision d'usinage et sur l'usure de l'outil [7].

Pendant le processus de coupe la pièce agit sur l'outil avec une certaine force « F » dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe (figure I.14). Mesurés selon 3 axes orthogonaux, les efforts de coupe nous indiquent les valeurs des différentes forces actives à l'interface outil / pièce / copeau. Leurs variations éventuelles seront donc des révélateurs des conditions de coupe liées à la dégradation des revêtements et du substrat sous-jacent le long de l'arête de coupe. La résultante de coupe « F » est la somme de 3 composantes suivantes :

- « **F<sub>t</sub>** ou **F<sub>z</sub>** » : composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.
- « **F<sub>a</sub>** ou **F<sub>x</sub>** » : composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial, en tournage, cette composante joue un rôle fondamental dans le processus de coupe.
- « **F<sub>r</sub>** ou **F<sub>y</sub>** » : composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial (effort de pénétration), n'a qu'une importance et disparaît dans le cas de la coupe orthogonale.



**Figure I.14::** Composantes des efforts de coupe

### **I. 3. Méthodes d'intelligence artificielle pour la modélisation et l'optimisation**

La modélisation et l'optimisation des paramètres de processus de fabrication sont généralement des tâches difficiles, dont il est nécessaire de bien connaître : le processus de fabrication, les équations empiriques reliant les paramètres technologiques de performance et les paramètres d'entrée contrôlables pour développer des contraintes réalistes, les spécifications des capacités de la machine, le développement d'un critère d'optimisation efficace et les techniques d'optimisation mathématiques et numériques appropriées. En raison de la complexité énorme du processus de fabrication intelligent et du nombre élevé de paramètres déterminants, les approches classiques en matière de modélisation et d'optimisation ne suffisent plus. Des techniques de modélisation et d'optimisation avancées basées sur des algorithmes d'intelligence artificielle (Régression statistique, Machine Learning, Métaheuristiques, etc...) doivent être mises au point et utilisées afin d'obtenir les meilleures performances possibles [16].

#### **I. 3. 1. Méthodes de Modélisations avancées**

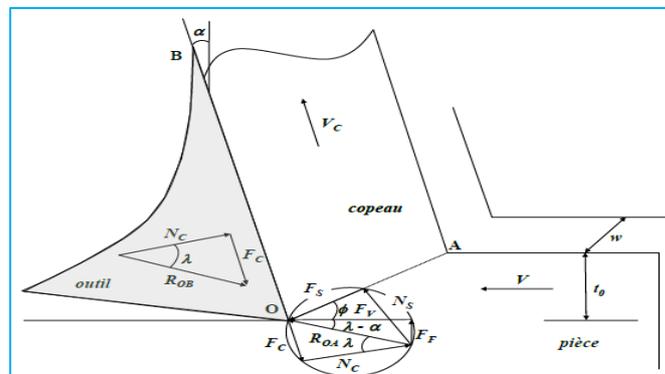
La modélisation prédictive des opérations d'usinage est la première et la plus importante étape du contrôle et de l'optimisation des processus. Un modèle prédictif est une relation précise entre les variables d'entrée indépendantes et les mesures de performance de sortie dépendantes. L'objectif principal de la modélisation des opérations d'usinage est de pouvoir prédire quantitativement les performances des opérations d'usinage avec précision. La modélisation peut faciliter une planification efficace des opérations d'usinage pour atteindre une productivité, une qualité et un coût optimaux [16].

Il existe de nombreuses méthodologies qui peuvent être utilisées pour établir les relations entre les entrées et les sorties de processus et il n'y a pas de méthodologie unique qui puisse exécuter la tâche définie ci-dessus de manière fiable en raison de la nature hautement non linéaire des opérations de coupe de métal [17]. La modélisation de l'usinage a évolué à travers trois étapes principales au fil des ans, à savoir la modélisation analytique, la modélisation numérique et la modélisation empirique. Selon van Luttervelt et al [18], 43% des groupes de recherche étaient actifs dans la modélisation empirique, 32% dans la modélisation analytique et 18% dans la modélisation numérique.

##### **I. 3. 1. 1. Modélisation analytique**

Les relations entrées-sorties peuvent être établies par des modèles purement analytiques basés uniquement sur la physique théorique fondamentale du processus d'usinage. Des méthodes de modélisation géométrique, analytique ou mécaniste sont à la base de cette approche. La modélisation analytique a été lancée en grande partie par la modélisation et l'analyse basées sur la physique de Merchant du système de force (figure I. 15) de base agissante entre l'outil de coupe, le copeau et la pièce dans un processus d'usinage. Dans cette approche, les prédictions sont faites à partir des propriétés physiques de base de l'outil et des matériaux de la pièce ainsi que de la cinématique et de la dynamique du processus. Ainsi, une fois que les données physiques appropriées ont été déterminées, l'effet des changements des conditions de

coupe (par exemple, la géométrie de l'outil, les paramètres de coupe, etc.) sur les performances d'usinage (par exemple, le taux d'usure, la conformité géométrique, la qualité de surface, etc.) peut être prédit [19].



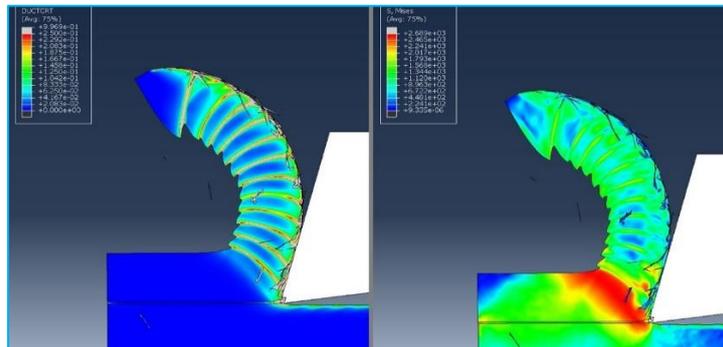
**Figure I.15:** Géométrie du modèle de Merchant (1945) [20]

Les modèles analytiques fournissent des informations utiles sur le processus de coupe. Cependant, ils reposent sur des hypothèses trop simplistes. Les hypothèses ont rendu ces modèles inadéquats pour prédire un flux de copeaux précis. Outre les limitations des configurations géométriques et cinématiques simples des théories classiques de coupe orthogonale et oblique appliquées aux opérations pratiques plus complexes, des difficultés ont été rencontrées dans le développement de modèles prédictifs pour diverses mesures de performance telles que les forces de coupe, la puissance, la rugosité de surface et températures de l'outil. Cependant, en raison de nombreux événements inattendus et non comptabilisés survenant au cours du processus et du nombre d'hypothèses, un chercheur doit être sûr que le problème est résoluble. Les résultats des modèles analytiques ne sont pas suffisamment fiables pour les rendre valables [20].

### I. 3. 1. 2. Modélisation numérique

La modélisation numérique, également connue sous le nom de modélisation assistée par ordinateur, a commencé à émerger dans les années 1970 et a marqué un tournant dans l'avènement de la technologie informatique numérique. Parmi les techniques de modélisation numérique, les méthodes des éléments finis (FEM) sont les plus utilisées. L'objectif principal des études par éléments finis est de dériver un modèle de calcul pour prédire les mesures de performance d'usinage telles que la force de coupe, la température, la distribution de la température, la géométrie des copeaux, etc. dans différentes conditions de coupe. Les techniques des éléments finis utilisent des représentations à petits mailles du matériau et de l'outil de coupe qui sont basées sur des principes de continuité ([21], [22], [23] et [24]). Lorsque le modèle de matériau, les conditions de frottement de l'outil et les propriétés thermiques de la pièce et de l'outil sont correctement définis, l'analyse par éléments finis fournit des informations sur le processus (figure I. 16). Le processus d'usinage avec analyse par éléments finis peut être modélisé comme suit : plastique rigide ou plastique élastique ; Eulérien (maillage fixe) ou lagrangien (maillage flux avec le matériau) ; maillage adaptatif ou maillage non adaptatif. La pointe de l'outil pose des difficultés en termes de génération de maillages en approche

lagrangienne. Afin de corriger les éléments fortement déformés autour de l'arête de coupe, des techniques telles que le rezonage du maillage et le remaillage dynamique sont utilisées [19].



**Figure I.16:** Simulation par éléments finis de la coupe orthogonale [20].

Bien que les méthodes par éléments finis soient capables de prédire les forces de coupe sans supposer la géométrie de la zone de cisaillement ou l'utilisation de coefficients empiriques, leur précision est une fonction forte du modèle de matériau sous-jacent, de l'incorporation des effets dynamiques et de la puissance de calcul disponible. Cette approche est critiquée comme n'étant pas basée sur la physique de l'usinage. Le temps de calcul, la sensibilité au modèle constitutif du matériau et aux définitions de frottement, et les problèmes d'instabilité avec le maillage sont quelques-uns des inconvénients de la modélisation par éléments finis [20].

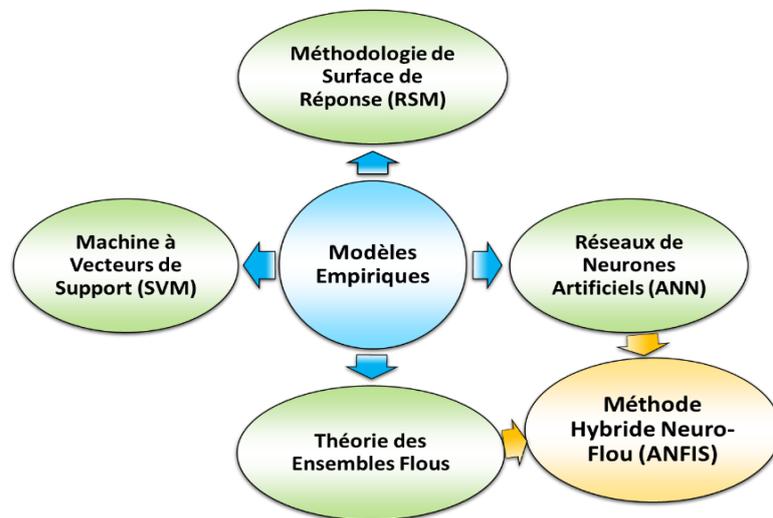
### I. 3. 1. 3. Modélisation empirique

La modélisation empirique est apparue comme un processus organisé de la fin des années 1890 au début des années 1900. Il est né de la recherche pionnière en ingénierie de F. W. Taylor et du développement d'une méthodologie empirique pour estimer des conditions d'usinage raisonnablement économiques. L'équation de Taylor et ses versions étendues sont largement utilisées même aujourd'hui pour évaluer l'usinabilité et les économies d'usinage [19].

La popularité de l'approche empirique provient de la simplicité impliquée dans la construction du modèle et de la précision de prédiction qui en résulte maintenue sur une gamme de conditions de coupe. Elle est considérée l'approche la plus adaptée aux applications industrielles. Une grande quantité d'expérimentation est nécessaire pour établir les relations empiriques entre diverses variables de fonctionnement indépendantes et les mesures de performance technologique. Une fois le travail expérimental effectué pour établir les exposants et les constantes des équations, ils peuvent être utilisés par le personnel de production pour installer et faire fonctionner leurs machines. Dans certaines études, des outils tels que la conception d'expériences et l'ajustement de courbes sont utilisés pour obtenir la relation empirique à partir de données expérimentales [19].

L'avantage de cette approche réside dans le fait que, selon le niveau de compréhension des phénomènes participants, elle peut produire de très bons résultats. Il faut souligner qu'il n'est pas facile de produire les résultats attendus à partir d'un ensemble d'expériences car il y a trop de facteurs à considérer concernant le phénomène expliqué et les équipements utilisés. De plus,

les conclusions obtenues ont des applications très spécifiques et peu ou pas d'applicabilité générale. Une nouvelle expérimentation approfondie est nécessaire chaque fois qu'une nouvelle variable de coupe est ajoutée à la relation puissance-loi et l'ensemble du processus doit être répété à chaque fois qu'une nouvelle combinaison outil-matériau de travail est rencontrée. La classification des différentes techniques de modélisation empirique est présentée à la figure I.17.



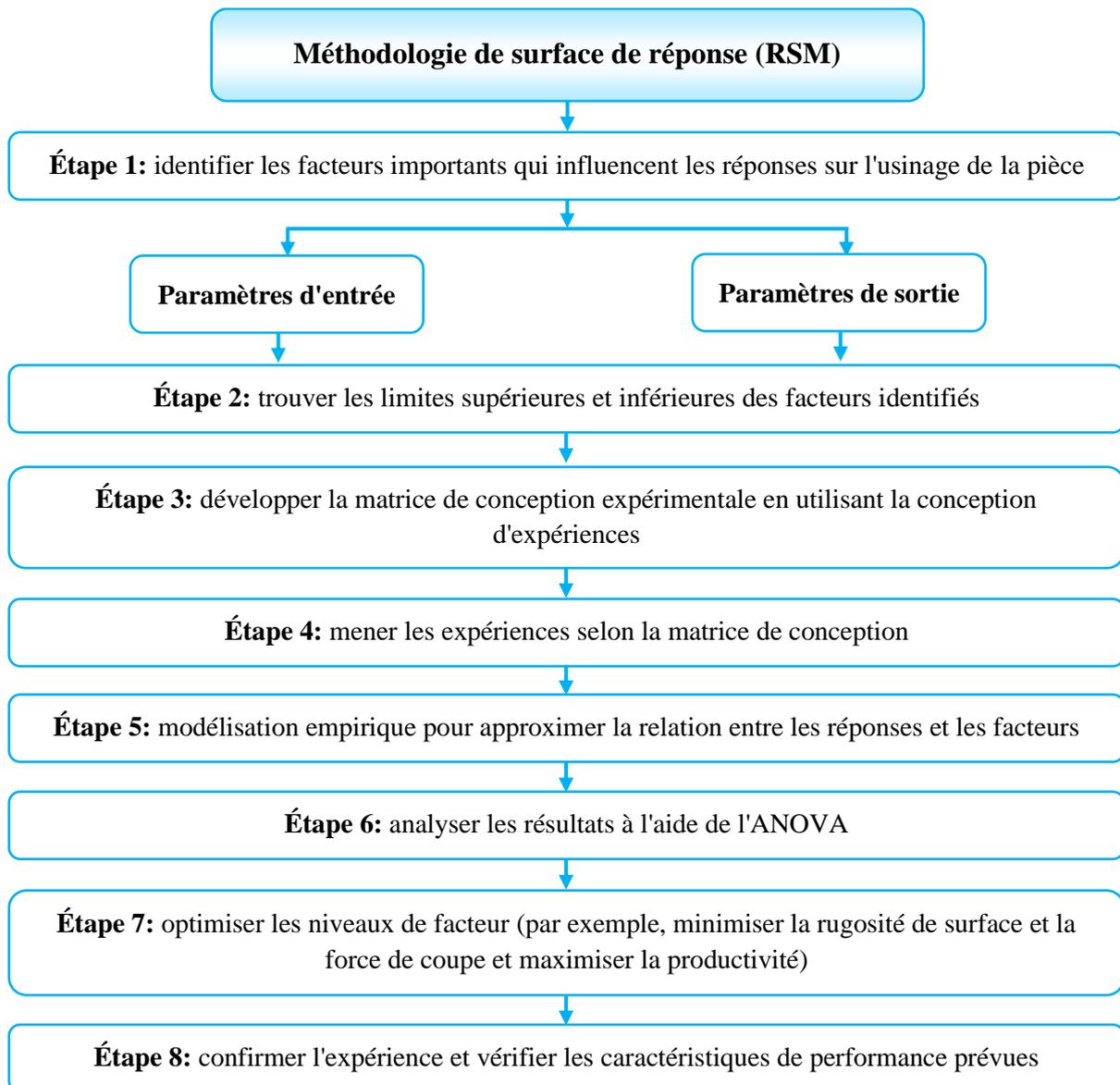
**Figure I.17:** Différentes techniques de modélisation empirique

### I. 3. 1. 3. 1 Méthodologie de surface de réponse (RSM)

La réponse d'un système mécanique à des variables aléatoires stimuli peut être obtenue par modèles physiques successifs (appelée surface de réponse physique par la suite), ou par ajustement d'une fonction mathématique (appelée surface de réponse analytique), en général de forme polynomiale, sur une base de données. Cette partie propose de présenter les techniques et outils de construction de ces surfaces de réponse en mécanique et de les situer dans le cadre plus général de la fiabilité des structures.

Dans le cas général, on appelle surface de réponse, la représentation géométrique de la réponse d'un processus physique spatio-temporel aléatoire à des variables stimuli. La propriété étudiée, ou réponse  $Y$ , résulte alors du transfert par une fonction de réponse explicite, ou fonction de transfert, des variables d'entrée du système, le changement de valeurs de ces variables entraînant un changement de la valeur de la fonction de réponse [25].

La méthode des surfaces de réponse (RSM) est un ensemble de techniques statistiques et mathématiques utilisées pour développer, améliorer et optimiser des procédés. Elle a aussi d'importantes applications dans la conception, le développement et la formulation de nouveaux produits, ainsi que dans l'amélioration de la conception de produits existants. L'objectif de cette méthode est de déterminer la relation entre plusieurs variables explicatives et une ou plusieurs variables de réponse afin d'explorer l'effet de ces paramètres sur les réponses. La présente méthodologie est basée sur les étapes présentées sur la figure I. 18.



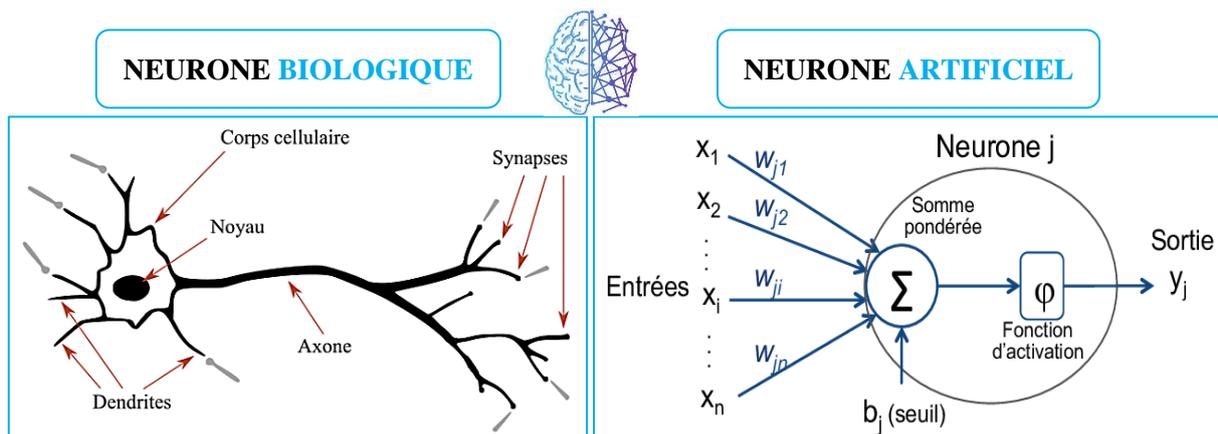
**Figure I.18:** Procédure de méthodologie de surface de réponse

### I. 3. 1. 3. 2 Les réseaux de neurones artificiels (ANN)

Le réseau de neurones artificiels (ANN) est l'une des méthodes d'intelligence artificielle les plus efficaces de modélisation empirique, en particulier pour les systèmes non linéaires, qui fait référence aux systèmes informatiques dans lesquels l'analogie des réseaux de neurones biologiques a été un concept élémentaire. De nombreuses tâches en temps réel impliquant la reconnaissance de formes ou des problèmes d'intelligence qui sont exceptionnellement compliqués à automatiser sont exécutés très facilement par des créatures vivantes. Les réseaux de neurones trouvent une large application dans différents domaines tels que la reconnaissance des caractères, l'optimisation, la prédiction, la surveillance, la compression de données, la parole, la vision et la médecine...etc [25].

Les réseaux de neurones artificiels se composent de neurones fonctionnant en parallèle. Ces neurones sont inspirés du système nerveux biologique (figure I. 19). Comme dans la nature, le fonctionnement du réseau est fortement influencé par la connexion des neurones entre eux. Il

est possible d'entraîner un réseau de neurones pour une tâche spécifique (reconnaissance de caractères par exemple) en ajustant les valeurs des connexions (ou poids) entre les éléments (neurones). Le neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones amont. A chacune de ces entrées est associé un poids  $w$  abréviation de weight (poids en anglais) représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones aval.



**Figure I.19:** Structure neurone biologique et modélisation simplifiée d'un neurone Artificiel

L'apprentissage est vraisemblablement la propriété la plus intéressante des réseaux neuronaux. Elle ne concerne cependant pas tous les modèles, mais les plus utilisés. L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. Dans le cas des réseaux de neurones artificiels, on ajoute souvent à la description du modèle l'algorithme d'apprentissage. Au niveau des algorithmes d'apprentissage, il a été défini deux grandes classes selon que l'apprentissage est dit supervisé ou non supervisé. Cette distinction repose sur la forme des exemples d'apprentissage [26].

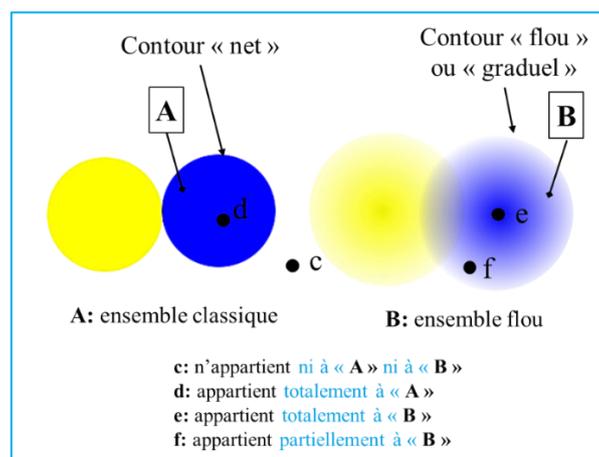
### I. 3. 1. 3. 3 Logique floue (FL)

La logique floue (fuzzy logic) qui existait depuis longtemps est d'une grande actualité aujourd'hui. Initialement, elle a été appliquée dans des domaines non-techniques. Durant l'année 1985, les Japonais ont commencé à utiliser la logique floue dans les industries. La logique floue a une grande capacité à capturer le raisonnement de bon sens humain, la prise de décision et d'autres aspects de la cognition humaine [27]. Elle a été développée à partir de la théorie des sous-ensembles flous. Les sous-ensembles flous sont une manière mathématique de représenter l'imprécision de la langue naturelle, ils peuvent être considérés comme une généralisation de la théorie des ensembles classiques. Un ensemble flou est un ensemble sans limite nette et clairement définie. Il peut contenir des éléments avec seulement un degré d'appartenance partiel. Pour comprendre ce qu'est un ensemble flou, considérons d'abord la définition d'un ensemble classique. Un ensemble classique est un conteneur qui inclut ou exclut totalement un élément donné. Par exemple, l'ensemble des jours de la semaine comprend incontestablement le lundi, le jeudi et le samedi. La logique floue est aussi appelée "logique

linguistique" car ses valeurs de vérité sont des mots du langage courant : "plutôt vrai, presque faux, loin, si loin, près de, grand, petit...". La logique floue a pour objectif l'étude de la représentation des connaissances imprécises, des raisonnements approchés et elle cherche à modéliser les notions vagues du langage naturel [28].

Les connaissances des systèmes experts sont généralement inexactes dans la pratique de la surveillance de l'état. Par conséquent, des mesures des incertitudes dans les connaissances sont nécessaires pour que le système expert fournisse des résultats robustes. Les mesures d'incertitude normalement utilisées sont les fonctions de probabilité et de membre flou dans la théorie de logique floue [29], [30].

Dans la théorie des ensembles, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble. La notion d'ensemble est à l'origine de nombreuses théories mathématiques. Cette notion essentielle ne permet cependant pas de rendre compte de situations pourtant simples et rencontrées fréquemment. Parmi des fruits, il est facile de définir l'ensemble des pommes. Par contre, il sera plus difficile de définir l'ensemble des pommes mûres. On conçoit bien que la pomme mûrit progressivement la notion de pomme mûre est donc graduelle. C'est pour prendre en compte de telles situations qu'a été créée la notion d'ensemble flou. La théorie des ensembles flous repose sur la notion d'appartenance partielle : chaque élément appartient partiellement ou graduellement aux ensembles flous qui ont été définis. Les contours de chaque ensemble flou ne sont pas « nets », mais « flous » ou « graduels » (figure I. 20) [29], [30].



**Figure I.20:** Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou [29].

#### I. 3. 1. 3. 4 La méthode hybride neuro-flou de prédiction « ANFIS »

Les systèmes flous ont pris une grande importance pour l'extraction automatique des connaissances à partir d'un ensemble de données (en l'absence d'un expert humain). Comme il n'y a aucune méthode évidente pour déterminer ses paramètres (règles floues), l'exécution d'un système flou peut prendre beaucoup de temps ; pour cette raison ce système est développé par hybridation avec d'autres méthodes, par exemple les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques, programmation évolutive, ...etc. Chaque technique intelligente a des propriétés particulières (par exemple capacité d'apprentissage, explication de décisions). Chaque technique convient à résoudre certains problèmes particuliers. En effet, les réseaux neuronaux

sont par exemple utilisés pour la reconnaissance des modèles. Cependant, ils sont incapables d'expliquer comment ils atteignent leurs décisions. Aussi pour les systèmes de la logique floue qui peuvent raisonner avec l'information imprécise et expliquer leurs décisions mais ne peuvent cependant pas acquérir automatiquement les règles qu'ils l'utilisent pour prendre ces décisions. Ces limites ont été une raison derrière la création de systèmes hybrides intelligents où ; deux ou plus de techniques sont combinées afin de vaincre les limitations d'une seule technique [31].

Le plus populaire de ces systèmes hybrides, est celui du neuro-flou (les réseaux de neurones flous) qui exploite la force d'apprentissage des réseaux de neurones ainsi que la facilité de compréhension linguistique du système à base de règles floues. Les réseaux neuro-flous sont déterminés par l'association des réseaux de neurones avec la logique floue. Un système neuro-flou est un réseau de neurones équivalent à la structure d'un système flou ; il peut être vu comme un système flou pour lequel les opérations sont implémentées de façon parallèle par un réseau de neurone. De nombreux types de systèmes Neuro-flous ont été définis et développés ces dernières années. Il existe quatre grandes catégories de combinaisons des réseaux de neurones avec la logique floue : réseau flou neuronal, système neuronal/flou simultanément, modèles neuro-flous coopératifs et modèles neuro-flous hybrides [32].

Les Modèles neuro-flous hybrides ce sont des modèles neuro-floues modernes. Le système peut être exprimé comme un réseau neuronal particulier avec des paramètres flous (un signal flou, des poids flous, une fonction de transfert floue et un module d'adaptation de la structure de RNF par un apprentissage d'un ensemble de données). Plusieurs architectures homogènes mettant en œuvre cette approche hybride, sont décrites dans la littérature Parmi ces architectures les plus utilisées on peut citer l'architecture ANFIS. Un système d'inférence neuro-floue adaptatif « ANFIS » (*Adaptive Network Based Fuzzy Inference System*) est une sorte de réseau neuronal artificiel basé sur le système d'inférence floue Takagi – Sugeno, ce dernier a comme but de transformer les données d'entrée en données de sortie à partir de l'évaluation d'un ensemble des règles). La technique a été développée au début des années 1990. Puisqu'il intègre à la fois les réseaux de neurones et les principes de logique floue, il a le potentiel de capturer les avantages des deux dans un cadre unique. Son système d'inférence correspond à un ensemble de règles « Si – Alors » floues qui ont la capacité d'apprentissage d'approximer des fonctions non linéaires. Par conséquent, ANFIS est considéré comme un estimateur universel [32].

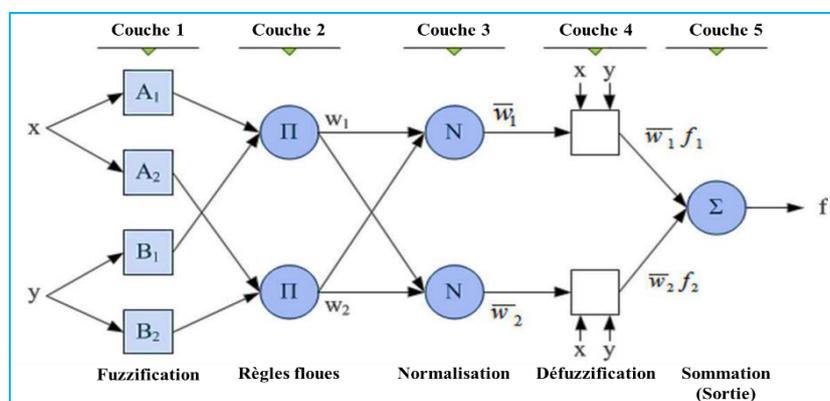
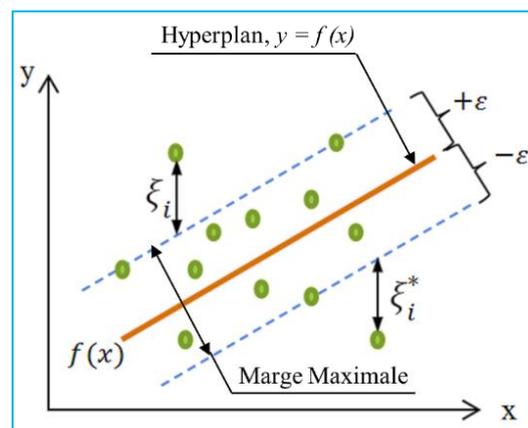


Figure I.21: L'architecture de l'ANFIS [32]

Il est possible d'identifier deux parties dans la structure du réseau, à savoir les parties prémisse et conséquence. Plus en détail, l'architecture de l'ANFIS (figure I. 21) est composée de cinq couches. La première couche prend les valeurs d'entrée et détermine les fonctions d'appartenance leur appartenant. Elle est communément appelée couche de fuzzification. Les degrés d'appartenance de chaque fonction sont calculés en utilisant l'ensemble de paramètres de prémisse. La deuxième couche est chargée de générer les puissances de tir pour les règles. En raison de sa tâche, la deuxième couche est dénommée "couche de règles". Le rôle de la troisième couche est de normaliser les puissances de tir calculées, en divisant chaque valeur par la puissance de cuisson totale. La quatrième couche prend en entrée les valeurs normalisées et l'ensemble de paramètres de conséquence. Les valeurs renvoyées par cette couche sont les valeurs défuzzifiées et ces valeurs sont transmises à la dernière couche pour renvoyer la sortie finale [32].

### I. 3. 1. 3. 5 La méthode de Machine à vecteurs de support (SVM / SVR)

La machine à vecteurs de support (SVM) est technique d'apprentissage de nouvelle génération basée sur la théorie de l'apprentissage statistique. Elle appartient à la classe des algorithmes d'apprentissage supervisé dans lesquels la machine d'apprentissage reçoit un ensemble de fonctionnalités (ou entrées) avec les étiquettes associées (ou valeurs de sortie). Chacune de ces caractéristiques peut être visualisée comme une dimension d'un hyperplan. SVM est un outil puissant pour résoudre des problèmes de classification non linéaire et d'estimation de fonction. Elle est initialement proposée au milieu des années 1990 pour effectuer des tâches de classification [33] a été rapidement étendue pour résoudre des problèmes de régression ou d'approximation de fonctions [34]. La technique SVM utilisée pour la régression non linéaire est connue sous le nom de régression vectorielle de support (SVR).



**Figure I.22:**  $\epsilon$ - zones de précision pour SVR linéaire [35].

La méthode SVM appartient à la classe des algorithmes d'apprentissage supervisé. En cela, la machine d'apprentissage reçoit un ensemble de fonctionnalités (ou de valeurs d'entrée) avec les étiquettes associées (ou les valeurs de sortie). Chacune de ces caractéristiques peut être considérée comme une dimension d'un hyperplan. Il sépare l'hyperplan en deux classes. Ce faisant, l'algorithme SVM essaie d'atteindre une séparation maximale entre les classes. Ceci est illustré à la figure I.22 («  $\xi$  » représente une erreur d'apprentissage dans les ensembles de

données et «  $\epsilon$  » est une précision supposée). Séparer les classes avec une marge maximale minimise l'erreur attendue. L'hyperplan de marge maximale donne la séparation maximale entre les classes de décision. Les exemples de formation les plus proches de l'hyperplan de marge maximale sont appelés vecteurs de support [35].

Le SVR est basé sur la minimisation structurelle du risque contrairement à la minimisation empirique du risque (implique la minimisation de certains indices de performance du modèle tels que la moyenne de l'erreur absolue ou l'erreur quadratique moyenne) couramment utilisée pour d'autres modélisations statistiques ou basées sur l'ANN. Le principe de minimisation du risque structurel implique la détermination d'une fonction  $f(x)$  qui présente au plus  $\epsilon$  des écarts par rapport aux valeurs cibles pour tous les ensembles de données d'apprentissage. Le paramètre de la fonction de perte  $\epsilon$  représente le rayon d'un tube autour de la fonction de régression. Ce tube est appelé zone insensible aux erreurs [35]. Le mappage non linéaire est effectué par transformation non linéaire des entrées en un espace de caractéristiques de grande dimension (similaire à l'entrée pour la projection de couche cachée dans les réseaux de neurones à action directe) suivie d'une corrélation linéaire des termes d'espace de caractéristiques avec la sortie.

### I. 3. 2. Méthodes d'optimisations avancées

L'optimisation est un outil mathématique utilisé pour trouver le minimum et maximum des fonctions soumises à des contraintes. Elle est une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant au choix des conditions de coupe les plus commodes afin d'obtenir des valeurs désirées dans une certaine variable. Ce qui a habituellement un impact économique direct tel que le temps machine ou le coût total d'opération. Il existe de nombreuses méthodes d'optimisation utilisées par les chercheurs dans les industries manufacturières pour l'amélioration continue des processus d'usinage et de la qualité de sortie des produits usinés. Elles sont classées en trois catégories : les méthodes d'optimisations conventionnelles, non-conventionnelles et les méthodes hybrides (figure I. 23).

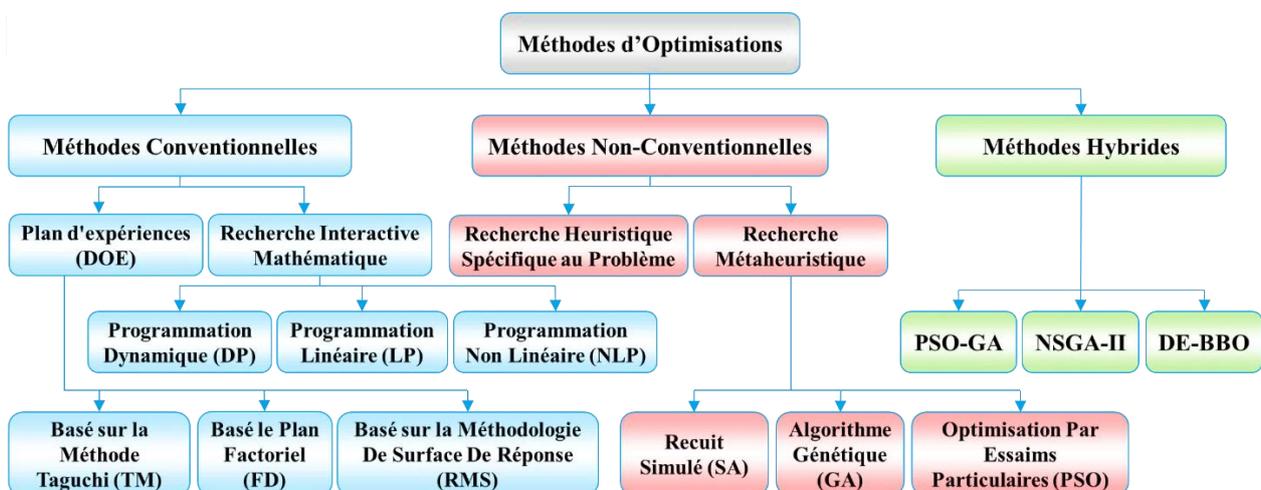


Figure I.23: Méthodes d'optimisation

Les méthodes conventionnelles sont basées sur les méthodes de plan d'expériences et sur une recherche itérative mathématique. Cette dernière repose sur des algorithmes déterministes

(programmation linéaire, non-linéaire et dynamique) avec des règles spécifiques pour passer d'une solution à l'autre. Ces algorithmes ont été appliqués avec succès à de nombreux problèmes de conception technique. Cependant, les problèmes d'optimisation liés à la fabrication sont généralement de nature complexe et caractérisés par des variables mixtes continues-discrètes et des espaces de conception discontinus et non convexes. La détermination des conditions de coupe optimales au moyen de modèles mathématiques rentables est de nature complexe et les techniques d'optimisation ont subi un développement et une expansion substantiels. Par conséquent, les méthodes d'optimisation conventionnelles ne donnent pas de solutions optimales globales car elles sont généralement piégées à l'optimum local [36]. Ces techniques sont généralement lentes à converger. Les techniques d'optimisation conventionnelles sont pour la plupart basées sur des gradients et posent de nombreuses limitations dans l'application aux modèles d'usinage complexes [36]. Pour surmonter ces problèmes, les chercheurs ont proposé des techniques non conventionnelles.

Les méthodes non conventionnelles sont de nature stochastique avec des règles de transition probabilistes. Ces méthodes sont principalement basées sur des phénomènes biologiques, moléculaires ou neurologiques qui imitent la métaphore de l'évolution biologique naturelle et / ou du comportement social des espèces. Pour imiter le comportement efficace de ces espèces, divers chercheurs ont développé des systèmes informatiques qui recherchent des solutions rapides et robustes à des problèmes d'optimisation complexes. Par conséquent, de nombreux nouveaux algorithmes basés sur des techniques de recherche aléatoire sont utilisés pour résoudre des problèmes d'optimisation d'usinage [36]. Des exemples de ces algorithmes incluent le recuit simulé (SA), l'algorithme génétique (GA), l'optimisation des essaims de particules (PSO), la colonie d'abeilles artificielle (ABC), l'optimisation des colonies de fourmis (ACO), etc.

Les méthodes non conventionnelles sont naturellement inspirées et donnent une meilleure solution, sinon la meilleure, en moins de temps par rapport aux méthodes conventionnelles. À partir de ces méthodes basées sur l'intelligence artificielle, un processus d'hybridation est en cours pour accumuler les qualités des méthodes individuelles dans leurs homologues hybrides. Les systèmes hybrides d'intelligence artificielle comprennent un domaine de recherche de l'intelligence computationnelle se concentrant sur des combinaisons synergiques d'approches multiples pour développer la prochaine génération de systèmes intelligents. L'informatique neuronale, l'apprentissage automatique, la logique floue, les algorithmes évolutifs et les méthodes basées sur les agents sont parmi les principales composantes de cette discipline. Récemment, les systèmes intelligents hybrides sont devenus populaires en raison de leurs capacités à gérer de nombreux problèmes complexes du monde réel impliquant l'imprécision, l'incertitude, l'imprécision et la haute dimensionnalité [36]. Parmi ces algorithmes on note : la technique hybride Neuro - Génétique « ANN-GA » basée sur la combinaison des réseaux de neurones artificiels avec les algorithmes génétiques, la technique hybride d'algorithme génétique et d'optimisation de l'essaim de particules « PSO-GA », la technique hybride évolution différentielle avec la biogéographie « DE-BBO », l'algorithme génétique de tri non dominé II « NSGA-II » et la méthode de recherche hybride basée sur l'algorithme de colonies d'abeilles artificielles (ABCA) avec recherche d'harmonie (HS).

### **I. 3. 2. 1. Approche basée sur la méthode RMS**

L'optimisation des réponses basé sur la méthodologie de surface de réponse (MSR) appelé aussi approche de la fonction de désirabilité (DF) aide à identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrées qui optimisent une réponse unique ou un ensemble de réponses. Elle est l'une des méthodes les plus largement utilisées dans l'industrie pour l'optimisation des processus de réponses multiples. Elle est basée sur l'idée que la « qualité » d'un produit ou d'un processus qui présente de multiples caractéristiques de qualité, dont l'une d'entre elles se situe en dehors de certaines limites « souhaitées », est totalement inacceptable. Le procédé trouve des conditions de fonctionnement qui fournissent les valeurs de réponse "les plus souhaitables". L'approche « DF » permettant un compromis entre diverses réponses grâce à la fonction de désirabilité qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes par le biais de fonction de désirabilité élémentaire et variant entre « 0 » et « 1 ».

### **I. 3. 2. 2. Analyse relationnelle grise (Grey)**

Un système avec des informations pertinentes est un système blanc, tandis qu'un système avec des informations inconnues est un système noir. Tout système situé entre ces deux est un système conforme avec des informations médiocres et imitées. Dans les problèmes du monde réel, la situation ne peut jamais être parfaitement noire (sans informations) ou parfaitement blanche (avec des informations complètes). Les situations entre ces extrêmes sont décrites comme étant grises, brumeux ou floues. Par conséquent, un système gris signifie qu'un système dans lequel une partie de l'information est connue et une partie de l'information est inconnue.

Avec cette définition, la quantité et la qualité des informations forment un continuum allant d'un manque total d'informations à des informations complètes du noir au gris en passant par le blanc. Puisque l'incertitude existe toujours, on est toujours quelque part au milieu, quelque part entre les extrêmes, quelque part dans la zone grise. Au milieu, les systèmes gris donneront une variété de solutions disponibles. L'analyse relationnelle de Gray, basée sur cette théorie, peut-être davantage adaptée pour résoudre les interrelations complexes entre les caractéristiques de performance désignées. Grâce à cette analyse, la note relationnelle grise est définie favorablement comme un indicateur de multiples caractéristiques de performance pour l'évaluation. Ces dernières années, l'analyse relationnelle grise est devenue l'outil puissant pour analyser les processus aux multiples caractéristiques de performance. Il fournit également une solution efficace aux problèmes d'entrées multiples et de données discrètes. Dans l'analyse relationnelle grise, le problème complexe d'optimisation des réponses multiples peut être simplifié en une optimisation du niveau relationnel gris à réponse unique [37], [38], [39].

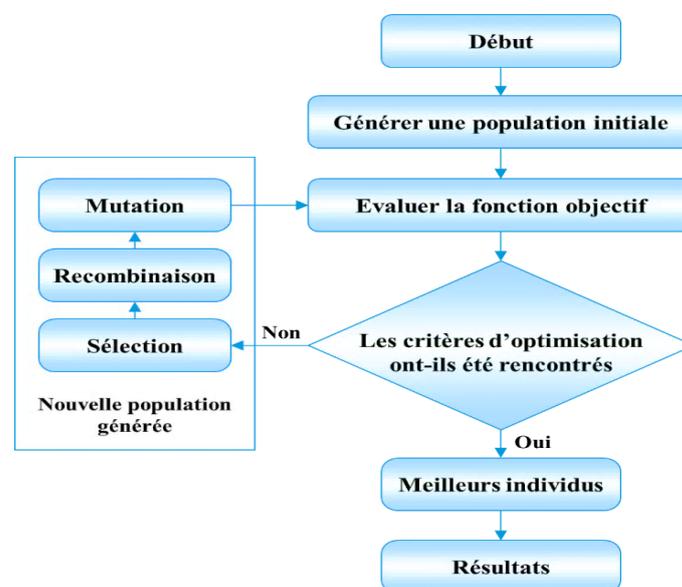
L'utilisation de l'Analyse Relationnelle Gris (GRA) contient les étapes suivantes :

- **Étape 1** : La normalisation ;
- **Étape 2** : Calcul des coefficients du Relationnel Gris ;
- **Étape 3** : Calcul du GRG (Grey relational grade).

### I. 3. 2. 3. Algorithmes Génétiques (GA)

L'algorithme génétique (GA) est l'algorithme de recherche heuristique adaptative basé sur la mécanique de la génétique et la sélection naturelle. GA est une famille de modèles informatiques inspirés de la théorie de l'évolution de Darwin, c'est-à-dire la survie du plus apte. Dans la nature, la compétition entre les individus pour les ressources fait que les individus les plus aptes dominent sur les plus faibles.

La mise en œuvre de l'AG commence par une population aléatoire de chromosomes. Ensuite, ces structures sont évaluées et attribuées en opportunités de reproduction, de sorte que les chromosomes représentant la meilleure solution pour la cible aient plus de chances de se reproduire que les chromosomes qui sont des solutions plus pauvres. Par conséquent, la qualité d'une solution est généralement définie par rapport à la population actuelle. Une population est actionnée par trois opérations fondamentales, à savoir, reproduction (pour remplacer la population avec le grand nombre de bonnes cordes ayant des valeurs élevées de forme physique), croisement (pour produire de nouveaux chromosomes en combinant les diverses paires de chromosomes dans la population), et mutation (pour la légère modification aléatoire des chromosomes). Un ordre de ces opérations constitue une génération. Les répétitions de processus jusqu'au système convergent à l'exactitude exigée après beaucoup de générations. Les algorithmes génétiques ont été trouvés très puissants en découvrant le minimum global. L'organigramme du processus d'algorithme génétique est présenté à la figure I.24 [40].



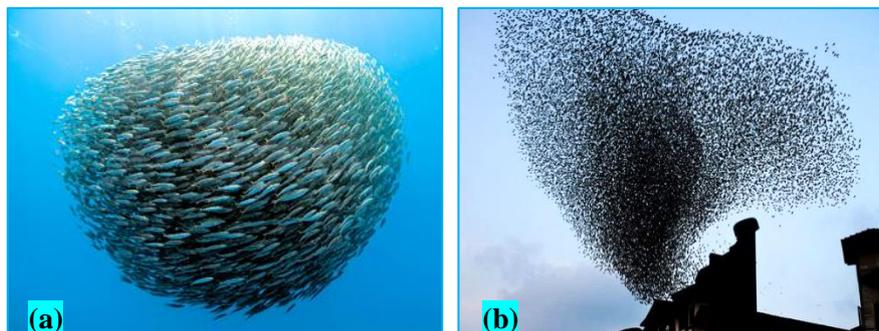
**Figure I.24:** L'organigramme du processus d'algorithme génétique [40].

Il y a plusieurs raisons pour choisir l'algorithme génétique. Premièrement, quand la conception de l'algorithme est faite, on a la possibilité d'utiliser n'importe quel langage informatique ou mathématique pour l'implantation. Un logiciel d'optimisation spécifique n'est pas nécessaire. Ensuite, ce type d'algorithme est reconnu pour être très robuste à l'utilisation. Cette robustesse se traduit principalement par deux caractéristiques intéressantes : il n'est pas nécessaire de fournir un point de départ pour démarrer l'optimisation et l'algorithme résiste assez bien au blocage dans des extremums locaux. Une autre caractéristique intéressante de

l'AG est qu'il améliore les solutions en cours d'optimisation. Plus on lui donne du temps, plus il s'approche de l'optimum. Mais si on a besoin d'une réponse, même s'il n'a pas eu le temps de converger, il est généralement capable de nous fournir une solution valide, même si elle n'est pas optimale, ce qui vaut toujours mieux que ne pas avoir de réponse du tout [16].

#### I. 3. 2. 4. Optimisation des essais de particules (PSO)

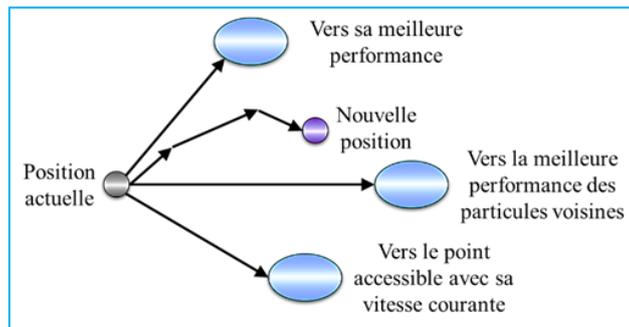
L'optimisation par essaim de particules (*Particle Swarm Optimization* (PSO)) est une méthode d'optimisation stochastique pour les fonctions non-linéaires, basée sur la reproduction d'un comportement social tel que les oiseaux, les poissons, etc, elle a été développée par le Dr. Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et le Dr. James Kennedy (socio-psychologue) en 1995 [41], [42]. Cette technique d'optimisation est issue d'une analogie avec les comportements collectifs de déplacements d'animaux. En effet, chez certains groupes d'animaux, comme les groupes d'oiseaux, les bancs de poissons et les groupes des abeilles. Chez les bancs de poissons on peut observer des dynamiques de déplacement relativement complexes, alors que les individus eux-mêmes n'ont accès qu'à des informations très limitées, comme la position et la vitesse de leurs voisins les plus proches. On peut par exemple observer qu'un banc de poissons est capable d'éviter une attaque d'un prédateur. Ce banc va tout d'abord se diviser en deux groupes, puis il se reconstitue de nouveau tout en maintenant la cohésion du banc, comme il est indiqué sur la Figure I.25-(a).



**Figure I.25:** (a) Schéma de banc de poissons, (b) Essaim d'oiseaux troupeau ciel noir

Ce comportement social basé sur l'analyse de l'environnement et du voisinage constitue alors une méthode de recherche d'optimum par l'observation des tendances des individus voisins. Chaque individu utilise, non seulement sa propre mémoire, mais aussi les informations locales sur ses plus proches voisins pour décider de son propre prochain déplacement. Des règles simples, telles que « aller à la même vitesse que les autres », « se déplacer dans la même direction » ou encore « rester proche de ses voisins » sont des exemples de comportements qui suffisent à maintenir la cohésion de tout le groupe, et à permettre des comportements collectifs complexes et adaptatifs. Kennedy et Eberhart se sont inspirés de ces comportements socio-psychologiques pour créer l'algorithme du PSO. Un essaim de particules, qui représente un groupe de solutions potentielles au problème d'optimisation, se déplace sur tout l'espace de recherche pour trouver l'optimum global. Le déplacement d'une particule est influencé par les trois composantes à savoir [43], [44]. : une composante physique (la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement), une composante cognitive (la particule tend à se diriger

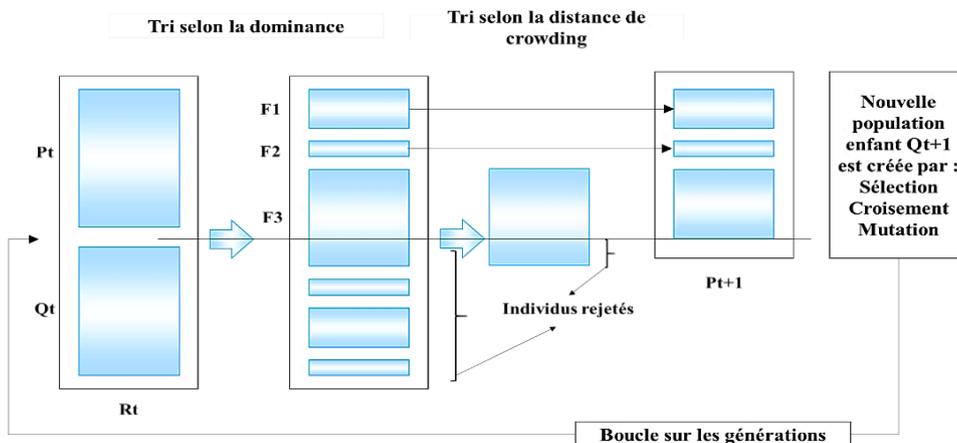
vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée) et une composante sociale (la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins). Dans le cas d'un problème d'optimisation, la qualité d'un site de l'espace de recherche est déterminée par la valeur de la fonction coût en ce point. La Figure I.26 illustre la stratégie de déplacement d'une particule [44].



**Figure I.26:** Déplacement d'une particule [44].

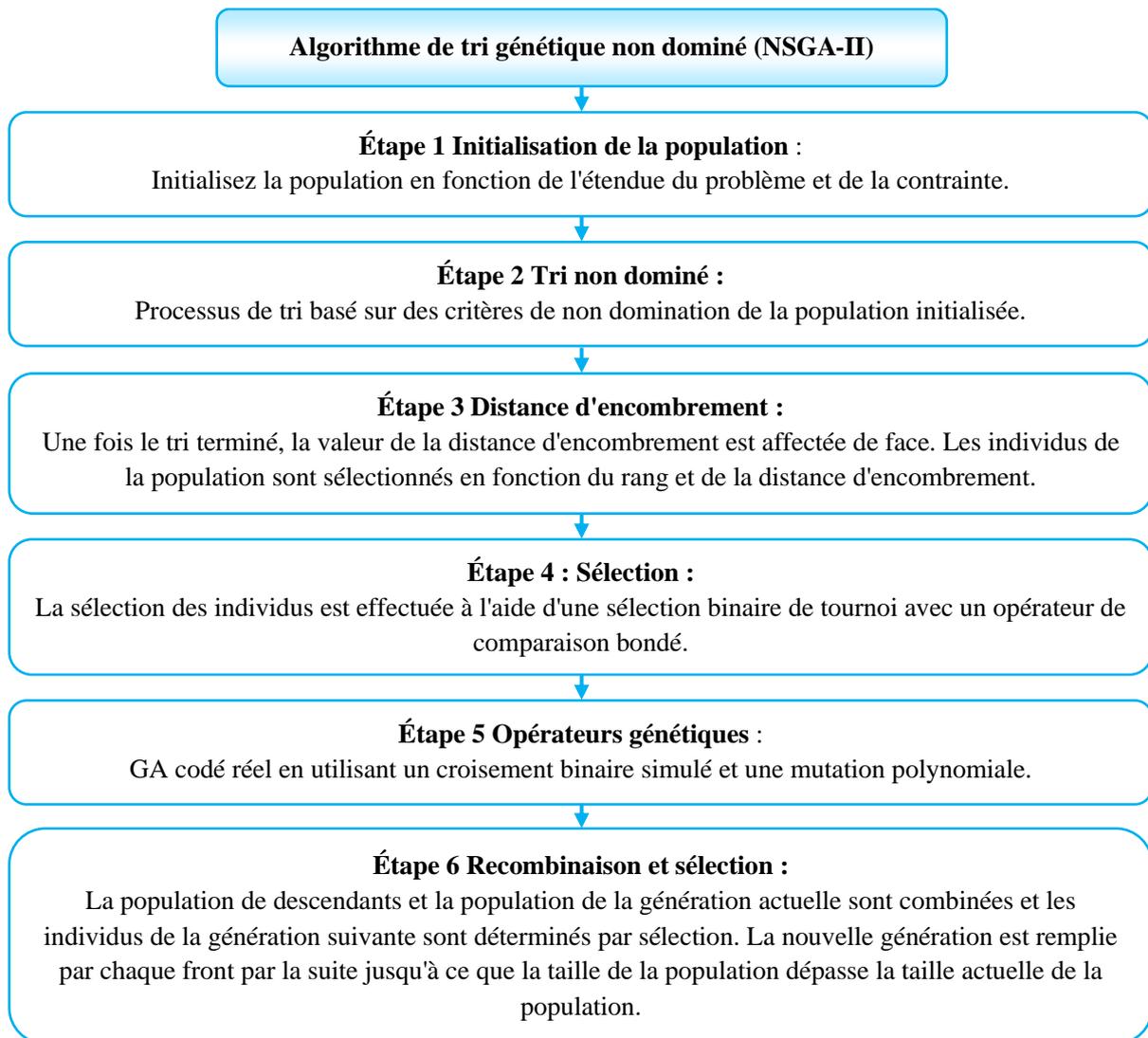
### I. 3. 2. 5. Algorithme de tri génétique non dominé (NSGA-II)

NSGA (*Non dominated Sorting Genetic Algorithm*) est un algorithme génétique populaire basé sur la non-dominance pour l'optimisation multi objective. C'est un algorithme très efficace mais qui a été généralement critiqué pour sa complexité de calcul, son manque d'élitisme et pour le choix de la valeur optimale du paramètre pour le partage des paramètres. Une version modifiée, NSGA-II a été développée, qui a un meilleur algorithme de tri, incorpore l'élitisme et aucun paramètre de partage n'a besoin d'être choisi a priori. NSGA-II est l'un des algorithmes d'optimisation multi-objectifs les plus populaires. Il est considéré comme étant le meilleur et le plus efficace de ses prédécesseurs, vu qu'il ne nécessite aucun réglage de paramètres. Il utilise aussi une méthode de tri basée sur le principe de non dominance qui est plus rapide. Cet algorithme est conçu en utilisant une approche élitiste permettant de ne retenir que les meilleurs individus (solutions) au cours des générations. Avec la notion de dominance. Le principe de fonctionnement de l'algorithme génétique NSGA-II est représenté sur la figure I.27 [45].



**Figure I.27::** Principe de fonctionnement de l'algorithme NSGA-II [45]

En règle générale, NSGA-II peut être grossièrement détaillé dans la figure I. 28.



**Figure I.28:** Procédure de l'algorithme de tri génétique non dominé (NSGA-II)

## I. 4. Etat de l'art

Afin de faire ressortir les objectifs de cette recherche, une revue de la littérature a été réalisée. Cela donne des informations générales sur les questions à refléter dans cette thèse et l'objectif est de souligner la pertinence de la présente étude. L'usabilité des aciers durs, la description des phénomènes régissant le processus de coupe dans ce procédé (les efforts de coupe, l'intégralité de surface, l'usure de l'outil et les mécanismes de formation du copeau) et l'approche de modélisation et d'optimisation avancées basées sur l'intelligence artificielle sont abordés.

### I. 4. 1. Usinage des matériaux durs

En raison des développements récents des matériaux modernes d'outil de coupe, la productivité d'usinage des aciers durcis a augmenté sensiblement. De nombreuses études ont été menées pour étudier l'influence des différents paramètres de la coupe, à savoir le matériau,

la forme, le revêtement, la géométrie de l'outil et les conditions de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage des matériaux durs à partir d'un nombre suffisant d'expériences en utilisant la méthodologie des plans d'expériences. Cette dernière consiste à n'étudier que certains points du domaine expérimental, tout en appréhendant le phénomène physique étudié sur l'ensemble du domaine considéré. Pour analyser l'usinage des matériaux durs, plusieurs paramètres doivent être pris en compte. Il comprend la géométrie de l'outil de coupe, l'usure de l'outil, la formation de copeaux et les forces de coupe développées dans l'usinage. De plus, l'un des résultats importants de l'usinage dur est l'intégrité de la surface qui joue un rôle important dans tous les domaines de la tribologie.

L'usinage des aciers durs est une technologie récente de mise en forme des pièces mécaniques par enlèvement de matière qui peut être définie comme l'opération d'usinage d'une pièce ayant une valeur de dureté de 45 à 68 [46]. (Pièces difficilement usinables). En conséquence, les matériaux de l'outil sont extra durs. Les principaux matériaux pour outils comprennent : la céramique, le nitrure de bore cubique (CBN) et le CBN revêtu, le nitrure de bore cubique polycristallin (PCBN), le diamant polycristallin (PCD) ou le carbure de tungstène (WC) revêtu de nitrure de titane (TiN) [47].

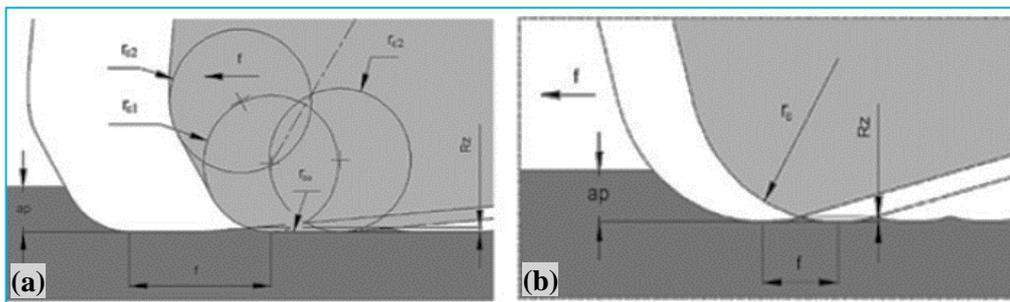
Chavoshi et Tajdari [48] ont défini que le tournage dur est un processus dans lequel des pièces avec une valeur de dureté minimale de 45 HRC sont usinées en utilisant des plaquettes appropriées. Il est mieux réalisé avec des plaquettes de coupe en CBN (nitrure de bore cubique), en cermet ou en céramique. Le tournage dur étant une coupe en un seul point, un avantage significatif de ce processus est la capacité à produire des contours et à générer des formes complexes avec la capacité de mouvement inhérente aux machines-outils modernes. Les applications de tournage dur de haute qualité nécessitent une machine-outil correctement configurée et l'outillage approprié. Pour de nombreuses applications, l'outillage CBN sera le choix le plus dominant. Cependant, Ceramic et Cermet ont également des rôles dans ce processus. Fnides et al [49], Bouacha et al. [50] et Fnides et al. [51] affirment que ce procédé de tournage dur est devenu une pratique courante dans l'industrie car il augmente la productivité et réduit la consommation d'énergie.

Aujourd'hui, les activités de recherche dans le secteur de tournage dur sont principalement axées sur l'usure des outils CBN (le matériau majoritairement utilisé dans l'outil de coupe) ([52], [53] et [54]). À l'opposé, de nouvelles données sur le tournage des aciers pour roulements AISI D3 et 100Cr6 trempés à l'aide d'outils en céramique sont rapportées par Benga et Abrão [55]. En général, les outils en céramique ont attiré l'attention des chercheurs et certains travaux peuvent être mis en valeur. Avec le développement des matériaux d'outils céramiques, ils sont de plus en plus largement utilisés dans le domaine de la coupe des métaux, car leurs propriétés mécaniques et leurs performances de coupe ont été grandement améliorées. Ils ont été utilisés dans de nombreuses applications en raison de leurs propriétés améliorées telles qu'une bonne résistance aux chocs thermiques, une bonne résistance à haute température, une résistance au fluage, une faible densité, une dureté et une résistance à l'usure élevées, une résistance électrique et une meilleure résistance chimique [56]. Dewes & Aspinwall [57] ont découvert que les céramiques à base d'alumine ( $Al_2O_3$ ) sont considérées comme les matériaux d'outils les

plus appropriés, entre autres, pour l'usinage des aciers trempés en raison de leur dureté à chaud, de leur résistance à l'usure et de leur inertie chimique.

L'effet du matériau de l'outil (céramique et CBN) et des paramètres de coupe (vitesse, avance et profondeur de coupe) sur la rugosité de la surface a été étudié par Darwish [58] à l'aide de plans factoriels à deux niveaux (23). Il a en outre démontré un effet favorable des inserts en céramique sur la rugosité de surface par rapport aux inserts CBN à des vitesses d'avance élevées et faibles. Ferreira et al [59] ont évalué le processus de tournage de l'acier 54 HRC AISI H13 en utilisant des outils en céramique de type conventionnel et multi-rayons dans des conditions d'usinage à sec en termes de rugosité de surface. Il a été constaté que les outils multi-rayons surpassaient les outils conventionnels.

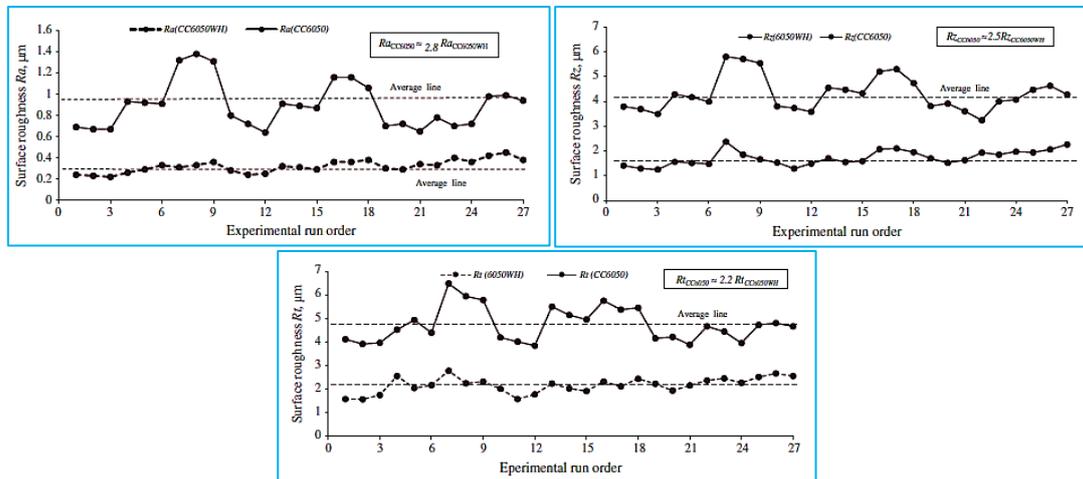
Les plaquettes d'une géométrie spéciale à rayons multiples (wiper) sont utilisées dans les opérations d'usinage en raison de leur compétence à générer une surface usinée supérieure. La rugosité de surface est une exigence majeure pour de nombreux composants industriels et est l'un des paramètres importants considérés pour décrire l'usinabilité des métaux et des alliages métalliques. La technologie wiper pour le tournage se compose de séries de rayons qui forment l'arête de coupe. Dans l'insert wiper adjacent au rayon du nez, 3 à 9 rayons plus petits ont été introduits (figure I. 29). Pour assurer une meilleure finition de surface, les paramètres de fonctionnement sont importants et sélectionnés très soigneusement, la géométrie et le matériau de l'outil, et la fiabilité de surface est très essentielle pour les composants usinés ayant des contraintes thermiques et mécaniques élevées.



**Figure I.29:** Évaluation des inserts avec (a) Wiper et (b) géométrie conventionnelle [60]

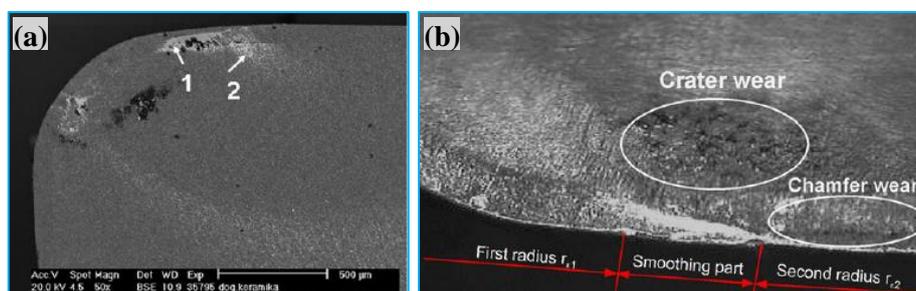
Grzesik et Wanat [61] ont présenté des résultats expérimentaux pour l'usinage de pièces AISI 5140 (DIN 41Cr4) avec une dureté de  $60 \pm 1$  HRC à l'aide d'inserts céramiques conventionnels et wiper. Les caractéristiques géométriques caractéristiques des surfaces obtenues dans ces deux opérations de tournage ont été évaluées au moyen de paramètres de rugosité de surface bidimensionnels (2D) représentatifs et de quelques visualisations 3D, qui ont permis une caractérisation plus complète de la topographie de la surface et la prédiction de ses propriétés de service. Les résultats montrent que le tournage dur de finition avec des inserts wiper offre une rugosité de surface comparable aux effets obtenus à une vitesse d'avance inférieure lors des opérations conventionnelles. Ils ont déterminé que les surfaces produites par les outils wiper contenaient des pics émoussés avec des pentes nettement plus petites, ce qui se traduisait par de meilleures propriétés de roulement.

Elbah et al. [62] ont comparé les valeurs de rugosité de surface obtenues avec des plaquettes en céramiques de géométries wipers et conventionnels lors du tournage dur de l'acier AISI 4140. Ils ont révélé que la qualité de surface améliorée est obtenue avec une géométrie wiper avec des valeurs de rugosité de surface deux fois plus faibles à ceux obtenues par les plaquettes en céramique conventionnelles. La valeur moyenne des rapports (L27) pour les paramètres de rugosité (Ra, Rz et Rt) est respectivement de (2,8 ; 2,5 et 2,2). (Figure I.30).



**Figure I.30:** Comparaison entre les outils de géométries Wiper (CC6050WH) et géométrie conventionnelle (CC6050) pour la rugosité de surface Ra [62].

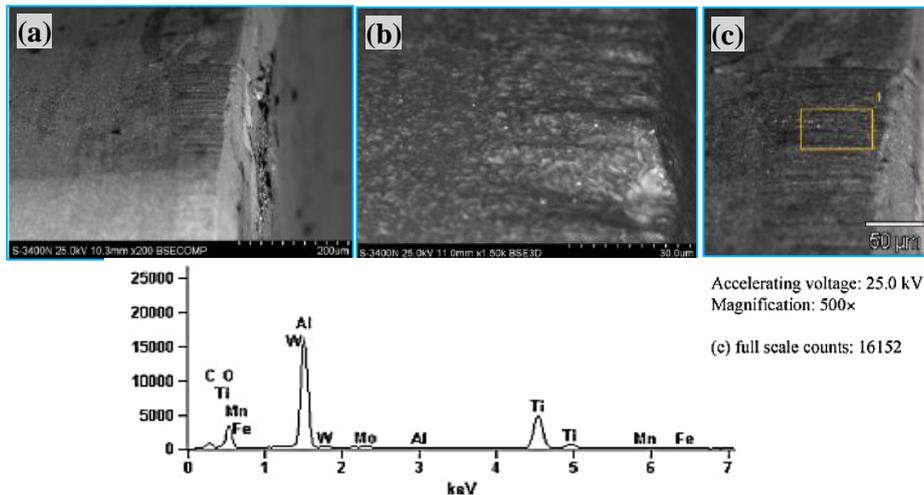
W. Grzesik [63] a réalisé une autre étude qui explore les mécanismes d'usure produites par des plaquettes de coupe en céramiques mixtes sur des éprouvettes d'acier allié 60 HRC (équivalent à AISI 5140 ou DIN 41Cr4) dans les opérations de tournage à sec et dur. Plusieurs tests d'usure d'usinage ont été réalisés avec une vitesse d'avance variable, une vitesse de coupe constante de 100 m / min et une faible profondeur de coupe de 0,2 mm. La microscopie optique (LOM), la microscopie électronique à balayage (MEB) et la technique des électrons à rétrodiffusion (BSE) ont été utilisées pour observer les caractéristiques morphologiques des surfaces usées produites par divers mécanismes d'usure (figure I.31).



**Figure I.31:** (a) Image BSE d'un insert en céramique wiper montrant deux types de couche de transfert sur la face du râteau. 1 - masse compacte, 2 - patch dispersé. (b) Image optique de la face de râteau montrant la configuration wiper constituée de la partie de lissage avec un rayon  $r_{bo}$  entre les coins avec des rayons  $r_{e1}$  et  $r_{e2}$  [63].

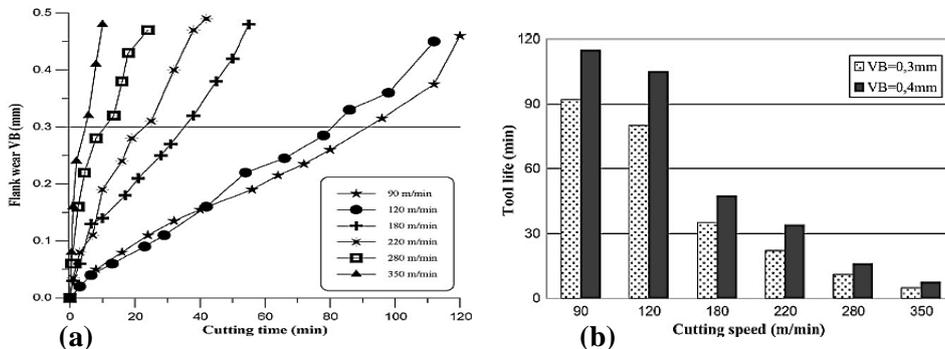
De plus, les compositions élémentaires des produits d'usure ont été évaluées par micro-analyse aux rayons X à dispersion d'énergie (EDX), appelée parfois spectroscopie à rayons X à

dispersion d'énergie (EDS) (figure I.32). En conséquence, les aspects microscopiques et microstructuraux de l'usure des outils en céramique ont été pris en compte. En général, les mécanismes d'usure identifiés dans les essais d'usinage impliquent l'abrasion, la fracture, l'écoulement plastique et les couches transférées, le BUE et les effets tribochimiques. Des symptômes d'usure spécifiques sont apparus en fonction des conditions mécaniques et thermiques générées dans les zones d'usure. En particulier, deux types de transfert de matière avec des morphologies différentes se produisant à l'interface râteau-copeaux sont distingués.



**Figure I.32:** Image ESB du flanc (a) avec spectre EDS au point 1 [63].

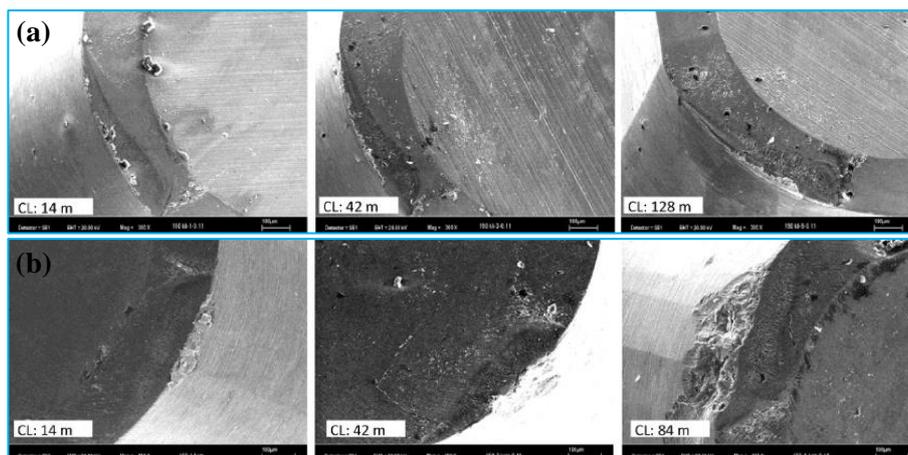
Yallese M.A. et al [64] ont conduit une recherche expérimentale pour déterminer l'évolution de l'usure des outils en nitrure de bore cubique (CBN) lors du tournage dur de l'acier 100Cr6. Une étude de rugosité a été menée aussi sur la pièce usinée en fonction des paramètres du régime de coupe. Les résultats expérimentaux sont utilisés pour établir des relations qui régissent l'usure des flancs, le critère de rugosité et les forces de coupe en tournage dur. Les résultats montrent que l'outil CBN offre une bonne résistance à l'usure malgré l'agressivité du 100Cr6 à 60HRC. La majeure partie de la chaleur générée lors de l'usinage est principalement dissipée à travers le copeau. Au-delà de 280 m / min, le système d'usinage devient instable et produit des étincelles et des vibrations importantes après seulement quelques minutes de travail.



**Figure I.33:** (a), Évolution de l'usure des flancs CBN (VB) en fonction du temps de coupe et de la vitesse. (b), Durée de vie de l'outil CBN à différentes vitesses de coupe [64].

La figure (I. 33 a et I. 33 b) illustre l'évolution de VB de la plaquette de coupe en CBN en fonction du temps de coupe et la durée de vie de l'outil CBN respectivement pour des vitesses allant de 90 à 350 m / min. VB est plutôt régulier et lent à 90 et 120 m / min. l'usure a augmenté de manière notable après 120m / min. confortant le fait que VB est considéré comme le principal critère d'évaluation de la durée de vie de l'outil. L'usure admissible de l'outil ( $[VB] = 0,3$  mm) est atteinte en 35 min à 180 m / min alors qu'à 350 m / min la durée de vie n'est que de 5 min. En règle générale, le comportement de l'outil est influencé par plusieurs facteurs, notamment la vitesse de coupe. L'impact de la vitesse sur la durée de vie de l'outil pour les deux critères d'usure admissibles (c'est-à-dire  $[VB] = 0,3$  ou  $0,4$  mm) peut être déduit de la Figure I. 33 (a).

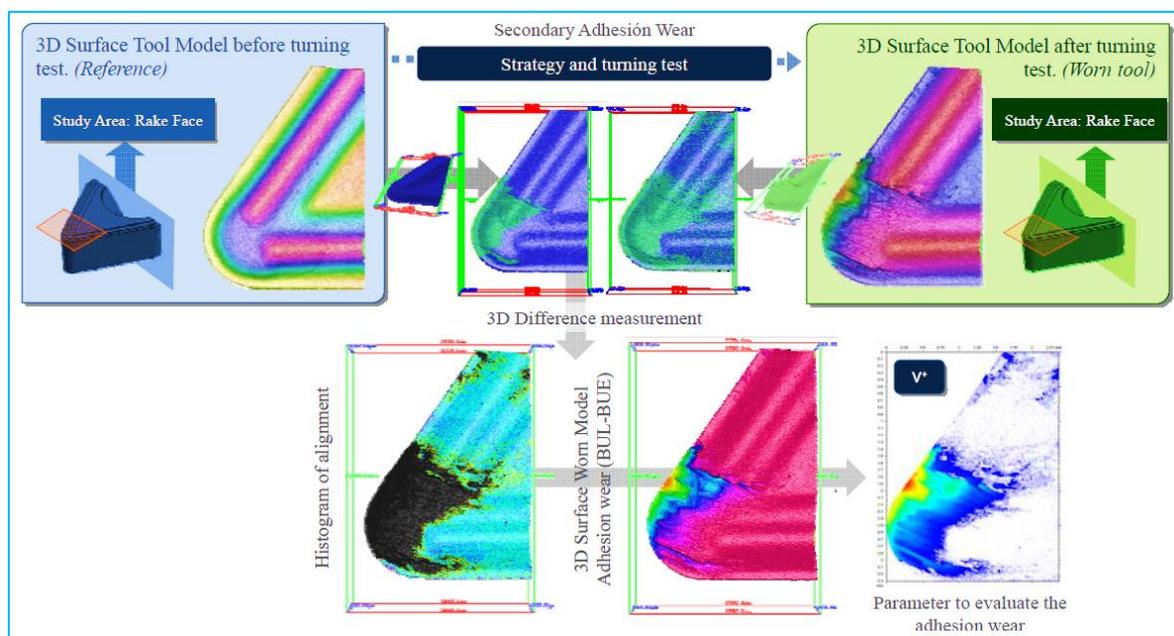
Dans les travaux de Aslantas K. et al [65], l'usinabilité de l'acier trempé d'AISI 52100 durci ( $\sim 63\text{HRC}$ ) en utilisant des plaquettes de coupe en céramique mixtes  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiCN}$  revêtu et non revêtu, a été évaluée par des mesures de l'usure de l'outil, de la durée de vie de l'outil et de l'état de surface de la pièce. Les mécanismes d'usure et les modèles des inserts en céramique dans le tournage dur de l'AISI 52100 trempé sont discutés. Selon les résultats obtenus, les dommages de type fracture et écaillage se produisent plus fréquemment dans les outils non revêtus, tandis que l'usure en cratère est le type de dommage le plus courant dans les outils revêtus de TiN (figure I. 34 (a) et (b)).



**Figure I.34:**  $V_c = 150$  m / min,  $f = 0,11$  mm / tr (a) et (b), formation d'usure du cratère dans l'outil de coupe en céramique mixte revêtu de TiN et non revêtu respectivement (CL: longueur de coupe) [65].

Le résultat le plus important obtenu de l'étude est que le revêtement TiN et l'usure du cratère affectent la direction d'écoulement des copeaux. Dans un outil en céramique non revêtu, la formation du cratère entraîne une diminution du rayon de courbure ascendante du copeau. En outre, un outil de coupe non revêtu entraîne une augmentation de la température à l'interface du copeau d'outil. Cela provoque un effet bimétallique thermique entre les côtés supérieur et inférieur du copeau qui force le copeau à s'enrouler sur un rayon plus petit. Les copeaux s'accumulent devant l'outil et adhèrent à la pièce en fonction de la durée de la coupe. Cela entraîne une détérioration de la qualité de la surface. Le revêtement TiN garantit non seulement que l'outil de coupe est plus résistant, mais garantit également que la qualité de la surface est maintenue pendant les processus de coupe.

Le concept d'usure des outils est généralement lié à la perte de matériau de l'outil. Selon cette idée, des normes, procédures et méthodologies ont été élaborées pour évaluer l'usure des outils. Cependant, actuellement, le concept d'usure des outils doit être envisagé dans un sens plus large. En effet, de nos jours, l'usure de l'outil doit être liée aux modifications de l'outil de coupe provoquées par le processus d'usinage. Ces changements contiennent à la fois des variations de ses propriétés géométriques et physico-chimiques qui modifient les conditions de coupe initiales. Par conséquent, les modifications géométriques de l'outil peuvent également inclure l'ajout de matière. Le transfert du matériau de coupe à l'outil de coupe pendant le processus d'usinage des alliages d'aluminium, est fortement lié aux mécanismes d'usure par adhérence secondaire ou indirecte, sous forme de couche sur la face de râteau de l'outil et / ou en vrac situé sur le tranchant.

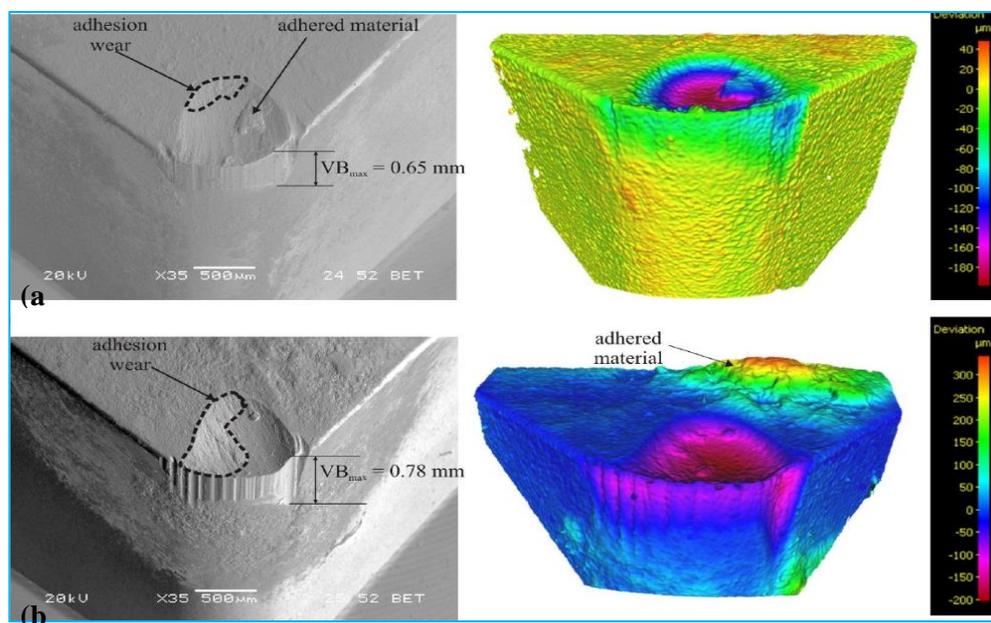


**Figure I.35:** Schéma de la méthodologie proposée suivie sur la procédure expérimentale,  $v = 50$  m / min,  $f = 0,30$  tr / min,  $d = 1$  mm [69].

Selon Byrne et al [66], les tendances de tournage dur de haute précision atteignent la tolérance ISO IT2 lorsqu'elles sont combinées avec une rugosité  $R_z$  inférieure à  $1 \mu\text{m}$ . Outre la précision de la machine-outil, les caractéristiques de micro géométrie de l'outil [67], ainsi que le niveau d'usure sont un problème critique à évaluer. Les paramètres d'usure traditionnels disponibles dans l'ISO 3685-1993 [68], comme VBB ou KT, ne sont pas sensibles lorsque la surface d'usure de l'outil est petite et que des phénomènes importants peuvent être ignorés. Les méthodes de mesure optique modernes, comme le microscope à variation de mise au point (FVM), qui combine la faible profondeur de champ d'un système optique avec un balayage vertical pour mesurer les informations topographiques et de couleur réelle d'une surface complexe avec des détails complexes, peuvent fournir des ressources pour mettre en œuvre de nouvelles techniques pour évaluer l'usure des arêtes de coupe dans les processus d'usinage. García-Jurado et al [69] ont obtenu des modèles tridimensionnels haute résolution à partir d'outils de coupe testés avec des techniques de microscopie à variation de focalisation (FVM). Les paramètres d'usure par adhérence ont été définis dans les images FVM et ont permis

d'évaluer les effets d'usure sur les outils de coupe WC-Co dans le tournage à sec de l'alliage UNS-A92024-T3 (figure I. 35). Mainé et al [70] ont utilisés la même méthodologie pour évaluer l'usure par adhérence des outils de coupe, une méthode basée sur des images de microscopie a été utilisée afin d'évaluer l'extension (surface) et le volume du matériau collé dans le tournage à sec d'un alliage aluminium-cuivre aérospatial (UNS A9204). L'usinage à sec a été choisi afin d'augmenter les performances environnementales, en évitant l'utilisation de lubrifiants qui peuvent nuire à l'environnement.

Maruda R. W. et al [71] ont analysés l'usure des outils des plaquettes en carbure cémenté P25 dans le tournage de finition de l'acier au carbone AISI 1045 pour différentes conditions de refroidissement : coupe à sec, refroidissement-lubrification à quantité minimale (MQCL) et MQCL avec additif EP / AW à base d'ester de phosphate. L'analyse volumétrique de l'usure des outils a été réalisée à l'aide d'une machine de mesure à mise au point infinie (IFM) (Figure I.36).



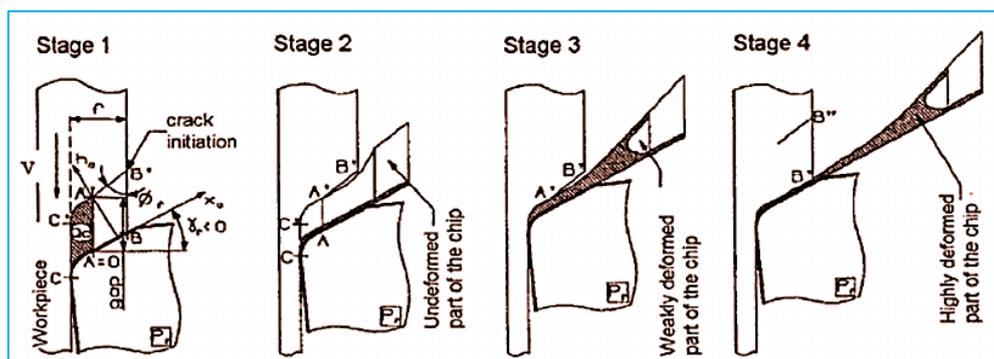
**Figure I.36:** Topographie de la surface de la lame de coupe après tournage avec l'utilisation de la méthode MQCL + EP / AW pour  $E = 26,4 \text{ g/h}$ : a) pointe d'outil T1 -  $P = 5,8 \text{ l/min}$  et  $l = 0,3 \text{ m}$ ; b) Pointe d'outil T2 -  $P = 2,4 \text{ l/min}$  et  $l = 0,2 \text{ m}$  [71].

L'IFM est un appareil de mesure optique 3D qui permet l'acquisition d'ensembles de données à une profondeur de champ élevée. La méthode IFM permet de capturer des images avec une résolution latérale jusqu'à 400 nm et une résolution verticale jusqu'à 20 nm. La version logicielle IFM 6.1 a été utilisée pour collecter et présenter les données de mesure de l'outil. En outre, l'évaluation de l'état de surface de l'outil de coupe, après le processus de tournage, a été réalisée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (SEM) JEOL JSM-5600LV couplé à des systèmes IXRF de microanalyseur à rayons X EDS. Parce que les zones d'usure des outils ont des formes complexes qui sont difficiles à mesurer pour la microscopie électronique en transmission TEM ou d'autres techniques de diffraction, un microscope SEM a donc été utilisé.

De nombreuses recherches sur le tournage dur se sont concentrées sur la compréhension de la formation des copeaux. Dans les procédés conventionnels d'enlèvement de métal, des

copeaux sont formés à la suite du cisaillement des pièces. Les mécanismes de formation des copeaux en tournage dur sont assez différents de ceux des aciers plus tendres, où des copeaux continus ont généralement été observés. Dans le tournage dur, des copeaux dentelés / périodiques en dents de scie se forment. Un tel éclat est le résultat de certains mécanismes interdépendants tels que le cisaillement localisé, le cisaillement adiabatique et le cisaillement catastrophique sous la forme de fissures étendues [72] et [73].

Poulachon et Moison [74] ont effectué des essais d'arrêt rapide pour étudier le mécanisme de formation de copeaux de l'acier AISI 52100 trempé. Ils ont identifié quatre étapes dans la formation d'un copeau en dent de scie, comme le montre la Figure I. 37.

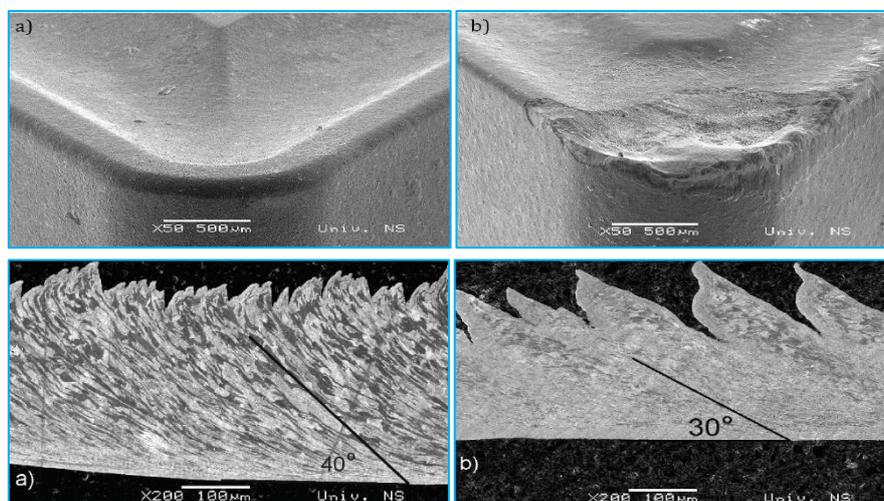


**Figure I.37:** Quatre étapes de formation de copeaux dans l'usinage de l'acier trempé [74].

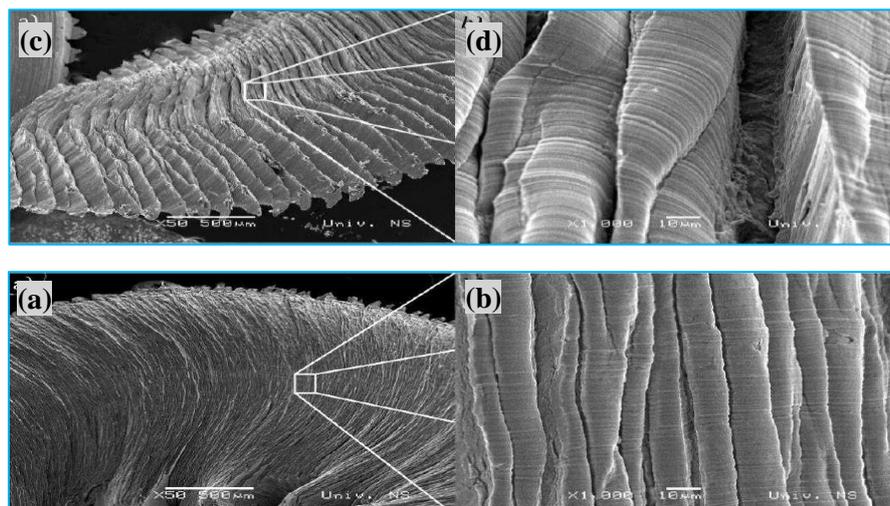
La première étape, l'angle de coupe négatif, induit une distribution des contraintes de compression autour du rayon de l'arête de l'outil. Au niveau de la surface libre du matériau de travail devant le chanfrein de l'outil, l'effet joint des contraintes de faible compression et de cisaillement élevé déclenche une fissure. La fissure est suivie d'un plan de glissement, qui se dirige vers l'arête de coupe. La deuxième étape intervient entre la fissure et le chanfrein de bord où le copeau commence à s'éjecter pratiquement sans aucune déformation. Dans cette étape, la martensite produite par frottement peut se présenter sous la forme de couches blanches à proximité du segment de copeau, et des valeurs élevées de force radiale sont indiquées. La troisième étape est que la ligne d'initiation de fissure et le chanfrein de l'outil deviennent si étroits que la vitesse d'éjection et la déformation plastique de copeau sont très élevées. À ce moment, l'épaisseur de copeau est réduite et le refroidissement de copeau est très rapide. La dernière étape montre que la formation du segment de copeau est terminée. La ligne d'initiation de fissure et le chanfrein de l'outil sont fermés et une nouvelle fissure commence à s'ouvrir en même temps.

Lee et Mathew [75] ont montré que les bandes de cisaillement catastrophiques (bandes blanches) apparaissent dans la zone de déformation secondaire, lors de l'usinage de l'acier AISI 4140 à des vitesses de coupe élevées et que la formation de copeaux peut passer d'un copeau continu à un copeau en dent de scie. John et coll. [76] ont étudié expérimentalement la formation de copeaux lors de l'usinage de l'acier faiblement allié AISI 4340 traité thermiquement. La transition de la formation continue à la formation de copeaux en dents de scie a été observée lors de l'augmentation de la vitesse de coupe, de la vitesse d'avance, de la dureté du matériau de travail et de l'angle d'inclinaison négatif de l'outil.

Antić Aco et al [77] ont analysés l'influence de l'usure des outils sur le mécanisme de segmentation des copeaux. Sur la base des résultats obtenus par l'analyse microscopique d'échantillons de copeaux, une forte corrélation a été établie entre le mécanisme de formation des copeaux, la morphologie des copeaux et le degré d'usure des outils. De plus, à paramètres d'usinage constants, le changement du degré d'usure de l'outil influence les changements de forme des copeaux et le type de segmentation. Pour les régimes d'usinage utilisés dans cette expérience, l'usinage avec de nouvelles inserts d'outils a généré des copeaux continus, c'est-à-dire quasi continus. Une fois que le degré d'usure de l'outil indiqué par  $VB > 0,5$  mm était atteint, le copeau généré était dentelé, avec des lamelles distinctives à la surface libre. Ce type de copeau est caractéristique du ramollissement thermique et du cisaillement adiabatique dans la zone de coupe primaire, ce qui est visible sur les images en coupe de copeau obtenues au microscope électronique su la figure I.38 et 39.



**Figure I.38:** Section de copeaux formée à la vitesse de coupe de 180 m / min, vitesse d'avance 0,2 mm/tr, profondeur de coupe 1,5 mm: a) nouvelle plaquette d'outil, b) plaquette d'outil usée [77].



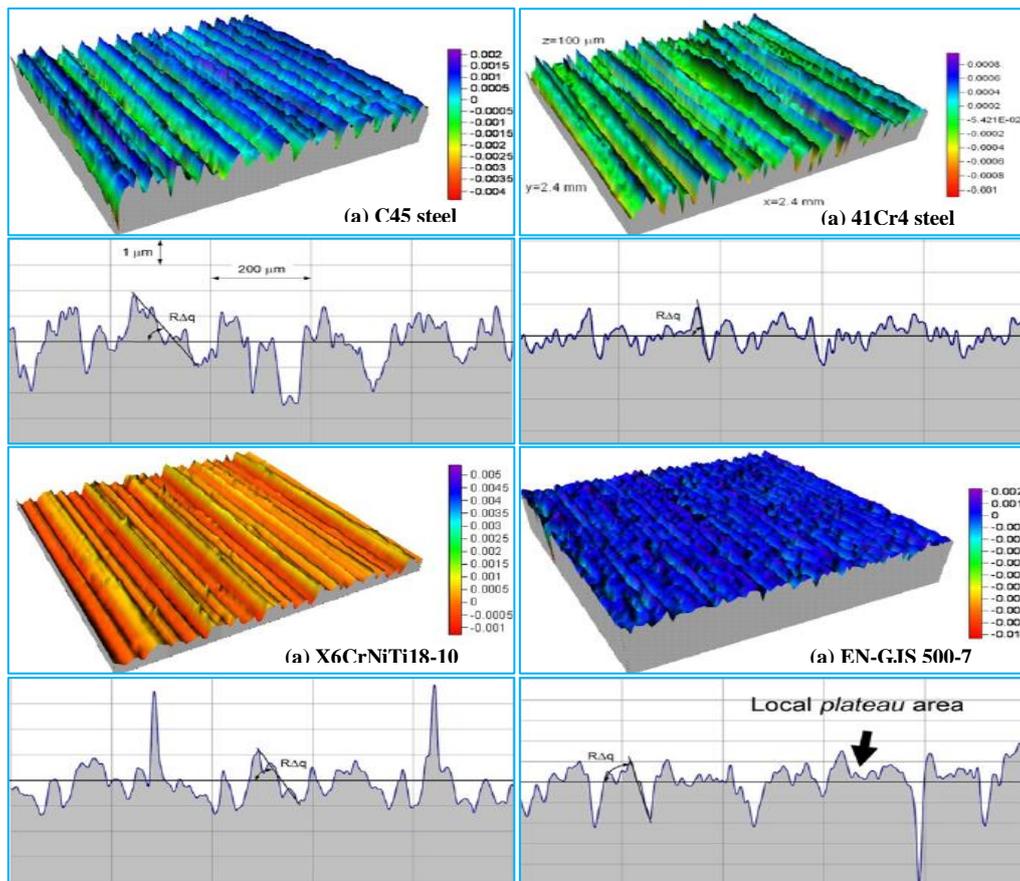
**Figure I.39:** Surface des copeaux libres obtenue avec des plaquettes de coupe neuf ( a , b) et usé ( c , d) à un grossissement 50x et 1000x sur SEM respectivement [77].

L'étude de l'intégrité de surface dépend non seulement de la rugosité de la surface, mais aussi de la dureté de la surface, de la déformation sous la surface, des macro / micro fissures, de

l'écoulement plastique du matériau, des contraintes résiduelles de traction et de la réduction de la durée de vie en fatigue [78]. L'intégrité de surface est l'état de surface intact, développé dans l'usinage en utilisant des processus de fabrication contrôlés. L'intégrité de surface a deux catégories importantes, à savoir, la texture de surface et la métallurgie de surface. La texture de surface est l'état inhérent ou amélioré d'une surface produite lors de l'usinage ou d'une autre opération de génération de surface. La texture de surface est généralement quantifiée en tant que valeurs de rugosité de surface. La rugosité de la surface usinée a un effet important sur les propriétés fonctionnelles et les performances des pièces de machine. Il affecte la résistance à l'usure, la résistance à la fatigue et la résistance à la corrosion de la pièce.

Chou et al [79] ont étudié les effets des conditions de coupe, des propriétés des matériaux et de l'usure des outils CBN sur la qualité de surface. Pour le tournage de finition, l'utilisation d'une faible teneur en CBN produit une meilleure finition de surface par rapport à une teneur plus élevée en CBN, avec une meilleure résistance à l'usure des outils. Par la suite, Chou et Song [80] ont rapporté qu'un grand rayon de nez d'outil donne une finition de surface plus fine lors du tournage de l'acier AISI 52100. Davim et Figueira [81] ont évalué les caractéristiques d'usinabilité pendant le tournage dur de l'acier à outils AISI D2 avec des outils en céramique à l'aide de techniques statistiques. Les résultats des tests ont montré que le choix approprié des paramètres de coupe permet d'obtenir une rugosité de surface qui permet d'éliminer les opérations de rectification cylindrique. D'après ce qui précède, on peut conclure que la finition de surface est affectée par un certain nombre de facteurs tels que la dureté des matériaux de travail, les paramètres de coupe et la géométrie de l'outil dans le processus de tournage dur. La vitesse d'avance et le rayon de la pointe de l'outil sont considérés comme les facteurs de contrôle les plus. En tournage dur de finition, la vitesse d'avance appliquée est généralement très faible et égale au rayon de la pointe de l'outil ou même plus petite.

Grzesik W et Zak K. [82] ont caractérisés l'intégrité de la surface produite par le tournage oblique avec une arête de coupe droite au moyen de la rugosité de surface 2D et 3D (figure I.40), des caractéristiques de roulement, des couches de surface, de la distribution de la micro dureté et des contraintes résiduelles induites dans la couche souterraine. En particulier, la rugosité de surface produite sur les pièces usinées a été caractérisée par 4 groupes de paramètres de rugosité de surface ISO (hauteur, espacement, hybride et distribution matériau / amplitude), comme proposé par les normes ISO. Grzesik W et Zak K. [83] ont présentés aussi dans une autre étude l'état d'intégrité de surface produit sur de l'acier 41Cr4 trempé à haute résistance après usinage dur et finition à la bille. Les surfaces usinées par des procédés d'usinage séquentiel ont été caractérisées à l'aide de paramètres de rugosité de surface 2D et 3D. De plus, la fonctionnalité détaillée des surfaces générées a été réalisée à l'aide d'un ensemble de paramètres de rugosité fonctionnelle 3D. Parmi les caractéristiques de la couche superficielle, sa microstructure, la répartition de la micro dureté et les contraintes résiduelles ont été déterminées. Ils ont confirmé que le polissage à la bille permet de produire des surfaces avec une rugosité de surface inférieure et de meilleures propriétés de service que celles générées par les opérations de tournage dur de finition au nitrure de bore cubique (CBN).



**Figure I.40:** Topographie 3D et profils de surface 2D obtenus après tournage oblique, (a) C45, (b) 41Cr4, (c) X6CrNiTi18-10, (d) EN-GJS 500-7 [82].

#### I. 4. 2. Méthodes de modélisations et d'optimisations avancées appliquées en usinage dur

Dans les industries manufacturières, les opérateurs de machines-outils choisissent les paramètres d'usinage pour obtenir la valeur de finition de surface souhaitée par des expérimentations répétitives par essais et erreurs qui peuvent être coûteuses et prendre du temps. Par conséquent, la sélection d'une combinaison appropriée de conditions d'usinage et la prédiction des valeurs de rugosité de surface avant d'effectuer l'opération d'usinage réelle a été un domaine de recherche important.

Davim [84] a appliqué une analyse de régression pour établir une corrélation entre les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de coupe) et les réponses (rugosité de surface moyenne et hauteur maximale de crête à creux) lors du tournage de l'acier d'usinage libre avec un outil en carbure cémenté. Suresh et all. [85] ont développé un modèle de prédiction de la rugosité de surface pour l'usinage de l'acier doux à l'aide de RSM. L'expérimentation a été réalisée avec des outils de coupe en carbure de tungstène revêtus de TiN pour l'usinage de pièces en acier doux couvrant une large gamme de conditions d'usinage. Un modèle mathématique du second ordre en termes de paramètres d'usinage a été développé pour la prédiction de la rugosité de surface.

Öktem et coll. [86] ont utilisé RSM pour créer un modèle mathématique de rugosité de surface en termes de paramètres de coupe (avance, vitesse de coupe, profondeur de coupe axiale, profondeur de coupe radiale et tolérance d'usinage) pour prédire les valeurs de rugosité de surface dans les surfaces de moules de fraisage en aluminium (7075-T6). La précision du modèle RSM a été vérifiée avec les mesures expérimentales. L'erreur de prédiction s'est avérée être de 2,05%. Sahin et Motorcu [87] ont utilisé RSM pour développer des modèles de prédiction de la rugosité de surface lors du tournage de l'acier doux (AISI 1040) avec des plaquettes en carbure revêtues. Les modèles de prédiction du premier et du second ordre ont été développés en termes d'avance, de vitesse de coupe et de profondeur de coupe. Ils ont conclu que la rugosité de surface augmente avec l'augmentation de la vitesse d'avance, mais diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe et de la profondeur de coupe. Les résultats prévus se sont avérés proches des valeurs expérimentales.

Palanikumar [88] a développé un modèle mathématique utilisant RSM pour la rugosité de surface afin de corréler les paramètres d'usinage pendant l'usinage des composites GFRP. Les quatre variables d'entrée considérées étaient la vitesse de coupe, l'angle d'orientation de la fibre, la profondeur de coupe et la vitesse d'avance. Les influences de ces paramètres sur la rugosité de surface ont été analysées sur la base du modèle mathématique développé. On a trouvé que la rugosité de surface diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe et de la profondeur de coupe tandis que la rugosité de surface augmente avec l'augmentation de la vitesse d'avance et de l'angle d'orientation des fibres.

L'effet des conditions de coupe sur la rugosité de surface et les forces de coupe pendant le tournage dur du X38CrMoV5-1 a été étudié par H Aouici et al [89]. L'acier trempé avec 50 HRC a été usiné avec un outil CBN. L'analyse de la variance a été utilisée pour explorer les effets d'interaction de trois paramètres de coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance et profondeur de coupe) sur les six sorties de performance (trois paramètres de rugosité de surface et trois composantes de force de coupe). La relation empirique entre les variables d'entrée et les paramètres de sortie a été déterminée et les conditions de coupe optimales pour chaque niveau de performance ont été établies grâce à la méthodologie de surface de réponse (RSM). Un modèle de régression quadratique a été utilisé pour cela. L'influence de la vitesse d'avance et de la vitesse de coupe sur la rugosité de la surface a été étudiée. On a constaté que la profondeur de coupe avait une grande influence sur les composants de la force de coupe, par rapport à la vitesse d'avance et à la vitesse de coupe.

Reddy et al [90] ont travaillé sur la régression multiple et le réseau de neurones artificiels dans la modélisation et la prédiction de la rugosité de surface dans le tournage CNC d'alliages d'aluminium. L'écart en pourcentage et l'écart en pourcentage moyen ont été utilisés par les auteurs pour juger de l'efficacité et de la prévisibilité du modèle en termes de rugosité de surface. L'étude des résultats expérimentaux a montré que le réseau de neurones artificiels était efficace par rapport aux modèles de régression multiples pour la prédiction de la rugosité de surface. Szecsi [91] a proposé une approche pour modéliser les forces de coupe à l'aide de réseaux de neurones artificiels. Anticipatrice, réseaux de neurones multicouches formés par l'algorithme de rétropropagation ont été utilisés. La formation des réseaux a été réalisée avec

des données d'usinage expérimentales. Un réseau de neurones à réaction directe à trois couches avec 7-8 neurones dans la couche cachée pour prédire les trois composantes de la force de coupe a été proposé pour de meilleurs résultats. Oktem et al [92] ont utilisé ANN pour la prédiction de la rugosité de surface pendant le fraisage en bout de l'aluminium (7075-T6). Un modèle de réseau de neurones à action directe a été développé en exploitant des mesures expérimentales. Le modèle de réseau neuronal a été formé et testé à l'aide de MATLAB. Les résultats prédits à partir du modèle ANN ont été comparés aux mesures expérimentales et une bonne corrélation a été obtenue entre les prévisions ANN et les mesures expérimentales.

Mangesh et Tatwawadi [93] ont développé un modèle de taux d'enlèvement de métal basé sur le réseau neuronal artificiel (ANN) le processus de tournage de matériaux ferreux et non ferreux dans une industrie à petite échelle avec un contexte indien. Le modèle ANN a été développé pour établir une relation entre les paramètres d'entrée et de sortie. L'opérateur, la pièce à usiner, le processus de coupe, l'outil de coupe, la machine et l'environnement ont été considérés comme les paramètres d'entrée de ce modèle. Un modèle de réseau neuronal à propagation avant et arrière à trois couches a été utilisé et formé avec des paires d'ensembles de données indépendants / dépendants générés lors de l'usinage de matériaux ferreux et non ferreux. Une très bonne performance du réseau de neurones, en termes de contrat avec des données expérimentales, a été obtenue.

Korkut et al [94] ont présenté des modèles ANN et RA pour la prédiction de la température de l'interface outil-copeau pendant le tournage de l'acier AISI 1117 avec des plaquettes en carbure cimenté. Les valeurs de température prédites par les modèles ANN et RA ont été trouvées proches des valeurs expérimentales. Zain et al [95] ont utilisé ANN pour prédire la valeur de la rugosité de surface en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de l'angle de coupe radiale pendant le fraisage d'un alliage de titane avec des outils en carbure revêtus et non revêtus. Après avoir comparé un certain nombre de structures de réseau, il a été constaté que la structure de réseau 3-7-7-1 offre une meilleure prédiction de la rugosité de surface.

Les connaissances des systèmes experts sont généralement inexacts dans la pratique de la surveillance de l'état. Par conséquent, des mesures des incertitudes dans les connaissances sont nécessaires pour que le système expert fournisse des résultats robustes. Les mesures d'incertitude normalement utilisées sont la probabilité et les fonctions membres floues dans la théorie de la logique floue. L'application de la théorie des ensembles flous et de la logique floue est utilisée dans la détection d'usure des outils avec d'autres techniques.

Om Prakash Yadav et al. [96] présentent un cadre structuré pour estimer l'amélioration de la fiabilité pendant le développement de produits en utilisant la logique floue et les méthodes bayésiennes. Yue Jiao et al. [97] développent un réseau adaptatif flou (FAN) pour modéliser la rugosité de surface dans les opérations de tournage. Le réseau FAN a à la fois la capacité d'apprentissage du réseau de neurones et la représentation linguistique de phénomènes complexes et vagues. De plus, il peut améliorer en continu le modèle approximatif initialement obtenu sur la base des données d'exploitation quotidiennes. Pour illustrer cette approche, un modèle représentant les influences des paramètres d'usinage sur la rugosité de surface est établi puis le modèle est vérifié en utilisant les résultats d'expériences pilotes. Daniel Kirby et [98]

discutent du développement d'un système de prédiction de la rugosité de surface pour les opérations de tournage à l'aide d'une technique de modélisation par filets flous. L'objectif est de développer et de former un système de prédiction de la rugosité de surface (FN-SRP) basé sur des filets flous qui prédira la rugosité de surface d'une pièce tournée à l'aide de données de vibration. Le système FN-SRP est développé à l'aide d'un tour à banc incliné à commande numérique par ordinateur (CNC) avec un outil de coupe au carbure. Le système est formé à l'aide de la vitesse d'avance, de la vitesse de la broche et des données de vibration collectées pendant les essais expérimentaux. Une série de cycles de validation indique que ce système a une précision moyenne de 95%.

Sivarao [99] développe une interface utilisateur graphique floue pour la modélisation des conditions d'usinage laser. Iman Attarzadeh et al [100] proposent un nouveau modèle réaliste de logique floue pour obtenir une meilleure précision dans l'estimation des coûts logiciels. Sathiyasekar et al [101] décrivent le développement d'un système expert pour aider le personnel d'entretien des machines tournantes à évaluer l'état d'isolation de leurs machines. Ils tentent de prédire les possibilités d'une corrélation existant entre la tension d'essai appliquée et la variation maximale de capacité en utilisant un réseau neuronal avec un algorithme de rétropropagation et un système flou. Sikorska et al [102] explorent les forces et les faiblesses du principal modèle pronostique pour établir ce qui les rend mieux adaptés à certaines applications que d'autres et résume comment chacune est appliquée à l'ingénierie prognostique. Altamash et al [103] expliquent une approche adaptative utilisant la logique floue pour la prédiction des performances de traction du système de coussin d'air intelligent. Wang et al [104] proposent une approche pratique, avec un petit échantillon de données, pour prédire avec précision la durée de vie restante d'une fraise en utilisant la méthode de régression de processus gaussienne.

Les systèmes d'inférence neuro-floue adaptatifs (ANFIS) ont été largement utilisés dans la modélisation, l'identification et la surveillance de systèmes complexes. Depuis son origine au début des années 90, l'ANFIS a subi divers changements, donnant lieu à diverses tendances de la recherche. Son principe est basé sur l'extraction de règles floues à chaque niveau d'un réseau de neurones. Une fois les règles obtenues, elles fournissent les informations nécessaires sur le comportement global du système. Peng et al [105] a développé un système d'inférence floue basé sur un réseau adaptatif (ANFIS) pour la prédiction de la rugosité de surface dans le fraisage en bout d'alliage d'aluminium 6061 à l'aide d'une fraise HSS. À cette fin, 72 expériences d'usinage au total ont été réalisées pour collecter l'ensemble de données pour les valeurs de rugosité de surface. La vitesse de broche, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe ont été considérées comme des paramètres d'entrée, et la rugosité de surface a été considérée comme un paramètre de sortie. Deux fonctions d'appartenance différentes (triangulaire et trapézoïdale) ont été employées lors de la formation de l'ANFIS. Il a trouvé que l'adoption des fonctions d'appartenance à la fois triangulaire et trapézoïdale donne des résultats satisfaisants. De plus, la vitesse d'avance s'est avérée être le facteur le plus significatif influençant la rugosité de surface suivie de la vitesse de la broche, tandis que l'effet de la profondeur de coupe sur la rugosité de la surface semble être négligeable.

Tsourveloudis [106] a développé une relation entre la rugosité de surface et les paramètres d'usinage critiques pendant le tournage de Ti6Al4V. Le modèle de prédiction de la rugosité de surface a été développé en termes de vitesse d'avance, de vitesse de coupe et de profondeur de coupe en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM) et le système d'inférence neuro-floue adaptatif (ANFIS). Au total, 32 expériences de tournage ont été menées avec différentes combinaisons de paramètres de coupe. La vitesse d'avance a été identifiée comme le paramètre d'usinage le plus significatif pour la rugosité de surface suivie de la profondeur de coupe. La capacité de prédiction de l'ANFIS s'est avérée supérieure à celle du RSM. Dans l'étude publiée par Adel T. Abbas et al [107] un modèle mathématique de la rugosité de surface a été obtenu à partir des données expérimentales en utilisant deux techniques: la méthode d'analyse de régression et le système d'inférence neuro flou adaptatif de MATLAB (ANFIS). Ces modèles ont été validés à l'aide de quinze essais expérimentaux qui n'ont pas été inclus dans l'analyse de régression ou dans l'ANFIS et une comparaison entre les deux modèles est présentée.

Hossain et Ahmad [108] ont proposé des modèles de prédiction de la rugosité de surface ( $R_a$ ) à l'aide de l'ANN et du système d'inférence neuro-floue adaptatif (ANFIS) pendant le fraisage à billes de l'aluminium. Les modèles de prédiction ont été obtenus en termes d'angle d'inclinaison de l'axe de coupe, de vitesse de broche, de vitesse d'avance, de profondeur de coupe radiale et de profondeur de coupe axiale. L'ensemble de données obtenu à partir des expériences a été divisé en un ensemble de données d'entraînement et un ensemble de données de test (68 ensembles de données pour la formation et 16 ensembles de données pour les tests). L'ensemble de données d'apprentissage est utilisé pour entraîner différents modèles ANN et ANFIS pour la prédiction  $R_a$ , et l'ensemble de données de test est utilisé pour valider les modèles. Les modèles ANFIS et ANN les plus performants sont sélectionnés en fonction de la valeur minimale de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Les valeurs de rugosité de surface prédites obtenues à partir du modèle ANFIS ont été comparées à la sortie d'équation théorique, à la méthode ANN et à la méthodologie de surface de réponse (RSM) sur la base de RMSE et MAPE. Le modèle ANFIS semble donner de meilleurs résultats dans la prédiction de la rugosité de surface par rapport à l'équation théorique, au modèle ANN et au modèle RSM.

Support Vector Machine est un système d'apprentissage de nouvelle génération basé sur la théorie de l'apprentissage statistique. Il appartient à la classe des algorithmes d'apprentissage supervisé dans lesquels la machine d'apprentissage reçoit un ensemble de fonctionnalités (ou entrées) avec les étiquettes associées (ou valeurs de sortie). Chacune de ces caractéristiques peut être visualisée comme une dimension d'un hyperplan. SVM est un outil puissant pour résoudre des problèmes de classification non linéaire et d'estimation de fonction. Chun-Hsin Wu et al [109] démontrent l'applicabilité de la régression vectorielle de support (SVR) à l'analyse des données de trafic et à la prédiction des temps de trajet. Chiang Hong et al [110] tentent d'appliquer le modèle SVM dans la prévision de la fiabilité des moteurs. Le résultat montre que le modèle SVM proposé offre des performances supérieures aux autres modèles. Zhao et al [111] présentent une nouvelle approche pronostique complète pour la prédiction des conditions basée sur la transformation de paquets en ondelettes et la machine à vecteurs de support des moindres carrés (LS-SVM). Après la simulation et les expériences, ils soulignent que cette nouvelle approche peut donner des résultats prometteurs. Xiaoh Wang [112] introduit

la méthode de régression vectorielle des moindres carrés (LS-SVR) pour prédire la rugosité de surface en fraisage en bout en fonction des paramètres d'usinage. Divya tomar et al [113] proposent une nouvelle approche qui prédit la marge opérationnelle avant impôts en appliquant la RVS et comparent différentes fonctions du noyau avec le poids. Wahyu Caesarendra et al [114] présentent une méthode intégrée utilisant l'approche probabiliste et soutiennent l'approche de la machine vectorielle (SVM) pour prédire la dégradation.

Caydas et Ekici [115] ont prédit les valeurs de rugosité de surface de l'acier inoxydable austénitique AISI 304 en tournage CNC. Les expériences de tournage ont été réalisées selon des plans factoriels complets à 3 niveaux. Les modèles de prédiction de la rugosité de surface ont été développés en termes de vitesse de coupe, d'avance et de profondeur de coupe à l'aide d'un réseau neuronal artificiel et de trois types différents de machines à vecteurs de support (SVM) tels que SVM des moindres carrés (LS-SVM), Spider SVM et SVM-KM. La vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe ont été considérées comme des paramètres d'entrée. La capacité de prédiction des trois SVM a été trouvée meilleure par rapport à ANN.

Yigit Kazancoglu et al [116] ont fait une recherche pour produire simultanément la force de coupe minimale et la rugosité de surface avec le taux d'enlèvement de matière maximal dans le processus de tournage avec une combinaison paramétrique optimale. La méthode de Taguchi et l'analyse relationnelle de Gray (GRA) ont été utilisées pour ledit problème. Neuf expériences ont été menées sur la base du tableau orthogonal Taguchi L9 pour obtenir des fonctions objectives dans le domaine expérimental pour l'optimisation. Les fonctions objectives sélectionnées par rapport aux paramètres du processus de coupe étaient la force de coupe, la rugosité de surface et le MRR. En outre, l'analyse relationnelle de Gray a également été utilisée pour résoudre le problème d'optimisation multi-objectifs. L'impact des facteurs sur les caractéristiques de qualité du processus de tournage a été estimé quantitativement à l'aide de l'ANOVA. Les résultats optimaux ont été vérifiés par des expériences de confirmation. Il a été conclu qu'un taux d'enlèvement de matière élevé avec une meilleure rugosité de surface et une force de coupe plus faible peut être obtenu de manière satisfaisante grâce à une sélection appropriée des paramètres de coupe.

Yan et Li [117] ont présenté une méthode d'optimisation multi-objectifs basée sur l'analyse relationnelle pondérée des gris et RSM pour optimiser les paramètres de coupe pendant le fraisage de l'acier à carbone moyen avec des outils en carbure pour obtenir l'énergie de coupe minimale, le taux d'enlèvement de matière maximal et la rugosité de surface minimale. Les résultats ont indiqué que la largeur de coupe était le paramètre le plus influent, suivi de la profondeur de coupe, de la vitesse d'avance et de la vitesse de la broche. Les résultats expérimentaux ont indiqué que le GRA couplé au RSM est un outil très utile pour l'optimisation multi-objectifs des paramètres de coupe.

L'optimisation des paramètres de processus en tournage a été étudiée par Xi et Liao [118]. Il existe trois paramètres de contrôle d'objectifs, à savoir le temps d'usinage, la précision d'usinage et le coût d'usinage. Les paramètres du processus (vitesse de coupe et vitesse d'avance) ont été optimisés à l'aide de PSO. De plus, les performances d'usinage considérées dans Bharathi et Baskar [119] sont le temps d'usinage et la rugosité de surface. PSO a été utilisé pour trouver les

paramètres d'usinage optimaux pour minimiser le temps d'usinage soumis à la rugosité de surface souhaitée. Les contraintes physiques pour l'expérience et l'approche théorique sont la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de coupe et la rugosité de la surface. On observe que le temps d'usinage et la rugosité de surface basés sur le PSO sont quasiment identiques à ceux des valeurs obtenues sur la base d'expériences de confirmation; par conséquent, on constate que PSO est capable de sélectionner des paramètres d'usinage appropriés pour l'opération de tournage.

Kalyanmoy Deb et Rituparna Datta [120] ont proposé une optimisation évolutive multi objective (EMO) pour déterminer les meilleurs paramètres d'usinage pour garantir l'efficacité d'un processus d'usinage. Deux études de cas, l'une avec deux objectifs et l'autre avec trois objectifs ont été présentées. Les solutions EMO ont été modifiées à l'aide d'une procédure de recherche locale pour obtenir une meilleure propriété de convergence. Une procédure de recherche locale basée sur l'heuristique a été suggérée pour une approche de calcul plus rapide dans laquelle l'heuristique spécifique au problème a été dérivée d'une étude innovante réalisée sur les solutions EMO. Amir Aryanfar et Maghsud Solimanpur [121] ont proposé un modèle de programmation mathématique non linéaire contraint pour la détermination des paramètres susmentionnés. Des algorithmes génétiques (GA) ont été proposés pour l'optimisation simultanée des paramètres d'ébauche multi-passes et de finition en une seule passe. Un exemple illustratif tiré de la littérature a été résolu grâce à l'algorithme proposé pour confirmer l'efficacité et l'efficacité de la méthode proposée.

Öktem et al [86] ont couplé le modèle RSM à un GA pour trouver les conditions de coupe optimales menant à la valeur de rugosité de surface la plus faible. Les conditions de coupe optimales prédites ont été validées par une mesure expérimentale. Il a été constaté que la prédiction optimale des paramètres par GA est en très bonne corrélation avec les données expérimentales. Il a également été constaté que le modèle couplé RSM et GA est efficace et peut être utilisé dans d'autres problèmes d'usinage tels que l'optimisation de la durée de vie de l'outil, la minimisation des erreurs dimensionnelles, etc.

Datta et al. [122] ont présenté une étude sur l'optimisation de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de coupe pour une opération de tournage. Les objectifs envisagés sont de minimiser le temps de production, de minimiser les coûts de production et de minimiser la rugosité de surface. Le front de Pareto est considéré comme bidimensionnel où un objectif est redondant. L'algorithme génétique de tri non dominé (NSGA-II) est utilisé pour obtenir un front Pareto-optimal pour résoudre les problèmes d'optimisation à trois objectifs en considérant la fonction comme un problème à deux objectifs en négligeant un objectif à chaque exécution.

Yusoff et al. [123] ont présenté un aperçu des techniques d'optimisation NSGA-II des paramètres de processus d'usinage. Ils ont observé que: (i) l'analyse ANN, GP, floue et de régression font partie des méthodes utilisées pour modéliser la prédiction des performances d'usinage et (ii) NSGA-II est un outil d'optimisation multi-objectifs qui peut répondre aux exigences de l'usinage. Processus pour trouver un ensemble de solutions basées sur la combinaison de variables appropriées. Yang et Natarajan [124] ont résolu le problème d'optimisation multi-objectif dans le tournage en utilisant l'algorithme d'évolution différentielle

multi-objectif (MODE) et NSGA-II. Les paramètres d'usinage considérés sont la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe. Des modèles de régression ont été développés pour minimiser l'usure des outils et maximiser le taux d'enlèvement de matière (MRR). L'ensemble de solutions non dominé obtenu à partir de MODE a été comparé à NSGA-II, et il a été constaté que NSGA-II surpassait MODE dans le contexte du nombre de solutions et du ratio d'individus non dominés.

## **I. 5. Conclusion**

Ce chapitre a pour objectif de présenter la coupe des matériaux durs, en mettant l'accent sur le tournage dur. Il met en lumière les nombreux paramètres qui peuvent influencer de manière significative le couple outil/matière ainsi que les phénomènes physiques en jeu. Une synthèse des différentes méthodes utilisées dans la littérature pour modéliser et optimiser le processus d'usinage a été réalisée. Cette synthèse présente les principes de base et les fondements mathématiques de chaque méthode. Par ailleurs, en plus des méthodes dites « classiques », une attention particulière a été accordée aux méthodes avancées basées sur les algorithmes d'intelligence artificielle.

Cette étude bibliographique met en évidence le grand nombre de travaux déjà réalisés pour comprendre la coupe des matériaux durs et l'utilisation des méthodes de modélisation et d'optimisation en tournage dur. Malgré les avantages qu'offre ce procédé par rapport à la méthode traditionnelle, le coût élevé des outils extra-durs utilisés et le domaine de fonctionnement mal défini pour un couple outil/matière à usiner rendent ce procédé difficilement exploitable. De plus, en raison du grand nombre de paramètres déterminants, les approches classiques en matière de modélisation et d'optimisation ne suffisent plus. Ainsi, plusieurs essais expérimentaux basés sur le choix des conditions de coupe sont souvent nécessaires avant d'obtenir une pièce satisfaisante. Pour répondre à ces exigences, il est nécessaire de mettre au point et d'utiliser des techniques de modélisation et d'optimisation avancées basées sur des algorithmes d'intelligence artificielle tels que la régression statistique, l'apprentissage automatique, les métaheuristiques, etc., afin d'obtenir les meilleures performances possibles.

Le prochain chapitre présentera l'ensemble des outils mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique et scientifique.

# Chapitre

# II

## APPROCHE EXPERIMENTALES

---

*« La science, c'est l'expérience qui se vérifie. Tout le reste n'est que littérature »*

---

Francis Bacon

### Sommaire

---

<b>II. 1. Introduction</b> .....	<b>- 56 -</b>
<b>II. 2. Approche expérimentale</b> .....	<b>- 56 -</b>
II. 2. 1. Introduction .....	- 56 -
II. 2. 2. Planification des expériences .....	- 57 -
II. 2. 2. 1. Méthode unifactorielle « Stratégie traditionnelle » .....	- 58 -
II. 2. 2. 2. Méthode multifactorielle « méthode de plan d'expériences ».....	- 59 -
(a) Définitions et concepts de base .....	- 60 -
(b) Les principaux types des plans expérimentaux à plusieurs variables.....	- 63 -
II. 2. 3. Démarche expérimental réalisée .....	- 65 -
II. 2. 3. 1. Présentation de l'étude réalisée et ses objectifs.....	- 65 -
(a) Sélection des variables d'entrée et de sortie.....	- 66 -
(b) Choix du type de plan d'expérience .....	- 67 -
(c) Réalisation des essais .....	- 71 -
(d) Analyse des résultats expérimentales .....	- 71 -
(e) Modélisation des réponses .....	- 72 -
(f) Recherche des paramètres optimaux .....	- 72 -
<b>II. 3. Equipements utilisés</b> .....	<b>- 73 -</b>
II. 3. 1. Matériau à utilisé.....	- 73 -
II. 3. 2. Traitement thermique des éprouvettes .....	- 76 -
II. 3. 3. Plaquettes de coupe .....	- 77 -
II. 3. 4. Porte outil.....	- 78 -
II. 3. 5. Machine-outil .....	- 79 -

---

---

II. 3. 6. Instruments de mesures utilisés.....	- 79 -
II. 3. 6. 1. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe .....	- 79 -
II. 3. 6. 2. Equipements utilisés pour la mesure de l'état de surface.....	- 81 -
(a) Mesure des états de surface 2D : méthode à contact.....	- 81 -
(a) Mesure des états de surface 3D : méthode sans contact.....	- 81 -
II. 3. 6. 3. Equipements de mesure de l'usure et la forme des copeaux.....	- 83 -
(a) Microscope Visual 250.....	- 83 -
(b) Microscope Numérique : KEYENCE VHX-6000 .....	- 83 -
(c) Microscope à balayage électronique MEB : QUANTA FEG 250 .....	- 85 -
(d) Appareil de mesure optique 3D : Infinite Focus G5 plus.....	- 87 -
II. 3. 6. 4. Duromètre pour la mesure de la dureté .....	- 89 -
<b>II. 4. Conclusion.....</b>	<b>- 89 -</b>

---

## II. 1. Introduction

Ce chapitre présente l'approche expérimentale adoptée dans le cadre de cette thèse de doctorat, dont l'objectif est d'étudier l'impact des différents paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage lors du tournage dur à sec de l'acier X38CrMoV5-1 traité à 50 HRC, en utilisant en utilisant une variété de plaquettes de coupe. Plus précisément, nous avons utilisé des plaquettes céramiques avec et sans revêtement, ainsi que des plaquettes d'une géométrie conventionnelle et Wiper. L'objectif de cette étude est de fournir des outils permettant une sélection intelligente des conditions de coupe, en utilisant la méthodologie des plans d'expériences à partir d'un nombre suffisant d'expériences. Les équipements et les conditions expérimentales utilisés pour mener cette recherche sont décrits en détail, y compris les dispositifs de mesure et le couple outil-matière. Les spécifications des plans adoptés pour l'approche expérimentale sont également présentées. Les expériences ont été menées au Laboratoire de Mécanique et Structure (LMS) du département de génie mécanique de l'université 8 Mai 1945 Guelma. Pour compléter cette étude, des machines de mesure avancées ont également été utilisées, notamment au centre de métrologie du Centre Technique des Industries Mécaniques "CETIM" à Senlis, ainsi qu'à la société "LISI AEROSPACE" en France, permettant d'enrichir les résultats scientifiques obtenus.

## II. 2. Approche expérimentale

### II. 2. 1. Introduction

Les progrès des sciences et de la technologie sont étroitement liés aux réponses que l'homme a pu apporter aux interrogations que lui pose régulièrement la nature. Ces réponses résultent le plus souvent d'une analyse des observations expérimentales obtenue par une approche méthodologique rigoureuses. Nous pouvons donc dire que, sans expérimentation physique ou numérique, il n'y a pas de solution. L'expérimentation est donc un des moyens privilégiés pour acquérir ou améliorer les connaissances mais, elle doit être optimisée car l'objectif est d'obtenir des informations les plus fiables possibles en un minimum d'essais [125].

La démarche expérimentale reste la méthode royale d'acquisition des connaissances dans le domaine industriel. De façon naturelle, l'ingénieur fonde sa démarche d'acquisition des connaissances sur des essais en avançant progressivement, puis, il réoriente ses expériences en fonction des résultats obtenus. [126]. Il recherche en général à augmenter la productivité de ses essais. Pour cela, il doit :

- faire un minimum d'essais ;
- obtenir un maximum de précision sur les résultats ;
- être capable de mettre en évidence des phénomènes secondaires comme des interactions entre facteurs.

Les difficultés de l'expérimentateur ne s'arrêtent pas à la planification des essais. Une fois ceux-ci réalisés, il faut interpréter les résultats. Il n'est pas rare de se retrouver devant une pléthore de mesures et de ne pouvoir en tirer un quelconque résultat. C'est à ce moment-là qu'on se dit souvent : « Les essais que j'ai réalisés sont inutiles, par contre, j'aurais dû faire d'autres essais ! ». [126].

Une bonne démarche d'acquisition des connaissances devra fournir des résultats aisés à interpréter. Ils devront être également faciles à présenter aussi bien à des spécialistes qu'à des non-spécialistes. Tous les industriels connaissent ces interrogations, aussi, il est judicieux de se poser quelques questions :

- quelle stratégie d'essais adopter pour arriver rapidement aux résultats attendus ?
- n'existe-t-il pas de meilleures stratégies que d'autres ?
- quel est le nombre minimum d'essais qui doivent être réalisés pour aboutir aux résultats ?
- ne peut-on pas éviter de réaliser des essais inutiles ?
- comment améliorer la précision de mes résultats ?

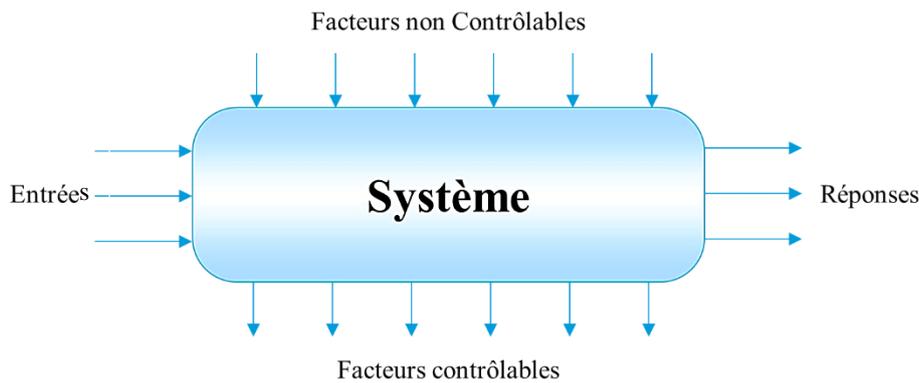
La planification des expériences apporte une méthodologie capable de répondre à ces questions. Cette méthodologie, sans équivalent, permet d'atteindre une meilleure connaissance du système observé par un minimum d'essais et un maximum de précision [126].

Lors de mes travaux de thèse, l'approche expérimentale utilisée pour étudier et caractériser le comportement physique du processus d'usinage d'un acier durcis est basée sur la démarche de planification expérimentale. Cette méthode est également connue sous la dénomination de méthodologie de la recherche expérimentale (en anglais, "*Design of Experiments*" et "*Statistical Designs of Experiments*"). C'est une méthode, théorique et pratique, utilisable a priori en toute science expérimentale, qu'on peut définir dans un premier temps simplement comme une approche générale d'optimisation de la planification des expériences sous la contrainte de postulation d'un modèle mathématique du phénomène étudié.

## II. 2. 2. Planification des expériences

La stratégie de planifications d'expériences permet de permettre d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Le principe général consiste à n'étudier que certains points du domaine expérimental, tout en appréhendant le phénomène physique étudié sur l'ensemble du domaine considéré. Elle est applicable à de nombreuses disciplines et à toutes les industries.

Dans toutes les entreprises, et quel que soit le secteur d'activité, le technicien ou l'ingénieur est amené à comprendre comment réagit un système en fonction des différents facteurs qui sont susceptibles de le modifier. Pour vérifier l'évolution du processus, il mesure une réponse, et à partir des différents essais, il va tenter d'établir des relations de cause à effet entre la (ou les) réponse(s) et les différents facteurs [126].



**Figure II.1:** L'environnement du système

Parmi les facteurs, on distinguera :

- les facteurs contrôlables qui dépendent directement du choix du technicien (choix d'un matériau, d'une pression...);
- les facteurs non contrôlables qui varient indépendamment des choix du technicien (conditions climatiques, environnement d'utilisation...);
- les facteurs d'entrées telles que la matière première dans un processus de fabrication.

De manière générale, la méthode des plans d'expériences cherchera à déterminer et à établir les liens existants entre deux types de variables :

- **La réponse** : grandeur physique étudiée (appelé aussi paramètre de sortie «  $Y$  » de l'étude expérimentale) ;
- **Les facteurs** : grandeurs physiques modifiables par l'expérimentateur, sensées influencer sur les variations de la réponse (appelé aussi paramètre de sortie «  $X_i$  » de l'étude expérimentale).

Les deux principales utilisations possibles de la méthode de planifications des expériences sont :

- **Méthode unifactorielle** : « Stratégie traditionnelle (un seul facteur à la fois) »
- **Méthode multifactorielle** : « méthode de plan d'expériences »

### II. 2. 2. 1. Méthode unifactorielle « Stratégie traditionnelle »

Parmi les facteurs «  $X_i$  » recensés par l'expérimentateur, cette méthode permet de déterminer ceux qui ont une influence statistiquement non négligeable sur les variations de la réponse «  $Y_j$  ». On procède ainsi implicitement à une simplification du problème. On cherche pourquoi la réponse varie (en fonction de quels facteurs) et on caractérise l'action d'un facteur «  $X$  » sur la réponse «  $Y$  ». Pour étudier et optimiser un processus technologique on utilise souvent cette méthode qui permet d'obtenir la relation «  $Y = f(X)$  ». Elle consiste donc à faire varier successivement chacun des facteurs «  $X [X_i \in \{X_{min}, X_{max}\}]$  » à chaque expérience tout en

mesurant la valeur correspondante de la réponse «  $Y_j$  » ( $i = 1 : n$  et  $j = 1 : m$ ), tous les autres facteurs étant maintenus constants. Cela peut conduire à la matrice d'expérience présentée dans le tableau II.1. Ce type d'approche est coûteuse, mais elle est facile et la plus courante en cas d'un nombre réduit des variables.

**Tableau II.1:** Matrice d'expérience- plan à un seul facteur à la fois (méthode unifactorielle)

Numéro d'essai	Facteur variable	Paramètre de sortie						
	$X$	$Y_1$	$Y_2$	...	$Y_j$	...	$Y_M$	$Y_{moy}$
1	$X_1$	$Y_{11}$	$Y_{21}$	...	$Y_{j1}$	...	$Y_{M1}$	$Y_{moy1}$
2	$X_2$	$Y_{12}$	$Y_{22}$	...	$Y_{j2}$	...	$Y_{M2}$	$Y_{moy2}$
3	$X_3$	$Y_{13}$	$Y_{23}$	...	$Y_{j3}$	...	$Y_{M3}$	$Y_{moy3}$
i	$X_i$	$Y_{1i}$	$Y_{2i}$	...	$Y_{ji}$	...	$Y_{Mi}$	$Y_{moyi}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
N	$X_N$	$Y_{1N}$	$Y_{2N}$	...	$Y_{jN}$	..	$Y_{MN}$	$Y_{moyN}$

Avec cette méthode, l'effet de chacun des facteurs est calculé pour une combinaison particulière des autres facteurs et rien ne permet de dire si cet effet est également valable dans les autres cas (problème d'interaction entre facteur). On parle alors d'effet conditionnel.

Il existe en fait autant d'effets conditionnels possibles qu'il y a de combinaisons envisageables pour les autres facteurs et le choix de la combinaison testée est tout à fait arbitraire : l'effet mesuré est donc peu représentatif de l'effet réel recherché, ce qui peut conduire à des aberrations dans l'exploitation des résultats des expériences

### II. 2. 2. 2. Méthode multifactorielle « méthode de plan d'expériences »

La méthode multifactorielle (plan d'expériences) est une approche statistique permettant de maîtriser un problème à plusieurs paramètres tout en déterminant l'action simultanée de plusieurs facteurs «  $X_i$  » sur une réponse «  $Y_j$  ». Les plans d'expériences constituent essentiellement une stratégie de planification d'expériences afin d'obtenir des conditions solides et adéquates de manière efficace et économique.

La méthodologie des plans d'expériences se base sur le fait qu'une expérience convenablement organisée, conduira fréquemment à une analyse et à une interprétation statistique relativement simple des résultats [Norme ISO 3534-3]. Elle permet également d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation des procédés des systèmes complexes qui reflètent la variation réelle du phénomène étudié.

Il n'est pas simple de réaliser de telles relations entre réponses et facteurs, surtout s'il existe des interactions entre les facteurs. Les plans d'expériences permettent de réaliser ce type de relations, en minimisant le nombre d'expériences tout en maximisant la précision du résultat. Plus précisément, cette méthode vise aussi bien à comprendre les relations liant la réponse avec les facteurs, que les facteurs entre eux (avec une fonction de type «  $Y = f(X_i)$  ». Pour cela, la

solution proposée consiste dans tous les cas à établir un modèle, exprimant la réponse en fonction des facteurs. Pour bâtir ce modèle, il faut appréhender ces variations. Celles-ci sont déduites des résultats de séries d'expériences.

Il existe de nombreux processus et propriétés que l'on sait dépendre d'un grand nombre de facteurs mais sans que l'on en ait des modèles analytiques. Lorsque l'on désire connaître la dépendance d'une variable de sortie «  $Y$  » d'un tel processus ou propriété, on se trouve confronté à plusieurs difficultés :

- quels sont les facteurs les plus influents ? ;
- existe-t-il des interactions entre les facteurs (corrélations) ? ;
- peut-on linéariser le processus (ou la propriété) en fonction de ces facteurs et le modèle ainsi obtenu est-il prédictif ? ;
- comment minimiser le nombre de points de mesure du processus (ou de la propriété) pour obtenir le maximum d'informations ? ;
- existe-t-il des biais dans les résultats des mesures ?

#### **(a) Définitions et concepts de base**

Avant d'aller plus loin, il est important de bien définir le vocabulaire que nous allons employer.

La grandeur d'intérêt, qui est généralement notée  $y$ , porte le nom de réponse. Les variables qui peuvent modifier la réponse sont appelées facteurs. On parle donc des facteurs qui influent sur une réponse. Les termes facteur et réponse sont universellement employés dans le domaine des plans d'expériences.

- **Facteur**

Un facteur est une variable, ou un état, qui agit sur le système étudié. Un facteur peut être de type continu (température, mesure d'une longueur) ou discret (marque de l'outil, robinet ouvert ou fermé).

- **Réponse**

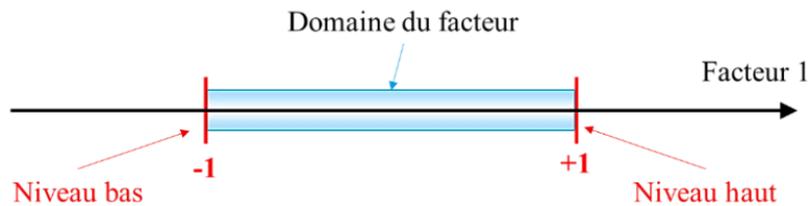
La réponse du système est la grandeur que l'on mesure pour connaître l'effet des facteurs sur le système. La réponse peut être de type quantitatif (poids d'une pièce, dispersion sur 30 pièces...) ou qualitatif (impression de chaud et froid, présence ou non de coulure). Les réponses quantitatives sont en général plus faciles à traiter.

- **Facteur significatif**

Un facteur significatif est un facteur qui, lorsqu'il est modifié, modifie la réponse du système. Evidemment, un facteur non significatif sera un facteur qui n'a aucun effet sur la réponse du système ou, dont l'effet est trop faible pour pouvoir être apprécié.

- **Niveaux d'un facteur**

Les niveaux d'un facteur indiquent les valeurs que prend ce facteur au cours des essais. En général, la variation de chaque facteur est délimitée par deux niveaux : supérieur et inférieur.



**Figure II.2:** Domaine de variation du « facteur ».

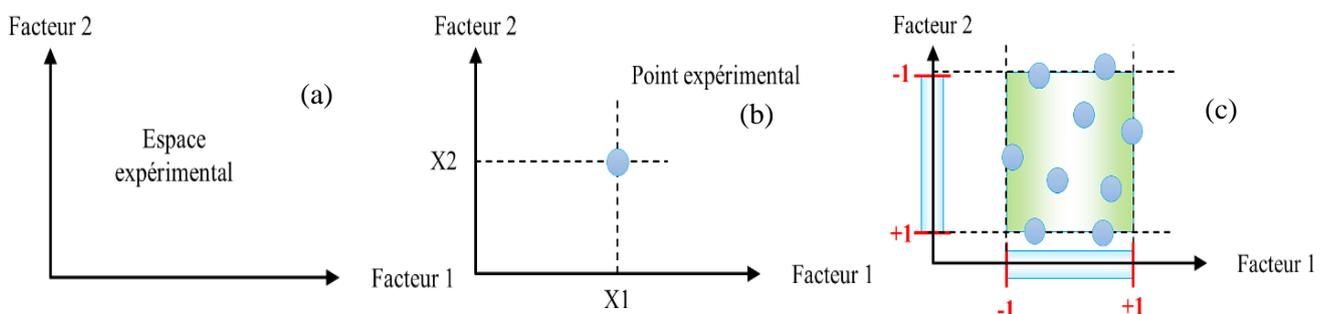
- **Modalité d'un facteur**

La modalité d'un facteur est l'état que peut prendre ce facteur au cours du plan d'expériences. Pour un facteur de type qualitatif (marque d'un produit par exemple) le nombre de modalités du facteur sera le nombre de marques étudiées dans le plan d'expériences. Par abus de langage, nous utiliserons "Niveau" à la place de modalité.

- **Espace expérimental**

Etant donnée la définition des variables de type facteur, il devient naturel de définir un espace  $k$  dimensionnel, dans lequel chaque point représente une combinaison des valeurs possibles des  $k$  facteurs. Cet espace est appelé domaine d'étude. On trouve également l'appellation espace de recherche, montrant un lien plus fort avec les futures optimisations prenant place dans cet espace. Les points situés à l'intérieur de ce domaine sont appelés points d'expérience, car ils représentent mathématiquement, par leurs coordonnées, les combinaisons de valeurs des grandeurs physiques qui leur sont associées.

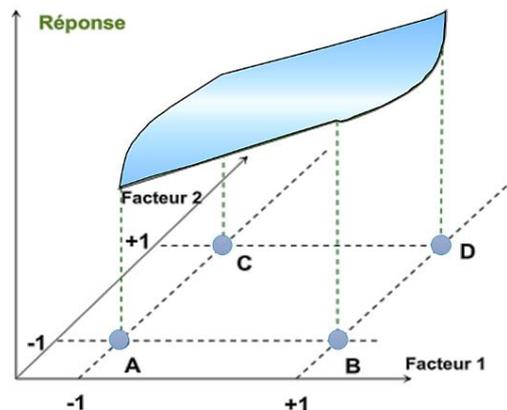
Le domaine d'étude est obligatoirement de forme hyper-rectangulaire, ses dimensions étant imposées par les plages de variation des  $k$  facteurs. Celles-ci imposent donc des contraintes dites de domaine.



**Figure II.3:** (a) Espace expérimental à deux dimensions définies par deux facteurs. (b) Les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux. (c) les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.

- **Surface de réponse**

La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs.



**Figure II.4:** Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse.

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse

- **Effet d'un facteur**

L'effet d'un facteur  $X$  sur une réponse  $Y$  est obtenu en étudiant les variations des valeurs de  $Y$  en fonction de celles de  $X$ . Si le facteur  $X$  a une interaction avec lui-même, on parle d'un effet quadratique. Un effet peut être positif, nul ou négatif. Il est exprimé par le coefficient multiplicatif de  $X$  dans un modèle mathématique de la réponse. La signification de l'effet de  $X$  sur  $Y$  est donnée par des tests statistiques.

- **Interaction**

On dit qu'il y a interaction entre deux facteurs  $X$  et  $X'$  si l'effet de  $X$  dépend du niveau de  $X'$  et inversement. Cette interaction est notée interaction  $XX'$  ou interaction  $X'X$ .

Pour l'élaboration d'un plan d'expériences, on passe généralement par les trois étapes suivantes :

- **Etape 01 : La recherche des facteurs influents**

Cette étape consiste à répondre à un ensemble de questions concernant l'influence des facteurs considérés sur le phénomène étudié : parmi tous les facteurs susceptibles d'influer sur la réponse, lesquels ont une influence significative ? Que vaut cette influence ? et y a-t-il des interactions entre ces facteurs ?

Une fois les facteurs influents sont bien déterminés et leurs influences est quantifiées, on passe au second stade :

- **Etape 02 : La modélisation**

Dans cette phase, on cherche quelle est la forme de l'influence définie dans la première étape : linéaire, courbe... et quelle est l'équation mathématique régissant, avec une précision donnée, la variation du phénomène en fonction des facteurs influents. La modélisation d'une réponse se fait en choisissant des points expérimentaux dont le nombre est au moins égal à la somme des effets, des interactions et des effets quadratiques. Ainsi on définit une matrice de  $n$  lignes et  $k$  colonnes, où  $n$  est le nombre d'expériences et  $k$  est le nombre des effets.

- **Etape 03 : L'optimisation**

Après la détermination de la forme graphique et analytique de notre réponse, il est primordial d'aller chercher les conditions expérimentales donnant le meilleur résultat. Cette étape nécessite préalablement une connaissance assez profonde du phénomène étudié.

### (b) Les principaux types des plans expérimentaux à plusieurs variables

La méthodologie des plans d'expériences consiste à déterminer tout d'abord le nombre d'essais nécessaires. Le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (fonction entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs. Le type de plan choisi doit faciliter l'interprétation des résultats. Il doit également minimiser le nombre des essais sans toutefois sacrifier la qualité. La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le coût minimum.

A partir des caractéristiques techniques, on peut classer les plans expérimentaux à plusieurs variables en deux grandes catégories :

- **Le plan factoriel complet** (stratégie exhaustive)
- **Le plan factoriel fractionnaire** (stratégie du plan d'expériences optimisés)
- **Qu'est-ce qu'un plan factoriel ?**

Un plan factoriel est un type de plan d'expériences qui vous permet d'étudier les effets que plusieurs facteurs peuvent avoir sur une réponse. Lorsque vous réalisez une expérience, faire varier les niveaux de tous les facteurs simultanément plutôt qu'un à la fois vous permet d'étudier les interactions entre les facteurs.

- **Le plan factoriel complet (stratégie exhaustive)**

Le plan factoriel complet combine de manière exhaustive toutes les combinaisons possibles des variables avec un nombre de facteurs pris en considérations dans l'expérience. Si on

considère un nombre discret de variation par facteurs, il permet d'envisager toutes les combinaisons possibles des niveaux des facteurs «  $N_{total}$  ».

Pour un cas de «  $k$  » facteurs «  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , » pouvant prendre chacun «  $q_1, q_2, \dots, q_i$  » niveaux différents. Par définition, une matrice d'expériences factorielle complète est constituée de toutes les combinaisons possibles des niveaux prises par chaque facteur. Le nombre total des essais nécessaire est déterminé avec la formule suivante :

$$N_{total} = q_1^{k_1} q_2^{k_2} \dots q_i^{k_i}$$

Avec,  $N_{total}$  : nombre total d'essais

$k_1$  : nombre de facteurs contenant  $q_1$  niveaux de variations,

$k_2$  : nombre de facteurs contenant  $q_2$  niveaux de variations,

$k_i$  : nombre de facteurs contenant  $q_i$  niveaux de variations,

Mais, le principal défaut réside bien sûr dans le nombre très élevé d'expériences que ce plan nécessite, défaut que l'on essaiera de contourner grâce à des plans d'expériences plus adaptés. Ce plan ne peut donc être envisagé que pour des études comportant un petit nombre de facteurs avec peu de niveaux.

- **Plans factoriel fractionnaire (stratégie du plan d'expériences optimisés)**

Un plan fractionnaire est un plan dans lequel les chercheurs n'effectuent qu'un sous-ensemble déterminé ou une "fraction" des essais du plan factoriel complet. Les plans factoriels fractionnaires constituent un bon choix lorsque les ressources sont limitées ou lorsque le nombre de facteurs figurant dans le plan est important du fait du nombre moins élevé d'essais effectués par rapport aux plans factoriels complets. Le plan factoriel permet de tester un grand nombre de facteurs avec un minimum d'expérience et d'en déduire l'effet moyen de chaque facteur avec une assez bonne précision.

Les matrices des plans d'expériences ont pour objectif, avec le minimum d'essais possible, de garantir trois propriétés principales :

- **l'iso-variance par rotation** : la colonne à laquelle on attribue une des grandeurs physiques mesurées ne doit pas avoir d'effet sur le résultat ;
- **la précision uniforme** : le domaine interpolé par le plan doit présenter des caractéristiques d'incertitude uniforme ;
- **l'orthogonalité.**

Le plan factoriel complet conduit souvent à un nombre d'essais trop important à réaliser, surtout si les essais en question sont onéreux. La recherche d'un plan ayant une précision voisine tout en étant plus économe conduit à utiliser des matrices d'expériences optimisées. Ainsi, on peut citer les plans suivants :

- matrices de Hadamard ;
- réseau de Doehlert ;
- plans Box-Behnken ;
- méthode Taguchi ;
- matrices composites centrées ;
- matrices de mélange ;
- matrices factorielles fractionnaires ;
- matrices de Hoke ;
- hyperpolyèdre croisé;
- plan composite centré ;
- plans de Rechtschaffner.

### **II. 2. 3. Démarche expérimental réalisée**

#### **II. 2. 3. 1. Présentation de l'étude réalisée et ses objectifs**

Dans le cadre du processus de tournage des pièces difficiles à usiner telles que les aciers durs, l'interface outil/matière représente un lieu d'interactions complexes entre les phénomènes mécaniques, thermiques et physico-chimiques. Ainsi, nous avons entrepris une étude expérimentale visant à comprendre ces phénomènes et à évaluer l'usinabilité de l'acier X38CrMoV5-1 traité à 50 HRC, en analysant les paramètres de la coupe tels que le matériau, la forme, le revêtement, la géométrie de l'outil et les conditions de coupe, ainsi que leur impact sur les indicateurs de performance d'usinage tels que les efforts de coupe, l'énergie dépensée, l'usure ou la durée de vie de l'outil, la qualité de la surface usinée et la fragmentation des copeaux.

Les essais ont été réalisés sur une machine-outil de calibre industriel en utilisant des plaquettes de coupe en céramique mixte  $Al_2O_3+TiC$  revêtue et non revêtue avec des géométries d'outils de forme wiper et conventionnelle. Les essais ont été planifiés à l'aide de la méthode des plans expérimentaux en prenant en compte le nombre des paramètres de coupe et leurs niveaux.

Les résultats ont été soumis à une étude statistique basée sur l'analyse de la variance (ANOVA) afin d'explorer l'influence des différents paramètres de la coupe et de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés. À partir de ces résultats, les plages des conditions de coupe les mieux adaptées ont été déterminées et des modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés ont été proposés en utilisant des techniques de modélisation avancées basées sur des algorithmes d'intelligence artificielle. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les paramètres de coupe et les paramètres technologiques d'usinage étudiés.

Enfin, ces modèles mathématiques seront couplés avec des techniques d'optimisation mono-objectif et multi-objectif pour trouver les conditions de coupe optimales et le régime optimal pour l'usinage de l'acier X38CrMoV5-1 traité à 50 HRC.

### (a) Sélection des variables d'entrée et de sortie

Comme pour tout plan d'expérience, le plan adopté pour cette étude implique la sélection de paramètres d'entrée (facteurs) ainsi que l'identification des variables de sortie (réponses). Les paramètres d'entrée sont les variables qui varient lors des essais, et leur nombre détermine le nombre total d'essais dans le plan d'expériences. Les variables de sortie sont les réponses observées à chaque essai.

Dans notre étude, parmi le grand nombre de facteurs qui influencent le système d'usinage, nous avons choisi d'étudier les facteurs suivants en fonction de nos objectifs de recherche :

- les éléments du régime de coupe :
  - vitesse de coupe «  $V_c$  » ;
  - profondeur de passe «  $ap$  » ;
  - avance de l'outil «  $f$  » ;
- la géométrie, matériaux et revêtement de la partie active de l'outil :
  - rayon du bec de l'outil «  $r$  »,
  - forme des plaquettes de coups :
    - géométrie conventionnelle,
    - géométrie wiper
  - type des matériaux outil/pièce:
    - matériau usinant : céramique mixte  $Al_2O_3+TiC$
    - matériau à usiné : acier X38CrMoV5-1 traité à 50 HRC
  - type de revêtement des plaquettes de coups :
    - plaquettes revêtue en TiN ;
    - plaquettes non revêtue.
- les conditions de travail (rigidité de la machine, la dureté de la pièce ...).

Quelle que soit la méthode utilisée, pour chaque essai, nous analyserons la performance d'usinage en nous basant sur les critères suivants :

- l'usure et la vie des outils ;
- les efforts de coupe ;
- la pression de coupe ;
- les états de surface des pièces usinées ;
- la formation de copeaux;

Les conditions de coupe utilisées pour les différents essais sont indiquées dans les tableaux (II-2 à II-5). Tous les essais d'usinage ont été réalisés sans lubrification.

**Tableau II.2:** Conditions de coupe pour les essais d'effort de coupe et de rugosité des plaquettes de coupes revêtues et non revêtues (plan de Taguchi L<sub>36</sub>)

Symbole	Variables	Unité	Code	Niveaux		
				1	2	3
ap	Profondeur de passe	mm	D	0,10	0,30	0,50
f	Avance	mm/tr	C	0,08	0,14	0,20
Vc	Vitesse de coupe	m/min	B	100	150	200
r	Rayon de bec	mm	A	0,80	1,20	

**Tableau II.3:** Conditions de coupe pour les essais d'usure des plaquettes de coupes revêtues et non revêtues

Paramètres	ap (mm)	Vc (m/min)	f (mm/tr)	r (mm)
Valeurs	0,30	150	0,08	0,8 et 1,2

**Tableau II.4:** Conditions de coupe pour les essais d'effort de coupe et de rugosité des plaquettes de géométrie wiper et conventionnelle (plan de Taguchi L<sub>54</sub>)

Symbole	Variables	Unité	Code	Niveaux		
				1	2	3
ap	Profondeur de passe	mm	D	0,10	0,20	0,30
f	Avance	mm/tr	C	0,08	0,14	0,20
Vc	Vitesse de coupe	m/min	B	110	160	220
r	Rayon de bec	mm	A	0,40	0,80	1,20
Insert	Insert	/	E	Wiper	Conv	/

**Tableau II.5:** Conditions de coupe pour les essais d'usure des plaquettes de géométrie wiper et conventionnelle

Paramètres	ap (mm)	Vc (m/min)	f (mm/tr)	r (mm)
Valeurs	0,20	160	0,08	1,2

### (b) Choix du type de plan d'expérience

Le choix du type de plan d'expérience est crucial pour maximiser l'information obtenue tout en minimisant le nombre d'expériences. Les plans d'expériences reposent sur la fabrication d'un modèle empirique approximatif qui fournit des informations sur les questions à traiter. Le choix du plan dépend de la nature des questions, de la généralité des conclusions recherchées et des ressources disponibles.

Dans le cadre de cette thèse, deux plans d'expériences de type "surface de réponse" ont été utilisés. Ce type de plan permet, à partir d'un modèle mathématique polynomial, de déterminer les valeurs des facteurs influents correspondant à une réponse particulière du système étudié. Toutefois, compte tenu des contraintes de coût et de temps, il n'est pas possible de réaliser des expériences en tout point du domaine expérimental. Il est donc primordial de bien définir les questions de recherche afin de sélectionner le plan d'expérience le plus adéquat. Chaque plan dispose d'un ensemble de matrices d'expériences possibles, codées mathématiquement, qui permettent, après recodage, d'obtenir un plan d'expérimentation à réaliser.

Afin de choisir une table existante, il faut calculer le nombre d'essais minimum à effectuer. Ce calcul est basé sur la notion de degré de liberté (ddl) qui est défini mathématiquement comme suit, le degré de liberté pour :

- un facteur est égal au nombre de ces niveaux moins un ;
- une interaction est égal au produit des ddl des facteurs qui la composent ;
- un modèle est égal à la somme des ddl des facteurs et des interactions ;
- un plan est égal au nombre d'essais moins un.

Il s'agit alors de choisir la plus petite matrice d'expériences compatible avec le modèle choisi, c'est-à-dire le nombre de ddl du plan doit être supérieur ou égal à celui du modèle. Le tableau de Taguchi est désigné par trois symboles. Pour la matrice d'essai «  $L_{36} (2^1 \times 3^3)$  » présentée dans le tableau II-7, comporte 36 essais pour étudier un facteur à deux niveaux (rayon du bec de l'outil « r ») et trois facteurs à trois niveaux (vitesse de coupe «  $V_c$  », avance « f », profondeur de passe « ap »).

Dans cette étude, les deux tables orthogonales standards  $L_{36} (2^1 \times 3^3)$  et  $L_{54} (2^1 \times 3^4)$  de Taguchi sont adoptées comme plan expérimentale pour les plaquettes de coupe revêtue/non revêtue et wiper/conventionnelle, respectivement. Les niveaux des paramètres ont été choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant d'outil de coupe (Sandvik Company) et à partir des essais préliminaires. Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans les *tableaux II.2, II.3, II.4, II.5, II.6 et II.7*.

**Tableau II.6:** Paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 36 essais

Niveau	Valeur codées	Vitesse de coupe $V_c$ (m/min)	Avance f (mm/tr)	Profondeur de coupe ap (mm)	Rayon de bec r (mm)
1	-1	100	0,08	0,1	0,8
2	0	150	0,14	0,3	/
3	1	200	0,20	0,5	1,2

**Tableau II.7:** Matrice de planification pour un plan de 36 essais

Test N°	Valeurs codées				Valeurs réelles			
	X1	X2	X3	X4	ap (mm)	f (mm/rev)	$V_c$ (m/min)	r (mm)
1	-1	-1	-1	-1	0.8	100	0.08	0.1
2	0	0	0	-1	0.8	150	0.14	0.3
3	1	1	1	-1	0.8	200	0.20	0.5
4	-1	-1	-1	-1	0.8	100	0.08	0.1
5	0	0	0	-1	0.8	150	0.14	0.3
6	1	1	1	-1	0.8	200	0.20	0.5
7	0	-1	-1	-1	0.8	100	0.08	0.3
8	1	0	0	-1	0.8	150	0.14	0.5
9	-1	1	1	-1	0.8	200	0.20	0.1
10	1	-1	-1	-1	0.8	100	0.08	0.5
11	-1	0	0	-1	0.8	150	0.14	0.1

12	0	1	1	-1	0.8	200	0.20	0.3
13	1	-1	0	-1	0.8	100	0.14	0.5
14	-1	0	1	-1	0.8	150	0.20	0.1
15	0	1	-1	-1	0.8	200	0.08	0.3
16	1	-1	0	-1	0.8	100	0.14	0.5
17	-1	0	1	-1	0.8	150	0.20	0.1
18	0	1	-1	-1	0.8	200	0.08	0.3
19	-1	-1	0	1	1.2	100	0.14	0.1
20	0	0	1	1	1.2	150	0.20	0.3
21	1	1	-1	1	1.2	200	0.08	0.5
22	0	-1	0	1	1.2	100	0.14	0.3
23	1	0	1	1	1.2	150	0.20	0.5
24	-1	1	-1	1	1.2	200	0.08	0.1
25	0	-1	1	1	1.2	100	0.20	0.3
26	1	0	-1	1	1.2	150	0.08	0.5
27	-1	1	0	1	1.2	200	0.14	0.1
28	0	-1	1	1	1.2	100	0.20	0.3
29	1	0	-1	1	1.2	150	0.08	0.5
30	-1	1	0	1	1.2	200	0.14	0.1
31	1	-1	1	1	1.2	100	0.20	0.5
32	-1	0	-1	1	1.2	150	0.08	0.1
33	0	1	0	1	1.2	200	0.14	0.3
34	-1	-1	1	1	1.2	100	0.20	0.1
35	0	0	-1	1	1.2	150	0.08	0.3
36	1	1	0	1	1.2	200	0.14	0.5

Tableau II.8: Paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 54 essais

Niveau	Valeur codées	Vitesse de coupe Vc (m/min)	Avance f (mm/tr)	Profondeur de coupe ap (mm)	Rayon de bec r (mm)	Incert
1	-1	110	0,08	0,1	0,4	Wiper
2	0	160	0,14	0,2	0,8	/
3	1	220	0,20	0,3	1,2	Conv

Tableau II.9: Matrice de planification pour un plan de 54 essais

Test N°	Valeurs codées				Valeurs réelles			
	X1	X2	X3	X5	Incert	r (mm)	f (mm/tr)	ap (mm)
1	-1	-1	-1	-1	Wiper	0,4	0,08	0,1
2	-1	-1	-1	1	Wiper	0,4	0,08	0,2
3	-1	-1	-1	1	Wiper	0,4	0,08	0,3
4	-1	-1	0	-1	Wiper	0,4	0,14	0,1
5	-1	-1	0	1	Wiper	0,4	0,14	0,2
6	-1	-1	0	1	Wiper	0,4	0,14	0,3
7	-1	-1	1	-1	Wiper	0,4	0,2	0,1
8	-1	-1	1	1	Wiper	0,4	0,2	0,2
9	-1	-1	1	1	Wiper	0,4	0,2	0,3

10	-1	0	-1	-1	Wiper	0,8	0,08	0,1
11	-1	0	-1	1	Wiper	0,8	0,08	0,2
12	-1	0	-1	1	Wiper	0,8	0,08	0,3
13	-1	0	0	-1	Wiper	0,8	0,14	0,1
14	-1	0	0	1	Wiper	0,8	0,14	0,2
15	-1	0	0	1	Wiper	0,8	0,14	0,3
16	-1	0	1	-1	Wiper	0,8	0,2	0,1
17	-1	0	1	1	Wiper	0,8	0,2	0,2
18	-1	0	1	1	Wiper	0,8	0,2	0,3
19	-1	1	-1	-1	Wiper	1,2	0,08	0,1
20	-1	1	-1	1	Wiper	1,2	0,08	0,2
21	-1	1	-1	1	Wiper	1,2	0,08	0,3
22	-1	1	0	-1	Wiper	1,2	0,14	0,1
23	-1	1	0	1	Wiper	1,2	0,14	0,2
24	-1	1	0	1	Wiper	1,2	0,14	0,3
25	-1	1	1	-1	Wiper	1,2	0,2	0,1
26	-1	1	1	1	Wiper	1,2	0,2	0,2
27	-1	1	1	1	Wiper	1,2	0,2	0,3
28	1	-1	-1	-1	Conv	0,4	0,08	0,1
29	1	-1	-1	1	Conv	0,4	0,08	0,2
30	1	-1	-1	1	Conv	0,4	0,08	0,3
31	1	-1	0	-1	Conv	0,4	0,14	0,1
32	1	-1	0	1	Conv	0,4	0,14	0,2
33	1	-1	0	1	Conv	0,4	0,14	0,3
34	1	-1	1	-1	Conv	0,4	0,2	0,1
35	1	-1	1	1	Conv	0,4	0,2	0,2
36	1	-1	1	1	Conv	0,4	0,2	0,3
37	1	0	-1	-1	Conv	0,8	0,08	0,1
38	1	0	-1	1	Conv	0,8	0,08	0,2
39	1	0	-1	1	Conv	0,8	0,08	0,3
40	1	0	0	-1	Conv	0,8	0,14	0,1
41	1	0	0	1	Conv	0,8	0,14	0,2
42	1	0	0	1	Conv	0,8	0,14	0,3
43	1	0	1	-1	Conv	0,8	0,2	0,1
44	1	0	1	1	Conv	0,8	0,2	0,2
45	1	0	1	1	Conv	0,8	0,2	0,3
46	1	1	-1	-1	Conv	1,2	0,08	0,1
47	1	1	-1	1	Conv	1,2	0,08	0,2
48	1	1	-1	1	Conv	1,2	0,08	0,3
49	1	1	0	-1	Conv	1,2	0,14	0,1
50	1	1	0	1	Conv	1,2	0,14	0,2
51	1	1	0	1	Conv	1,2	0,14	0,3
52	1	1	1	-1	Conv	1,2	0,2	0,1
53	1	1	1	1	Conv	1,2	0,2	0,2
54	1	1	1	1	Conv	1,2	0,2	0,3

### **(c) Réalisation des essais**

Les essais de coupe effectués sur l'acier X38CrMoV5-1 (traité à 50HRC), usiné à sec par des plaquettes de coupe en céramique avec des géométriques outils de forme wiper et conventionnelle ainsi que des plaquettes en céramique mixte  $Al_2O_3+TiC$  revêtues et non revêtues. Ces essais nous ont permis de déterminer les paramètres technologiques (les efforts de coupe, la rugosité des surfaces usinées et l'usure) pour différentes conditions de coupe (vitesse de coupe, profondeur de passe, avance de l'outil et rayon du bec de l'outil).

L'évolution de ces paramètres de sortie a défini les performances des matériaux de coupe utilisés et les conditions de coupe adéquates pour optimiser le processus de coupe relatif à cet acier.

### **(d) Analyse des résultats expérimentales**

L'analyse des résultats d'expériences est facilitée par le choix initial des expériences. Les résultats seront faciles à interpréter et riches d'enseignement si l'on a bien préparé les expériences. Grâce aux ordinateurs et aux logiciels la construction des plans d'expériences et les calculs nécessaires à leur interprétation sont devenus très simples. Ces outils favorisent également les représentations graphiques qui illustrent de manière spectaculaire les résultats et améliorent la compréhension des phénomènes.

Les essais unifactoriels ont permis de définir le domaine de fonctionnement adéquat du couple outil/matériau, constitué de céramiques et d'acier X38CrMoV5-1. Les paramètres technologiques de coupe, notamment les composantes de l'effort de coupe, l'effort résultant, la puissance de coupe, la pression spécifique, le volume de copeau enlevé et la rugosité de surface, ont été étudiés en fonction de la variation des paramètres de coupe pour les deux types de plaquettes de coupe, wiper et conventionnelle. Ensuite, la micro-géométrie de l'intégrité de surface a été étudiée en analysant la topographie de surface 2D et 3D mesurée avec un interféromètre en lumière blanche (rugosimètre 3D) suivant la norme internationale ISO. Les résultats ont également permis de déterminer l'évolution de l'usure des outils en fonction du temps d'usinage et son impact sur l'évolution des composantes de l'effort de coupe, la rugosité de surface et la formation du copeau. Ces résultats ont permis de définir les performances des matériaux de coupe et les conditions de coupe optimales pour l'acier étudié.

À partir des résultats expérimentaux des essais multifactoriels, nous avons déterminé les plages de conditions de coupe les mieux adaptées. Pour cela, nous avons utilisé les logiciels de statistiques "Minitab et Design-Expert" pour réaliser une analyse de variance (ANOVA), déterminer les constantes des différents modèles mathématiques, ainsi que pour présenter les résultats en 3D sous forme d'une surface de réponse. L'objectif de cette analyse était de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres technologiques d'usinage étudiés et de proposer des modèles mathématiques pour chaque phénomène étudié.

### **(e) Modélisation des réponses**

L'idée fondamentale de l'analyse des résultats expérimentales des opérations d'usinage est basée sur la modélisation mathématique prédictive entre les variables d'entrée indépendantes et les mesures de performance de sortie dépendantes. L'objectif principal de cette modélisation est de pouvoir prédire quantitativement les performances des opérations d'usinage avec précision. La modélisation peut faciliter une planification efficace des opérations d'usinage pour atteindre une productivité, une qualité et un coût optimaux.

En raison de la complexité énorme du processus de fabrication et du nombre élevé de paramètres déterminants, les approches classiques en matière de modélisation et d'optimisation ne suffisent plus. Des techniques de modélisation et d'optimisation avancées basées sur des algorithmes d'intelligence artificielle (Régression statistique, Machine Learning, Métaheuristiques, etc...) doivent être mises au point et utilisées afin d'obtenir les meilleures performances possibles.

Pour exprimer la relation entre les paramètres de coupe et les paramètres technologiques d'usinage étudiées nous avons utilisé les méthodes de prédictions suivantes :

- la Méthodologie de surface de réponse (RSM) ;
- les Réseaux de Neurones Artificiels (ANN) ;

### **(f) Recherche des paramètres optimaux**

L'optimisation est une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant au choix des conditions de coupe les plus commodes afin d'obtenir des valeurs désirées dans une certaine variable. La sélection des paramètres de processus optimaux joue un rôle important pour garantir la qualité du produit, réduire les coûts de fabrication et augmenter la productivité. Pour une telle optimisation, il est nécessaire de représenter le processus de fabrication dans un modèle mathématique de prédiction.

Pour déterminer le régime optimal de processus de coupes des matériaux durs et sur la base des résultats expérimentaux du plan d'expérience de Taguchi (L54), nous avons utilisé les méthodes d'optimisation mono et multi objective avancées suivantes :

- approche de la fonction de désirabilité (DF) ;
- analyse relationnelle grise (Grey) ;
- algorithmes génétiques (GA) ;
- algorithme de tri génétique non dominé (NSGA-II).

## II. 3. Equipements utilisés

### II. 3. 1. Matériau à utilisé

Pour réaliser cette étude expérimentale, nous avons utilisé des éprouvettes en acier fortement allié de nuance X38CrMoV5-1 (AISI H11). C'est un acier à outils pour travail à chaud à 5% de chrome qui se caractérise par son excellente résistance aux chocs. Les aciers à outils au chrome pour travail à chaud sont désignés comme des aciers du groupe H selon le système de classification AISI et spécifiés dans la norme ASTM A681. Les plus couramment utilisés chrome des aciers à chaud travail sont en acier à outils H11, H12 acier à outils et H13 acier, dans la série de H1 à H19. L'acier à outils H11 contient moins de vanadium que l'acier à outils pour travail à chaud H13 couramment utilisé. Cela donne à ces aciers une ténacité plus élevée, avec une certaine réduction de la résistance à l'usure et de la résistance à la trempe. C'est un acier à durcissement en profondeur et à l'air et peut être durci en profondeur par traitement thermique et trempe à l'air. Cela donne un changement de taille minimal pendant le traitement thermique. Il a également une super résistance à la fissuration par fatigue thermique et une superbe résistance à la fissuration grossière et aux chocs thermiques lorsqu'il est refroidi à l'eau en service.

Grâce à ces propriétés, l'acier à outils H11 est principalement utilisé dans l'industrie aérospatiale, plus précisément pour les trains d'atterrissage. Cet alliage est également largement utilisé pour les pales et les arbres de rotor d'hélicoptères, ainsi que pour les matrices de moulage sous pression.

L'acier à outils H11 est également utilisé pour les applications d'outillage à chaud grâce à son excellente résistance à la fissuration, y compris la fissuration par fatigue thermique, la fissuration grossière et le choc thermique lors du refroidissement par eau. Ceux-ci comprennent des poinçons à chaud, des matrices de moulage sous pression, des matrices de forgeage, des lames de cisaillement à chaud, des matrices de préhension chaude et des outils d'extrusion. Comme la plupart des aciers à haute ténacité et à faible teneur en carbone, l'acier H11 peut être utilisé pour produire des aciers pour travail à chaud avec la méthode de refroidissement par eau. Il se classe parmi les aciers résistants aux chocs thermiques du fait de la présence du chrome, du molybdène et du vanadium.

**le chrome :** augmente la trempabilité de l'acier, diminue le grossissement du grain lors de l'austénitisation, retarde l'adoucissement lors du revenu et contribue à la réduction de l'oxydation à haute température. Il forme également des carbures qui contribuent à la résistance à l'abrasion.

**le molybdène :** confère à l'acier une très bonne résistance à l'usure à chaud via la présence de carbures très durs de 1500 (M6C) à 2000 HV (M2C), et ralentit l'adoucissement.

**le vanadium :** permet de générer des carbures de très haute dureté (3000 HV). De petites additions supérieures à (0,2% en masse) sont très efficaces pour éviter le grossissement du grain

lors du traitement thermique. Dans les aciers à outils, il est très utilisé avec le chrome, le molybdène et le tungstène. Sa mauvaise résistance à l'oxydation au-delà de 600°C est compensée par la présence de chrome. Par ailleurs, la teneur en carbone de l'acier est étroitement liée à la teneur en vanadium. Cette dernière se trouve limitée par des problèmes de trempabilité, de forgeabilité après trempe et revenu.

**le silicium** : avec une teneur voisine de 1% en masse, est utilisé comme désoxydant dans l'acier liquide au stade final de l'élaboration et entraîne une augmentation de la limite élastique, de la résistance à l'oxydation au-delà de 1000°C et de la trempabilité par effet de synergie avec d'autres éléments d'alliage comme le molybdène. Il permet aussi de diminuer la stabilité des carbures M<sub>2</sub>C, ce qui diminue la fragilité du métal. Cet aspect est particulièrement important dans le cadre du forgeage à chaud. Cet acier doit posséder, malgré sa structure martensitique revenue, une bonne trempabilité et il se caractérise par une dureté à température ambiante relativement élevée, comprise entre 40 et 56 HRC, et par une bonne dureté à chaud. Sa propriété essentielle est d'avoir un bon niveau de résistance à l'adoucissement qui lui permet d'être utilisé à une température de travail d'environ 600-650°C.

La composition chimique de l'acier **X38CrMoV5-1** est représentée dans le tableau II-10.

**Tableau II.10:** Composition chimique de l'acier X38CrMoV5-1

Éléments	Pourcentage (%)
Carbone	0,35
Chrome	5,26
Molybdène	1,19
Vanadium	0,50
Silicium	1,01
Manganèse	0,32
Soufre	0,002
Phosphore	0,016
Autres éléments	1,042
Fe	90,31

L'acier X38CrMoV5-1 peut être facilement formé en utilisant des méthodes conventionnelles d'usinage et de forgeage. Pour le forgeage, la température préférée est de 2050 °F (1121 °C), 1650 °F (899 °C) étant le point le plus bas recommandé. H11 peut également être écroui et soudé avec des méthodes conventionnelles pour les aciers de ce groupe. Cela dit, l'usinabilité de H11 est de 75 % à celle des aciers du groupe « W ». Les propriétés mécaniques, thermiques et physiques de l'acier est présentée dans le tableaux II-11.

**Tableau II.11:** Propriétés mécaniques, thermiques et physiques de l'acier X38CrMoV5-1

Propriétés	Valeur
Densité	7,81 g/cc
Point de fusion	1427°C
Résistance à la traction	1792 MPa

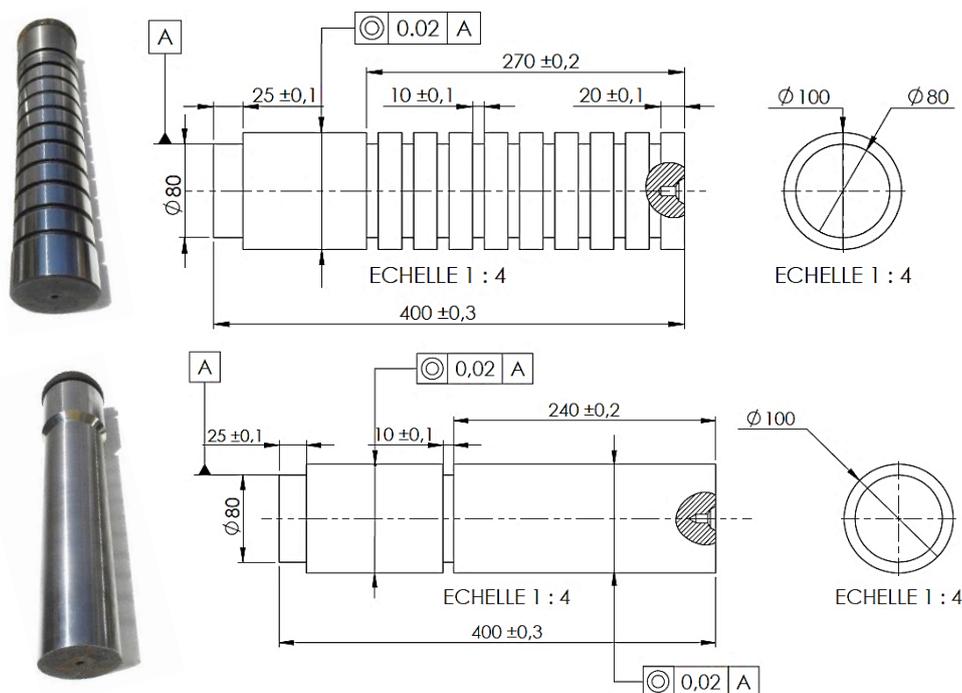
Résistance à la traction, Rendement	1482 MPa
Allongement en 4D	8%
Réduction de la superficie	30%
Dureté, Rockwell C Refroidi à l'air à partir de 1038 °C	57
Coefficient de Poisson	0,27 – 0,30
Résistance à la traction	1792 MPa
Résistance à la traction, Rendement (0,2% Offset)	1482 MPa
Dilatation thermique (20-100 °C)	11,9 x 10 <sup>-6</sup> /°C
Conductivité thermique (100 °C)	42,2 W/mK

Le tableau II-12 donne les équivalences des standards internationaux pour la désignation de cet acier.

**Tableau II.12:** Équivalence d’X38CrMoV5-1 en fonction des normes et des pays

Pays	Normes	Désignation
France	NF A35- 590	X38CrMoV5
Allemagne	DIN 17350	X38CrMoV5-1
Espagne	UNE 36-072	X38CrMoV5
USA	ASTM A681	H11
Italie	UNI 2955-4	X38CrMoV5-1
Japon	JIS G 4404	SKD6
Royaume-uni	BS 4659	BH11

Pour les essais, nous avons usiné des éprouvettes de diamètre  $\Phi = 80$  mm et de longueur  $L = 400$  mm (figure II-5).



**Figure II.5:** Eprouvettes en acier X38CrMoV5-1 utilisées.

### II. 3. 2. Traitement thermique des éprouvettes

L'acier X38CrMoV5-1 peut être traité thermiquement en utilisant divers schémas différents qui donnent des propriétés différentes. Les traitements thermiques de cet alliage consistent généralement en un recuit, un durcissement/austénitisation, une trempe à l'air et à l'huile et un revenu simple ou double à des températures de 840° F (450° C), 930° F (500° C), 1020° F (550° C), 1110°F (600°C) et 1200°F (650°C).

Selon certaines études indépendantes, le traitement thermique optimal pour une combinaison de dureté, ténacité, limite d'élasticité, résistance ultime et ductilité comprend la trempe à l'huile et le double revenu à 1020° F (550° C). Une dureté plus élevée peut être obtenue par trempe à l'huile et double revenu à 1110° F (600° C), mais cela peut également conduire à une résistance inférieure du plomb et à une très faible ductilité. De plus, avec l'augmentation de la dureté de cet acier, la résistance aux chocs diminue.

Pour réaliser les essais de tournage dur nous avons traité thermiquement l'ensemble des éprouvettes, où elles ont subi une trempe suivie d'un revenu, ce qui a augmenté leur dureté entre (45 - 50) HRC (tableau II-3). Le revenu se fait très généralement à température au plus égale à 200 °C. Les valeurs de la dureté peuvent atteindre à l'état trempé ~55HRC. Lorsqu'une grande stabilité des dimensions est désirée, le revenu doit être fait au-dessus de 250 °C, de manière à transformer complètement l'austénite.

**Tableau II.13:** Conditions de traitement thermique

Acier	Dureté avant traitement	Dureté après traitement	Traitement thermique		Temps de maintien
			Trempe	Revenu	
X38CrMoV5-1	26 HRC	~ 50HRC	1010°C	~ [570 ÷ 585]	45 minutes
		~ 45HRC		~ [600 ÷ 620]	
		~ 40HRC		~ [620 ÷ 650]	

Les traitements thermiques des éprouvettes ont été réalisés dans un four électrique pour atelier de production (figure II-6).



**Figure II.6:** Four à chambre électrique pour le traitement thermique des éprouvettes.

### II. 3. 3. Plaquettes de coupe

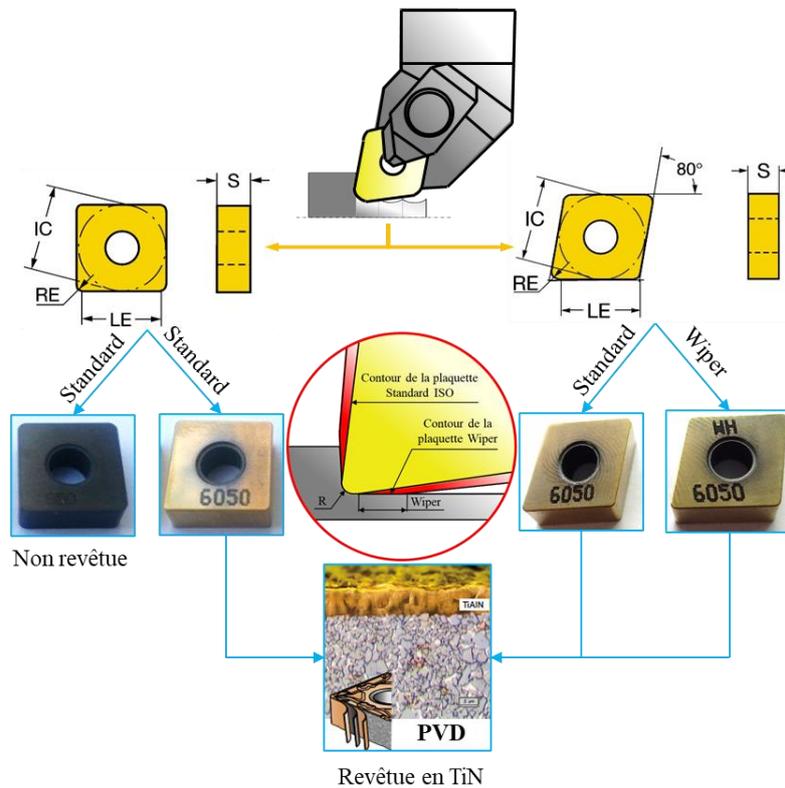
Le matériau des plaquettes de coupe utilisées est la céramique avec et sans revêtement. Ces plaquettes sont amovibles de forme :

Rhombique d'une géométrie Wiper et non Wiper, comportant 4 arêtes de coupe par plaquette et sont de marque SANDVIK, avec une fixation par trou central.

Carrée, comportant 8 arêtes de coupe par plaquette et sont de marque SANDVIK, avec fixation par trou central. Toutes les informations relatives aux plaquettes de coupe sont regroupées dans le tableau II-14 et montrées à la figure II-7.

**Tableau II.14:** Informations relatives aux plaquettes utilisées

Matériau de coupe	Désignation	Géométrie	Revêtement	Composition
Céramique Wiper	CC6050WH SANDVIK	CNGA 120408 S01525WH	TiN	70 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 30 % TiC
Céramique conventionnelle	CC6050WG SANDVIK	CNGA 120408 S01525	TiN	70% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 30% TiC
Céramique mixte revêtue	CC6050 SANDVIK	SNGA 120408 S01020	TiN	70% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 30% TiC
Céramique mixte non revêtue	CC650 SANDVIK	SNGA 120408 T01020	sans	70% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 30% TiC



**Figure II.7:** Types de plaquettes de coupes utilisées

**Plaquettes en céramique mixte non revêtue (noire) :** Les plaquettes de coupe (Figure II-7) sont une nuance de céramique mixte à base d'alumine, additionnées de carbure de titane (70%  $Al_2O_3$  + 30% TiC). Principalement recommandée pour l'usinage de finition des aciers trempés et des superalliages réfractaires, requérant une bonne résistance à l'usure associée à de bonnes propriétés thermiques.

**Plaquettes en céramique mixte revêtue :** Nuance céramique à base d'alumine, conçue pour optimiser les performances dans les superalliages réfracteurs présumés dans des conditions stables. offre une sécurité élevée et une usure prévisible grâce à sa grande résistance à l'usure en entaille.

**Géométrie Wiper :** les plaquettes céramiques s'utilisent notamment pour la finition des surfaces selon des spécifications très élevées. Sandvik Corament a adapté sa technologie

**Wiper** mondialement réputée aux plaquettes en matériaux de haute technologie afin d'améliorer considérablement la productivité de ce type d'opération.

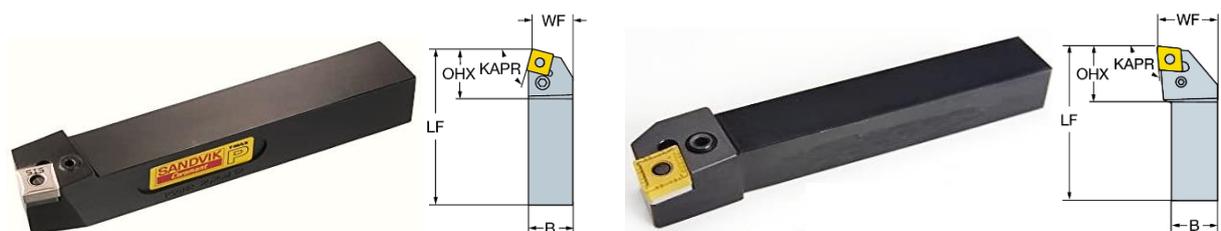
- **WG :** géométrie Wiper pour usinage générale convient bien pour la finition des fontes grise autorise des avances élevées ;
- **WH :** géométrie Wiper optimisée pour le tournage dur peut rivaliser avec la rectification conçue pour des performances optimales sous des avances utilisées en tournage dur de finition.

### II. 3. 4. Porte outil

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé deux porte-outil (SANDVIK) sur lequel sont fixées les plaquettes mécaniquement par trou central (figure II.7). La désignation des deux porte-outils selon la norme ISO sont données au tableau II-5. La plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un fort élément de serrage dans le porte-outil. Une cale-support en carbure métallique vissée et rectifiée, protège le porte-outil et garantit un contact parfait de la plaquette.

**Tableau II.15:** Caractéristiques des portes plaquettes utilisées

Désignation	Marque	$\alpha$	$\gamma$	$\chi$	$\lambda$
PSBNR 2525 M12	SANDVIK Coromant	6°	-6°	75°	-6°
PCLNR 25×25 M12	SANDVIK P MAX	6°	-6°	95°	-6°



**Figure II.8:** Portes outils utilisés

### II. 3. 5. Machine-outil

Pour réaliser les essais de tournage dur sur l'ensembles des éprouvettes à l'aide d'un tour conventionnel « TOS TRENCIN » modèle SN40 (Figure II.9). Les caractéristiques de cette machine sont les suivantes :

- Puissance du moteur électrique : 6.6 kW.
- Vitesse de rotation possibles de la broche : 45 à 2000 tr/min.
- Vitesses d'avance : 0.08 à 6.4 mm/tr.



**Figure II.9:** Tour parallèle modèle SN 40C

### II. 3. 6. Instruments de mesures utilisés

#### II. 3. 6. 1. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

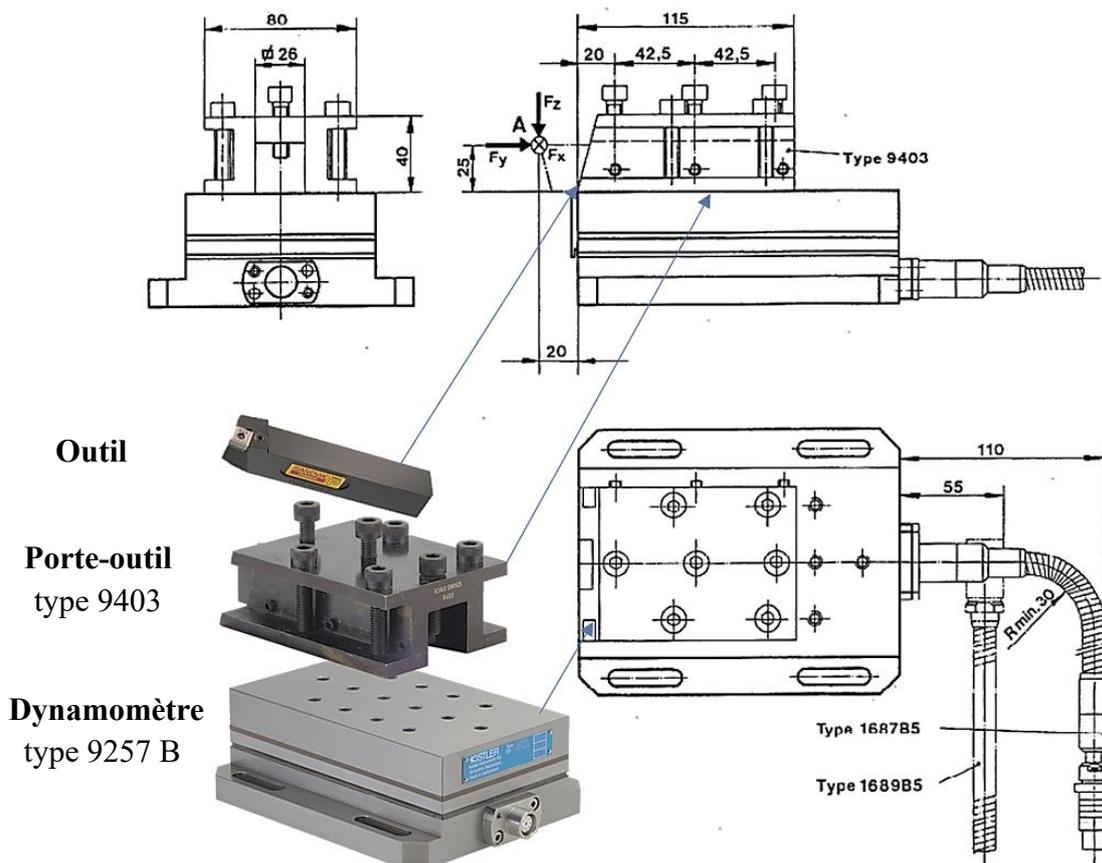
Pour la mesure des composantes de l'effort de coupe, nous avons utilisé une plateforme de dynamomètre multi-composantes KISTLER 9257 B (Figure II-10). Ce dispositif est considéré comme l'un des équipements les plus fiables pour effectuer cette mesure. Il est constitué de plusieurs éléments, notamment le dynamomètre lui-même, un amplificateur de signaux, un PC avec un logiciel approprié, ainsi qu'un traceur ou une imprimante pour tracer les courbes.

Le dynamomètre à plusieurs composantes sert à mesurer dynamiquement et quasi statiquement les 3 composantes orthogonales d'une force ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) qui agit dans une direction quelconque sur la plaque de recouvrement. A l'aide d'instruments d'évaluation optionnels, les 3 moments  $M_x$ ,  $M_y$  et  $M_z$  peuvent aussi être mesurés. Il possède une grande rigidité et par conséquent une fréquence propre élevée. Sa très haute résolution permet de mesurer les moindres variations de grandes forces. Il mesure l'effort de coupe effectif indépendamment du point d'attaque. La force moyenne ainsi que l'augmentation dynamique de celle-ci peuvent être évaluées. La gamme des fréquences utilisable dépend principalement de la fréquence de résonance de la configuration de mesure complète.

Le dynamomètre à plusieurs composantes est surtout utilisé pour :

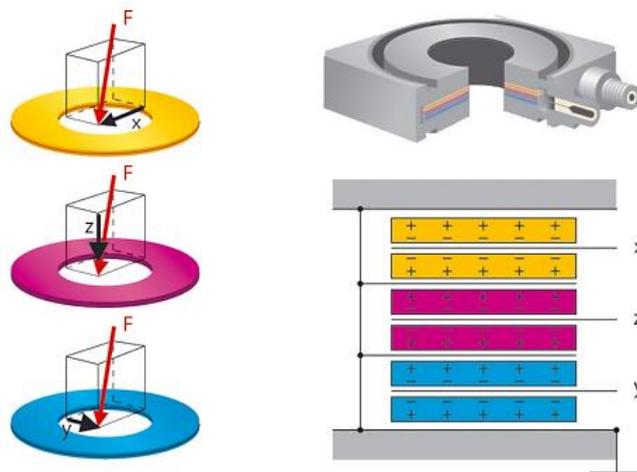
- Mesurer des efforts de coupe lors du tournage, du rectifiage.
- La grande sensibilité et les gammes de mesure partielles étalonnées permettent des mesures exactes sur de petits outils ou lors du rectifiage.
- Mesures ergonométriques.

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. La force à mesurer est introduite sur la plaque de recouvrement et distribuée sur les 4 capteurs de force à 3 composantes qui sont disposés entre la plaque de base et de recouvrement. Les capteurs de force comprennent chacun trois paires de plaquettes en cristal de quartz ; l'une de ces paires est sensible à la pression selon l'axe z alors que les deux autres sont sensibles au cisaillement selon l'axe x resp. y. La mesure se fait pratiquement sans déformation. La force introduite est décomposée en trois composantes dans ces quatre capteurs.



**Figure II.10:** Dimensions du dynamomètre type « 9257 B » avec porte-outil type « 9403 »

Pour la mesure de forces à trois composantes les signaux séparés sont réunis dans le câble de connexion. Pour la mesure de forces et moments avec 6 composantes les 8 signaux séparés sont directement menés aux entrées de l'amplificateurs de charge par l'intermédiaire du câble de connexion. Dépendant de la direction de la force agissante, des charges positives ou négatives sont générées aux connexions. Les charges négatives donnent des tensions positives à la sortie de l'amplificateur de charge et inversement.



**Figure II.11:** Principe de fonctionnement du dynamomètre

### II. 3. 6. 2. Equipements utilisés pour la mesure de l'état de surface

#### (a) Mesure des états de surface 2D : méthode à contact

Les différents critères de la rugosité de surface ( $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_z$ ) ont été mesurés avec la méthode à contact en utilisant un rugosimètre (2D) SurfTest 301 (Mitutoyo), pour chaque condition de coupe. Il est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de  $5\ \mu\text{m}$  se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce (Figure II-12)



**Figure II.12:** Mesure de rugosité avec un rugosimètre 2D

#### (a) Mesure des états de surface 3D : méthode sans contact

Pour étudier la topographie de surface 2D et 3D des éprouvettes d'essais, nous avons utilisé la station de topographie de surface sans contact micrométrique « AltiSurf » (Figure II-13). Cet instrument de mesure est un système multi-capteurs conçu pour lire finement les surfaces de composants. Il relève des séries de profils qui, assemblés automatiquement, permettent de reconstituer la morphologie de pièces et matériaux afin d'appliquer des paramètres d'analyse en termes de rugosité, de tribologie, de formes et de phénomènes topographiques, de dimensions.



**Figure II.13:** Station de topographie de surface sans contact micrométrique « AltiSurf 500 »

- **Principe de fonctionnement**

Un faisceau lumineux, issu d'une lampe halogène (lumière blanche, poly chromatique), passe par une fibre optique jusqu'à une sonde passive. Cette sonde passive possède une lentille à forte aberration chromatique. Le rôle de cette lentille est de décomposer le faisceau lumineux en longueurs d'ondes monochromatiques sur une certaine distance que l'on appelle gamme de mesure : 300 microns ou 3 millimètres (cf. schéma ci-dessous, 300  $\mu\text{m}$ ). En fonction du relief de la surface analysée, certaines longueurs d'ondes monochromatiques vont être réfléchies. Ces dernières vont être interprétées en termes d'altitude.

- **Traitement de la surface**

Les données acquises font l'objet d'un traitement informatique permettant de :

- Caractériser les états de surface
- Calculer des paramètres de rugosité normalisés 2D et 3D
- Mesurer des distances, hauteurs, angles, épaisseurs
- Mesurer des volumes (creux ou de pics)
- Représenter la surface en 2D et 3D suivant divers modes

- **Applications**

Caractérisation d'états de surface sur tout type de support, tribologie, analyse de revêtements, propagation défaut (ex : de fissures, rayures, ...), planéité de surface, contrôle production, ...

- **Caractéristiques techniques :**

- Vitesse maximale d'acquisition : 10 mm.s-1
- Sondes : 300  $\mu\text{m}$  (résolution 0,01  $\mu\text{m}$ ) et 3 mm (résolution 0,1  $\mu\text{m}$ )
- Précision de table : inférieure à 0,1  $\mu\text{m}$  / 50 mm
- Mesure jusqu'à 43° d'angle

### II. 3. 6. 3. Equipements de mesure de l'usure et la forme des copeaux

#### (a) Microscope Visual 250

Cette machine a été spécialement conçue dans le souci d'offrir une alternative à coût fortement optimisé dans le domaine de la vision, tout en assurant une précision et une qualité optimum. Sa conception mécanique est d'une grande robustesse, ce qui permet une utilisation de la machine aussi bien en atelier que dans le laboratoire de mesure (Figure II-14).



**Figure II.14:** Machine pour la mesure d'usure (machine Visual 250)

#### (b) Microscope Numérique : KEYENCE VHX-6000

Le microscope numérique Keyence VHX-6000 est un équipement de pointe de nouvelle génération qui intègre une technologie optique avancée, incluant un microscope 3D offrant un zoom allant de 0,1x à 5000x, ainsi qu'une profondeur de champ élargie et des observations multi-angles. Il est doté d'un disque dur intégré de 500 Go permettant de stocker des données d'images, de vidéos et de mesures brutes directement sur l'appareil. Les mesures dimensionnelles peuvent être effectuées en temps réel à l'aide d'un tapis de souris. Le VHX-6000 est capable de traitement rapide et dispose d'une platine de 100 mm x 100 mm avec un mouvement motorisé à 3 axes.

KEYENCE est fabricant de microscopes depuis plus de 25 ans pour l'Industrie. Le microscope numérique professionnel de la série VHX-6000 en est la dernière évolution. Il est

conçu pour faire des observations d'échantillons rapides et sous tous les angles notamment pour des applications de métallographie ou de caractérisation de surface des matériaux. Ce microscope numérique combine, en un seul système, les fonctions d'observation, de capture d'image et de mesure tout en offrant une interface sur écran qui facilite la visualisation. C'est un système simple d'utilisation qui peut répondre à tous vos besoins. Tout utilisateur, quel que soit son niveau d'expérience, peut obtenir instantanément des images entièrement nettes de haute qualité et réduire ainsi considérablement le temps consacré au contrôle.



**Figure II.15:** Microscope Numérique : KEYENCE VHX-6000

Equipement de pointe, le microscope numérique Série VHX-6000 garantit une grande profondeur de champ 20x supérieur à celle des microscopes optiques. La technologie HDR permet la capture d'images haute résolution. Il suffit d'afficher la zone souhaitée pour capturer une image entièrement nette de l'ensemble du champ de vision. Equipé d'un capteur CMOS, ce microscope assure une vitesse de capture de 50 images par seconde (ips).

Le microscope numérique Série VHX-6000 est muni d'une platine, conçue pour s'adapter à tous les types d'objectif et offrir une résistance importante aux vibrations. Il peut définir automatiquement le modèle d'objectif, le grossissement et les réglages de chaque fonction. L'angle d'éclairage est réglable même après enregistrement de l'image. Il est ensuite possible de réaliser des mesures 2D en temps réel et d'obtenir des données de profil, de hauteur et de

volume à partir d'images 3D. Les caractéristiques techniques du microscope numérique VHX-6000 sont les suivantes :

- Microscope haute résolution, écran 23" connectiques, source LED intégrée
- Caméra couleur CMOS 50 fps / 3CCD
- Support de montage 40\*40mm inclinable, motorisé en XYZ
- Monture à revolver x20 jusqu'à x2000
- Lentille à Reconnaissance de Zoom x500 à x5000
- Distance de travail 4,4mm
- Jeu de 3 éclairages et filtres fluorescents Nightsea®

### (c) Microscope à balayage électronique MEB : QUANTA FEG 250

Le microscope électronique à balayage permet de visualiser la surface d'échantillons variés et d'observer les détails à l'échelle du nanomètre. Le contrôle de la pression dans la chambre du microscope et le module de cryo-préparation offrent de plus la possibilité de regarder des échantillons secs, hydratés ou congelés. Parmi les nombreuses possibilités qu'offre cette ressource, la cryofracture permet d'observer l'intérieur des échantillons et l'analyse X de qualifier et quantifier les espèces atomiques présentes à sa surface.



**Figure II.16:** Microscope à balayage électronique de type «QUANTA FEG 250»

Le MEB utilisé durant la thèse était un QUANTA FEG 250 (Figure II.16). Ce microscope a la spécificité de pouvoir fonctionner en mode environnemental ou ESEM (Environmental Scanning Electron Microscopy). L'étape de préparation pour faire de l'imagerie en mode ESEM est très rapide, voir même inexistante lorsqu'on étudie des faciès fracturés. On peut ainsi

observer des échantillons dans leurs états naturels, sans aucun de traitement de surface (polissage, ion milling, métallisation, etc.). Cet appareil permet d'observer des échantillons dans trois modes différents :

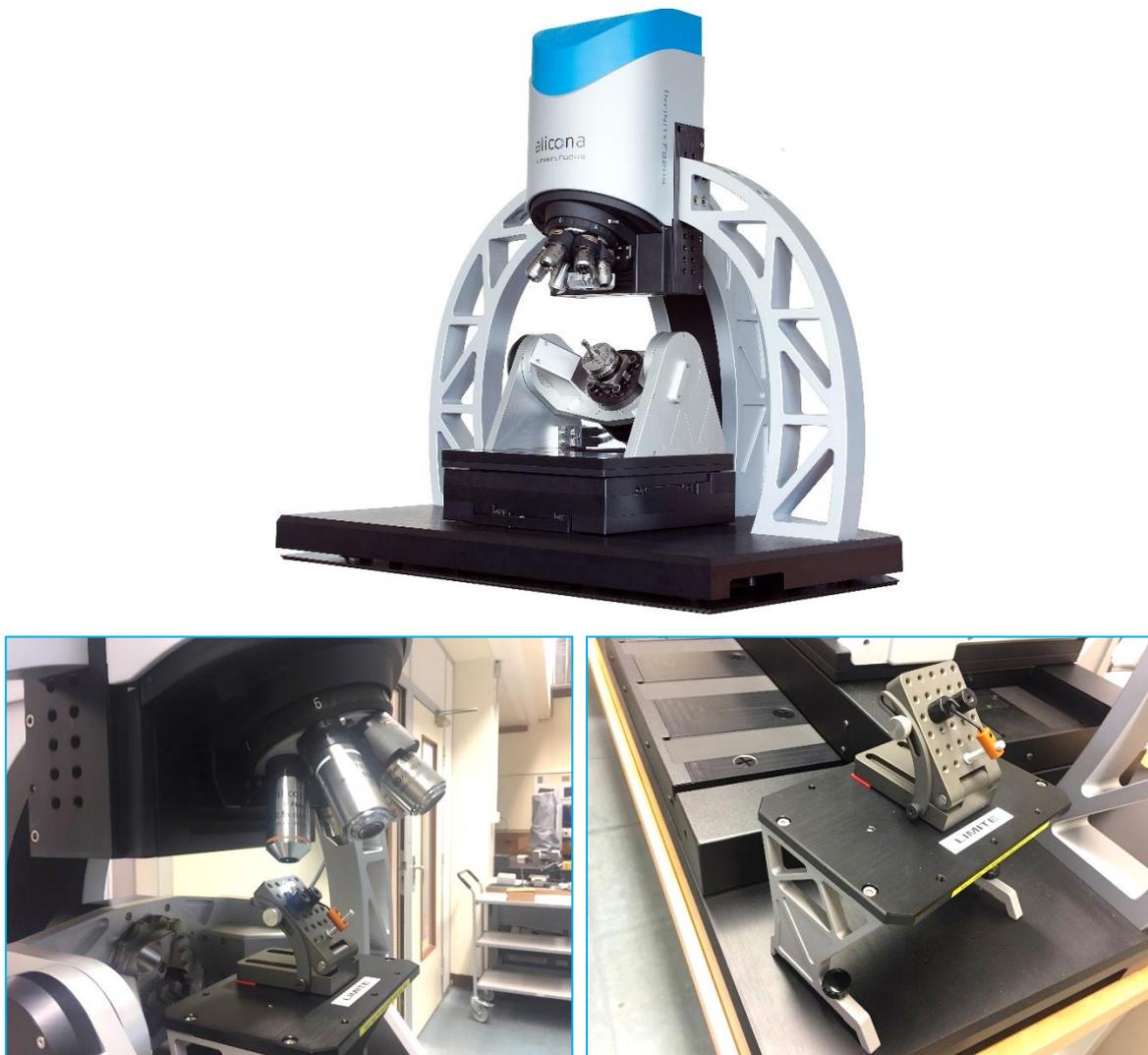
- **Haut vide**, pour les échantillons conducteurs et ceux qui vont nécessiter une préparation, ainsi qu'une métallisation.
- **Pression contrôlée**, pour les échantillons non-conducteurs. Ce mode peut éviter de réaliser une préparation.
- **Environnemental**, ce mode permet l'observation d'échantillons hydratés à l'aide d'une platine refroidissante par effet Peltier, permettant de faire varier la température de -25°C à +55°C.

#### Caractéristiques techniques :

- **Source** : Canon à effet de champ (FEG) de type Schottky
- **Tension d'accélération** : 200 V à 30 kV
- **Vide** :
  - Mode haut vide (HV) <6 e -4 Pa
  - Mode faible vide (LV) de 10 à 130 Pa
  - Mode environnemental (ESEM) de 10 à 4000 Pa
- **Résolution en électrons secondaires** :
  - 0,8 nm à 30 kV (STEM) (Mode HV)
  - 1,2 nm à 30 kV et 3 nm à 1 kV (SE) (Mode HV)
  - 1,5 nm à 30 kV et 3 nm à 3 kV (SE) (Mode LV)
  - 1.5nm à 30 kV (SE) (Mode ESEM)
- **Imagerie** :
  - en électrons secondaires (Everhart-Thornley en mode HV, LFD en mode LV, GSED en mode ESEM)
  - en électrons rétrodiffusés (BSED en modes HV et LV, GAD en modes LV et GBSSED en mode ESEM)
  - en électrons transmis (STEM en modes HV et LV, WetSTEM en mode ESEM)
- **Équipements** :
  - Platine Peltier équipée du module WetSTEM
  - Système de microanalyse X à sélection d'énergie (EDS) avec un détecteur SDD (Silicon Drift Detector) Ultim Max 100 mm<sup>2</sup> d'Oxford Instruments.
  - Cathodoluminescence Centaurus avec un photomultiplicateur 400nm-1200nm de chez DEBEN.

**(d) Appareil de mesure optique 3D : Infinite Focus G5 plus**

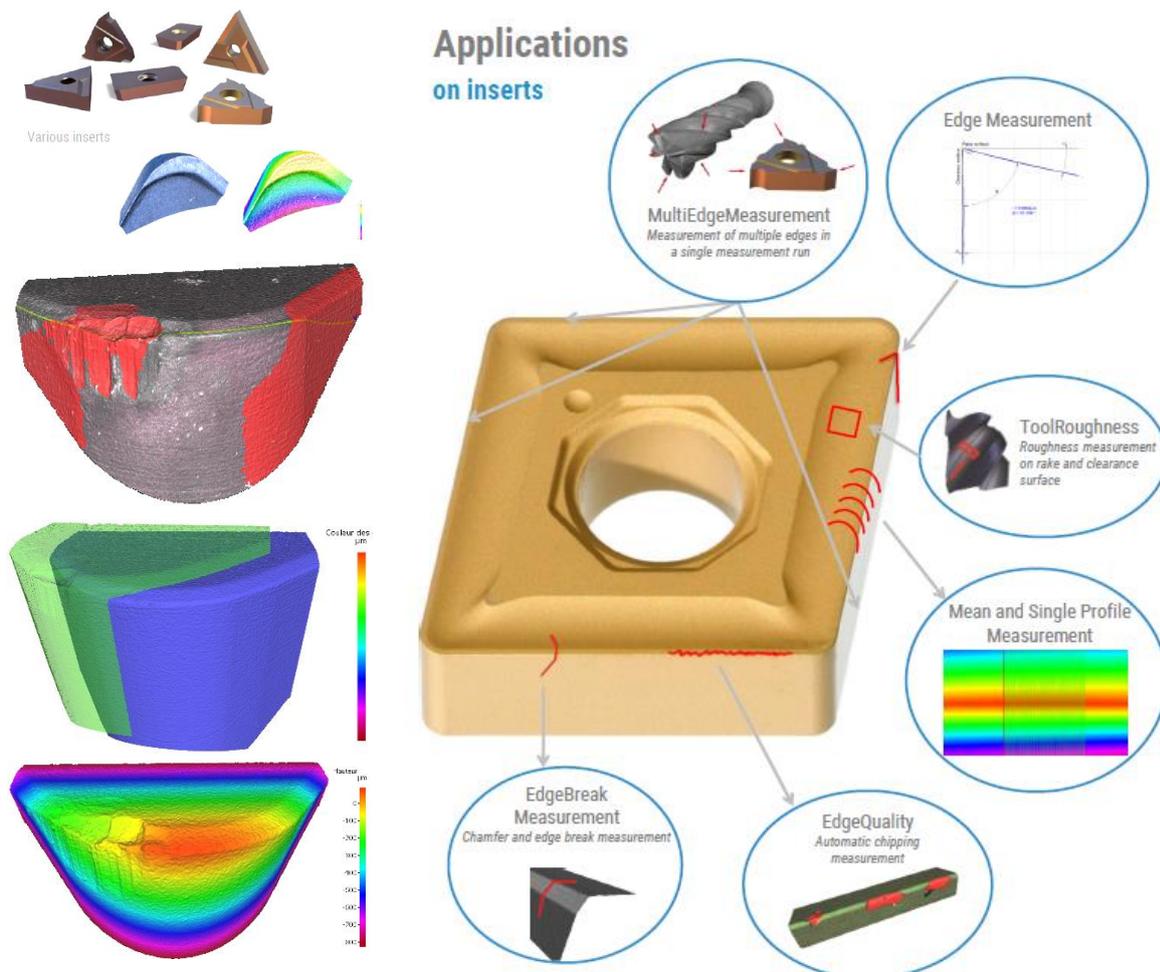
Infinite Focus est un système de mesure optique 3D extrêmement précis, rapide et flexible. Avec un seul capteur, les utilisateurs vérifient la précision dimensionnelle et mesurent la rugosité de surface de leurs composants. Basé sur la technologie de Focus Variation, la gamme de surfaces mesurables est presque illimitée. Au moyen de la sonde de mise au point verticale, qui est une extension de la variation de la mise au point, les surfaces verticales sont également sondées latéralement. Les composants sont mesurés de manière traçable avec une grande précision, une résolution verticale élevée et une répétabilité élevée. Le principe de mesure robuste de Focus-Variation en combinaison avec un matériel d'isolation des vibrations permet la mesure de la forme et de la rugosité de composants également volumineux et lourds. Tous les axes d'Infinite Focus sont équipés d'encodeurs de haute précision assurant un mouvement précis de la scène. Avec une interface d'automatisation, Infinite Focus est également appliqué pour des mesures entièrement automatiques également en production.



**Figure II.17:** Appareil de mesure optique 3D : Infinite Focus G5 plus

La Variation Focale combine la faible profondeur de champ d'un système optique et son balayage vertical, afin de fournir une information de topographie en couleurs réelles à partir de la variation de netteté des images sur le capteur. Le composant principal du système consiste en un système optique de précision, comportant de nombreuses lentilles, qui peut être équipé d'une variété d'objectifs, qui permettent de réaliser des mesures à différentes résolutions.

A l'aide d'un miroir semi-réfléchissant, la lumière issue d'une source de lumière blanche est guidée vers le chemin optique du système et focalisée sur la pièce à mesurer au travers de l'objectif. Suivant la topographie présente à la surface de la pièce, la lumière est réfléchiée dans différentes directions dès qu'elle l'atteint. Si la topographie présente des caractéristiques de réflexion diffuses, la lumière est réfléchiée de manière homogène dans toutes les directions. Dans le cas d'une réflexion spéculaire, la lumière est réfléchiée suivant une direction principale. Tous les rayons issus de la pièce et qui sont renvoyés vers l'objectif, sont ensuite groupés dans le système optique puis collectés au moyen d'un capteur sensible à la lumière, derrière le miroir semi-réfléchissant. A cause de la faible profondeur de champ de l'objectif, seules de petites zones de l'objet sont focalisées sur l'image.



**Figure II.18:** Mesurer l'usure de la plaquette en 3D avec la technologie d'infinite Focus

Afin de permettre une détection complète de la surface sur toute sa profondeur, le système optique de précision est alors déplacé verticalement le long de l'axe optique, tout en réalisant

l'acquisition des données de la surface en continu, ce qui permet ainsi d'obtenir des données focalisées sur toutes les zones de la surface. L'algorithme convertit alors les données acquises par le capteur, en informations 3D en couleurs réelles, avec une profondeur de champ complète. Ceci est réalisé en analysant la variation de netteté le long de l'axe vertical.

#### **II. 3. 6. 4. Duromètre pour la mesure de la dureté**

Pour mesurer la dureté des éprouvettes avant et après traitement thermique, nous avons utilisé un duromètre digital type DM2-D 390 dont les caractéristiques sont les suivantes :

- son poids = 40 Kgf, sa hauteur = 490 mm, sa largeur = 250 mm, sa profondeur = 395 mm ;
- la table sur laquelle se pose l'échantillon est de forme carrée de côté 110 mm ;
- les charges utilisées sont : (10 ; 25 ; 50 ; 100 ; 200 ; 300 ; 500 et 1000) gf ;
- la hauteur max de l'échantillon ne doit pas dépasser 90 mm ;
- l'intervalle de la dureté est de 211 à 1037 HV (17 à 70) HRC ;
- le temps de chargement est de (0 à 99) secondes.

#### **II. 4. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons exposé les équipements utilisés lors de nos essais expérimentaux, ainsi que les caractéristiques des matériaux de coupe, les instruments de mesure utilisés, les conditions de coupe et la planification des expériences selon la méthode paramétrique et multifactorielle. Le chapitre suivant (chapitre III) portera sur une étude de l'usinabilité de l'acier X38CrMoV5-1 traité à 50 HRC. Nous évaluerons les performances d'outils de coupe en céramique de formes wiper et conventionnelles, ainsi que des plaquettes en céramique mixte Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiC, revêtues et non revêtues.

# Chapitre

# III

## Etude de l'impact du revêtement de l'outil sur la coupe d'un acier dur

« La créativité consiste à inventer, expérimenter, grandir, prendre des risques, briser les règles, faire des erreurs et s'amuser »

Mary Lou Cook

### Sommaire

<b>III. 1. Introduction.....</b>	<b>- 92 -</b>
<b>III. 2. Résultats expérimentaux et discussions .....</b>	<b>- 92 -</b>
III. 2. 1. Analyse et modélisation de la rugosité de surface (Ra et Rt) .....	- 94 -
III. 2. 1. 1. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface .....	- 94 -
(a) Facteurs influents (Graphe de Pareto).....	- 96 -
III. 2. 1. 1. Analyse de régression de la rugosité de surface Ra et Rt .....	- 97 -
III. 2. 1. 2. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées.....	- 101 -
III. 2. 2. Analyse et modélisation de l'effort de coupe (Ft).....	- 101 -
III. 2. 2. 1. Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort tangentiel .....	- 101 -
(a) Facteurs influents (Graphe de Pareto).....	- 102 -
III. 2. 2. 2. Analyse de régression de l'effort tangentiel Ft .....	- 103 -
III. 2. 3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées.....	- 105 -
<b>III. 3. Analyse de l'intégrité de la surface.....</b>	<b>- 106 -</b>
III. 3. 1. Paramètres de profil (2D) d'état de surface .....	- 106 -
III. 3. 1. 1. Paramètres d'amplitude de profil 2D .....	- 106 -
III. 3. 2. Paramètres surfaciques 3D d'état de surface .....	- 109 -
III. 3. 2. 1. Paramètres d'amplitude .....	- 109 -
III. 3. 2. 2. Paramètres fonctionnels .....	- 110 -
(a) Paramètres de taux de portance.....	- 111 -
(b) Les paramètres Sk.....	- 113 -
(a) Paramètres de volume .....	- 114 -
<b>III. 4. Analyse de l'usure de l'outil de coupe.....</b>	<b>- 115 -</b>
III. 4. 1. Evolution de l'usure en fonction du temps de coupe .....	- 115 -
III. 4. 2. Evolution de la rugosité de surface en fonction du temps d'usinage .....	- 120 -
III. 4. 3. Évolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage.....	- 122 -
<b>III. 5. Conclusion .....</b>	<b>- 122 -</b>

### III. 1. Introduction

Ce chapitre vise à étudier l'impact du revêtement des outils de coupe sur les différents paramètres technologiques liés au couple (Outil – Matière) lors du tournage à sec de l'acier X38CrMoV5-1 traité à 50 HRC. Deux types de plaquettes de coupe ont été utilisées d'une nuance de céramique mixte à base d'alumine, additionnées de carbure de titane (70%  $Al_2O_3$  + 30% TiC) dont la première est non revêtue. La deuxième plaquette est revêtue avec une couche mince de nitrure de titane (TiN) déposée par voie physique (technique PVD). La méthodologie des surfaces de réponse (RSM) a été utilisée pour développer des modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés en utilisant un plan d'expérience incomplet de Taguchi  $L_{36}$  ( $2^1 \times 3^3$ ). Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $ap$  et  $r$ ) et les paramètres technologiques étudiés (effort de coupe et rugosité de surface). L'analyse de la variance ANOVA a été utilisée pour déterminer et classer les paramètres de coupe qui sont influents sur les réponses étudiées. L'évolution de l'usure en dépouille ( $V_b$ ) des outils en fonction du temps et l'analyse de la topographie des surfaces usinées 2D et 3D ont été établies.

### III. 2. Résultats expérimentaux et discussions

Le Tableau III.1 présente les conditions de coupe (la vitesse de coupe, le rayon de bec, l'avance et la profondeur de passe), et les résultats expérimentaux correspondants aux critères de rugosité de surface ( $R_a$  et  $R_t$ ) et de l'effort de coupe tangentiel ( $F_z$ ). Ces résultats sont obtenus suite aux différentes combinaisons des conditions de coupe (matrice de planification des expériences pour un plan de Taguchi  $L_{36}$ , avec  $N = 2^1 \times 3^3 = 36$  essais), lors du tournage dur de l'acier X38CrMoV5-1 (50 HRC) en utilisant des plaquettes de coupe en céramique mixte revêtue et non revêtue. L'ensemble des résultats indiqués au Tableau III.1 seront utilisés pour faire l'analyse de la variance ANOVA afin de déterminer l'impact de chaque paramètre de coupe ( $V_c$ ,  $r$ ,  $f$  et  $ap$ ) sur la rugosité de surface et l'effort de coupe obtenus pour les deux plaquettes de coupe. D'autre part, cette analyse sera utilisée pour modéliser le processus et aussi optimiser les conditions de coupe.

Les critères de rugosité de surface ( $R_a$  et  $R_t$ ) ont été obtenus dans la plage de (0,18–1,51 et 1,33–7,96)  $\mu m$  et (0,20–1,36 et 0,69–6,77)  $\mu m$  respectivement pour la plaquette revêtue et non revêtue. Les résultats montrent que l'avance est la caractéristique prédominante et déterminante de la qualité de l'état de surface ( $R_a$  et  $R_t$ ), avec son accroissement on assiste à une dégradation significative de celle-ci. Le deuxième paramètre qui influence la rugosité de surface est le rayon de bec, avec son augmentation contribuant aussi à l'amélioration de l'état de surface usinée. Le facteur le moins influant dans notre cas sur l'état de surface est la vitesse de coupe.

On remarque que les valeurs maximales de l'effort tangentiel ( $F_t$ ) ont été obtenues pour le régime de coupe suivant :  $r = 1,2$  mm,  $V_c = 150$  m/min,  $f = 0,20$  mm/tr et  $ap = 0,5$  mm (test

N°23). Avec une augmentation de  $r$ ,  $f$  et de  $a_p$ , l'épaisseur du copeau devient importante ce qui cause une croissance du volume du métal déformé et cela nécessite d'énormes efforts de coupe pour tailler le copeau. Alors que ses valeurs minimales ont été enregistrées pour les conditions suivantes :  $r = 0,8$  mm,  $V_c = 200$  m/min,  $f = 0,08$  mm/tr et  $a_p = 0,3$  mm (test N°18) et  $r = 1,2$  mm,  $V_c = 100$  m/min,  $f = 0,14$  mm/tr et  $a_p = 0,1$  mm (test N°19), respectivement pour la plaquette revêtue et non revêtue.

**Tableau III.1:** Valeurs expérimentales de  $R_a$ ,  $R_t$  et  $F_z$ , pour les deux types de plaquettes de coupe

Test N°	Variables d'entrées				Plaquette revêtue			Plaquette non revêtue		
	r mm	Vc m/min	F mm/rev	ap mm	Ra µm	Rt µm	Ft N	Ra µm	Rt µm	Ft N
1	0.8	100	0.08	0.1	0.39	2.61	164.26	0.67	3.65	20.41
2	0.8	150	0.14	0.3	0.76	4.40	67.30	0.63	3.23	78.08
3	0.8	200	0.2	0.5	1.48	7.40	170.16	1.14	5.60	161.84
4	0.8	100	0.08	0.1	0.37	2.56	72.93	0.66	3.30	22.71
5	0.8	150	0.14	0.3	0.80	4.76	91.83	0.61	3.96	87.24
6	0.8	200	0.2	0.5	1.51	7.01	107.03	1.36	6.77	153.24
7	0.8	100	0.08	0.3	0.36	2.67	175.80	0.29	1.82	48.98
8	0.8	150	0.14	0.5	0.73	4.34	120.97	0.58	3.27	131.83
9	0.8	200	0.2	0.1	1.40	6.38	46.54	1.30	6.26	30.80
10	0.8	100	0.08	0.5	0.30	2.38	31.40	0.36	3.46	100.70
11	0.8	150	0.14	0.1	0.73	3.76	142.30	0.67	3.59	33.81
12	0.8	200	0.2	0.3	1.50	7.96	104.85	1.10	5.25	100.96
13	0.8	100	0.14	0.5	0.71	4.21	167.99	0.63	3.88	122.15
14	0.8	150	0.2	0.1	1.24	5.70	139.75	1.24	6.31	31.31
15	0.8	200	0.08	0.3	0.33	2.46	112.13	0.31	2.16	59.59
16	0.8	100	0.14	0.5	0.67	3.88	41.07	0.68	3.57	133.28
17	0.8	150	0.2	0.1	1.26	6.68	61.54	1.28	6.70	48.48
18	0.8	200	0.08	0.3	0.24	1.65	15.35	0.27	2.25	51.07
19	1.2	100	0.14	0.1	0.54	3.12	55.23	0.63	3.41	29.93
20	1.2	150	0.2	0.3	1.10	6.13	25.57	0.79	4.36	105.89
21	1.2	200	0.08	0.5	0.26	1.77	29.63	0.30	1.81	85.31
22	1.2	100	0.14	0.3	0.59	3.22	114.91	0.41	2.69	87.19
23	1.2	150	0.2	0.5	1.12	6.28	207.45	0.52	2.88	163.39
24	1.2	200	0.08	0.1	0.18	1.33	63.19	0.26	1.87	29.48
25	1.2	100	0.2	0.3	1.07	5.41	88.88	0.82	4.50	125.40
26	1.2	150	0.08	0.5	0.24	1.66	36.19	0.33	2.45	90.16
27	1.2	200	0.14	0.1	0.50	3.38	54.71	0.51	2.68	45.67
28	1.2	100	0.2	0.3	1.03	5.99	105.73	0.92	4.58	120.7
29	1.2	150	0.08	0.5	0.30	2.47	134.58	0.26	2.19	96.21
30	1.2	200	0.14	0.1	0.46	2.93	140.62	0.54	2.86	30.41
31	1.2	100	0.2	0.5	1.08	6.17	48.56	0.66	0.69	215.75
32	1.2	150	0.08	0.1	0.30	2.00	45.98	0.29	2.03	14.49
33	1.2	200	0.14	0.3	0.42	2.63	64.73	0.46	3.05	70.91
34	1.2	100	0.2	0.1	1.16	6.13	123.94	1.13	4.98	51.11
35	1.2	150	0.08	0.3	0.28	2.09	106.50	0.20	1.48	43.12
36	1.2	200	0.14	0.5	0.42	3.48	134.34	0.33	2.21	139.49

### III. 2. 1. Analyse et modélisation de la rugosité de surface (Ra et Rt)

#### III. 2. 1. 1. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface

Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour la rugosité de surface Ra et Rt obtenus par les deux plaquettes de coupe testées (revêtue et non revêtue) sont exposés dans le Tableau III. 2 et le Tableau III.3 respectivement. L'analyse est effectuée pour un niveau de signification  $\alpha = 0,05$  (c.-à-d. pour un niveau de confiance de 95%). Dans ces tableaux sont mentionnés les valeurs des degrés de liberté (ddl), la somme des carrés des écarts (SCE), les carrés moyens (CM), la probabilité (Prob.) et la contribution en pourcentage (Cont. %) de chaque facteur et des différentes interactions. Cette analyse détaillée des valeurs de la rugosité Ra et Rt permet de classer les quatre éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$  et  $r$ ) et leurs interactions par ordre d'influence.

L'analyse des résultats montre que l'avance est le facteur le plus important qui affecte la rugosité Ra avec une contribution de (72,24 et 89,95) % respectivement pour les deux plaquettes de coupe testées (non revêtue et revêtue), car l'augmentation de l'avance engendre des sillons hélicoïdaux résultat de la forme de l'outil et du mouvement hélicoïdal outil pièce. Ces sillons sont autant plus profonds et plus larges que l'avance est élevée, d'où la nécessité d'employer de faibles avances lors du tournage de finition. Le second facteur qui influe sur Ra est le rayon de bec. Sa contribution est (12,10 et 4,89)% respectivement. L'effet de la vitesse de coupe n'est pas significatif puisque la valeur de la probabilité est supérieure à 5 %. L'interaction «  $r \times f$  » a un effet significatif sur Ra. Les autres interactions n'ont pas un effet significatif sur la rugosité Ra. Des résultats semblables ont été rapportés par Fnides et autres [127] lors du tournage dur de l'acier X38CrMoV5-1 traité à (50HRC) en utilisant l'outil en céramique mixte non revêtue.

**Tableau III. 2:** Analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité Ra pour les deux plaquettes de coupe testées (revêtue et non revêtue)

Source	SCE	ddl	CM	F-value	Prob.	Cont. %	Remarque
<b>(a) Plaquette Non revêtue</b>							
<b>Modèle</b>	3,701743	10	0,37017431	26,32226	< 0,0001		Significatif
<b>A-r, mm</b>	0,317911	1	0,31791178	22,60599	< 0,0001	12,10	Significatif
<b>B-Vc, m/min</b>	0,023762	1	0,02376211	1,689670	0,2055	0,91	Non significatif
<b>C-f, mm/tr</b>	1,897396	1	1,89739643	134,9195	< 0,0001	72,24	Significatif
<b>D-ap, mm</b>	0,171704	1	0,17170417	12,20949	0,0018	6,53	Significatif
<b>AB</b>	0,000672	1	0,00067277	0,04783	0,8286	0,02	Non significatif
<b>AC</b>	0,087192	1	0,08719213	6,200036	0,0198	3,32	Significatif
<b>AD</b>	0,005410	1	0,00541017	0,384705	0,5407	0,21	Non significatif
<b>BC</b>	0,008830	1	0,00883093	0,62794	0,4356	0,33	Non significatif
<b>BD</b>	0,092884	1	0,09288452	6,604809	0,0165	3,53	Significatif
<b>CD</b>	0,020574	1	0,02057459	1,463013	0,2378	0,78	Non significatif
<b>Résiduel</b>	0,35157	25	0,01406316				
<b>Lack of Fit</b>	0,31637	16	0,01977369	5,055773	0,0091		Significatif
<b>Erreur</b>	0,0352	9	0,00391111				

Total	4,053322	35				100	
<b>(b) Plaquette revêtue</b>							
<b>Modèle</b>	6,038464	10	0,60384643	76,23911	< 0,0001		Significatif
<b>A-r, mm</b>	0,179108	1	0,17910833	22,61346	< 0,0001	4,89	Significatif
<b>B-Vc, m/min</b>	0,002216	1	0,00221681	0,279885	0,6014	0,06	Non significatif
<b>C-f, mm/tr</b>	3,289100	1	3,28910046	415,2680	< 0,0001	89,95	Significatif
<b>D-ap, mm</b>	0,003504	1	0,00350417	0,442421	0,5120	0,09	Non significatif
<b>AB</b>	0,083535	1	0,08353521	10,54680	0,0033	2,29	Significatif
<b>AC</b>	0,051658	1	0,05165824	6,522152	0,0171	1,41	Significatif
<b>AD</b>	0,003139	1	0,00313962	0,396395	0,5347	0,08	Non significatif
<b>BC</b>	0,030636	1	0,03063683	3,868077	0,0604	0,84	Non significatif
<b>BD</b>	0,005318	1	0,0053184	0,671478	0,4203	0,14	Non significatif
<b>CD</b>	0,008257	1	0,00825726	1,042527	0,3170	0,22	Non significatif
<b>Résiduel</b>	0,198010	25	0,00792043				
<b>Lack of Fit</b>	0,188110	16	0,01175692	10,68810	0,0005		Significatif
<b>Erreur</b>	0,009900	9	0,0011				
<b>Total</b>	6,236475	35				100	

A partir du Tableau III.3, les résultats de l'analyse de la variance montrent également que l'avance est le paramètre le plus influant sur la rugosité de surface  $R_t$  avec une contribution de (55,34 et 93,08) %, suivie par le rayon de bec avec une contribution de (15,66 et 3,22) % respectivement pour les deux plaquettes non revêtue et revêtue.

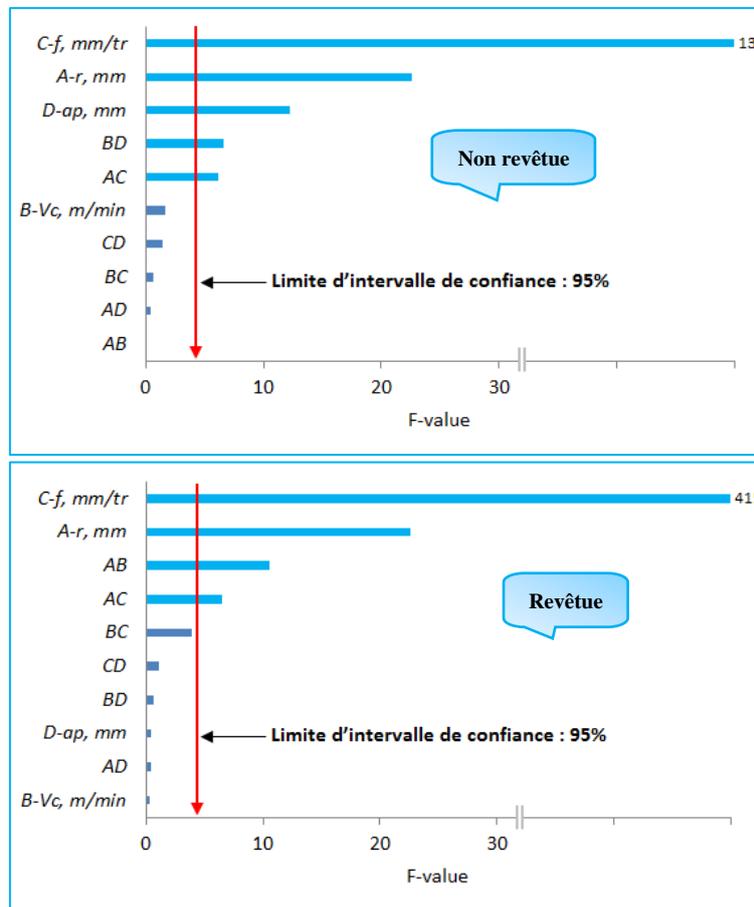
**Tableau III.3:** Analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité  $R_t$  pour les deux plaquettes de coupe testées (revêtue et non revêtue)

Source	SCE	dll	CM	F-value	Prob.	Cont. %	Remarque
<b>(a) Plaquette Non revêtue</b>							
<b>Model</b>	70,90744	10	7,09074415	15,67095	< 0,0001		Significatif
<b>A-r, mm</b>	8,152613	1	8,15261377	18,01774	0,0003	15,66	Significatif
<b>B-Vc, m/min</b>	0,058907	1	0,05890714	0,130188	0,7213	0,11	Non significatif
<b>C-f, mm/tr</b>	28,80886	1	28,8088632	63,66924	< 0,0001	55,34	Significatif
<b>D-ap, mm</b>	3,270816	1	3,27081666	7,228693	0,0126	6,28	Significatif
<b>AB</b>	0,048931	1	0,04893190	0,108142	0,7450	0,09	Non significatif
<b>AC</b>	1,390497	1	1,39049737	3,073079	0,0919	2,67	Non significatif
<b>AD</b>	1,651184	1	1,65118431	3,649212	0,0676	3,17	Non significatif
<b>BC</b>	0,929685	1	0,92968558	2,054658	0,1641	1,79	Non significatif
<b>BD</b>	3,579892	1	3,57989214	7,911767	0,0094	6,87	Significatif
<b>CD</b>	4,167336	1	4,16733631	9,210053	0,0056	8,01	Significatif
<b>Résiduel</b>	11,31192	25	0,45247689				
<b>Lack of Fit</b>	10,11842	16	0,63240139	4,768841	0,0112		Significatif
<b>Erreur</b>	1,193500	9	0,13261111				
<b>Total</b>	82,21936	35					
<b>(b) Plaquette revêtue</b>							
<b>Modèle</b>	120,11806	10	12,0118064	46,285163	< 0,0001		Significatif
<b>A-r, mm</b>	2,4681083	1	2,46810833	9,5103761	0,0049	3,22	Significatif
<b>B-Vc, m/min</b>	0,0238445	1	0,02384454	0,0918803	0,7643	0,03	Non significatif
<b>C-f, mm/tr</b>	71,274847	1	71,2748471	274,64378	< 0,0001	93,08	Significatif
<b>D-ap, mm</b>	0,8325375	1	0,8325375	3,2080215	0,0854	1,09	Non significatif
<b>AB</b>	0,7523151	1	0,75231516	2,8989003	0,1010	0,98	Non significatif
<b>AC</b>	0,0894116	1	0,08941166	0,3445304	0,5625	0,12	Non significatif
<b>AD</b>	0,0898803	1	0,0898803	0,3463362	0,5615	0,12	Non significatif
<b>BC</b>	0,7154013	1	0,71540132	2,7566600	0,1093	0,93	Non significatif

<b>BD</b>	0,1112695	1	0,1112695	0,4287554	0,5186	0,14	Non significatif
<b>CD</b>	0,2127386	1	0,2127386	0,8197468	0,3739	0,28	Non significatif
<b>Résiduel</b>	6,4879356	25	0,25951742				
<b>Lack of Fit</b>	4,8856356	16	0,30535223	1,7151407	0,2075		Significatif
<b>Erreur</b>	1,6023	9	0,17803333				
<b>Total</b>	126,606	35				100	

**(a) Facteurs influents (Graphe de Pareto)**

Pour mieux visionner les résultats de l'analyse des variances, un diagramme de Pareto est construit (Figure III.1 et Figure III.2). Ce dernier nous permet d'évaluer les effets principaux des paramètres ainsi que ceux de leurs interactions sur le facteur étudié. Il classe par ordre décroissant l'importance des paramètres et leurs interactions sur les facteurs de la rugosité  $R_a$  et  $R_t$  pour les deux plaquettes de coupe testées.



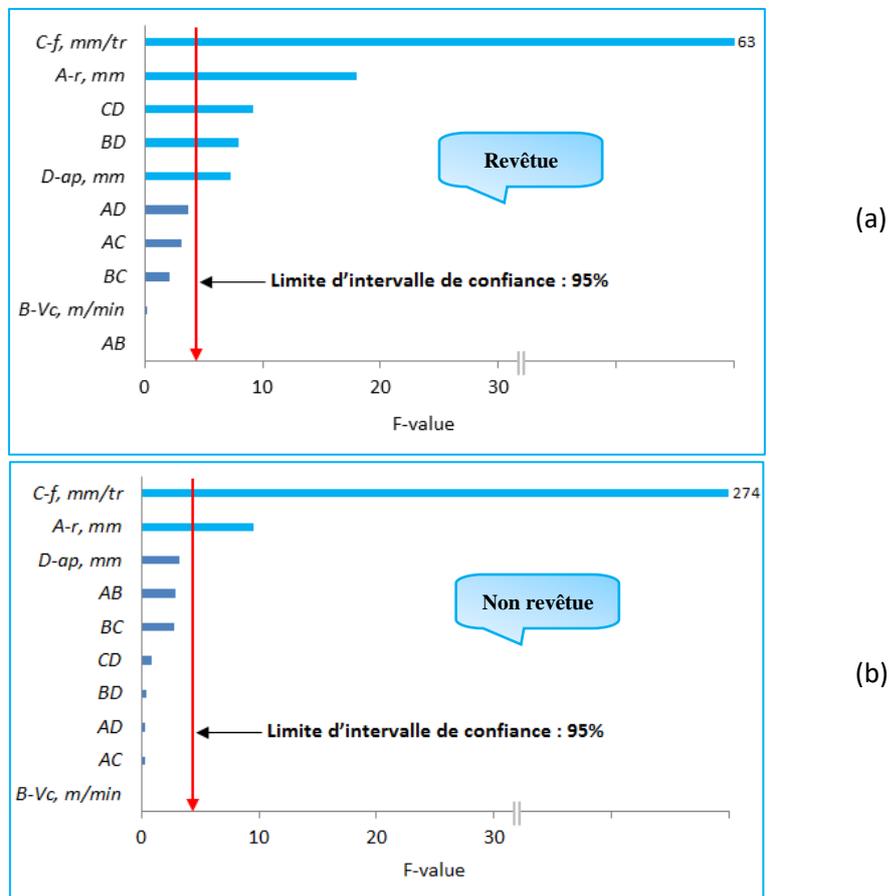
**Figure III.1 :** Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur la rugosité  $R_a$  pour les deux plaquettes de coupe testées (revêtue et non revêtue)

Les valeurs standardisées (F-value) de cette figure sont obtenues en divisant l'effet de chaque facteur (CM) par l'erreur sur la valeur estimée du facteur correspondant. Les valeurs standardisées au-dessus de la ligne rouge ( $F_{\text{tableau}} = 4,25$ , avec un intervalle de confiance choisi de 95%.) présentent un effet significatif. Plus l'effet standardisé est élevé, plus le facteur présente une influence sur la rugosité. Par contre, tous les paramètres et les

interactions ayant un niveau inférieur à cette limite sont négligeables et ne sont pas pris en compte.

Le graphe de Pareto correspondant montre que le facteur le plus dominant est l'avance par tour suivie du rayon de bec. La vitesse de coupe n'a pratiquement aucun effet sur la rugosité  $R_a$ .

L'analyse des résultats de Pareto (**Figure III.2**) montre que l'avance par tour présente un effet important sur la rugosité  $R_t$ , vu que la valeur de F-value est très grande par rapport à la valeur seuil ( $F_{\text{tableau}} = 4,25$ ), elle est suivie par le rayon de bec. Par contre la vitesse de coupe n'a pas un effet significatif sur  $R_t$  puisque la valeur F-value est inférieure à la valeur de seuil est cela pour les deux plaquettes de coupe testées.



**Figure III.2:** Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur la rugosité  $R_t$  pour les deux plaquettes de coupe testées (revêtue et non revêtue)

### III. 2. 1. 1. Analyse de régression de la rugosité de surface $R_a$ et $R_t$

La relation entre les sorties étudiées et les paramètres de coupe est caractérisée par un model numérique à l'aide de la méthodologie de surface de réponse (RMS). Ces modèles de régression sont utilisés pour la prédiction des facteurs de réponse incontrôlables dans les opérations d'usinage. La relation entre les conditions de coupe et les facteurs technologiques d'usinage peut être exprimée comme suit :

$$Y = F (r, Vc, f, ap ) \quad \text{III-1}$$

La surface de réponse du modèle du second ordre peut être ajustée dans l'équation suivante:

$$y_p = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 + \beta_4 \cdot x_4 + \beta_5 \cdot x_1 \cdot x_2 + \beta_6 \cdot x_1 \cdot x_3 + \beta_7 \cdot x_1 \cdot x_4 + \beta_8 \cdot x_2 \cdot x_3 + \beta_9 \cdot x_2 \cdot x_4 + \beta_{10} \cdot x_3 \cdot x_4 \quad \text{III-2}$$

Où 'y' est la réponse correspondante (*Ra* ou *Rt*), 'P' représente le type de plaquette de coupe et  $x_1, x_2, x_3, x_4$  représentent les paramètres de coupe. Le terme  $\beta$  est le coefficient de régression. A partir de l'équation III-2, la relation entre la sortie étudiée et les paramètres de coupe est définie comme indiqué ci-dessous :

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot r + \beta_2 \cdot Vc + \beta_3 \cdot f + \beta_4 \cdot ap + \beta_5 \cdot r \cdot Vc + \beta_6 \cdot r \cdot f + \beta_7 \cdot r \cdot ap + \beta_8 \cdot Vc \cdot f + \beta_9 \cdot Vc \cdot ap + \beta_{10} \cdot f \cdot ap \quad \text{III-3}$$

L'analyse de régression des deux critères de rugosité (*Ra* et *Rt*) en fonction du régime de coupe et du rayon de bec donne les équations (III-4 à III-7) avec des coefficients de détermination  $R^2$  respectifs de [(0, 9133 ; 0, 8624) et (0, 9682; 0, 9488)] % lors de l'usinage dur de l'acier AISI H11 par deux plaquettes de coupe revêtue (CC6050) et non revêtue (CC650), respectivement.

#### Plaquette de coupe revêtue (CC6050)

$$Ra_{cc6050} = -0,996 + 1,287r + 3,935 \times 10^{-3} Vc + 8,677f - 0,830ap - 7,447 \times 10^{-3} r \times Vc - 4,880r \times f + 0,301r \times ap + 0,019Vc \times f + 1,994 \times 10^{-3} Vc \times ap + 2,070f \times ap \quad \text{III-4}$$

$$Rt_{cc6050} = -0,240 + 2,1999r + 5,886 \times 10^{-3} Vc + 23,324f - 3,522ap - 0,022r \times Vc - 6,420r \times f + 1,614r \times ap + 0,093Vc \times f + 9,120 \times 10^{-3} Vc \times ap + 10,501f \times ap \quad \text{III-5}$$

#### Plaquette de coupe non revêtue (CC650)

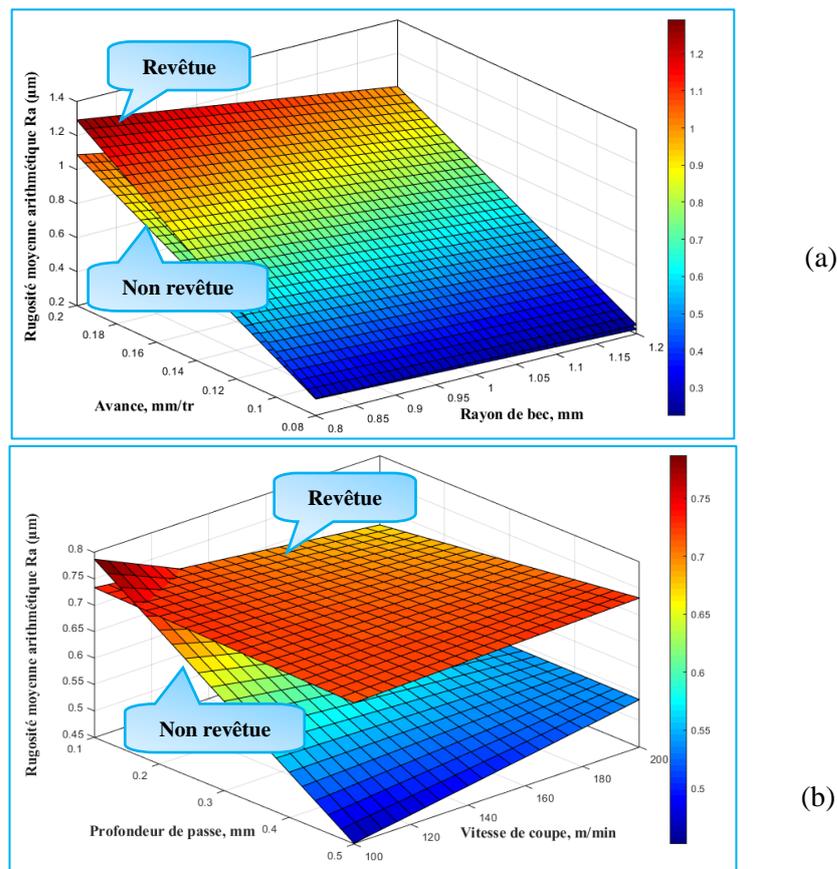
$$Ra_{cc650} = 0,0151 + 0,544r - 4,017 \times 10^{-3} Vc + 11,1317f - 0,819ap - 6,683 \times 10^{-4} r \times Vc - 6,340r \times f - 0,396r \times ap + 0,010Vc \times f + 8,33 \times 10^{-3} Vc \times ap - 3,268f \times ap \quad \text{III-6}$$

$$Rt_{cc650} = +1,876 + 1,917r - 0,037Vc + 45,012f + 3,824ap + 5,699 \times 10^{-3} r \times Vc - 25,319r \times f - 6,918r \times ap + 0,105Vc \times f + 0,052Vc \times ap - 46,512f \times ap \quad \text{III-7}$$

Des graphiques de surface de réponse tridimensionnelle (3D), basés sur ces modèles quadratiques, ont été établis pour étudier l'effet de chaque paramètre de coupe sur la rugosité de surface. Ces graphiques peuvent fournir une évaluation supplémentaire de la relation entre les paramètres du processus et la réplication. Les tracés de surface 3D sont dessinés comme

suit : deux des facteurs sont maintenus constants à leur niveau intermédiaire, tandis que les deux autres sont variés. L'objectif est de présenter l'effet d'interaction à deux facteurs sur la réponse.

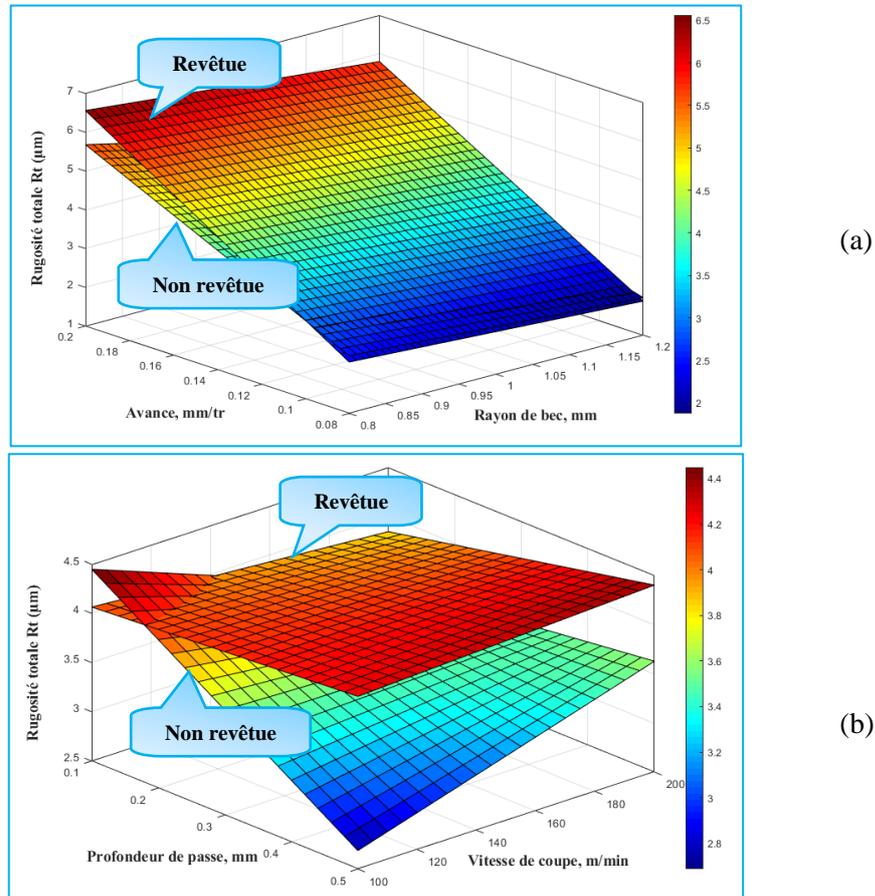
Les Figure III.3 et Figure III.4 montrent la surface de réponse « 3D » des critères de rugosité de surface «  $Ra$  et  $Rt$  » en fonction de l'avance par tour et le rayon de bec ( $f \times r$ ), et de la vitesse de coupe et la profondeur de passe ( $Vc \times ap$ ) lors du tournage dur de l'acier X38CrMoV5-1 pour les deux plaquettes de coupe testées en céramique revêtue et non revêtue.



**Figure III.3 :** Evolution de la rugosité  $Ra$  en fonction de  $Vc$ ,  $r$ ,  $f$  et  $ap$  pour les deux plaquettes de coupe testées (revêtue et non revêtue)

Comme indiqué dans la Figure III.3 (a) et Figure III.4 (a), on peut observer qu'à rayon de coupe constant, les critères de rugosité de surface «  $Ra$  et  $Rt$  » augmentent avec l'augmentation de l'avance, car leur augmentation génère des sillons hélicoïdaux, le résultat de la forme de l'outil et le mouvement hélicoïdal outil-pièce. Ces sillons deviennent plus profonds et plus larges lorsque l'avance augmente. Pour cette raison, une faible avance doit être utilisée pendant l'opération de tournage. Des résultats similaires ont été rapportés par JP. Davim et autres [128] lors du tournage dur de l'acier AISI D2 (60 HRC) par deux plaquettes en céramique Wiper et conventionnelle et par Aouici et al. (2014) [129] lors du tournage d'acier AISI D3 (60 HRC) à l'aide d'un outil en céramique. En revanche, les critères de rugosité de surface ont tendance à diminuer avec une augmentation du rayon de coupe à une

avance constante. La meilleure rugosité de surface a été obtenue avec la vitesse d'avance la plus faible et le rayon de coupe le plus élevé pour les deux plaquettes de coupe testées en céramique revêtue et non revêtue.



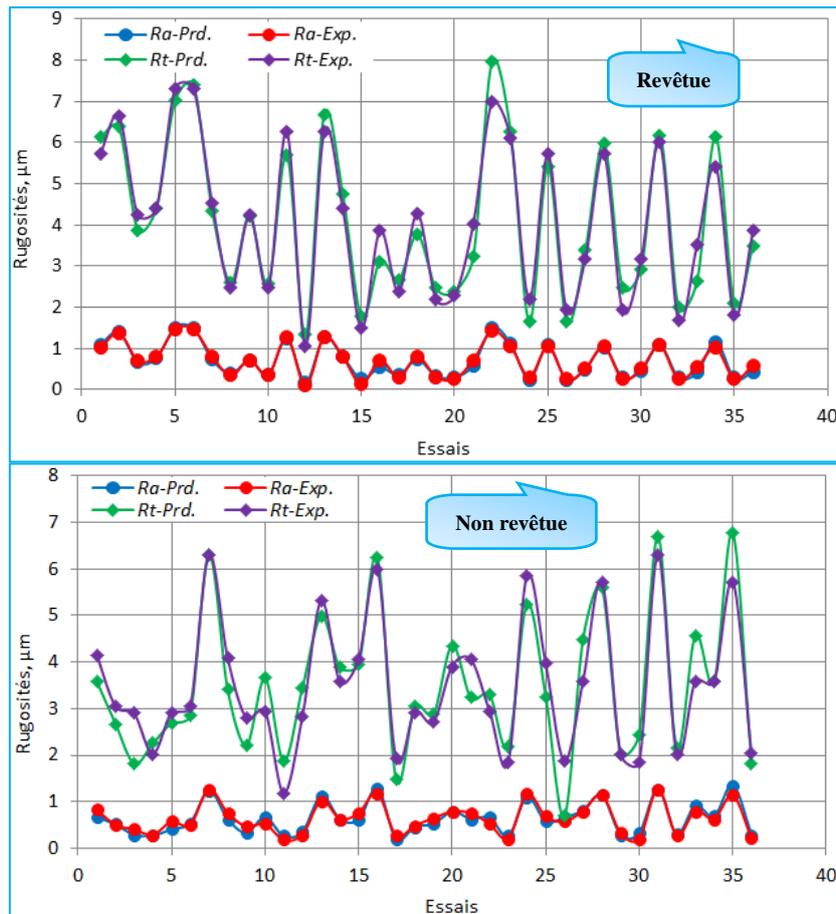
**Figure III.4:** Evolution de la rugosité  $R_t$  en fonction de  $V_c$ ,  $r$ ,  $f$  et  $a_p$  pour les deux plaquettes de coupe testées

La partie (b) des Figure III.3 et Figure III.4 illustre l'effet qualitatif de la profondeur de passe et la vitesse de coupe sur la rugosité de surface à une avance et une profondeur de coupe constantes, 0,14 mm/tour et 0,30 mm respectivement. On remarque que les critères de rugosité de surface «  $R_a$  et  $R_t$  » ne sont pas statistiquement influencés par la variation de ces deux facteurs. Cependant, une comparaison qualitative peut être faite. Par exemple, Elbah M. et al [62] ont constaté que la profondeur de coupe n'a pas d'impact sur la rugosité de surface des surfaces tournées. Cependant, l'avance, le rayon du bec, le matériau de travail et l'angle de pointe de l'outil ont un impact significatif sur la rugosité de surface observée en utilisant l'approche d'expérimentation factorielle fractionnaire.

En comparant les valeurs des rugosités obtenues par les deux matériaux de coupe utilisés, on remarque clairement que la plaquette de coupe en céramique non revêtue produit une meilleure finition de surface par rapport à la plaquette revêtue lors du tournage dur à sec de l'acier à outils X38CrMoV5-1 traité à 50 HRC.

### III. 2. 1. 2. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) des critères de la rugosité ( $R_a$  et  $R_t$ ) pour les deux plaquettes de coupe testées (revêtue et non revêtue) et celles estimées par les modèles mathématiques (quadratique) obtenus par la méthodologie de surface de réponse (MSR), est présentée graphiquement sur la Figure III.5. L'analyse des résultats montre clairement que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très intimement liées dans la majorité des cas.



**Figure III.5 :** Courbes des valeurs de comparaison entre les critères de la rugosité pour les deux plaquettes testées

### III. 2. 2. Analyse et modélisation de l'effort de coupe ( $F_t$ )

#### III. 2. 2. 1. Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort tangentiel

Le Tableau III.4 présente l'analyse de variance (ANOVA) pour les efforts de coupe ( $F_t$ ). Il est observé que la profondeur de passe est le facteur ayant la plus grande contribution, représentant (81,56 % et 78,06 %) respectivement pour les deux types de plaquettes de coupe (revêtue et non revêtue). L'avance par tour est le deuxième facteur le plus influent avec une contribution de (15,62 % et 15,65 %). En revanche, la vitesse de coupe et le rayon de bec

n'ont pas d'effet significatif, car la valeur de probabilité (Prob.) est supérieure à 0,05 pour les deux plaquettes de coupe testées.

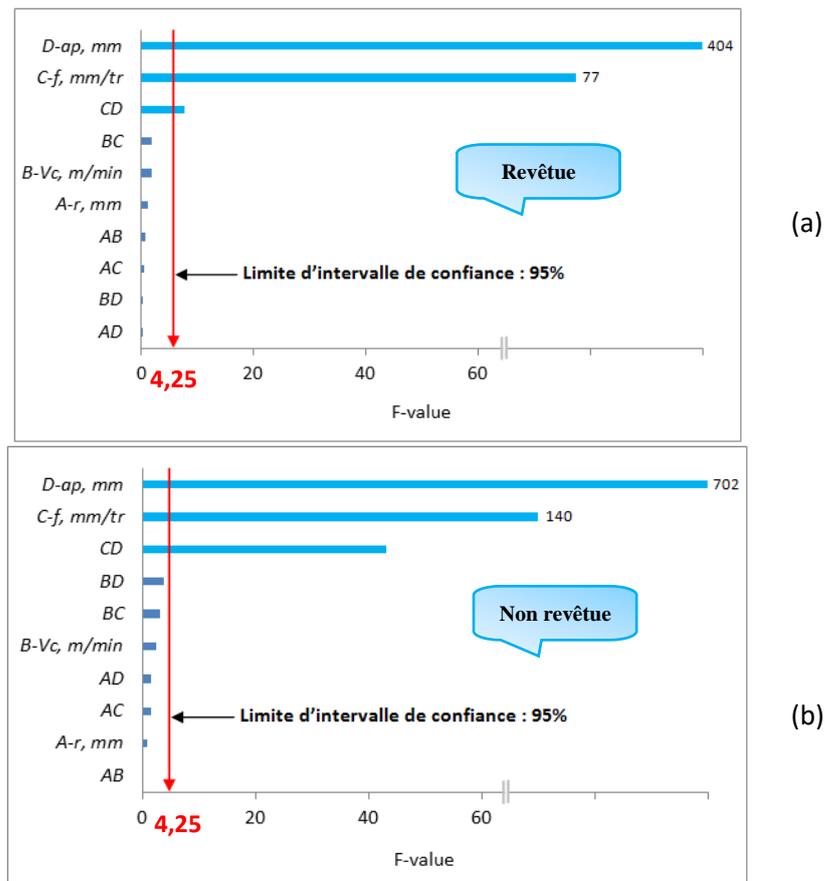
L'interaction (f×ap) a un effet significatif sur Ft avec une contribution de (1,55 et 4,79) % respectivement aux différentes nuances de coupe (revêtue et non revêtue).

**Tableau III.4:** Analyse de la variance (ANOVA) de l'effort tangentiel pour les deux plaquettes de céramique testées

Source	SCE	dll	CM	F-value	Prob.	Cont. %	Remarque
<b>(a) Plaquette Non revêtue</b>							
<b>Modèle</b>	83941,653	10	8394,1653	97,54967	< 0,0001		Significatif
<b>A-r, mm</b>	77,543400	1	77,543400	0,901142	0,3516	0,10	Non significatif
<b>B-Vc, m/min</b>	213,64240	1	213,64240	2,482766	0,1277	0,28	Non significatif
<b>C-f, mm/tr</b>	12126,858	1	12126,858	140,9278	< 0,0001	15,65	Significatif
<b>D-ap, mm</b>	60474,936	1	60474,936	702,7870	< 0,0001	78,06	Significatif
<b>AB</b>	7,8975154	1	7,8975154	0,091778	0,7644	0,01	Non significatif
<b>AC</b>	127,14514	1	127,14514	1,477570	0,2355	0,16	Non significatif
<b>AD</b>	135,67617	1	135,67617	1,576710	0,2208	0,18	Non significatif
<b>BC</b>	270,39466	1	270,39466	3,142291	0,0885	0,35	Non significatif
<b>BD</b>	331,22563	1	331,22563	3,849215	0,0610	0,43	Non significatif
<b>CD</b>	3708,6389	1	3708,6389	43,09857	< 0,0001	4,79	Significatif
<b>Résiduel</b>	2151,2542	25	86,050169				
<b>Lack of Fit</b>	1678,2582	16	104,89114	1,995832	0,1472		Non significatif
<b>Erreur</b>	472,99595	9	52,555105				
<b>Total</b>	86092,907	35				100	
<b>(b) Plaquette revêtue</b>							
<b>Modèle</b>	83350,822	10	8335,0822	51,65591	< 0,0001		Significatif
<b>A-r, mm</b>	180,15543	1	180,15543	1,116497	0,3008	0,23	Non significatif
<b>B-Vc, m/min</b>	306,50024	1	306,50024	1,899507	0,1803	0,38	Non significatif
<b>C-f, mm/tr</b>	12496,522	1	12496,522	77,44605	< 0,0001	15,62	Significatif
<b>D-ap, mm</b>	65252,167	1	65252,167	404,3943	< 0,0001	81,56	Significatif
<b>AB</b>	134,81677	1	134,81677	0,835515	0,3694	0,17	Non significatif
<b>AC</b>	76,881684	1	76,881684	0,476467	0,4964	0,10	Non significatif
<b>AD</b>	0,0021559	1	0,0021559	1,336E-05	0,9971	0,01	Non significatif
<b>BC</b>	317,61405	1	317,61403	1,968384	0,1729	0,40	Non significatif
<b>BD</b>	1,4316313	1	1,4316313	0,008872	0,9257	0,01	Non significatif
<b>CD</b>	1243,6552	1	1243,6552	7,707440	0,0103	1,55	Significatif
<b>Résiduel</b>	4033,9441	25	161,35776				
<b>Lack of Fit</b>	3554,8741	16	222,17963	4,173955	0,0175		Significatif
<b>Erreur</b>	479,07005	9	53,230005				
<b>Total</b>	87384,767	35				100	Significatif

**(a) Facteurs influents (Graphe de Pareto)**

L'analyse de graphe de Pareto (Figure III.6) nous permet de distinguer les paramètres et les interactions qui ont un effet significatif sur la réponse. Les paramètres les plus influents sur l'effort tangentiel sont la profondeur de passe, l'avance par tour et l'interaction entre l'avance et la profondeur de passe pour les deux plaquettes de coupe testées. La contribution de la vitesse de coupe et le rayon de bec sont négligeables ainsi que ses interactions.



**Figure III.6 :** Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur l'effort tangentiel pour les deux plaquettes de coupe testées

### III. 2. 2. 2. Analyse de régression de l'effort tangentiel Ft

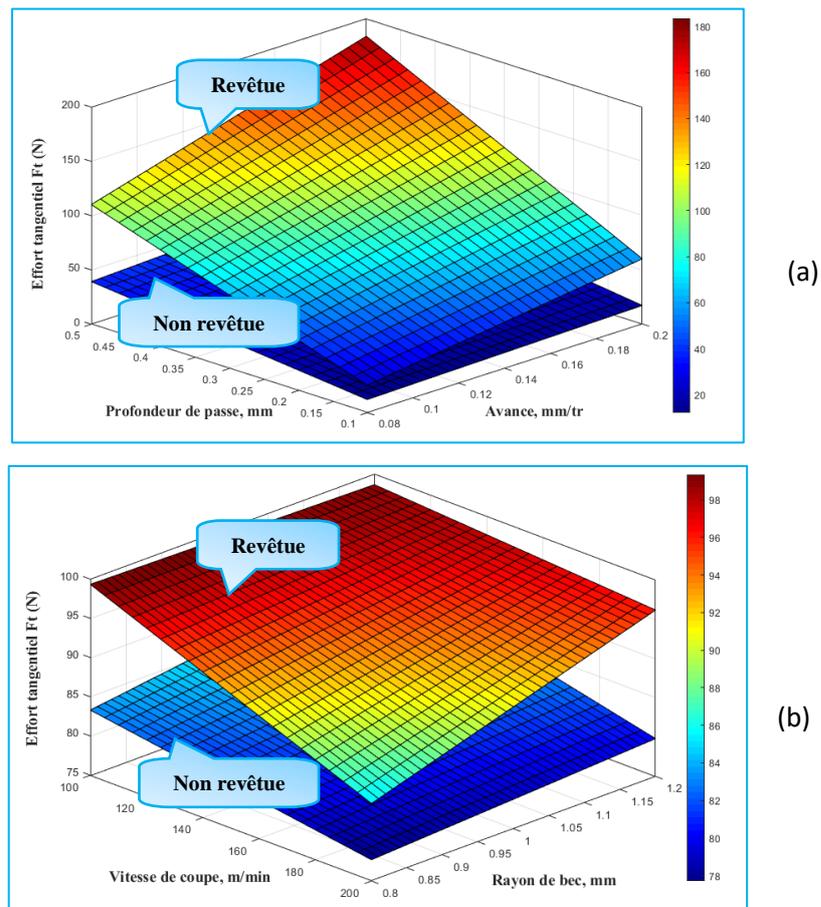
Les modèles mathématiques obtenus par l'analyse de régression de l'effort tangentiel Ft sont représentés dans les équations III.7 et III.8 avec des coefficients de déterminations  $R^2$  respectifs de [0,9538 et 0,9750] % lors de l'usinage dur de l'acier AISI H11 par deux plaquettes de coupe revêtue (CC6050) et non revêtue (CC650), respectivement.

#### Plaquette de coupe revêtue (CC6050)

$$Ft_{CC6050} = -34,415 - 5,055r - 0,120Vc + 689,979f + 143,563ap + 0,299r \times Vc - 188,271r \times f - 0,250r \times ap - 1,953Vc \times f + 0,032Vc \times ap + 803,512f \times ap \quad \text{III-7}$$

#### Plaquette de coupe non revêtue (CC650)

$$Ft_{CC650} = -13,384 - 33,066r + 0,403Vc + 55,019f + 68,655ap - 0,072r \times Vc + 242,115r \times f + 62,715r \times ap - 1,802Vc \times f - 0,497Vc \times ap + 1387,553f \times ap \quad \text{III-8}$$



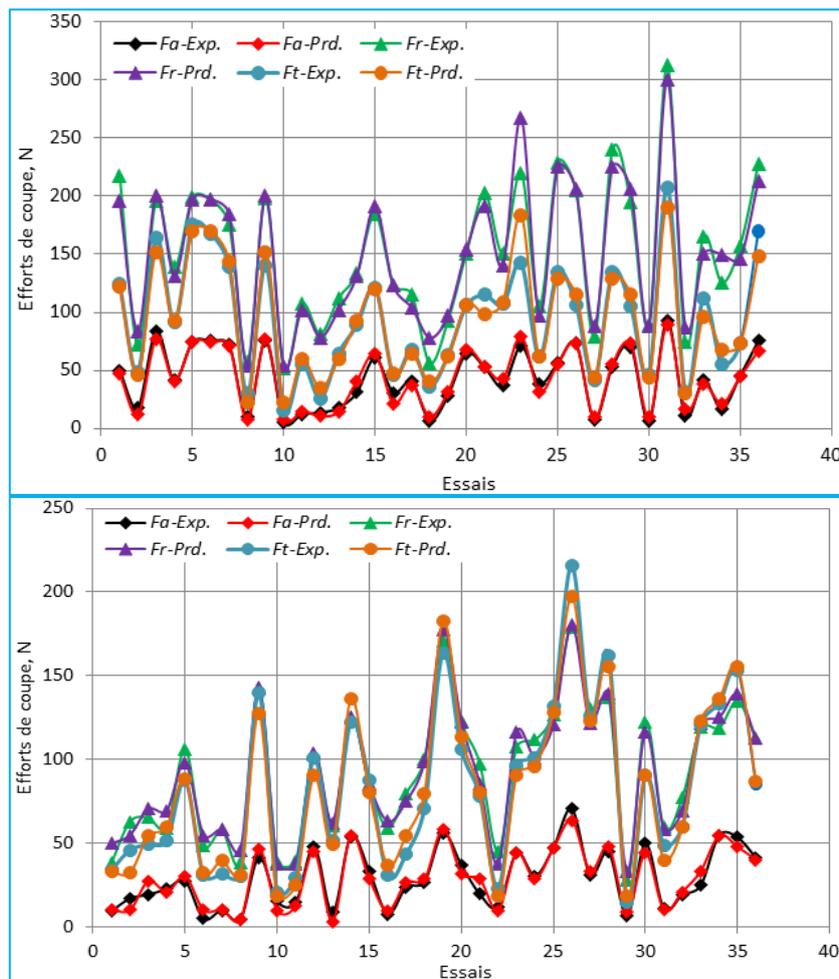
**Figure III.7:** Evolution de l'effort tangentiel en fonction de  $V_c$ ,  $r$ ,  $f$  et  $ap$  pour les deux plaquettes de coupe testées

La **Figure III.7** montre la surface de réponse « 3D » de l'effort tangentiel «  $F_t$  » en fonction de l'avance par tour et la profondeur de passe ( $f \times ap$ ), et de la vitesse de coupe et le rayon de bec ( $V_c \times r$ ) lors du tournage dur de l'acier X38CrMoV5-1 pour les deux plaquettes de coupe testées en céramique revêtue et non revêtue. On peut observer que la profondeur de passe est le paramètre le plus important suivi de l'avance par tour. La force tangentielle augmente avec l'augmentation de ces deux facteurs en raison de l'élargissement de la zone d'action de coupe [89]. De plus, elle atteint sa valeur maximale à des niveaux élevés de profondeur de coupe et d'avance. Le tracé de surface illustre également que lorsque la vitesse de coupe et le rayon de coupe augmentent à avance et profondeur de coupe constantes, 0,14 mm/tour et 0,30 mm respectivement, il n'y a pratiquement aucun effet sur l'effort tangentiel.

Globalement, en comparant les valeurs de l'effort tangentiel «  $F_t$  », en fonction des paramètres de coupe, obtenues par les deux plaquettes de coupe utilisées, on remarque clairement que la plaquette non revêtue génère des efforts de coupe faibles par rapport à la plaquette de coupe revêtue.

### III. 2. 3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) des composantes de l'effort tangentiel « Ft » pour les deux plaquettes de coupe testées (revêtue et non revêtue), et celles estimées par les modèles mathématiques (quadratique) obtenus par la méthodologie de surface de réponse (MSR), est présentée graphiquement sur la Figure III.8. L'analyse des résultats montre clairement que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches. Donc on peut conclure que les modèles issus de la méthodologie de surface de réponse donnent des résultats fiables.



**Figure III.8:** Courbes des valeurs de comparaison entre les composantes des efforts de coupe pour les deux plaquettes testées

### III. 3. Analyse de l'intégrité de la surface

L'intégrité de surface se définit comme l'état modifié ou amélioré d'une surface résultant d'un processus de génération de surface. Cette altération peut se référer à diverses propriétés telles que la géométrie (qualité de surface), la mécanique (dureté, résistance à la fatigue, usure, etc.), la physico-chimie (tribologie, résistance à la corrosion, etc.) et l'aspect visuel (apparence, etc.).

La géométrie réelle d'une pièce mécanique réalisée en usinage diffère de sa géométrie nominale, de cette différence et des inévitables défauts d'usinage de pose induits. Nous distinguons différents ordres de grandeur de ces défauts, à savoir :

- Macro-géométrie (défauts d'ordre 1 (différence de forme) et d'ordre 2 (ondulation))
- Micro-géométrie (défauts d'ordre 3 et 4 (rugosité))

Afin de mieux comprendre les phénomènes physiques liés à la micro-géométrie de la surface et de caractériser les défauts de surface localisés au niveau des profils usinés, une étude de la micro-géométrie (rugosité) de l'intégrité de surface a été menée en analysant la topographie de surface 2D et 3D produite lors de l'usinage de l'acier dur X38CrMoV5-1. Les plaquettes de coupe en céramique mixte revêtue et non revêtue ont été utilisées avec les conditions de coupe suivantes :  $V_c = 150$  m/min,  $f = 0.14$  mm/tr et  $a_p = 0,3$  mm. Deux valeurs de rayon de bec ( $r=0.8$ mm et  $1.2$ mm) ont été utilisées pour étudier l'effet de la variation de ce facteur sur la qualité de surface produite en tournage dur.

La mesure de l'état de surface a été effectuée sur un rugosimètre optique 3D de marque AltiSurf ® 500, utilisant un interféromètre à lumière blanche. Les paramètres de profil 2D et de surface 3D ont été analysés conformément aux normes internationales "ISO 4287", "ISO 13565-2 et 3" et "ISO 25178". Dans notre étude, toutes les courbes et paramètres étudiés ont été obtenus en utilisant un filtre de régression gaussien robuste, qui permet d'éviter certaines limitations des autres filtres et d'obtenir un bon profil de rugosité conformément à la norme "ISO 11562/1996". Ce filtre fonctionne en lissant les points de données grâce à une fonction Gaussienne qui sépare l'ondulation et la rugosité sans distorsion ni déphasage du signal. Il permet également de réduire les erreurs au voisinage des pics et des vallées [130].

#### III. 3. 1. Paramètres de profil (2D) d'état de surface

##### III. 3. 1. 1. Paramètres d'amplitude de profil 2D

Les paramètres désignant la rugosité de surface présentés dans les normes ISO sont nombreux, on se limite à présenter les paramètres de profil fréquemment utilisés dans le domaine de la fabrication mécanique, définis selon la norme **ISO 4287**. Il s'agit de la norme principale pour les paramètres de profil dans le système GPS. Elle définit les termes et les équations des paramètres généraux.

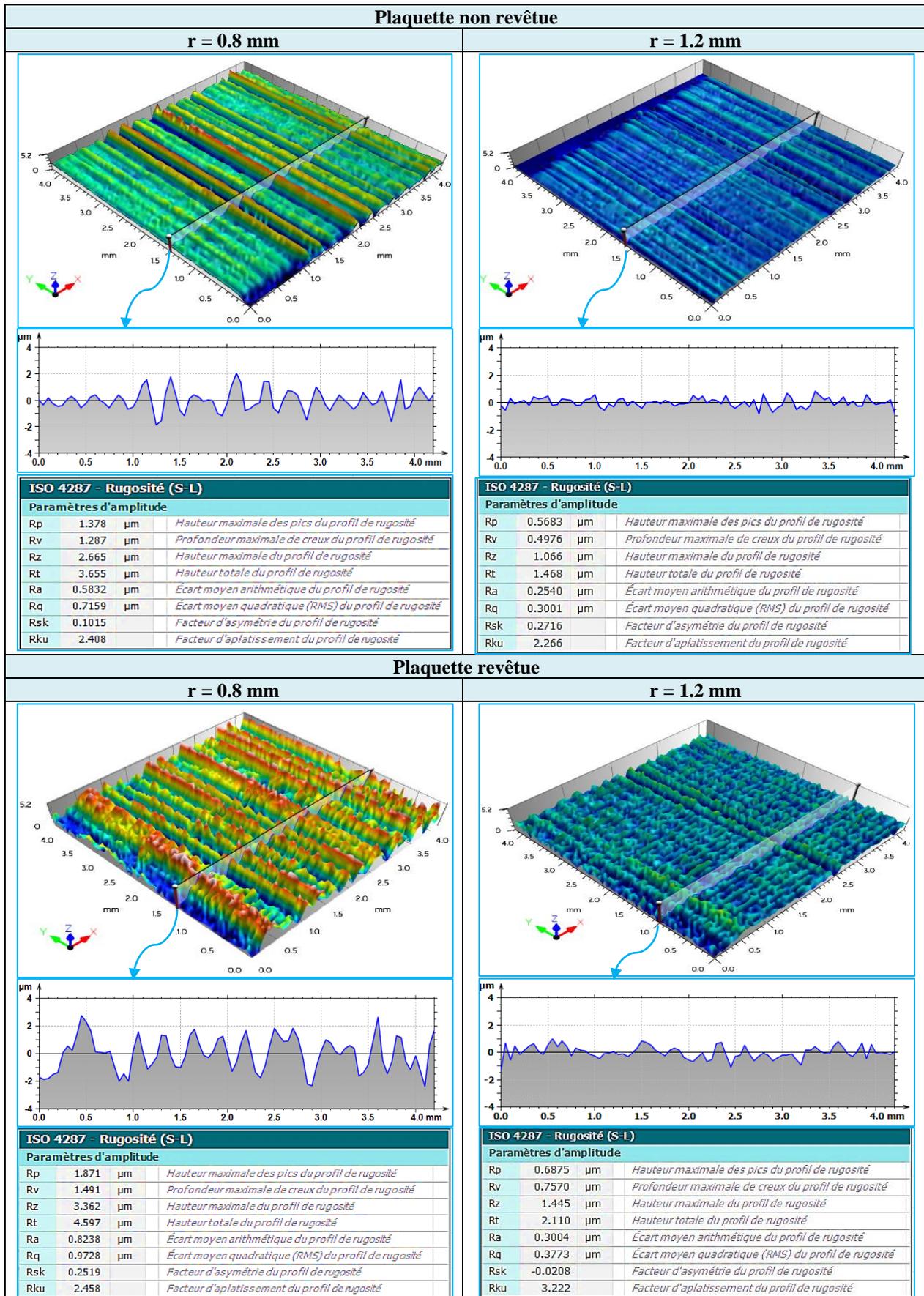
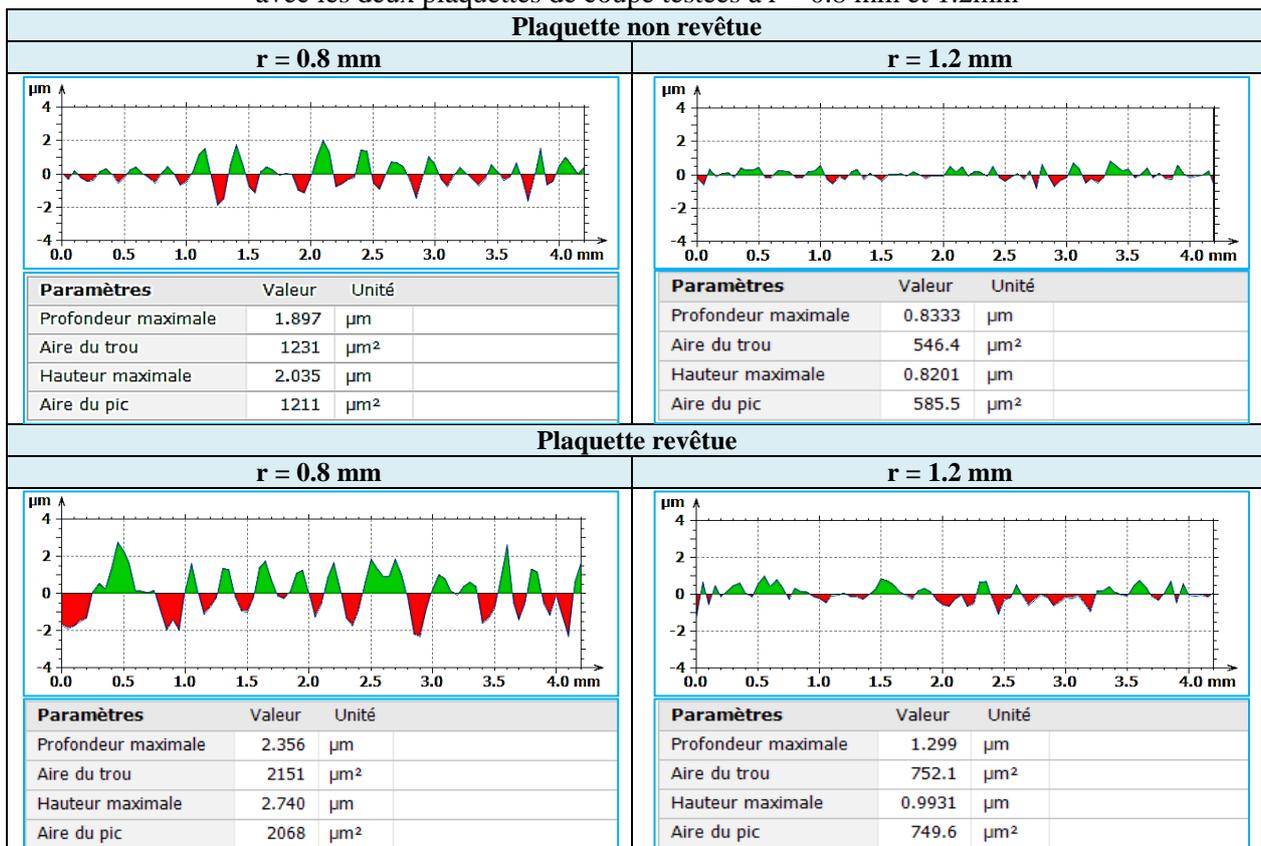


Figure III.9: Paramètres d'amplitude (ISO 4287) et profils de surface 2D réalisés en tournage dur à sec

avec les deux plaquettes de coupe testées à  $r = 0.8 \text{ mm}$  et  $1.2 \text{ mm}$



**Figure III.10:** Analyse de l'aire et de la profondeur des creux et des crêtes des profils de surface 2D réalisés en tournage dur à sec avec les deux plaquettes de coupe testées à  $r = 0.8 \text{ mm}$  et  $1.2 \text{ mm}$

Le profil mesuré est représenté par une courbe des hauteurs  $Z$  en fonction de la position  $X$ . Le côté de la matière est représenté par un remplissage de couleurs sous le profil. Les hauteurs sont référencées, par convention, par rapport à la ligne moyenne, qui est calculée comme la moyenne de toutes les hauteurs du profil. En mettant cette moyenne à zéro, les hauteurs sont comptées positivement pour les points situés au-dessus de la ligne moyenne et négativement pour les points situés au-dessous. Une portion du profil située au-dessus de la ligne moyenne et entre deux passages à zéro est appelée une saillie du profil. Le point le plus haut d'une saillie est un pic. Une portion du profil située en dessous de la ligne moyenne et entre deux passages à zéro est appelée un creux du profil. Le point le plus bas d'un creux est une vallée.

La Figure III.9 présente les paramètres d'amplitude selon la norme ISO 4287 ainsi que les profils 2D de quatre surfaces réalisées lors du tournage dur par l'outil en céramique mixte revêtue de TiN et non revêtue, en utilisant deux rayons de bec différents ( $r=0.8 \text{ mm}$  et  $1.2 \text{ mm}$ ). Tous les profils 2D représentent des valeurs de rugosité pures, car les composantes d'ondulation ont été filtrées. Pour les deux plaquettes (revêtue et non revêtue), les profils 2D des surfaces produites avec un rayon de coupe de  $1.2 \text{ mm}$  montrent des petites formes de pics et de creux par rapport aux profils réalisés par les plaquettes de rayon de  $0.8 \text{ mm}$ , car l'augmentation de ce dernier génère une augmentation de la longueur de contact de l'outil avec la surface usinée. Cela a été confirmé par l'analyse des paramètres d'amplitude qui sont influencés par la variation du rayon de bec ainsi que le revêtement de l'outil. L'augmentation

de « r » de 0.8mm à 1.2mm provoque une diminution des paramètres d'amplitude de ( $R_p=1.378\mu m$ ,  $R_v=1.287\mu m$ ,  $R_z=2.665\mu m$ ,  $R_t=3.655\mu m$ ,  $R_a=0.5832\mu m$  et  $R_q=0.7159\mu m$ ) à ( $R_p=0.5683\mu m$ ,  $R_v=0.4976\mu m$ ,  $R_z=1.066\mu m$ ,  $R_t=1.468\mu m$ ,  $R_a=0.2540\mu m$  et  $R_q=0.3001\mu m$ ) pour les outils non revêtus, et de ( $R_p=1.871\mu m$ ,  $R_v=1.491\mu m$ ,  $R_z=3.362\mu m$ ,  $R_t=4.597\mu m$ ,  $R_a=0.8238\mu m$  et  $R_q=0.9728\mu m$ ) à ( $R_p=0.6775\mu m$ ,  $R_v=0.7570\mu m$ ,  $R_z=1.445\mu m$ ,  $R_t=2.110\mu m$ ,  $R_a=0.3004\mu m$  et  $R_q=0.3773\mu m$ ) pour la surface usinée par la céramique revêtue.

La Figure III.10 montre les résultats d'analyse de l'aire et de la profondeur des creux et des crêtes des quatre profils de surface 2D réalisés. Nous avons remarqué que le profil de surface usinée avec un outil en céramique mixte non revêtu avec un rayon de bec de 1.2mm engendre les plus petites valeurs de profondeur, de hauteur et d'aire des pics et des creux. On peut en conclure qu'un grand rayon de bec d'outil donne une finition de surface plus fine. En générale, les outils de coupe en céramique mixte non revêtue génèrent de meilleurs états de surface par rapport aux outils revêtus en TiN en tournage à sec des aciers durs. La présence de revêtement en TiN dans ce cas, dégrade légèrement la qualité de surface réalisée.

### III. 3. 2. Paramètres surfaciques 3D d'état de surface

#### III. 3. 2. 1. Paramètres d'amplitude

La plupart des paramètres de l'ISO 4287 peuvent facilement être étendus pour le cas 3D. Les paramètres d'amplitude dépendent de l'écart de hauteur, pour la description des propriétés liées à l'amplitude d'une surface. Six paramètres sont conçus pour caractériser la propriété d'amplitude des surfaces, définis selon la norme **ISO 25178**. Ils sont classés en deux catégories, la moyenne des ordonnées et les paramètres extrêmes des pics et des vallées.

La Figure III.11 montre les paramètres d'amplitude selon la norme ISO 25178 ainsi que la représentation de la topographie 3D de quatre surfaces réalisées lors du tournage dur par l'outil en céramique mixte revêtue de TiN et non revêtue, en utilisant deux rayons de bec différents ( $r=0.8\text{mm}$  et  $1.2\text{mm}$ ). Les surfaces sont visualisées à l'aide de quatre vues isométriques dont les composantes d'ondulation ont été filtrées. En effet, les graphes obtenus sont caractérisés par des pics et des vallées bien définis permettant d'évaluer la qualité des surfaces. Pendant le processus de tournage en utilisant un seul tranchant, la surface générée est un sillon hélicoïdal résultant de la forme du bec de l'outil et du mouvement hélicoïdal de la pièce-outil générée par la machine-outil. Les deux surfaces obtenues avec la plaquette de coupe en céramique mixte non revêtue ont une forme des pics plats et écrasés. D'autre part, les outils revêtus génèrent des formes des pics d'une forme aiguë. D'après les paramètres d'amplitude de surface selon la norme ISO 25178, on constate que l'augmentation du rayon de bec de l'outil de  $r=0.8\text{ mm}$  à  $r=1.2\text{mm}$  provoque une augmentation de la hauteur arithmétique moyenne ( $S_a$ ), quadratique moyenne ( $S_q$ ) et maximale ( $S_z$ ) de ( $S_a=0.586\mu m$ ,  $S_q=0.7848\mu m$ ,  $S_z=4.609\mu m$ ) à ( $S_a=0.2862\mu m$ ,  $S_q=0.3585\mu m$ ,  $S_z=1.895\mu m$ ) pour la plaquette de coupe non revêtue et de ( $S_a=1.041\mu m$ ,  $S_q=1.230\mu m$ ,  $S_z=5.162\mu m$ ) à ( $S_a=0.3833\mu m$ ,  $S_q=4.777\mu m$ ,  $S_z=2.659\mu m$ ) pour la céramique revêtue.

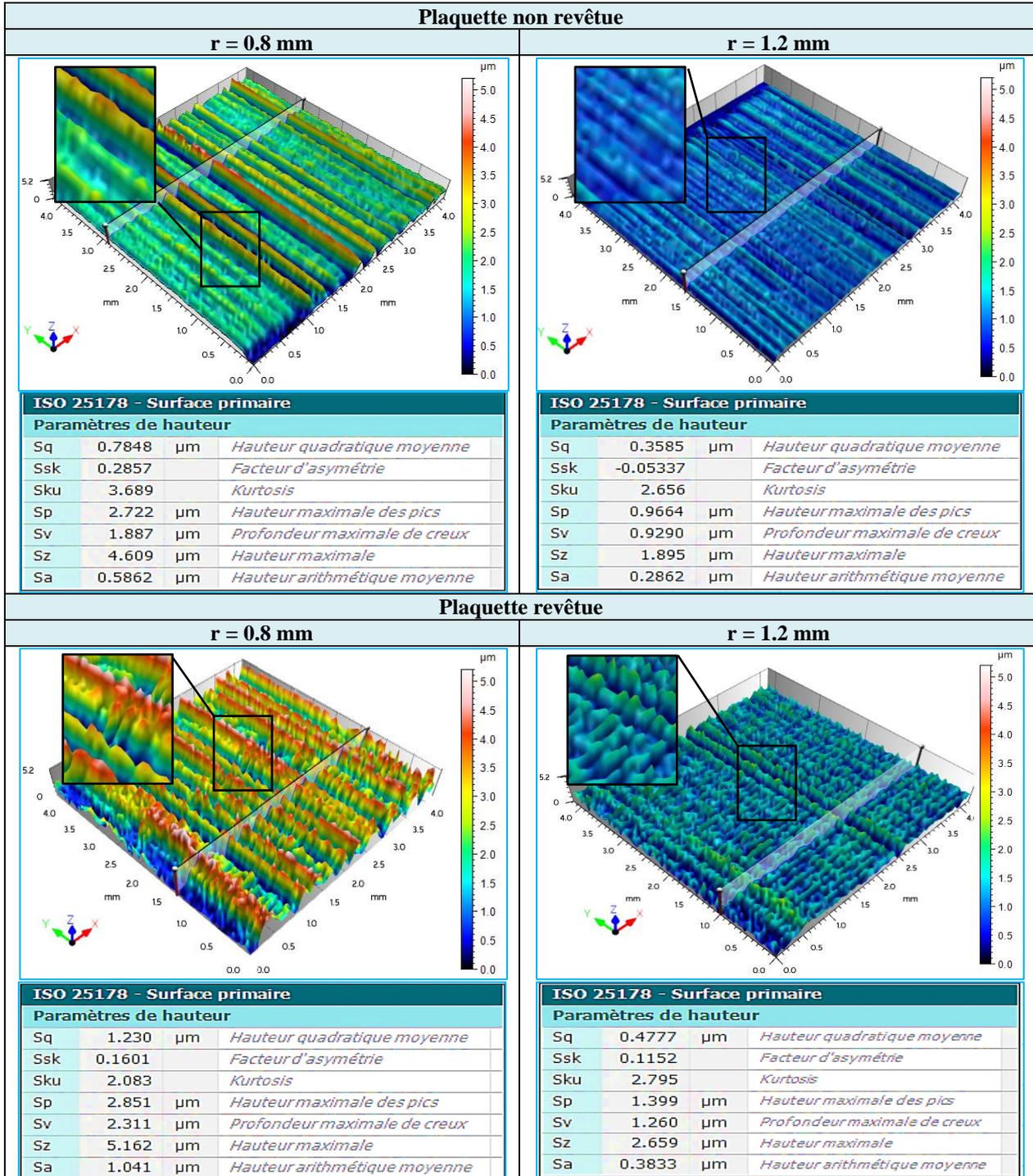


Figure III.11: Paramètres (ISO 25178) et topographie 3D de surface réalisés en tournage dur à sec avec les deux plaquettes de coupe testées à r = 0.8 mm et 1.2mm

### III. 3. 2. 2. Paramètres fonctionnels

Les paramètres fonctionnels sont calculés à partir de la courbe d'Abbott obtenue par l'intégration de la distribution des hauteurs sur toute la surface. Ils ont pour application de caractériser l'aspect fonctionnel de la surface (usure, lubrification, contact). Ce sont des paramètres globaux (paramètres de champ) qui peuvent être vus comme une exploration statistique de la surface.

(a) Paramètres de taux de portance

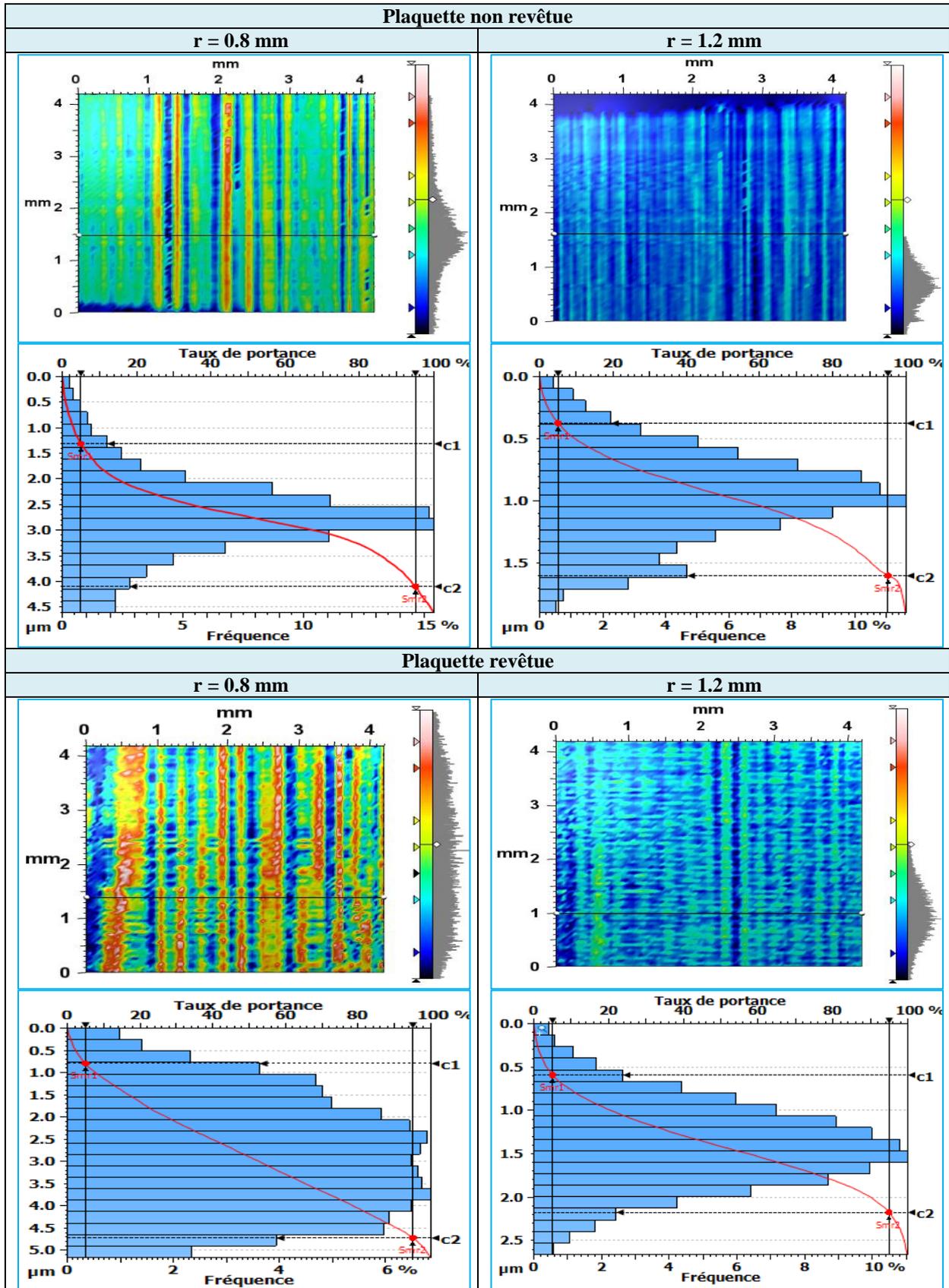


Figure III.12: Représentation dans le plan XY de la topographie de surface et de la courbe Abbott-Firestone réalisés avec les deux plaquettes de coupe testées à  $r = 0.8$  mm et 1.2mm

La Figure III.12 illustre la représentation du plan XY et la courbe Abbott-Firestone des quatre surfaces usinées lors de tournage dur par l'outil en céramique mixte revêtue de TiN et non revêtue, en utilisant deux rayons de bec différents ( $r=0.8\text{mm}$  et  $1.2\text{mm}$ ). On peut remarquer que la répartition des pics et des vallées dépend du type de nuance de la plaquette de coupe et des valeurs du rayon de bec. Cela est attribué au sillon hélicoïdal résultant de la combinaison du mouvement outil-pièce lors du tournage utilisant un seul tranchant.

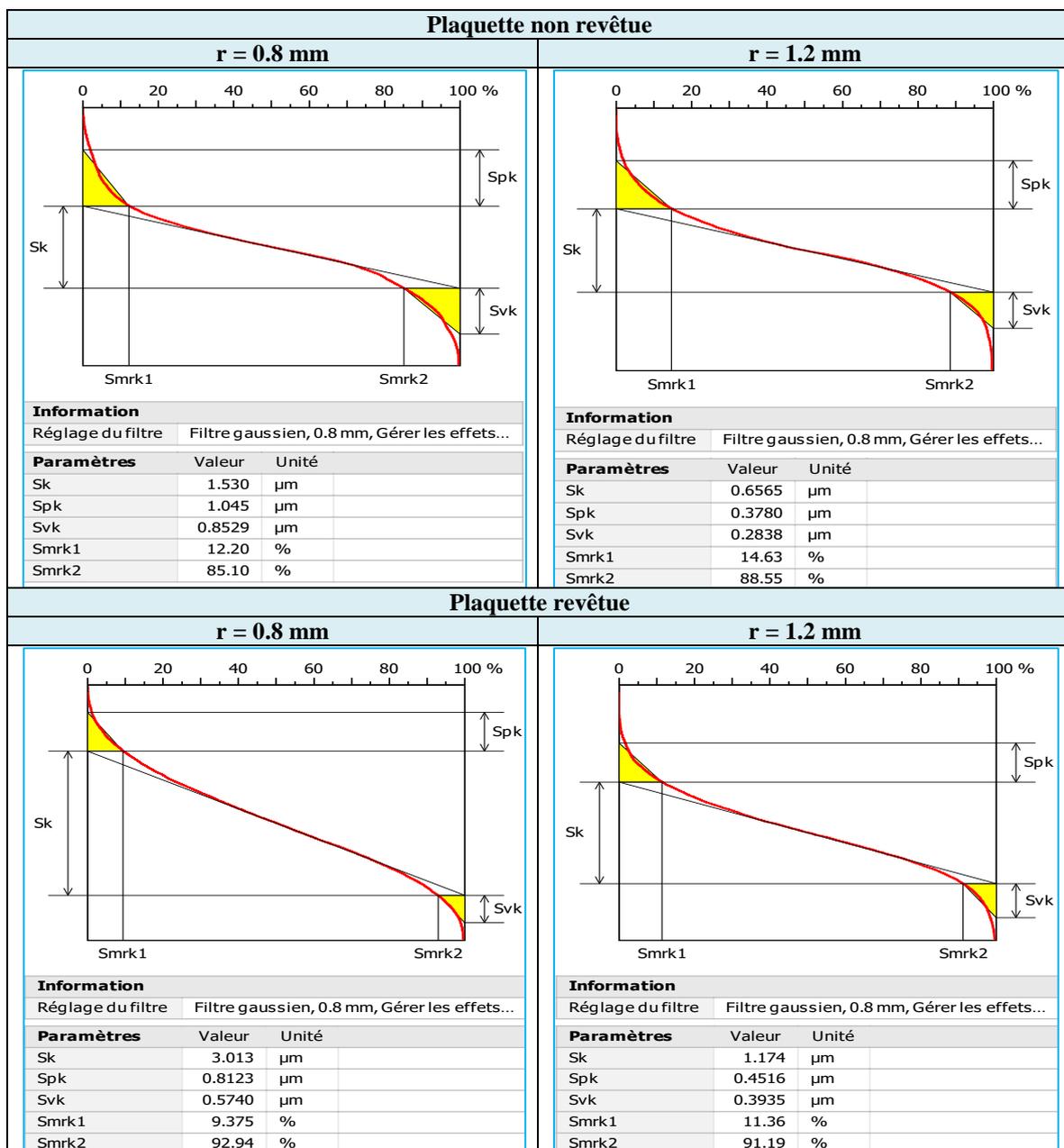
Pour caractériser la rugosité de surface, on peut mesurer la variation de la hauteur d'une surface. Une surface présentant une hauteur plus faible que celle de la vallée aura une rugosité de surface moindre. En étudiant la topographie de surface dans le plan XY, nous avons observé que les surfaces usinées avec un rayon de bec de  $0,8\text{ mm}$  présentent des zones colorées en bleu et rouge foncé, qui peuvent être indicatives d'une variation plus importante de la hauteur de la vallée, les surfaces réalisées avec un rayon de bec de  $1,2\text{ mm}$  ont des couleurs presque uniques et cela est clairement illustré dans la surface générée avec la plaquette de coupe non revêtue avec un rayon de bec de  $1,2\text{ mm}$  où on peut voir que toute la surface est bleue. Ce qui signifie qu'elle a une très petite forme de pics et de vallées, preuve que c'est la meilleure qualité de surface produite. Par conséquent, la plaquette de coupe en céramique non revêtue présente les meilleures performances par rapport à celle en céramique revêtue en termes de rugosité de surface de la pièce. Des résultats similaires ont été trouvés par Bensouilah et al. [131] lors du tournage d'acier AISI D3.

L'étude des histogrammes de profondeur des quatre surfaces obtenues avec les différents outils de coupe pourrait fournir des informations supplémentaires permettant de comparer leur rugosité de surface. Les lignes rouges pleines représentées sur les histogrammes représentent la courbe d'aire portante (*Bearing Area Curve* « *BAC* »), ou courbe Abbott-Firestone. BAC est l'intégrale de la fonction de distribution d'amplitude et indique le pourcentage ou la fraction linéaire d'un profil au-dessus d'une certaine hauteur. La division de la courbe d'Abbott en sous-sections pourrait aider à interpréter les résultats de la rugosité de surface. La courbe Abbott-Firestone est une bonne caractéristique pour évaluer les propriétés fonctionnelles des surfaces et leur exploitation éventuelle. Nous pouvons distinguer différentes surfaces avec la même valeur de  $R_a$  ou d'autres caractéristiques de hauteur. D'une manière générale, chaque type de surface est caractérisé par le tracé de la courbe d'Abbott.

D'après la Figure III.12, les diagrammes des barres montrent clairement que les fractions des pics et des vallées de la hauteur totale dépendent distinctement de rayon de bec des outils en premier lieu, en suite de type du matériau de coupe (revêtue ou non revêtue). Pour les surfaces usinées par la céramique mixte non revêtue, la plupart des pics et des vallées compris entre  $1.311\text{ }\mu\text{m}$  et  $4.098\text{ }\mu\text{m}$  pour rayon de bec de  $0.8\text{ mm}$  et entre  $0.374\text{ }\mu\text{m}$  et  $1.599\text{ }\mu\text{m}$  avec un rayon de bec de  $1.2\text{ mm}$ . Pour la plaquette céramique mixte revêtue en TiN, les hauteurs des pics et des vallées sont un peu grandes par rapport à celles de la céramique non revêtue, de sorte que les valeurs compris entre  $0.795\text{ }\mu\text{m}$  et  $4.722\text{ }\mu\text{m}$  pour le rayon de bec de  $0.8\text{ mm}$  et entre  $0.591\text{ }\mu\text{m}$  et  $2.174\text{ }\mu\text{m}$  pour le rayon de  $0.2\text{ mm}$ .

**(b) Les paramètres  $S_k$**

Ces paramètres sont calculés à partir de la courbe d'Abbott obtenue par intégration de la distribution des hauteurs sur toute la surface. La division de la courbe d'Abbott (BAC) en sous-sections pourrait aider à interpréter les résultats de la rugosité de surface. À cette fin, une ligne droite peut être tracée sur la base d'une ligne de meilleur ajustement représentant plus de 40% de la partie centrale du BAC. Les trois sous-sections du BAC comprennent la profondeur de rugosité du noyau ( $S_k$ ), la hauteur maximale de pic ( $S_{pk}$ ) et la profondeur de vallée réduite ( $S_{vk}$ ). Il est souhaitable d'avoir une surface avec une petite surface, car ces pics disparaissent au cours des premières étapes de l'utilisation, tandis que  $S_k$  peut être la caractéristique à long terme (rugosité) d'une surface.



**Figure III.13:** Paramètres fonctionnels «  $S_k$  » et courbe d'Abbott-Firestone pour les surfaces réalisées avec les deux plaquettes de coupe testées à  $r = 0.8 \text{ mm}$  et  $1.2 \text{ mm}$ .

Selon la Figure III.14, l'augmentation du rayon du bec a entraîné une translation ascendante de la courbe d'Abbott vers des profondeurs plus faibles. La figure montre qu'un rayon de coupe de 1,2 mm donne une surface extrêmement précise (pour une plaquette non revêtue  $Spk=0.3780\mu\text{m}$  et pour une revêtue  $Spk=1.4516\mu\text{m}$ ) par rapport à l'autre rayon de coupe avec un rayon de 0,8 mm (pour une plaquette non revêtue  $Spk=1.045\mu\text{m}$  et pour une revêtue  $Spk=0.8123\mu\text{m}$ ). Nous avons également remarqué que la plaquette de coupe non revêtue avec un rayon de bec de 1,2 mm avait le minimum  $Sk=0,656\mu\text{m}$ ,  $Spk=0,378\mu\text{m}$  et  $Svk=0,2838\mu\text{m}$ .

(a) Paramètres de volume

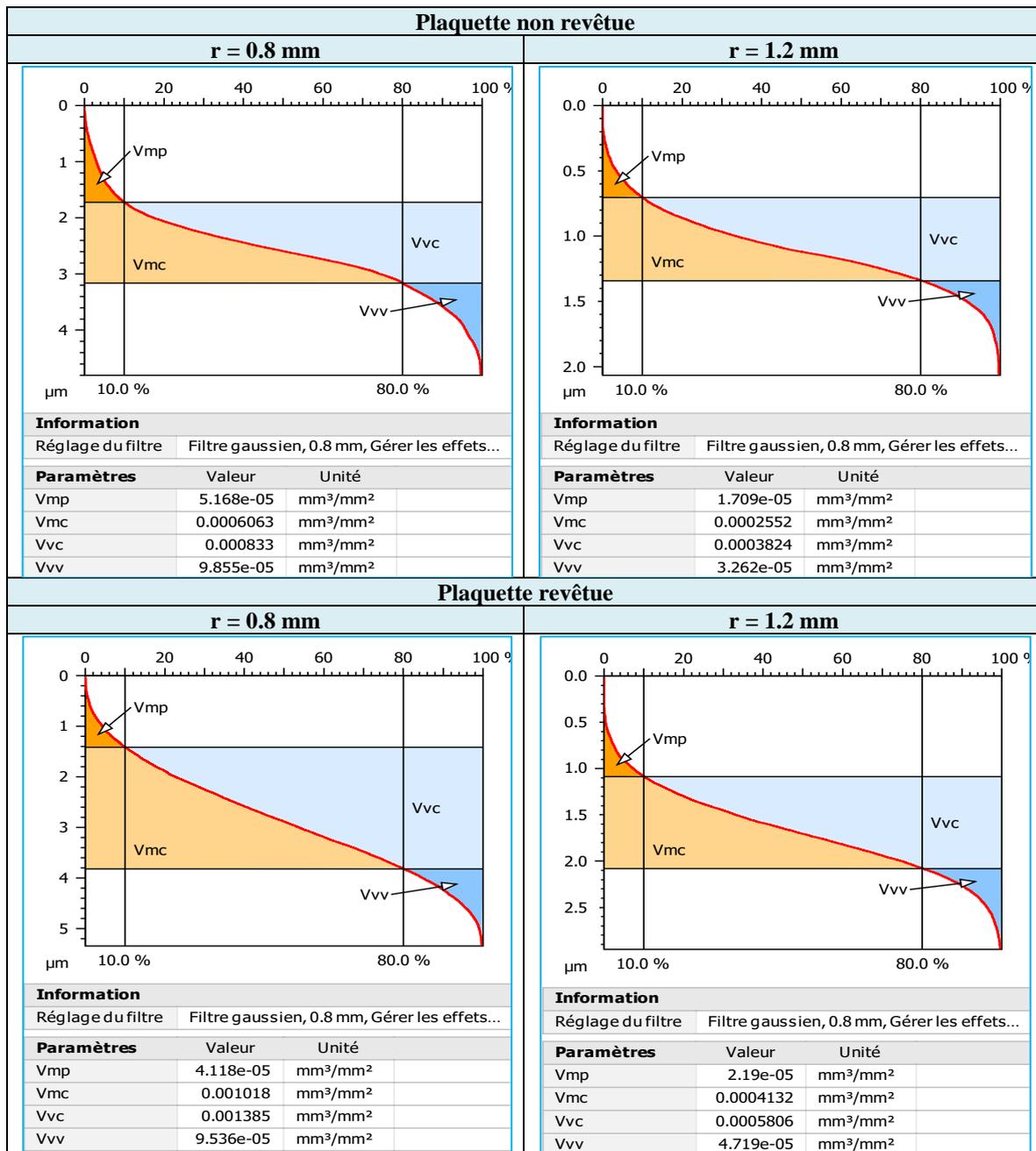


Figure III.14: Paramètres volumiques des surface réalisées avec les deux plaquettes de coupe testées à r = 0.8 mm et 1.2mm.

La Figure III.14 illustre les paramètres fonctionnels de volume, tous ces paramètres représentent une étape intermédiaire vers la définition des paramètres fonctionnels de volume, jugés plus pertinents. Comme les précédents, ces paramètres sont calculés sur la courbe d'Abbott à partir de deux seuils de taux de portance fixés à 10% et 80%. Ces paramètres peuvent caractériser non seulement les propriétés fonctionnelles communes des surfaces, mais aussi d'interpréter l'usure et les propriétés tribologiques. La famille de volumes à une énorme importance pratique et peut être utilisée pour évaluer numériquement le rapport de surface des matériaux et avoir des valeurs unitaires absolues de volume par unité de surface. A partir de cette figure, on remarque qu'avec l'augmentation du rayon de bec d'outil de  $r=0.8$  mm à  $r=1.2$  mm, le volume de matière des pics ( $V_{mp}$ ) diminue de 3 fois pour la plaquette de coupe en céramique non revêtue et 1.9 fois pour la céramique revêtue et le volume de matière de cœur ( $V_{mc}$ ) diminue 2.4 fois pour la céramique non revêtue et 2.5 fois pour la céramique revêtue.

### III. 4. Analyse de l'usure de l'outil de coupe

#### III. 4. 1. Evolution de l'usure en fonction du temps de coupe

Afin d'évaluer l'effet de revêtement en TiN des outils de coupe en céramique sur leur durée de vie et de comparer leurs performances en termes d'usure par rapport à d'autres outils non revêtus, des essais de chariotage de longue durée ont été réalisés sur des éprouvettes en acier faiblement allié X38CrMoV5-1 traité à 50 HRC. Deux types de plaquettes de coupe ont été utilisées, à savoir des outils en céramique mixte revêtus en TiN et d'autres non revêtus avec une vitesse de coupe ( $V_c=150$  m/min), l'avance par tour ( $f=0.08$  mm/tr), une profondeur de passe ( $a_p=0.3$  mm), avec deux rayons de bec d'outil ( $r=0.8$  mm et  $r=1.2$  mm). Ces opérations ont pour but de déterminer les courbes d'usure en fonction du temps d'usinage.

Les tenues des différentes plaquettes de coupe utilisées ont été déterminées sur la base d'une usure en dépouille admissible  $[VB] = 0.3$  mm. Des valeurs d'usure et de rugosité ont été mesurées au-delà de cette limite dans le but d'observer le comportement global de ce type des plaquettes de coupe dans des conditions extrêmes lors de tournage dur d'un acier traité avec des outils revêtus. La définition de la durée de vie ( $T$ ) d'un outil selon la norme ISO 3685 : « C'est le temps de coupe total d'un outil nécessaire pour atteindre un critère de durée de vie spécifique ». Les résultats de l'évolution de l'usure en dépouille des quatre plaquettes de coupe testées en fonction du temps d'usinage sont présentés sur la Figure III.15.

L'analyse de cette figure montre que l'allure de l'usure  $VB$  suit la loi universelle de l'usure de n'importe quelle pièce mécanique (Norme ISO 8688-1/1989). En d'autres termes, cette évolution est caractérisée par trois périodes principales. La première période correspond aux premières secondes de travail, qui se distingue par une usure intensive appelée souvent « usure initiale ou rodage ». La grande vitesse d'accroissement de l'usure dans cette période s'explique par l'élimination des aspérités au niveau de l'arête de coupe ou à son voisinage. Au cours de la deuxième phase qui dépasse la période de rodage, l'usure évolue avec une vitesse relativement plus lente devient plus ou moins linéaire, cette période est connue dans la

littérature par « l'usure progressive ou normale », elle se distinguait par une grande résistance à l'usure. Au fur et à mesure que l'outil travaille, la température à l'interface Outil/Pièce et Outil/Copeau s'élèvent faisant favoriser l'apparition de la troisième période qui s'appelle « l'usure catastrophique ». L'élévation de la température dans les zones de contact de la partie active de l'outil conduit à l'accélération des mécanismes d'usure par abrasion et par diffusion. Logiquement, l'usure augmente brusquement et l'outil perd ses qualités de coupe en affectant la rugosité et la précision dimensionnelle ce qui explique la limite de la durée de vie de l'outil.

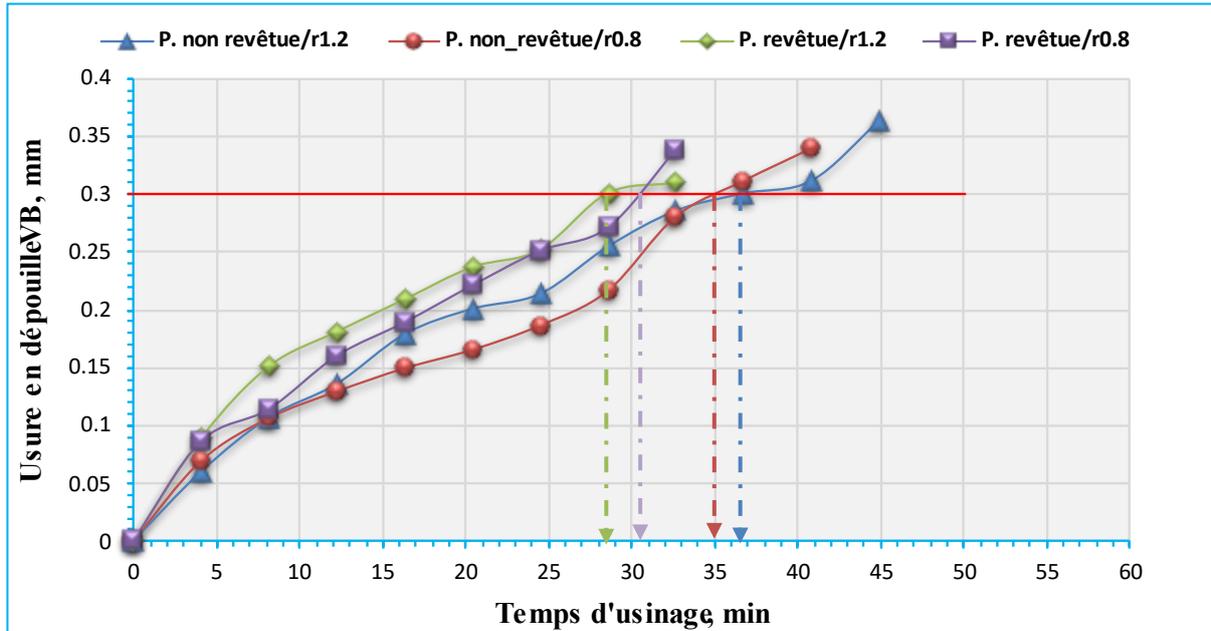


Figure III.15: Evolution de l'usure des plaquettes de coupe testées en fonction du temps de coupe à différents rayons de bec

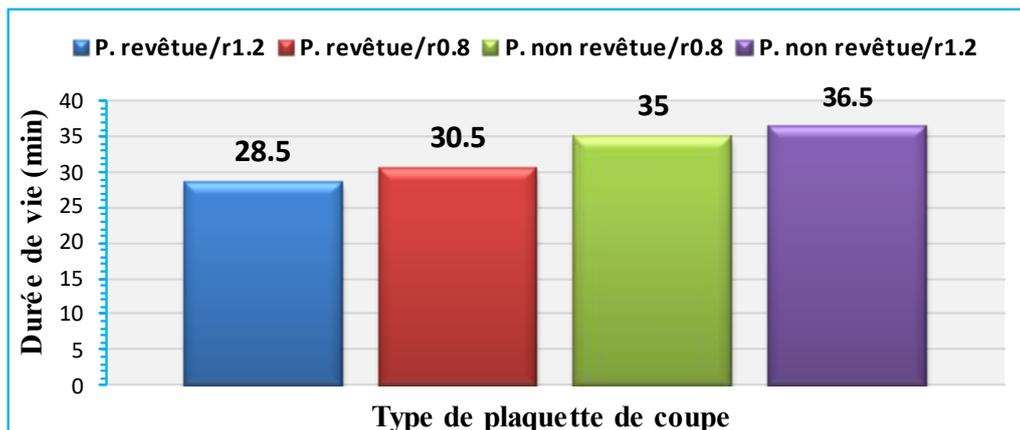


Figure III.16: Progression de la durée de vie lors du tournage de l'acier X38CrMoV5-1 avec des plaquettes de coupe revêtues et non revêtues à différents rayons de nez (0,8 et 1,2), pour [VB]=0,3mm

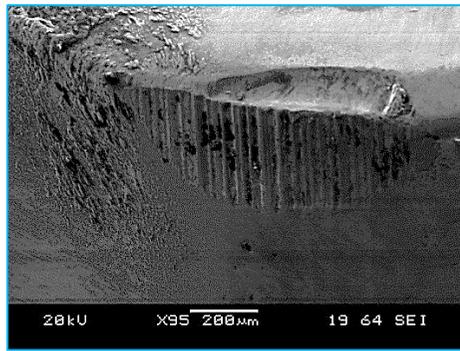
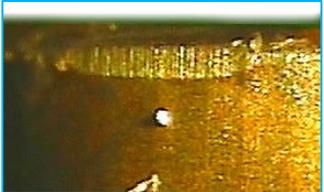
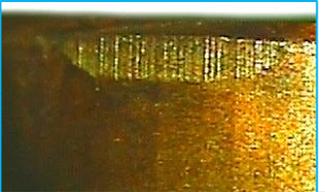
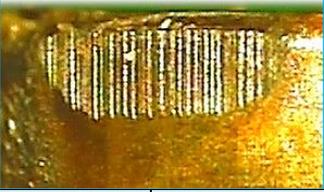
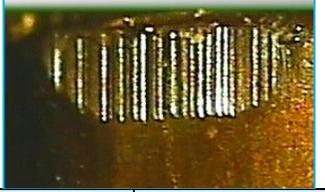
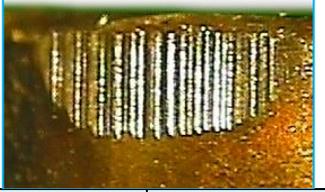
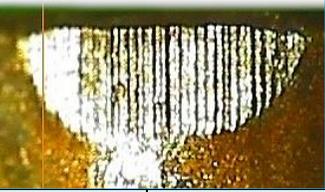
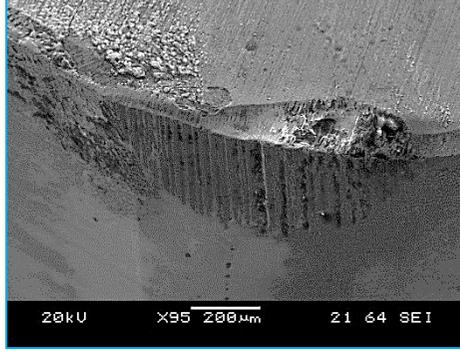
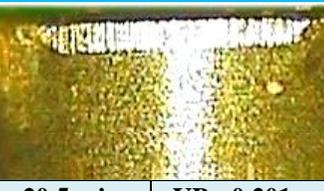
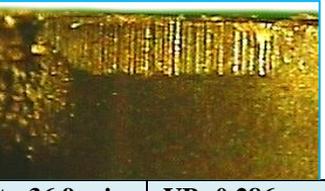
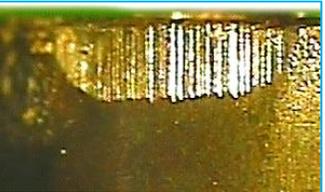
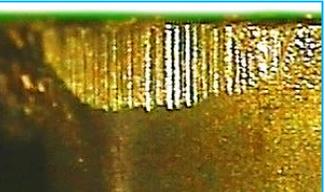
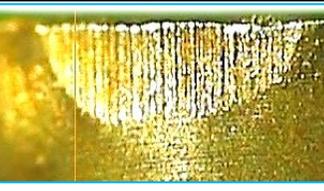
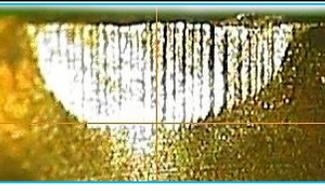
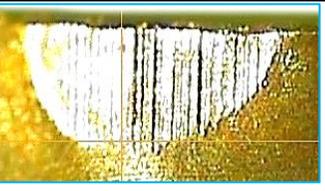
Les Figure III.15 et Figure III.16 présentent l'effet du revêtement et du rayon de bec de l'outil sur la durée de vie des plaquettes de coupe utilisées dans cette étude. Pour une plaquette en céramique revêtue avec un rayon de coupe  $r=0,8\text{mm}$  et un temps d'usinage de 4 minutes, l'usure en dépouille VB de la plaquette atteint  $0,089\text{ mm}$ . À la fin de l'usinage ( $t=30,50\text{ min}$ ),

l'usure en dépouille est de 0,30 mm, représentant une augmentation de 337%. La durée de vie de cette plaquette est de 30,50 min. Pour la première opération de tournage avec une plaquette en céramique revêtue avec un rayon de bec de 1,2mm, l'usure en dépouille VB est de 0,089 mm. Cependant, la durée de vie de l'outil en fin d'usinage est de 28,5 min, avec une usure en dépouille de 0,30 mm, représentant une augmentation de 337%. La durée de vie de cet insert est de 28,5 min.

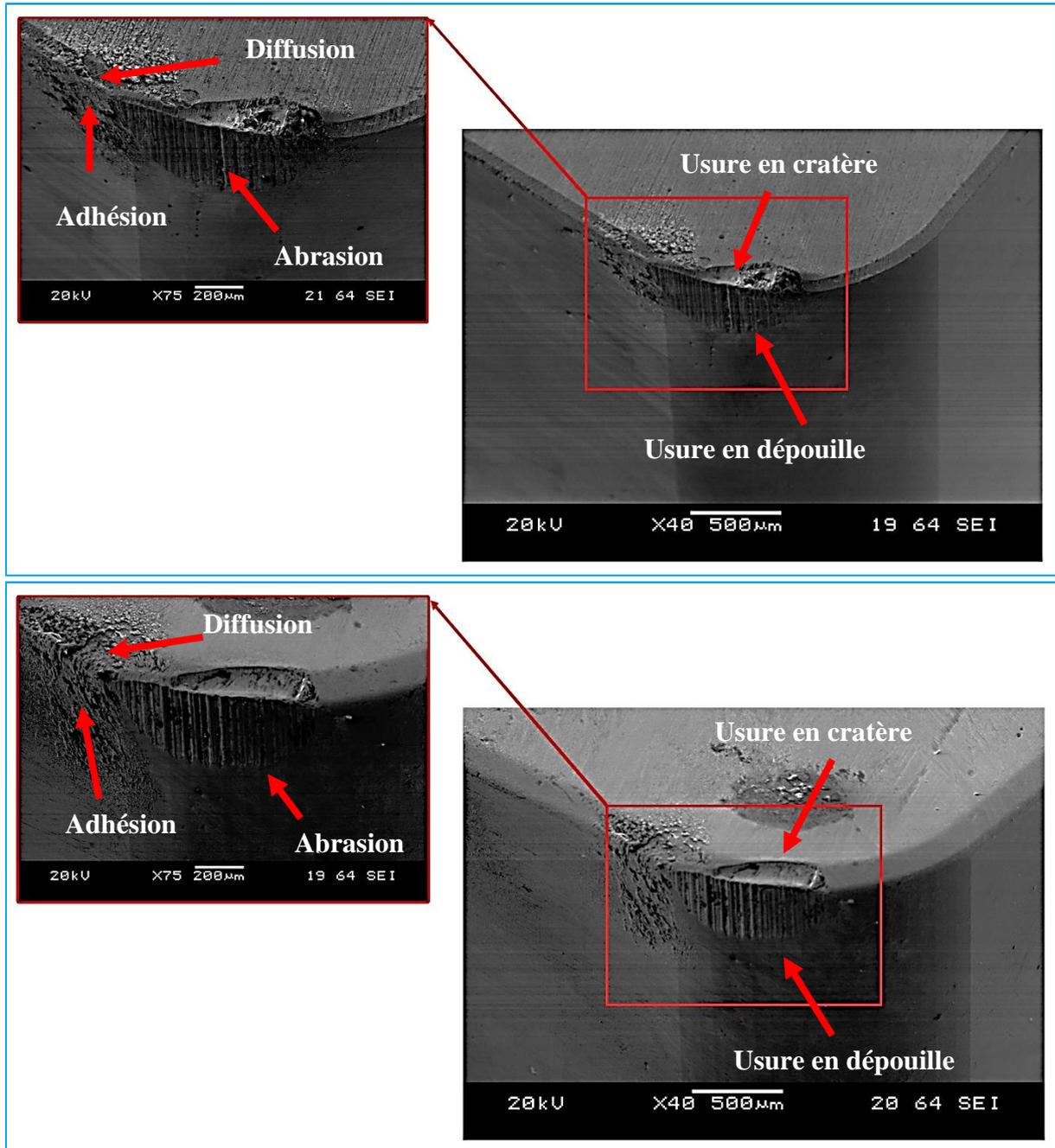
En ce qui concerne la plaquette de coupe non revêtue avec un rayon de coupe de 0,8 mm, l'usure en dépouille atteint une valeur de 0,069 mm après 4 min d'usinage. Cependant, la durée de vie de l'outil en fin d'usinage est de 35 min, avec une usure en dépouille de 0,30 mm représentant une augmentation de 335%. La durée de vie de cette plaquette est de 35 min. Enfin, pour un usinage réalisé par la céramique non revêtue avec un rayon de 1,2 mm, la première opération de tournage conduit à une valeur d'usure en dépouille de 0,060 mm. Cependant, la durée de vie de l'outil en fin d'usinage est de 36,5 min, avec une usure en dépouille de 0,30 mm représentant une augmentation de 400%. La durée de vie de cette plaquette est de 36,5 min.

La Figure III.17 présente la morphologie de l'usure en dépouille VB de deux plaquettes de coupe en céramique (revêtue et non revêtue en TiN) à  $V_c = 150$  m/min,  $f = 0,08$  mm/tr et  $a_p = 0,30$  mm. Les deux céramiques montrent une usure en dépouille régulière qui s'élargit avec le temps pour toutes les plaquettes testées. Les outils de coupe pour les deux nuances des plaquettes s'usent lentement sur le bec de l'outil ainsi que sur la surface d'attaque, indiquant que ces matériaux conviennent bien à l'usinage de l'acier AISI H11 traité à 50 HRC avec ces conditions de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$  et  $r$ ). Les valeurs de VB des deux plaquettes ont été comparées, montrant que la céramique non revêtue est plus performante que la céramique revêtue. La valeur de l'usure en dépouille VB enregistrée sur la céramique revêtue après 28,7 minutes est de 0,255 mm, dépassant la valeur d'usure en dépouille admissible  $V_b=0,30$  mm. Dans ces conditions de coupe, les outils de coupe en céramique non revêtus pour les deux rayons de coupe étudiés ont de meilleures performances que les outils de coupe en céramique revêtus en TiN, en particulier en termes de durée de vie de l'outil.

L'usinage à sec de l'acier dur AISI H11 avec une céramique revêtue entraîne une usure de 0,310 mm après 32,8 minutes d'usinage, due à l'augmentation de la température et des frottements dans la zone de coupe (contact outil-pièce), accélérant ainsi l'usure. L'usinage des aciers durs est une opération de déformation plastique visant à obtenir la rupture de la matière. Les sollicitations mécaniques et thermiques subies par l'outil sont donc très importantes, avec une température pouvant atteindre 1000°C dans la zone de coupe. Attia et al [141] examinent l'usure et la température de coupe lors de l'usinage à sec de l'acier dur AISI H11 avec des plaquettes en céramique revêtues et non revêtues. Les résultats montrent que la température dans la zone de coupe peut atteindre 1000°C en raison des sollicitations mécaniques et thermiques importantes subies par l'outil pendant l'opération de coupe. Ce phénomène a un impact négatif sur la durée de vie de l'outil avec un revêtement TiN par rapport à l'outil en céramique non revêtue, en raison d'une possible réaction thermomécanique ou chimique du revêtement.

Plaquettes		Micrographies pour l'usure en dépose (plaquettes revêtues et non revêtues)							
 Plaquette de coupe Revêtue_r1.2	t=4,1min	VB=0,089mm	t= 8,2min	VB=0,151mm	t= 12,3 min	VB=0,181mm	t= 15,9 min	VB=0,209mm	 20kU X95 200µm 19 64 SEI
	t= 20,5 min	VB= 0,247mm	t=24,6min	VB= 0,272mm	t= 28,7 min	VB=0,301mm	t= 32,8 min	VB=0,310mm	
									
									
 Non revêtue _r1.2	t= 4,1 min	VB= 0,060mm	t= 8,2 min	VB= 0,107mm	t= 12,3 min	VB=0,136mm	t= 16,4 min	VB=0,179mm	 20kU X95 200µm 21 64 SEI
	t= 20,5 min	VB= 0,201mm	t= 24,6min	VB= 0,214mm	t= 28,7 min	VB=0,255mm	t= 36,9 min	VB=0,286mm	
									
									
	t= 41 min	VB= 0,301mm	t= 49,2min	VB= 0,312mm	t= 57,4 min	VB=0,364mm			
									

**Figure III.17:** Micrographies et images au MEB de l'usure en dépose VB des plaquettes revêtues et non revêtues à  $V_c=150\text{m/min}$ ,  $f=0,08\text{mm/tour}$  et  $a_p=0,30\text{mm}$  pour  $r=1,2\text{min}$ .



**Figure III.18:** Morphologie de l'usure en dépouille VB et en cratère par MEB. (a) Plaquette non revêtue ; (b) plaquette revêtue avec un rayon de bec de  $r=1.2\text{mm}$ .

La Figure III.18 présente les résultats de l'étude de l'usure en dépouille et en cratère des plaquettes de coupe testées, revêtues et non revêtues, avec un rayon de bec  $r=1.2\text{mm}$ , observées à l'aide d'un microscope à balayage électronique (MEB) lors de l'usinage de l'acier AISI H11, sous les conditions de coupe suivantes :  $V_c = 150\text{ m/min}$  ;  $f = 0,08\text{ mm/tr}$  et  $a_p=0,30\text{ mm}$ . Les micrographies ont été prises en fin de vie de l'outil (le temps total d'usinage est indiqué entre parenthèses). Les bandes striées présentes sur la surface en dépouille des outils sont caractéristiques du mécanisme d'usure abrasive et adhésive. B. Lauwers et al [142], ont analysé les mécanismes d'usure lors du tournage de matériaux durs et ont observé que les bandes striées sur la surface en dépouille des outils sont caractéristiques de l'usure abrasive et

adhésive. Ils ont utilisé des techniques d'analyse de surface, telles que la microscopie à balayage électronique et la profilométrie, pour étudier l'évolution de l'usure de l'outil au fil du temps. Les résultats de leur étude montrent que l'usure abrasive et adhésive est un mécanisme important lors du tournage de matériaux durs, et que les bandes striées sur la surface en dépouille des outils en sont une manifestation visible.

Les résultats obtenus indiquent que les mécanismes d'usure majeurs sont l'abrasion, la diffusion et l'adhérence, surtout au niveau des faces de dépouille et de dégagement. Néanmoins, l'usure en cratère peut également apparaître sur tous les outils, particulièrement sur la face de coupe, révélant ainsi la diffusion comme l'un des mécanismes d'usure actifs, en plus de l'abrasion et de l'adhérence. En effet, l'abrasion est considérée comme le principal mécanisme d'usure lors de l'usinage dur. Toutefois, en raison des hautes températures et des contraintes mécaniques rencontrées lors de l'usinage dur, la diffusion peut également se produire. Des réactions chimiques telles que l'oxydation rapide, due aux températures de coupe élevées, ont également été rapportées. Les propriétés chimiques sont particulièrement importantes à des vitesses de coupe élevées, où la température peut accélérer les réactions chimiques entre l'outil et la pièce à usiner. En conclusion, les outils de coupe en céramique d'alumine recouverts de TiN sont plus susceptibles de subir une usure adhésive, tandis que l'usure par diffusion activée chimiquement est plus élevée dans les matériaux d'outils de coupe en céramique revêtus de TiN. En revanche, l'outil en céramique conventionnelle non recouvert est peu affecté par l'usure par diffusion [132, 133 et 134].

#### **III. 4. 2. Evolution de la rugosité de surface en fonction du temps d'usinage**

La qualité de la surface usinée est l'un des paramètres critiques dans le processus d'usinage. La rugosité de surface est un critère clé qui dépend en grande partie de l'état de l'outil de coupe. Au fur et à mesure que l'outil s'use, la rugosité de la surface usinée tend à augmenter. Par conséquent, il est important d'optimiser les paramètres de coupe afin de minimiser la rugosité de surface et de maximiser la durée de vie de l'outil. La détermination des paramètres de coupe appropriés est un processus crucial qui permet d'atteindre à la fois une qualité de surface optimale et une durée de vie prolongée de l'outil.

Dans cette partie, nous avons procédé à des mesures de rugosité de surface en fonction du temps d'usinage et de l'usure de l'outil. L'impact du temps d'usinage sur la surface usinée est souvent discuté dans les études d'usinage difficile. Les mesures de rugosité de surface ont été effectuées tous les 100 mm de coupe. Trois mesures ont été prises à trois points distincts de la circonférence, espacés de 120°. Les Figure III.19 et Figure III.20 présentent l'évolution des paramètres de rugosité ( $R_a$  et  $R_t$ ) en fonction du temps d'usinage pour deux matériaux testés avec des rayons de coupe de 0,8 mm et 1,2 mm, à une vitesse de coupe de 150 m/min, une avance de 0,08 mm/tr et une profondeur de passe de 0,30 mm. Nous constatons que les valeurs des paramètres de rugosité ( $R_a$  et  $R_t$ ) de la surface usinée avec des plaquettes non revêtues sont nettement inférieures à celles des plaquettes revêtues, pour tous les temps d'usinage et pour différents rayons de coupe. En outre, les deux figures montrent que cette relation peut être expliquée comme suit.

Dans la première zone de temps de coupe, inférieure à 16 minutes, les deux types de plaquettes de coupe testées présentent une meilleure qualité de surface, quel que soit le rayon de bec. Cependant, lorsque l'usure en dépouille devient excessive au-delà de 16 minutes, l'augmentation de l'effort de coupe et de la température peut déstabiliser le processus d'usinage et dégrader la qualité de surface obtenue. À la fin de l'usinage, la durée de vie de l'outil revêtu  $T_{p\_revêtu}$  est de 32,67 minutes et celle de l'outil non revêtu  $T_{p\_non\_revêtu}$  est de 40,83 minutes. Les critères de rugosité de surface ( $Ra_{1,2}$  et  $Rt_{1,2}$ ) présentent des valeurs de (1,63 et 9,34)  $\mu\text{m}$  pour la plaquette de coupe revêtu et des valeurs de (0,72 et 4,1)  $\mu\text{m}$  pour la plaquette de coupe non revêtu.

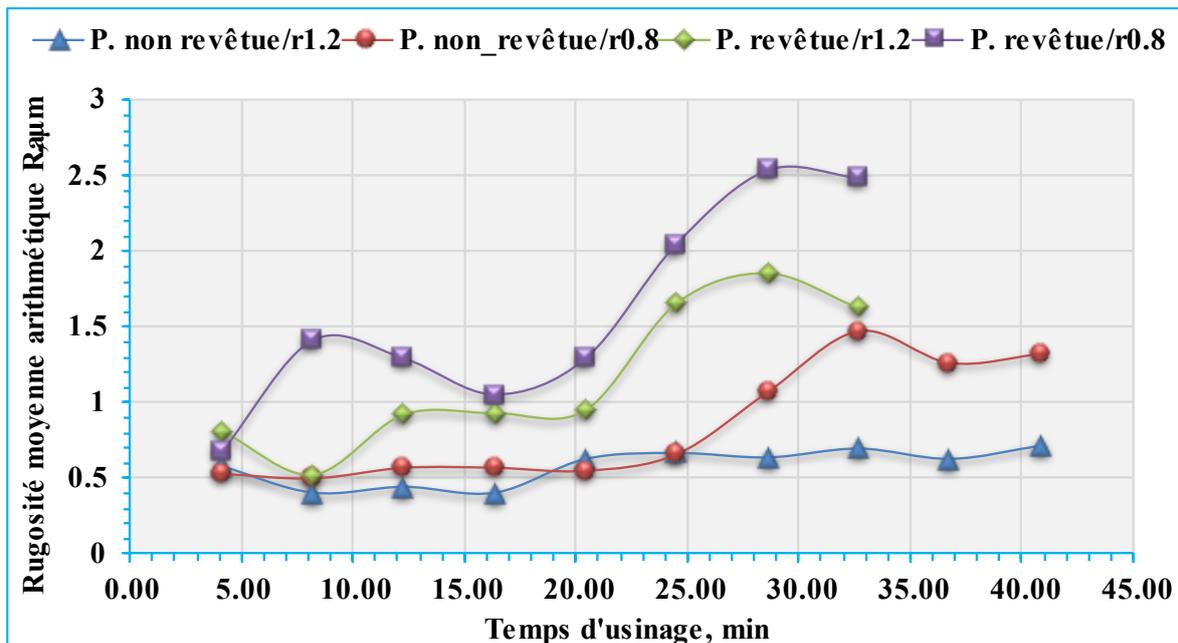


Figure III.19: Influence du temps d'usinage sur la rugosité moyenne arithmétique  $Ra$ , à différents rayons de bec des plaquettes de coupe testées pour  $V_c = 150 \text{ m / min}$ ,  $f = 0,08 \text{ mm}$  et  $a_p = 0,30 \text{ mm}$ .

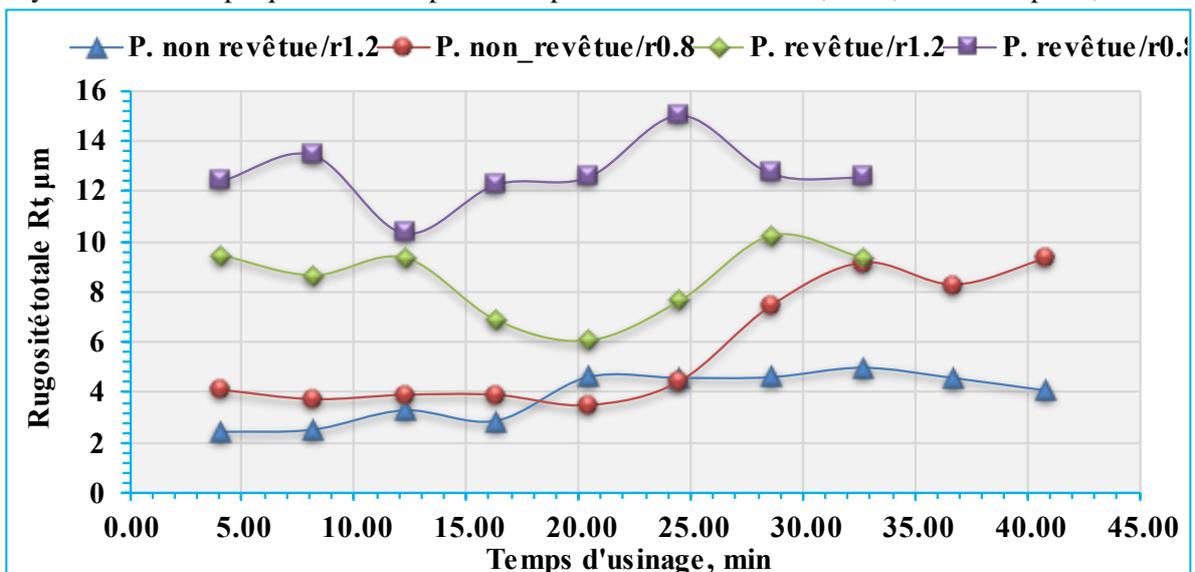


Figure III.20: Influence du temps d'usinage sur la rugosité totale  $Rt$ , à différents rayons de bec des plaquettes de coupe testées pour  $V_c = 150 \text{ m / min}$ ,  $f = 0,08 \text{ mm}$  et  $a_p = 0,30 \text{ mm}$ .

### III. 4. 3. Évolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage

La Figure III.21 présente l'évolution de l'usure en dépouille VB en fonction de la force de coupe tangentielle « Ft » pour deux plaquettes de coupe testées, avec deux rayons de bec de l'outil ( $r=0.8\text{mm}$  et  $r=1.2\text{mm}$ ), à des conditions d'usinage de  $f = 0,08\text{ mm/tour}$ ,  $a_p = 0,30\text{ mm}$  et  $V_c = 150\text{ m/min}$ . On observe que les forces de coupe augmentent proportionnellement à l'usure en dépouilles, car cette dernière affecte les surfaces de coupe et de dépouille de l'outil. Cette évolution de l'usure entraîne une augmentation de la surface de contact pièce-outil, ce qui génère des forces de friction plus élevées et, par conséquent, des forces de coupe accrues. L'analyse des résultats montre également que les courbes des efforts de coupe pour les quatre plaquettes testées se rapprochent deux à deux à la fin de l'usinage. En outre, les valeurs obtenues avec les plaquettes céramiques revêtues sont nettement supérieures en raison de la réaction de la couche de revêtement aux éléments de la pièce.

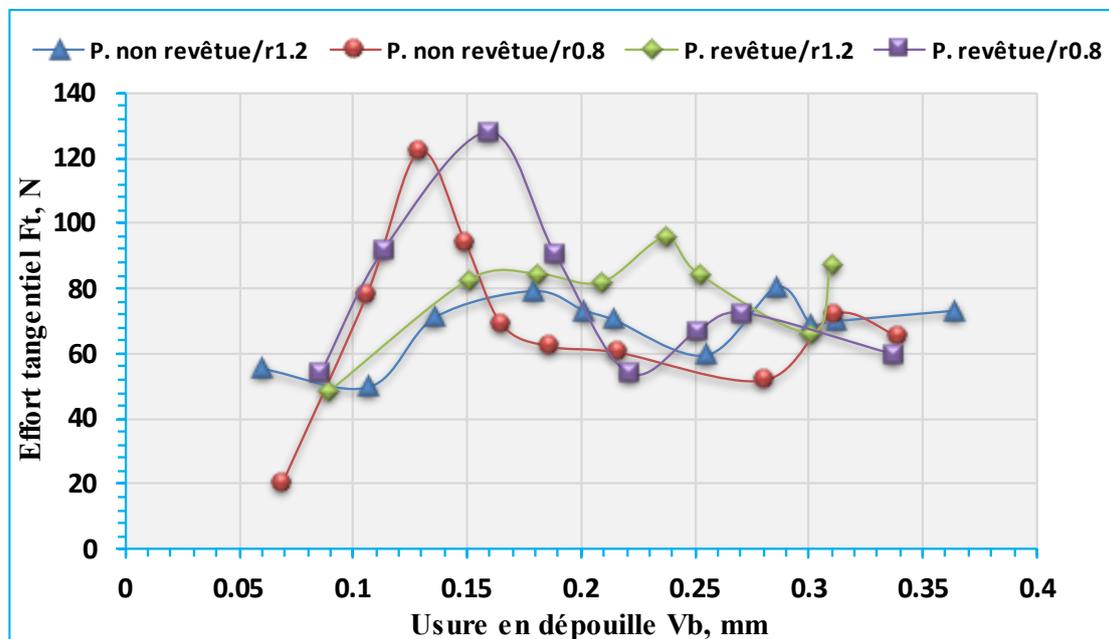


Figure III.21: Influence de l'usure des flancs sur Fc, à différents rayons de nez pour  $V_c = 150\text{ m/min}$ ,  $f = 0,08\text{ mm}$  et  $a_p = 0,30\text{ mm}$  (inserts revêtus et non revêtus)

### III. 5. Conclusion

Les résultats obtenus à partir des essais effectués sur l'usinabilité Couple-Outil-Matière avec l'acier X38CrMoV5-1 (AISI H11) trempé, usiné en tournage dur à sec par les deux types de matériaux d'outils de coupe en céramique ont fourni des informations précieuses sur les performances des outils de coupe en termes d'effort de coupe, de rugosité des surfaces usinées et d'usure en dépouille. Les deux types d'outils de coupe en céramique testés comprennent une plaquette de coupe en céramique mixte à base d'alumine, additionnées de carbure de titane ( $70\% \text{ Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{ TiC}$ ) dont la première est non revêtue et la deuxième plaquette est revêtue avec une couche mince de nitrure de titane (TiN) déposée par voie physique (technique PVD).

Les résultats ont permis de déterminer les plages des conditions de coupe liées au fonctionnement correct des outils, les mieux adaptées et les durées de vie. Les états de surfaces usinées par les céramiques non revêtue ( $r=0.8\text{mm}$  et  $r=1.2\text{mm}$ ) sont meilleurs que ceux obtenus par les céramiques revêtue ( $r=0.8\text{mm}$  et  $r=1.2\text{mm}$ ) et cela pour toutes les conditions de coupe testées (la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe).

La profondeur de passe affecte énormément les efforts de coupe. Mais elle devient le paramètre le moins influant sur les rugosités. En plus, l'avance vient en deuxième position. Elle devient le facteur prépondérant sur les rugosités. En comparant les valeurs de l'effort de coupe tangentiel " $F_t$ " et les deux critères de la rugosité " $R_a$  et  $R_t$ " en fonction des paramètres de coupe obtenus par les deux plaquettes de coupe utilisées, on remarque clairement que la plaquette non revêtue génère des efforts de coupe faibles et des meilleurs états de surface par rapport à l'autre plaquette revêtue en TiN.

Les composantes de l'effort de coupe variaient presque linéairement avec l'avance et la profondeur de coupe mais présentaient des comportements différents avec la vitesse de coupe. Initialement, les forces de coupe ont diminué avec l'augmentation de la vitesse de coupe, mais sont restées presque inchangées dans la plage de vitesse de coupe plus élevée pour les deux outils de coupe en céramique.

D'après l'étude comparative menée entre les deux types de céramiques de coupe, il est possible de constater que les céramiques non revêtues et dotées de deux rayons de bec ( $r=0.8\text{mm}$  et  $r=1.2\text{mm}$ ) présentent des performances supérieures en termes d'usure, de tenue, d'effort de coupe et de rugosité de surface, par rapport aux céramiques revêtues d'une couche mince de nitrure de titane (TiN) ( $r=0.8\text{mm}$  et  $r=1.2\text{mm}$ ).

Il convient de prendre en compte l'usure qui peut causer des dommages et des dégradations sur les surfaces des pièces. Malgré l'évolution de VB jusqu'à  $0,3\text{ mm}$ , la plupart des valeurs de  $R_a$  enregistrées pour les deux céramiques non revêtues n'ont pas dépassé la valeur de  $1,5\text{ }\mu\text{m}$ .

Les deux types de matériaux d'outils de coupe en céramique subissent une usure abrasive progressive avec l'augmentation du temps de coupe. L'usure adhésive est plus élevée lors de l'usinage de matériaux plus durs, et le matériau d'outil de coupe en céramique d'alumine revêtue de TiN est plus affecté par l'usure adhésive. L'usure par diffusion activée chimiquement est plus élevée dans les matériaux d'outil de coupe en céramique revêtus de TiN, alors que l'outil en céramique conventionnel non revêtu est peu affecté par l'usure par diffusion.

# Chapitre

# IV

## Etude de l'effet de la géométrie de l'outil et des conditions de coupe en tournage dur

---

*« N'allez pas où le chemin peut mener,  
allez au lieu où il n'y a pas de chemin et laissez une trace. »*

---

Ralph Waldo Emerson

### Sommaire

---

<b>IV. 1. Introduction.....</b>	<b>- 126 -</b>
<b>IV. 2. Analyse des résultats uni-factorielles .....</b>	<b>- 126 -</b>
IV. 2. 1. Influence des paramètres de coupe sur les efforts de coupe .....	- 126 -
IV. 2. 1. 1. Influence de la vitesse de coupe .....	- 126 -
IV. 2. 1. 2. Influence de la profondeur de passe .....	- 127 -
IV. 2. 1. 3. Influence de l'avance.....	- 129 -
IV. 2. 2. Influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface .....	- 130 -
IV. 2. 2. 1. Influence de la vitesse de coupe .....	- 130 -
IV. 2. 2. 2. Influence de la profondeur de passe .....	- 131 -
IV. 2. 2. 3. Influence de l'avance par tour .....	- 132 -
<b>IV. 3. Analyse et discussion des résultats multifactoriels.....</b>	<b>- 134 -</b>
IV. 3. 1. Analyse et modélisation de la rugosité de surface (Ra et Rz).....	- 136 -
IV. 3. 1. 1. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface.....	- 136 -
IV. 3. 1. 2. Analyse de régression de la rugosité de surface Ra et Rz.....	- 138 -
IV. 3. 1. 3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées .....	- 141 -
IV. 3. 2. Analyse de l'effet des paramètres de coupe sur les efforts de coupe.....	- 142 -
IV. 3. 2. 1. Analyse de la variance (ANOVA) pour les efforts de coupe.....	- 142 -
IV. 3. 2. 2. Analyse de régression pour des efforts de coupe.....	- 145 -
IV. 3. 2. 3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées .....	- 150 -
<b>IV. 4. Analyse de l'intégrité surface.....</b>	<b>- 151 -</b>
IV. 4. 1. Paramètres de profil (2D) d'état de surface .....	- 152 -
IV. 4. 1. 1. Paramètres d'amplitude de profil 2D.....	- 152 -
IV. 4. 2. Paramètres surfaciques 3D d'état de surface .....	- 154 -
IV. 4. 2. 1. Paramètres d'amplitude .....	- 154 -
IV. 4. 2. 2. Paramètres fonctionnels.....	- 156 -
a) Paramètres de taux de portance.....	- 156 -

---

---

b) Les paramètres Sk.....	- 157 -
c) Les paramètres de volume .....	- 158 -
<b>IV. 5. Analyse de l'usure de l'outil de coupe.....</b>	<b>- 159 -</b>
IV. 5. 1. Evolution de l'usure en fonction du temps de coupe .....	- 159 -
IV. 5. 2. Evolution de la rugosité de surface en fonction de temps d'usinage .....	- 173 -
IV. 5. 3. Évolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage.....	- 175 -
IV. 5. 4. Analyse tridimensionnelle 3D de l'usure des outils .....	- 176 -
IV. 5. 4. 1 Procédures de numérisation 3D et de post-traitement .....	- 177 -
<b>IV. 6. Conclusion .....</b>	<b>- 184 -</b>

---

## IV. 1. Introduction

Dans cette première partie du chapitre, nous présentons les résultats d'une analyse d'observations expérimentales réalisées pour étudier et caractériser l'influence de la géométrie de l'outil sur l'usinabilité de l'acier X38CrMoV5-1 traité à 50 HRC, en utilisant des plaquettes de coupe en céramique à géométrie d'outil de forme conventionnelle et wiper. Nous avons utilisé l'approche de planification expérimentale en combinant les méthodes uni et multifactorielles pour définir le domaine de fonctionnement adéquat du couple outil/matière (céramiques de forme wiper (CC6050WH) et conventionnelle (CC6050WG) / Acier X38CrMoV5-1), usinées à sec. Nous avons également utilisé la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) pour développer des modèles mathématiques qui expriment la relation entre les éléments du régime de coupe et les paramètres technologiques étudiés afin de quantifier l'effet de ces facteurs variables sur les réponses étudiées. Dans la deuxième partie du chapitre, nous présentons les résultats de l'étude de la micro-géométrie de l'intégrité de surface par l'analyse de la topographie de surface 2D et 3D. Nous exposons également les résultats de l'évolution de l'usure des outils en fonction du temps d'usinage, son impact sur l'évolution des composantes de l'effort de coupe et sur la rugosité de surface, ainsi que la caractérisation de la formation du copeau et de ses différents mécanismes.

## IV. 2. Analyse des résultats uni-factorielles

### IV. 2. 1. Influence des paramètres de coupe sur les efforts de coupe

#### IV. 2. 1. 1. Influence de la vitesse de coupe

L'influence de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe a été étudiée pour les deux plaquettes de coupe de géométrie wiper et conventionnelle, pour une avance ( $f = 0.14$  mm/rev), une profondeur de passe ( $ap = 0.2$  mm) et un rayon de bec ( $r = 0.8$  mm). Le Tableau IV. 1 présente la matrice d'expérience unifactorielle ainsi que les résultats des efforts de coupe ( $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_v$ ).

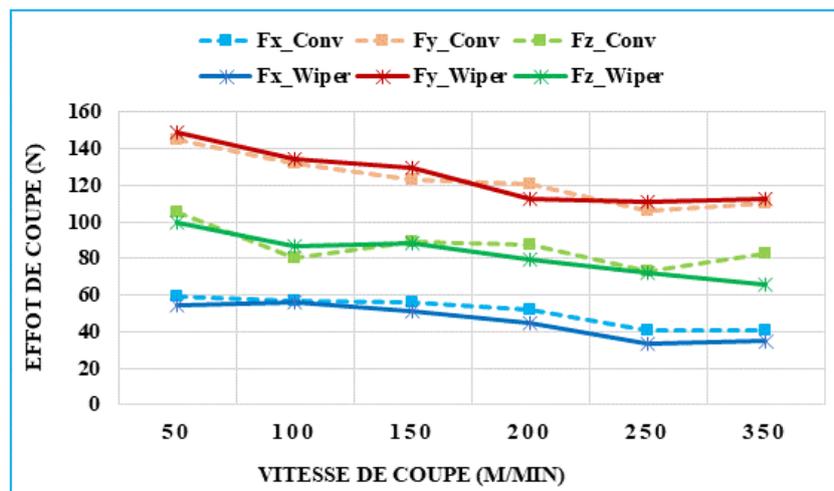
**Tableau IV. 1:** Matrice d'expérience unifactorielle : résultats de l'effet de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe pour les deux géométries wiper et conventionnelle

Numéro d'essai	Facteur(s) d'entrée				Paramètres de sortie					
	variable	constants			Plaquette conventionnelle			Plaquette wiper		
	Vc	f	ap	r	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>
1	50	0.14	0.2	0.8	59.28	144.64	105.01	54.17	149.04	99.82
2	100				57.27	132.29	80.6	55.87	134.65	86.98
3	150				56.09	123.42	89.33	50.96	129.65	88.11
4	200				51.9	120.74	88.01	44.89	112.69	79.62
5	250				40.87	106.12	73.13	33.66	111.04	72.48

6	350				41.11	110.46	82.57	35.23	112.96	65.82
---	-----	--	--	--	-------	--------	-------	-------	--------	-------

Les résultats obtenus suite à la variation de la vitesse de coupe pour les plaquettes de coupe sont présentés dans la Figure IV. 1. L'analyse de ces résultats démontre que l'augmentation de la vitesse de coupe entraîne généralement une diminution des composantes de l'effort de coupe. Cette diminution peut être attribuée à l'élévation de la température dans la zone de coupe. En effet, l'énergie thermique produite par la déformation plastique et le frottement affecte les propriétés mécaniques de la matière usinée. Dans le cas spécifique du tournage dur, les températures élevées à l'interface outil-pièce, combinées à l'avance de l'outil, expliquent donc la réduction des efforts de coupe.

Par ailleurs, les résultats de l'analyse montrent que la céramique conventionnelle, utilisée à une faible vitesse de coupe ( $V_c = 100$  m/min), entraîne des efforts moins élevés que la plaquette Wiper. En outre, l'analyse démontre que l'usinage avec la céramique Wiper à des vitesses de coupe élevées entraîne des efforts moindres que la céramique conventionnelle testée, en raison de leur géométrie différente (Figure IV. 1).



**Figure IV. 1 :** Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour les géométries wiper et conventionnelle à  $f = 0.14$  mm/rev,  $r = 0.8$  mm et  $a_p = 0.2$  mm

#### IV. 2. 1. 2. Influence de la profondeur de passe

L'influence de la profondeur de passe sur les efforts de coupe a été étudiée pour les deux plaquettes de coupe de géométrie wiper et conventionnelle, pour une avance ( $f = 0.14$  mm/rev), une vitesse de coupe ( $V_c = 160$  m/min) et un rayon de bec ( $r = 0.8$  mm). Le Tableau IV. 2 présente la matrice d'expérience unifactoriels ainsi que les résultats des efforts de coupe ( $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_v$ ).

Les résultats de l'étude sur la variation des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe pour les deux types de plaquettes de coupe, wiper et conventionnelle, sont présentés dans la Figure IV. 2. Les résultats montrent que l'engagement de l'outil de coupe dans la

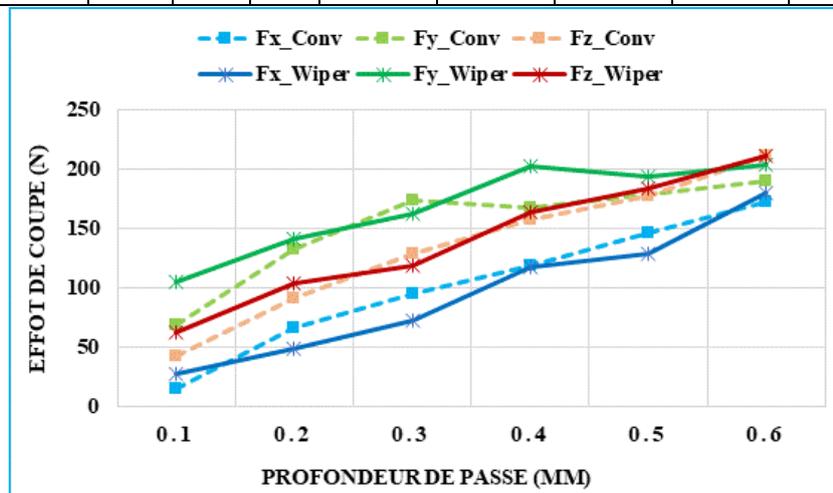
matière usinée entraîne une augmentation des efforts de coupe pour les deux types de plaquettes. Cette augmentation est attribuée à l'augmentation de l'épaisseur du copeau non déformé, ce qui conduit à une augmentation de la section du copeau à cisailer. Par conséquent, le matériau résiste davantage à la rupture et nécessite des efforts plus importants pour l'enlèvement du copeau.

Les résultats indiquent également que l'augmentation de la profondeur de passe de 0,1 à 0,6 mm conduit à des augmentations importantes des efforts de coupe, en pourcentage, pour les différents composants de l'effort de coupe. Ces augmentations sont de l'ordre de 650,23 % à 1077,93 % pour l'effort axial, de 194,48 % à 275,26 % pour l'effort radial et de 334,93 % à 490,96 % pour l'effort tangentiel pour les deux types de plaquettes.

D'une manière générale, il est observé que l'effort tangentiel est très affecté par l'avance, suivi de l'effort radial et en dernier lieu de l'effort axial. Ces résultats mettent en évidence l'importance de la profondeur de passe en tant que paramètre de coupe critique pour obtenir des niveaux d'effort de coupe élevés et soulignent l'importance de choisir une plaquette de coupe appropriée en fonction de l'application d'usinage.

**Tableau IV. 2:** Matrice d'expérience unifactorielle : résultats de l'effet de la profondeur de passe sur les efforts de coupe pour les deux géométries wiper et conventionnelle

Numéro d'essai	Facteur(s) d'entrée				Paramètres de sortie					
	variable	constants			Plaquette conventionnelle			Plaquette wiper		
		ap	f	Vc	r	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>
1	0.1	0.14	160	0.8	16.09	69.38	43.06	27.79	104.92	63.24
2	0.2				66.76	132.64	92.35	49.74	141.75	104.21
3	0.3				95.91	174.55	128.98	73.08	163.49	119.85
4	0.4				118.8	168.53	158.61	118.02	203.13	164.73
5	0.5				146.22	179.87	178.12	129.5	194.34	184.11
6	0.6				173.44	190.98	211.41	180.7	204.05	211.81



**Figure IV. 2 :** Evolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe pour deux céramiques de géométries wiper et conventionnelle à Vc = 160 m/min, f = 0.14 mm/rev et r = 0.8 mm

Les résultats obtenus à partir des courbes générées dans les mêmes conditions expérimentales pour les deux géométries de plaquettes de coupe ont révélé que la plaquette en Wiper engendrait des efforts de coupe légèrement plus élevés que la plaquette conventionnelle. Cette différence s'explique par l'effet de la géométrie du bec de la plaquette. Le méplat de la plaquette wiper situé au point de jonction du rayon et du côté de la plaquette crée plus de friction, ce qui entraîne une augmentation des efforts de coupe.

#### IV. 2. 1. 3. Influence de l'avance

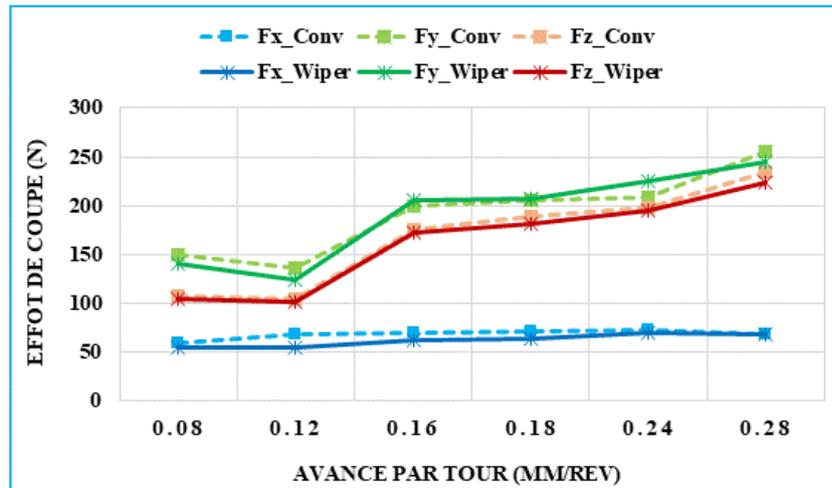
L'influence de l'avance par tour sur les efforts de coupe a été étudiée pour les deux plaquettes de coupe de géométrie wiper et conventionnelle, pour une profondeur de passe ( $ap = 0.2$  mm), une vitesse de coupe ( $Vc = 160$  m/min) et un rayon de bec ( $r = 0.8$  mm). Le Tableau IV.3 présente la matrice d'expérience unifactorielle ainsi que les résultats des efforts de coupe ( $Fa$ ,  $Fr$  et  $Fv$ ).

Les données expérimentales présentées dans la Figure IV. 3 montrent une évolution croissante des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe pour les deux types de plaquettes de coupe. Cette évolution est plus ou moins rapide en fonction de la valeur de l'avance utilisée. Cette augmentation des efforts de coupe est principalement due à l'augmentation de la section du copeau à cisailier, ce qui induit un accroissement de l'effort nécessaire à son arrachement.

De plus, on note que l'effort axial atteint un palier final pour certaines conditions d'usinage. En augmentant l'avance de 0.08 à 0.28 mm, les résultats montrent une élévation de (126,48 et 115,28) % de l'effort axial, (174 et 169,17) % de l'effort radial et (214,78 et 217.22) % de l'effort tangentiel pour les plaquettes wiper et conventionnelle, respectivement. Ces résultats mettent en évidence une sensibilité particulière de l'effort tangentiel à l'égard de l'avance, suivi de l'effort radial et enfin de l'effort axial.

**Tableau IV.3:** Matrice d'expérience unifactorielle : résultats de l'effet de l'avance sur les efforts de coupe pour les deux géométries wiper et conventionnelle

Numéro d'essai	Facteur(s) d'entrée				Paramètres de sortie					
	variable	constants			Plaquette conventionnelle			Plaquette wiper		
		f	ap	Vc	r	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>
1	0.08	0.2	160	0.8	59	150.61	108.18	54.59	141	104.22
2	0.12				67.82	137.04	105.3	55.23	124.13	101.88
3	0.16				70.45	200.26	175.54	62.52	206.31	173.17
4	0.18				71.25	206.24	188.8	63.8	207.93	181.32
5	0.24				72.5	209.39	198.38	69.95	225.61	195.35
6	0.28				68.02	254.79	234.99	69.05	245.35	223.85



**Figure IV. 3 :** Evolution des efforts de coupe en fonction de l'avance pour deux plaquettes de géométries wiper et conventionnelle à  $V_c = 160$  m/min,  $a_p = 0.2$  mm et  $r = 0.8$  mm

#### IV. 2. 2. Influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface

Les plaquettes de coupe Wiper, également appelées racleuses, ont pour objectif d'atténuer les marques de coupe laissées sur les surfaces tournées, ce qui améliore la finition de surface. En comparaison avec les plaquettes conventionnelles, les plaquettes Wiper ont la capacité d'améliorer la finition de surface par un facteur supérieur à deux ou de maintenir une finition constante tout en augmentant l'avance d'usinage. En d'autres termes, elles permettent d'augmenter la qualité ou la productivité. Toutefois, l'utilisation de plaquettes Wiper présente un inconvénient lié à leur profil inhabituel et complexe. Contrairement aux plaquettes conventionnelles qui suivent un seul rayon, le profil des plaquettes Wiper combine plusieurs rayons.

##### IV. 2. 2. 1. Influence de la vitesse de coupe

Les paramètres de qualité de surface ont été évalués en se limitant à la rugosité totale ( $R_t$ ), la moyenne arithmétique ( $R_a$ ), la moyenne des hauteurs des irrégularités ( $R_z$ ) et la rugosité moyenne quadratique ( $R_q$ ). La Figure IV. 4 illustre l'influence de la vitesse de coupe sur ces critères de rugosité lors de l'usinage de l'acier X38CrMoV5-1 trempé à 50 HRC avec deux céramiques de géométries différentes : wiper et conventionnelle, pour une avance de  $f = 0,14$  mm/rev, un rayon de coupe de  $r = 0,8$  mm et une profondeur de passe de  $a_p = 0,20$  mm. Les résultats montrent que la rugosité diminue légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe, quelle que soit la céramique utilisée. Le Tableau IV.4 présente la matrice de l'expérience unifactorielle et les résultats de la rugosité de surface ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ).

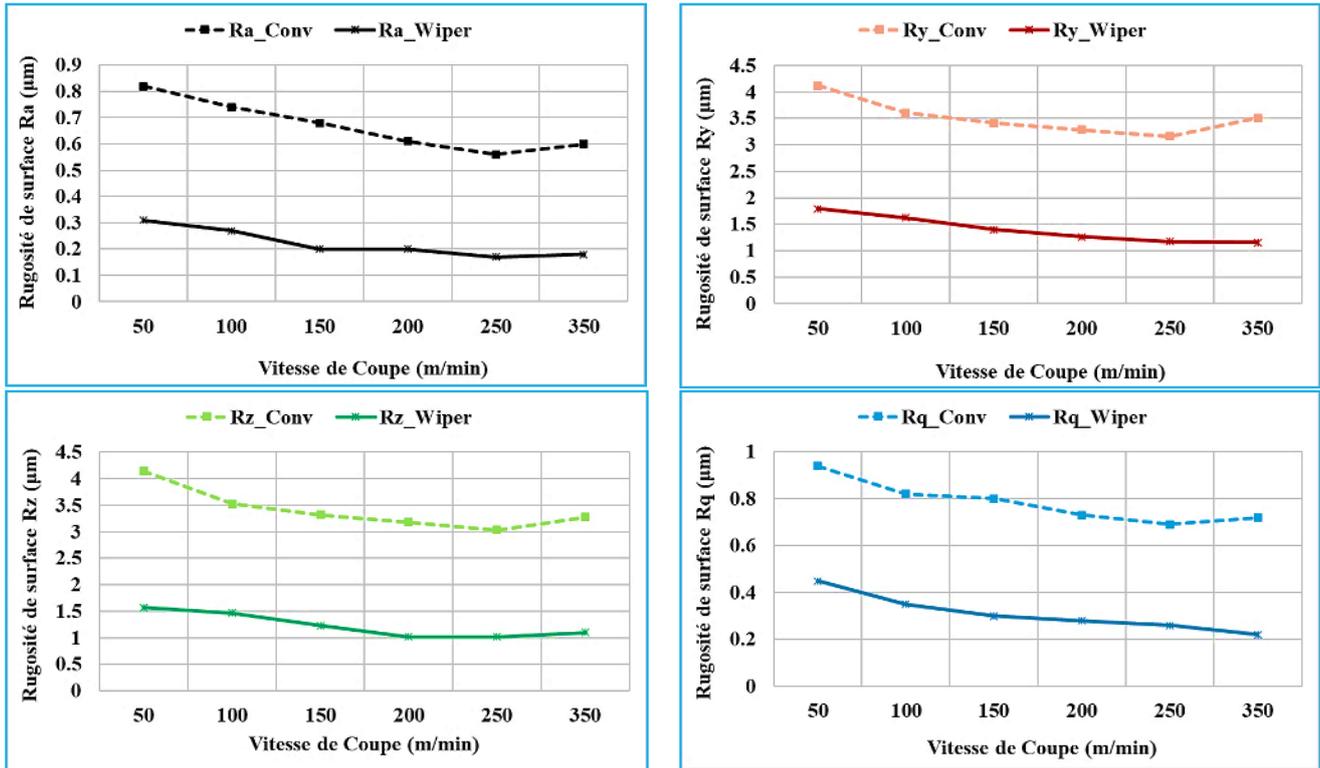


Figure IV. 4 : Evolution de la rugosité de surface en fonction de la vitesse de coupe pour deux céramiques de géométries wiper et conventionnelle à  $V_c = 160$  m/min,  $a_p = 0.2$  mm et  $r = 0.8$  mm

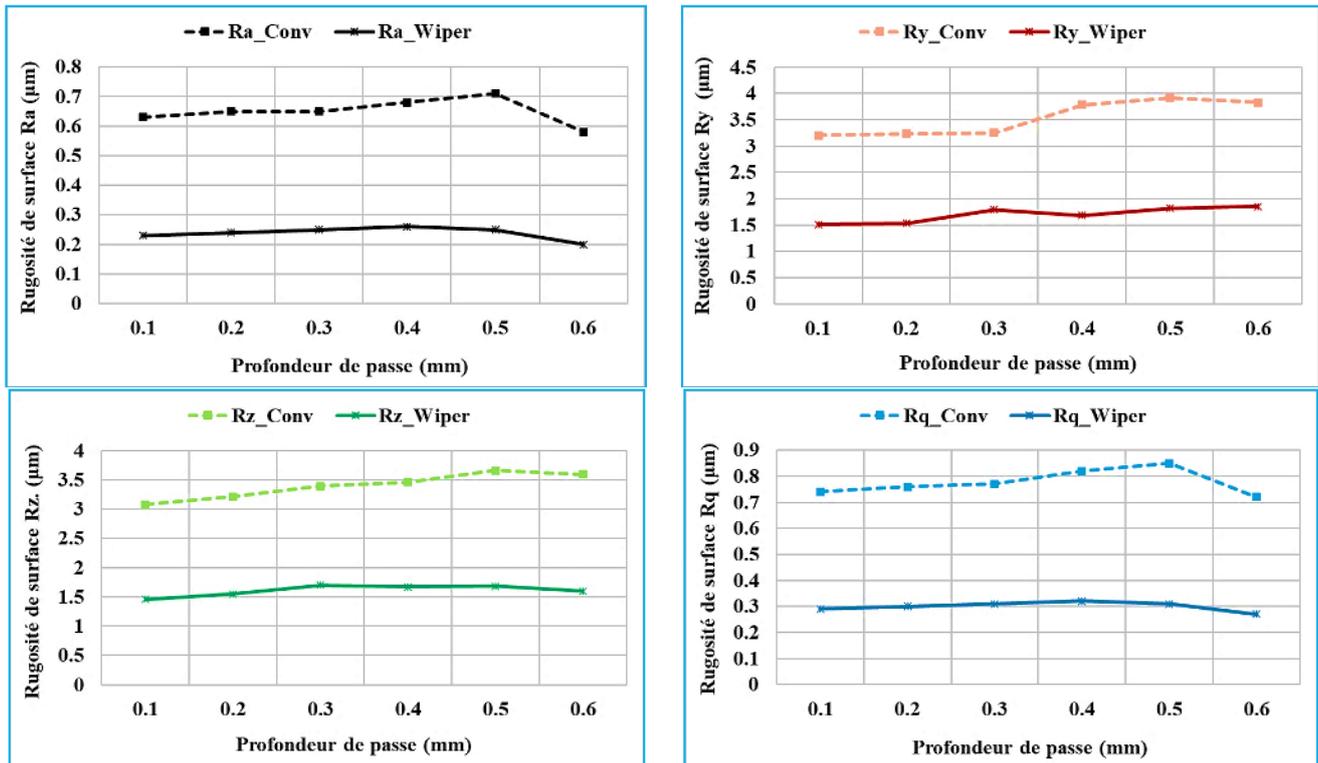
On a remarqué que l'état de surface s'améliore avec l'augmentation de la vitesse de coupe jusqu'à la limite de 200m/min.

Tableau IV.4: Matrice d'expérience unifactorielle : résultats de l'effet de la vitesse de coupe sur les critères de rugosité pour les deux géométries wiper et conventionnelle

Numéro d'essai	Facteur variable	Paramètres de sortie							
		Plaquette conventionnelle				Plaquette wiper			
		Vc	Ra	Ry	Rz	Rq	Ra	Ry	Rz
1	50	0.82	4.12	4.15	0.94	0.31	1.79	1.57	0.45
2	100	0.74	3.6	3.53	0.82	0.27	1.62	1.47	0.35
3	150	0.68	3.41	3.32	0.8	0.2	1.4	1.23	0.3
4	200	0.61	3.28	3.18	0.73	0.2	1.26	1.02	0.28
5	250	0.56	3.16	3.03	0.69	0.17	1.17	1.02	0.26
6	350	0.6	3.51	3.28	0.72	0.18	1.15	1.1	0.22

#### IV. 2. 2. 2. Influence de la profondeur de passe

La Figure IV. 5 présente le tracé de la variation des quatre critères de la rugosité de surface ( $R_t$ ,  $R_a$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ) en fonction de la profondeur de passe pour deux céramiques de géométries wiper et conventionnelle à  $V_c=160$ m/min,  $f=0.14$ mm/rev et  $r=0.8$ mm. Le Tableau IV.5 présente la matrice d'expérience unifactorielle ainsi que les résultats des critères de rugosité de surface ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ).



**Figure IV. 5 :** Evolution de la rugosité de surface en fonction de la profondeur de passe pour deux céramiques de géométries wiper et conventionnelle à  $V_c = 160$  m/min,  $a_p = 0.2$  mm et  $r = 0.8$  mm

L'étude des résultats obtenus montre que le paramètre de rugosité de surface est moins influent que l'avance. Cette observation s'explique par l'augmentation de la surface de contact entre l'outil et la pièce, qui améliore la dissipation de la chaleur dans la zone de coupe. Des conclusions similaires ont été rapportées dans une étude menée par Bouacha et al [50], qui ont observé une diminution de la rugosité de surface lors du tournage à haute dureté de l'acier AISI 52100 (60 HRC) à l'aide d'un outil en CBN.

**Tableau IV.5:** Matrice d'expérience unifactorielle : résultats de l'effet de la profondeur de passe sur les critères de rugosité pour les deux géométries wiper et conventionnelle

Numéro d'essai	Facteur variable	Paramètre de sortie							
		Plaquette conventionnelle				Plaquette wiper			
		R <sub>a</sub>	R <sub>y</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>q</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>y</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>q</sub>
1	0.1	0.63	3.2	3.08	0.74	0.23	1.51	1.46	0.29
2	0.2	0.65	3.24	3.21	0.76	0.24	1.53	1.55	0.3
3	0.3	0.65	3.25	3.39	0.77	0.25	1.79	1.7	0.31
4	0.4	0.68	3.78	3.46	0.82	0.26	1.68	1.67	0.32
5	0.5	0.71	3.92	3.66	0.85	0.25	1.82	1.68	0.31
6	0.6	0.58	3.83	3.59	0.72	0.2	1.85	1.6	0.27

#### IV. 2. 2. 3. Influence de l'avance par tour

La variation de la rugosité de surface en fonction de l'avance de l'outil de coupe pour deux céramiques de géométries wiper et conventionnelle à  $V_c = 160$  m/min,  $a_p = 0.20$  mm et  $r =$

0.8 mm, est illustrée dans la Figure IV. 6. Le Tableau IV.6 présente la matrice d'expérience unifactorielle ainsi que les résultats des critères de rugosité de surface ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ).

**Tableau IV.6:** Matrice d'expérience unifactorielle : résultats de l'effet de l'avance sur les critères de rugosité pour les deux géométries wiper et conventionnelle

Numéro d'essai	Facteur variable	Paramètres de sortie							
		Plaquette conventionnelle				Plaquette wiper			
	f	$R_a$	$R_y$	$R_z$	$R_q$	$R_a$	$R_y$	$R_z$	$R_q$
1	0.08	0.7	3.92	3.54	0.85	0.3	2.3	1.79	0.41
2	0.12	0.97	4.86	4.46	1.11	0.38	3.46	2.8	0.56
3	0.16	1.37	5.66	5.08	1.55	0.45	3.52	2.98	0.66
4	0.18	1.92	9.26	9.77	2.23	0.55	3.6	3.08	0.75
5	0.24	2.32	10.23	10.16	2.7	0.58	3.89	2.92	0.79
6	0.28	2.52	10.89	10.56	2.87	0.63	4.73	4.12	0.89

Il est clair que l'augmentation de l'avance a un effet considérable sur la rugosité de surface, car en augmentant ce paramètre de 0.08 à 0.2 mm/rev, le critère de rugosité  $R_a$  augmente de 290,62 %. Cela est dû aux sillons hélicoïdaux qui sont créés pendant l'usinage en raison de la forme de l'outil et du mouvement hélicoïdal entre l'outil et la pièce. Ces sillons sont plus larges et plus profonds lorsque l'avance est plus élevée, ce qui nécessite l'utilisation de faibles avances lors du tournage de finition. Des résultats similaires ont été rapportés par Aouici et ses collaborateurs [89] lors du tournage dur de l'acier AISI H11 (50 HRC) à l'aide d'un outil en CBN7020, où ils ont constaté que l'avance par tour avait un effet significatif sur les critères de rugosité. Ces observations confirment l'importance de l'avance dans la production de surfaces avec une rugosité de qualité et nécessitent une optimisation minutieuse des paramètres de coupe pour obtenir les meilleurs résultats.

En examinant les données expérimentales de rugosité obtenues pour les deux géométries d'outil de coupe utilisées en fonction de l'augmentation de l'avance par tour, on peut observer que l'utilisation de l'outil en forme wiper conduit à une réduction significative des valeurs de rugosité par rapport à la plaquette conventionnelle. Cette différence peut être attribuée à la forme de l'outil, qui comporte des sillons hélicoïdaux spécialement conçus pour réduire les stries laissées sur la surface usinée, ainsi qu'à une augmentation de la largeur de contact entre l'outil et la pièce.

Selon les résultats de cette étude, la qualité de surface obtenue avec la céramique en Wiper est supérieure à celle obtenue avec la plaquette conventionnelle, quelle que soit la condition de coupe testée (vitesse de coupe, avance par tour et profondeur de passe). Cette amélioration de la qualité de surface est due à la géométrie spéciale de l'outil Wiper qui permet une réduction des stries et une amélioration de la finition de surface. En effet, les plaquettes Wiper sont conçues pour "adoucir" les stries laissées sur les surfaces tournées en associant plusieurs rayons au lieu de suivre un seul rayon comme les plaquettes conventionnelles. Cette caractéristique permet d'améliorer le fini de surface et d'assurer un maintien constant du fini en usinant avec une avance plus élevée.

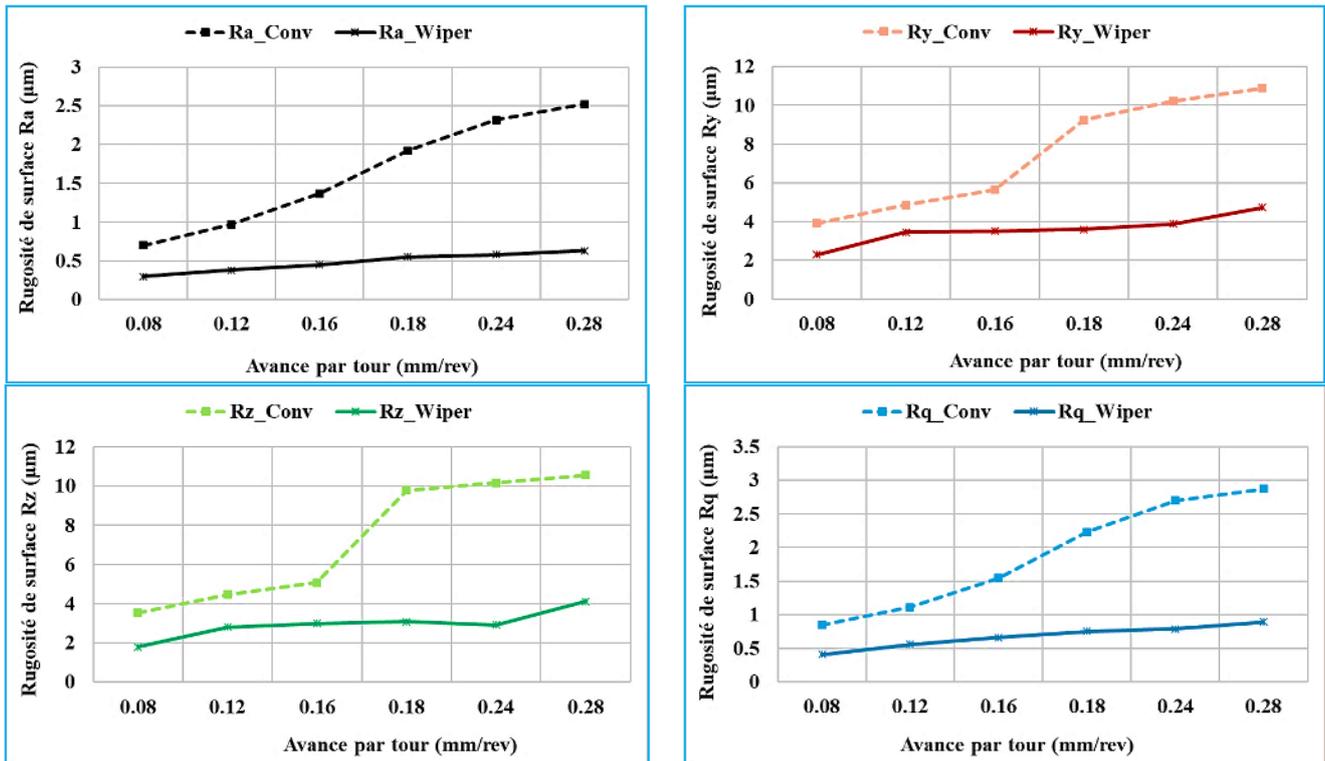


Figure IV. 6 : Evolution de la rugosité de surface en fonction de la vitesse d'avance pour deux céramiques de géométries wiper et conventionnelle à  $V_c = 160$  m/min,  $a_p = 0.2$  mm et  $r = 0.8$  mm

### IV. 3. Analyse et discussion des résultats multifactoriels

Le Tableau IV.7 présente les différentes conditions de coupe qui ont été testées, telles que la vitesse de coupe, le rayon de bec, l'avance par tour, la profondeur de passe et le type de géométrie de l'outil. Les résultats expérimentaux correspondant aux critères de rugosité de surface (Ra et Rz) ainsi qu'aux efforts de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) ont été obtenus en combinant ces différentes conditions de coupe (à l'aide d'une matrice de planification des expériences pour un plan de Taguchi L54, avec  $N=54$  essais). Ces expériences ont été réalisées lors du tournage dur de l'acier X38CrMoV5-1 (50 HRC) en utilisant des plaquettes de coupe en céramique, avec des géométries d'outil de forme wiper et conventionnelle.

Les résultats indiqués dans le Tableau IV.7 seront utilisés pour effectuer une analyse de la variance ANOVA afin de déterminer l'impact de chaque paramètre de coupe (géométrie de la plaquette,  $V_c$ ,  $r$ ,  $f$  et  $a_p$ ) sur la rugosité de surface et l'effort de coupe pour les deux plaquettes de coupe. Cette analyse permettra également de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés, de modéliser le processus et d'optimiser les conditions de coupe.

Les critères de rugosité de surface, Ra et Rz, ont été mesurés dans une plage allant de 0,18 à 2,06 µm et de 1 à 9,14 µm, respectivement. Les résultats montrent clairement que la géométrie de la plaquette de coupe est la caractéristique la plus déterminante de la qualité de l'état de surface, car une augmentation de cette caractéristique conduit à une détérioration

significative de la rugosité de surface (Ra et Rz). Il est à noter que les valeurs maximales des efforts de coupe (Fx, Fy et Fz) ont été obtenues lors du test N°27, avec les paramètres de coupe suivants : géométrie de la plaquette de coupe "Wiper", rayon de bec  $r=1,2$  mm, vitesse de coupe  $V_c=220$  m/min, avance par tour  $f=0,20$  mm/tr et profondeur de passe  $a_p=0,3$  mm. En augmentant le rayon de bec, l'avance par tour et la profondeur de passe, l'épaisseur du copeau augmente, ce qui entraîne une augmentation du volume de métal déformé et donc nécessite des efforts de coupe plus importants pour enlever le copeau. Les résultats obtenus seront soumis à une analyse de variance (ANOVA) pour déterminer les effets des différents paramètres de coupe sur les critères de rugosité de surface et les efforts de coupe, afin de modéliser le processus et d'optimiser les conditions de coupe.

**Tableau IV.7:** Valeurs expérimentales de Ra, Rz, Fx, Fy et Fz, pour les deux types de plaquettes de coupe

Test N°	Variables d'entrées					Variables de sorties				
	Géométrie plaquette	r (mm)	f (mm/rev)	ap (mm)	Vc (m/min)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Ra (µm)	Rz (µm)
1	Wiper	0.4	0.08	0.1	110	34.21	96.25	52.43	0.72	5.15
2	Wiper	0.4	0.08	0.2	160	61.37	111.13	77.03	0.36	2.27
3	Wiper	0.4	0.08	0.3	220	86.1	114.9	105.2	0.3	1.82
4	Wiper	0.4	0.14	0.1	160	32.76	112.21	63.83	0.55	2.84
5	Wiper	0.4	0.14	0.2	220	52.71	113.48	100.59	0.4	2.14
6	Wiper	0.4	0.14	0.3	110	114.39	156.4	161.55	0.91	6.11
7	Wiper	0.4	0.2	0.1	220	25.38	126.24	84.24	0.64	3.41
8	Wiper	0.4	0.2	0.2	110	62.04	170.33	142.77	0.7	3.94
9	Wiper	0.4	0.2	0.3	160	95.61	160.29	207.2	0.5	3.38
10	Wiper	0.8	0.08	0.1	110	18.06	89.6	42.87	0.44	2.61
11	Wiper	0.8	0.08	0.2	160	50.6	127.78	83.48	0.25	1.29
12	Wiper	0.8	0.08	0.3	220	88.86	153.77	105.81	0.18	1.07
13	Wiper	0.8	0.14	0.1	160	27.56	105.41	67.16	0.32	2.06
14	Wiper	0.8	0.14	0.2	220	51.7	149.55	122.53	0.28	1.64
15	Wiper	0.8	0.14	0.3	110	109.04	213.98	186.44	0.38	3.61
16	Wiper	0.8	0.2	0.1	220	31.83	125.04	86.47	0.37	1.84
17	Wiper	0.8	0.2	0.2	110	54.87	190.93	145.66	0.46	2.62
18	Wiper	0.8	0.2	0.3	160	101.69	220.71	219.16	0.42	2.26
19	Wiper	1.2	0.08	0.1	160	25.74	98.17	48.92	0.21	1.75
20	Wiper	1.2	0.08	0.2	220	39.32	137.44	97.25	0.16	1
21	Wiper	1.2	0.08	0.3	110	77.3	181.28	12.11	0.21	1.26
22	Wiper	1.2	0.14	0.1	220	21.53	112.69	83.43	0.24	1.45
23	Wiper	1.2	0.14	0.2	110	61.65	188.18	150.36	0.26	1.72
24	Wiper	1.2	0.14	0.3	160	78.56	222.87	170.55	0.18	1.24
25	Wiper	1.2	0.2	0.1	110	25.78	148.52	103.21	0.33	2.41
26	Wiper	1.2	0.2	0.2	160	67.85	205.13	164.02	0.31	2.17
27	Wiper	1.2	0.2	0.3	220	97.6	245.16	220.46	0.21	1.77
28	Conv	0.4	0.08	0.1	220	24.2	51.03	31.48	0.89	4.19
29	Conv	0.4	0.08	0.2	110	59.61	93.85	83.68	0.84	3.97
30	Conv	0.4	0.08	0.3	160	85.81	202.88	111.6	0.8	3.84
31	Conv	0.4	0.14	0.1	110	34.51	90.61	70.74	1.22	6.21
32	Conv	0.4	0.14	0.2	160	58.33	116.3	120.62	1.33	6.57
33	Conv	0.4	0.14	0.3	220	93.71	124.76	153.38	1.3	6.36
34	Conv	0.4	0.2	0.1	160	25.79	96.45	90.79	2.05	9.02
35	Conv	0.4	0.2	0.2	220	62.38	128.49	140.44	1.98	8.84

36	Conv	0.4	0.2	0.3	110	122.54	179.59	220.72	2.06	9.14
37	Conv	0.8	0.08	0.1	160	27	81.82	47.47	0.77	3.48
38	Conv	0.8	0.08	0.2	220	54.51	126.35	70.48	0.69	3.2
39	Conv	0.8	0.08	0.3	110	88.72	161	115.75	0.71	3.51
40	Conv	0.8	0.14	0.1	220	21.79	86.64	62.69	1.23	5.84
41	Conv	0.8	0.14	0.2	110	65.53	148.89	138.13	1.27	5.88
42	Conv	0.8	0.14	0.3	160	111.48	196.26	179.83	1.11	5.92
43	Conv	0.8	0.2	0.1	110	30.9	132.63	89.3	1.9	8.06
44	Conv	0.8	0.2	0.2	160	58.99	162.11	146.62	1.95	8.05
45	Conv	0.8	0.2	0.3	220	91.22	205.5	218.68	1.97	8.59
46	Conv	1.2	0.08	0.1	220	16.53	68.11	43.43	0.34	1.86
47	Conv	1.2	0.08	0.2	110	46.6	133.14	86.86	0.37	2.2
48	Conv	1.2	0.08	0.3	160	90.94	192.81	128.75	0.48	2.58
49	Conv	1.2	0.14	0.1	110	28.72	114.47	73.08	0.77	3.61
50	Conv	1.2	0.14	0.2	160	73.62	196.33	141.03	0.78	3.65
51	Conv	1.2	0.14	0.3	220	84.44	216.99	162.81	0.77	4.21
52	Conv	1.2	0.2	0.1	160	28.45	133.29	101.46	1.37	5.5
53	Conv	1.2	0.2	0.2	220	68.78	188.78	165.2	1.37	6.04
54	Conv	1.2	0.2	0.3	110	113.1	274.18	253.8	1.51	6.93

### IV. 3. 1. Analyse et modélisation de la rugosité de surface (Ra et Rz)

#### IV. 3. 1. 1. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface

Le Tableau IV. 8 présente les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour les mesures de la rugosité de surface Ra et Rz, effectuée à un niveau de signification de  $\alpha = 0,05$  (correspondant à un niveau de confiance de 95%). Les valeurs des degrés de liberté (ddl), la somme des carrés des écarts (SCE), les carrés moyens (CM), la probabilité (Prob.) et la contribution en pourcentage (Cont. %) de chaque facteur et de chaque interaction sont mentionnées dans ce tableau. Cette analyse approfondie des valeurs de la rugosité Ra et Rz permet de hiérarchiser l'influence des différents éléments du régime de coupe (Gp, Vc, f, ap et r) ainsi que leurs interactions.

Les résultats de l'analyse montrent que la géométrie de surface est le facteur le plus important qui affecte la rugosité Ra, avec une contribution de 53,31%. La vitesse d'avance est le deuxième facteur qui influe sur Ra, avec une contribution de 21,79%. En revanche, l'effet de la profondeur de passe n'est pas significatif car la valeur de probabilité est supérieure à 5%. Les interactions "Gp  $\times$  r" et "Gp  $\times$  f" ont un effet significatif sur Ra, tandis que les autres interactions n'ont pas d'effet significatif sur la rugosité Ra.

**Tableau IV. 8:** Analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité Ra

Source	SCM	ddl	CM	F-value	Prob.	Cont. %	Remarque
<b>Modèle</b>	16.54	15	1.1	99.94	< 0.0001		Significatif
<b>A-Gp</b>	8.79	1	8.79	796.67	< 0.0001	53.31	Significatif
<b>B-r, mm</b>	1.54	1	1.54	139.86	< 0.0001	9.36	Significatif
<b>C-f, mm/tr</b>	3.59	1	3.59	325.59	< 0.0001	21.79	Significatif
<b>D-ap, mm</b>	0.0099	1	0.0099	0.8942	0.3503	0.06	Non significatif
<b>E-Vc, m/min</b>	0.0631	1	0.0631	5.72	0.0219	0.38	Significatif

<b>AB</b>	0.1056	1	0.1056	9.57	0.0037	0.64	Significatif
<b>AC</b>	2.28	1	2.28	207.09	< 0.0001	13.86	Significatif
<b>AD</b>	0.0215	1	0.0215	1.94	0.1713	0.13	Non significatif
<b>AE</b>	0.0357	1	0.0357	3.24	0.0799	0.22	Non significatif
<b>BC</b>	0.0115	1	0.0115	1.05	0.3129	0.07	Non significatif
<b>BD</b>	0.0099	1	0.0099	0.8949	0.3501	0.06	Non significatif
<b>BE</b>	0.0023	1	0.0023	0.2062	0.6523	0.01	Non significatif
<b>CD</b>	0.0068	1	0.0068	0.6146	0.4379	0.04	Non significatif
<b>CE</b>	0	1	0	0.0022	0.9628	0.00	Non significatif
<b>DE</b>	0.0126	1	0.0126	1.14	0.2925	0.08	Non significatif
<b>Résiduel</b>	0.4193	38	0.011				
<b>Total</b>	16.96	53					

A partir du Tableau IV. 9, les résultats d'analyse de la variance montrent également que la géométrie de la plaquette de coupe est le paramètre le plus influant sur la rugosité de surface Rz avec une contribution de 50.33 %, suivie par l'avance et le rayon de bec de l'outil avec une contribution de 23.98 % et 11.45%, respectivement.

**Tableau IV. 9:** Analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité Rz

Source	SCM	dll	CM	F-value	Prob.	Cont. %	Remarque
<b>Modèle</b>	277.54	15	18.5	100.01	< 0.0001		Significatif
<b>A-Gp</b>	139.27	1	139.27	752.75	< 0.0001	50.33	Significatif
<b>B-r, mm</b>	31.68	1	31.68	171.24	< 0.0001	11.45	Significatif
<b>C-f, mm/tr</b>	66.36	1	66.36	358.66	< 0.0001	23.98	Significatif
<b>D-ap, mm</b>	0.1366	1	0.1366	0.7384	0.3956	0.05	Non significatif
<b>E-Vc, m/min</b>	2.52	1	2.52	13.61	0.0007	0.91	Significatif
<b>AB</b>	2.39	1	2.39	12.9	0.0009	0.86	Significatif
<b>AC</b>	30.96	1	30.96	167.35	< 0.0001	11.19	Significatif
<b>AD</b>	0.4975	1	0.4975	2.69	0.1093	0.18	Non significatif
<b>AE</b>	1.69	1	1.69	9.15	0.0044	0.61	Significatif
<b>BC</b>	0.5687	1	0.5687	3.07	0.0876	0.21	Non significatif
<b>BD</b>	0.1016	1	0.1016	0.549	0.4633	0.04	Non significatif
<b>BE</b>	0.0538	1	0.0538	0.2907	0.5929	0.02	Non significatif
<b>CD</b>	0.3421	1	0.3421	1.85	0.1819	0.12	Non significatif
<b>CE</b>	0.0007	1	0.0007	0.004	0.9501	0.00	Non significatif
<b>DE</b>	0.1473	1	0.1473	0.7962	0.3778	0.05	Non significatif
<b>Résiduel</b>	7.03	38	0.185				
<b>Total</b>	284.57	53					

Afin de visualiser les résultats de l'analyse des variances, nous avons construit un diagramme circulaire (Figure IV. 7) qui nous permet d'évaluer les effets principaux et les interactions des paramètres sur les facteurs de la rugosité Ra et Rz pour les deux plaquettes de coupe testées. Ce diagramme classe par ordre décroissant l'importance de chaque paramètre et de ses interactions. Nous pouvons ainsi remarquer clairement que la géométrie des plaquettes de coupe est le facteur le plus influent sur les deux critères de rugosité de surface (Ra et Rz), par rapport aux autres facteurs étudiés.

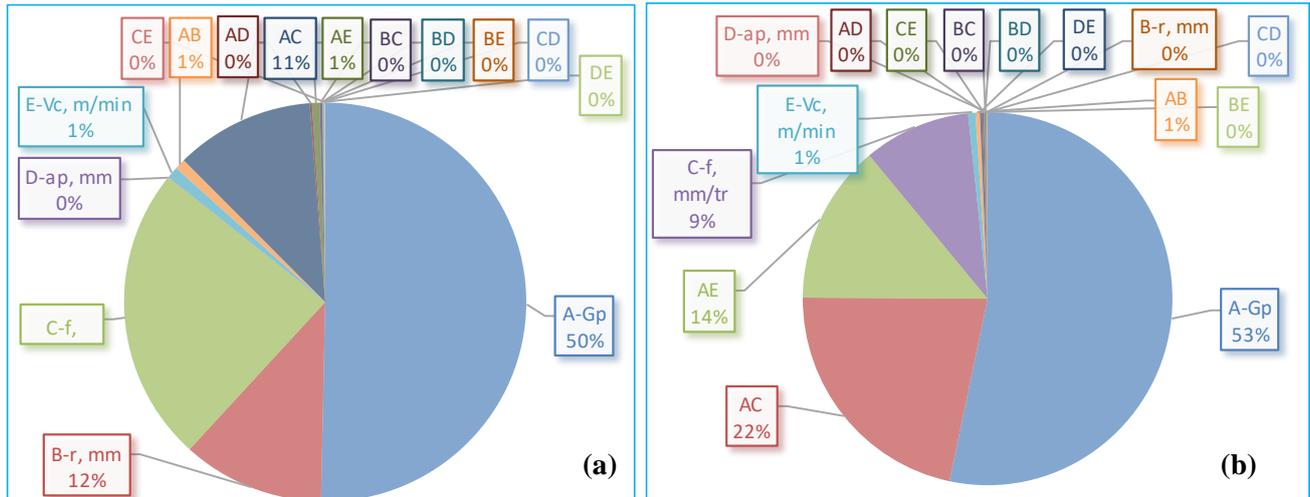


Figure IV. 7 : Diagramme circulaire des effets des paramètres de coupe sur la rugosité (a) Ra et (b) Rz

### IV. 3. 1. 2. Analyse de régression de la rugosité de surface Ra et Rz

Pour mieux comprendre la relation entre les sorties étudiées (la rugosité Ra et Rz) et les paramètres de coupe, un modèle numérique basé sur la méthodologie de surface de réponse (RMS) est utilisé pour caractériser cette relation. Les modèles de régression obtenus à partir de cette méthodologie sont très utiles pour prédire les facteurs de réponse incontrôlables lors des opérations d'usinage. Ainsi, une analyse de régression est réalisée pour étudier la relation entre les deux critères de rugosité (Ra et Rz) et les paramètres de coupe, notamment le régime de coupe et le rayon de bec. Les équations (IV-1 à IV-4) sont obtenues avec des coefficients de détermination  $R^2$  respectifs de 97,53 % et 97,52 % lors de l'usinage dur de l'acier AISI H11 en utilisant deux plaquettes de coupe de géométrie wiper et conventionnelle. Ces équations permettent de prédire les valeurs de la rugosité Ra et Rz en fonction des paramètres de coupe pour des valeurs données de ces paramètres.

$$\begin{aligned}
 Ra_{Gp\_Wiper} = & +0.832763 - 0.430587 \times r + 1.06318 \times f - 0.524808 \times ap & \text{IV-1} \\
 & - 0.000877 \times Vc - 0.945293 \times r \times f + 0.524583 \times r \times ap \\
 & + 0.000457 \times r \times Vc + 2.97270 \times f \times ap + 0.000323 \times f \times Vc \\
 & - 0.004409 \times ap \times Vc
 \end{aligned}$$

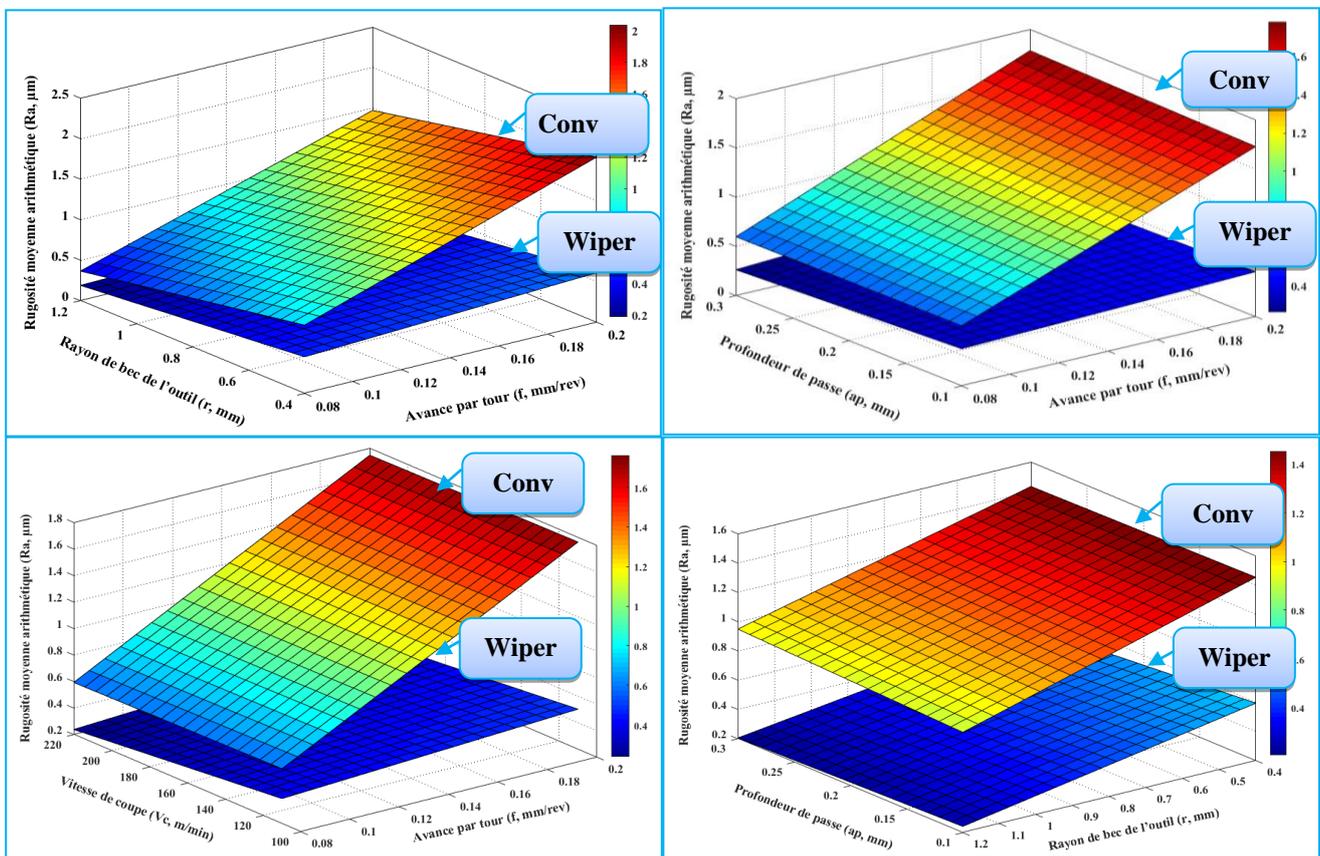
$$\begin{aligned}
 Ra_{Gp\_Conv} = & +0.354676 - 0.701420 \times r + 9.69165 \times f - 0.023132 \times ap & \text{IV-2} \\
 & + 0.000299 \times Vc - 0.945293 \times r \times f + 0.524583 \times r \times ap \\
 & + 0.000457 \times r \times Vc + 2.97270 \times f \times ap + 0.000323 \times f \times Vc \\
 & - 0.004409 \times ap \times Vc
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Rz_{Gp\_Wiper} = & +4.10344 - 1.47756 \times r + 8.14260 \times f - 2.40276 \times ap & \text{IV-3} \\
 & - 0.007358 \times Vc - 6.63525 \times r \times f + 1.68247 \times r \times ap \\
 & + 0.002223 \times r \times Vc + 21.11347 \times f \times ap - 0.001776 \times f \times Vc \\
 & - 0.015094 \times ap \times Vc
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Rz_{Gp\_Conv} = & +2.08289 - 2.76506 \times r + 39.90498 \times f + 0.012998 \times ap & \text{IV-4} \\
 & + 0.000732 \times Vc - 6.63525 \times r \times f + 1.68247 \times r \times ap \\
 & + 0.002223 \times r \times Vc + 21.11347 \times f \times ap - 0.001776 \times f \times Vc \\
 & - 0.015094 \times ap \times Vc
 \end{aligned}$$

Pour étudier l'impact de chaque paramètre de coupe sur la rugosité de surface, des graphiques de surface de réponse tridimensionnelle (3D) ont été générés à partir de modèles quadratiques. Ces graphiques fournissent une évaluation supplémentaire de la relation entre les paramètres du processus et la qualité de la surface usinée. Les tracés de surface 3D sont obtenus en maintenant deux des facteurs à un niveau intermédiaire, tandis que les deux autres sont variés, permettant ainsi de visualiser l'effet d'interaction à deux facteurs sur la réponse.

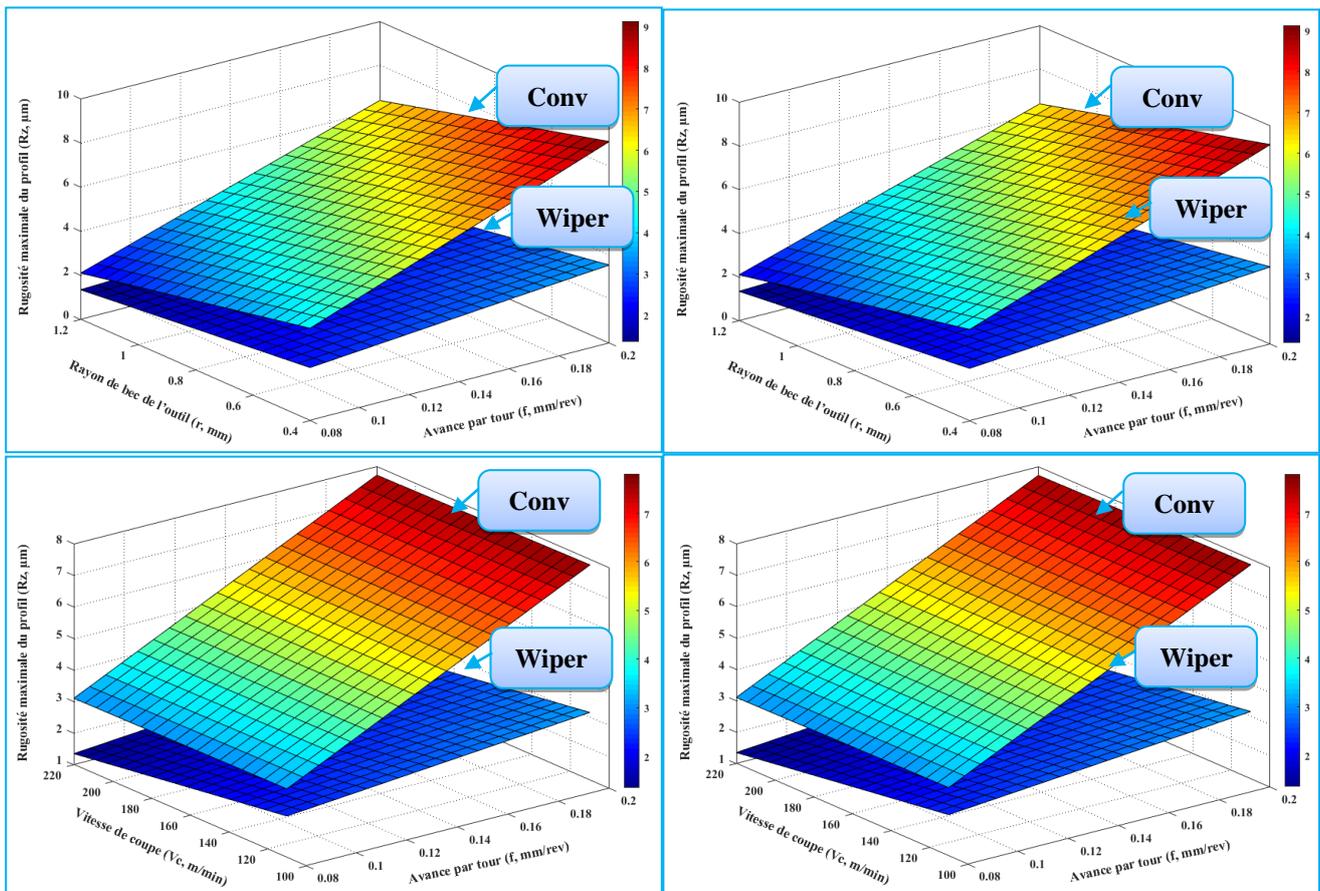
Les Figure IV. 8 et Figure IV. 9 présentent les surfaces de réponse « 3D » des critères de rugosité de surface ( $R_a$  et  $R_z$ ) en fonction des paramètres suivants : l'avance par tour et le rayon de bec ( $f \times r$ ), la vitesse de coupe et l'avance par tour ( $V_c \times f$ ), la profondeur de passe et l'avance par tour ( $ap \times f$ ), ainsi que la profondeur de passe et le rayon de bec ( $ap \times r$ ). Ces résultats ont été obtenus lors du tournage dur de l'acier X38CrMoV5-1, en utilisant deux plaquettes de coupe différentes : une plaquette de géométrie wiper et une plaquette conventionnelle, toutes deux revêtues de céramique.



**Figure IV. 8 :** Evolution de la rugosité  $R_a$  en fonction de  $V_c$ ,  $r$ ,  $f$  et  $ap$  pour les deux plaquettes de coupe testées de géométrie wiper et standard

Selon les observations fournies par les deux figures, il est possible de constater que, à rayon de coupe constant, les critères de rugosité de surface, à savoir «  $R_a$  et  $R_t$  », augmentent pour les deux types de plaquettes, à savoir la plaquette de géométrie wiper et la plaquette standard, à mesure que l'avance augmente. Cette augmentation est due à la formation de sillons hélicoïdaux résultant de la forme de l'outil et du mouvement hélicoïdal outil-pièce. Les sillons deviennent plus profonds et plus larges à mesure que l'avance augmente. En revanche,

lorsque le rayon de coupe augmente à une avance constante, les critères de rugosité de surface ont tendance à diminuer. Pour les deux types de plaquettes testées, la meilleure rugosité de surface a été obtenue avec l'avance la plus faible et le rayon de coupe le plus élevé. Des résultats similaires ont été rapportés par JP.Davim et d'autres [135] lors du tournage dur de l'acier AISI D2 (60 HRC) en utilisant des plaquettes en céramique wiper et conventionnelles. En outre, il est important de noter que, à avance, vitesse de coupe et rayon de coupe constants, l'augmentation de la profondeur de passe n'a pratiquement aucun effet sur la qualité de surface pour les deux outils testés. De plus, les critères de rugosité ( $R_a$  et  $R_z$ ) ne sont pas statistiquement influencés par la variation de la vitesse de coupe, et les pentes des différentes courbes sont également faibles.



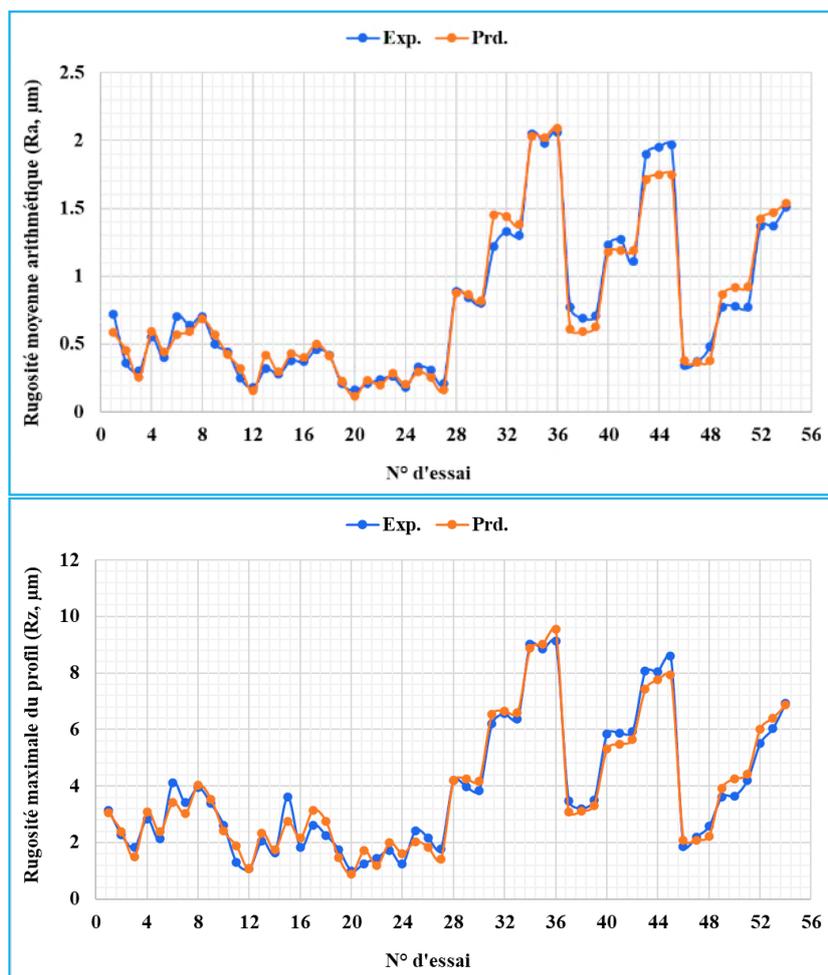
**Figure IV.9 :** Evolution de la rugosité  $R_z$  en fonction de  $V_c$ ,  $r$ ,  $f$  et  $a_p$  pour les deux plaquettes de coupe testées de géométrie wiper et standard

Une comparaison des valeurs de rugosité obtenues à l'aide des deux types de plaquettes révèle de manière significative que la plaquette en céramique avec une géométrie de type wiper présente une performance supérieure à celle de la plaquette de coupe de géométrie conventionnelle. Ces constatations concordent avec les résultats précédemment publiés par Grzesik et Wanat [136], qui ont également observé des résultats similaires lors d'une étude portant sur le tournage dur de l'acier AISI 5140 (60 HRC) en utilisant deux plaquettes en céramique (Wiper et conventionnelle). Cette corrélation positive entre la géométrie de la plaquette et la qualité de la surface usinée met en évidence l'importance de la sélection

appropriée des plaquettes pour optimiser les performances d'usinage et obtenir des finitions de surface améliorées.

### IV. 3. 1. 3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La Figure IV. 10 présente une comparaison graphique entre les valeurs expérimentales mesurées des critères de rugosité (Ra et Rz) pour les deux types de plaquettes de coupe testées (géométries wiper et conventionnelle) et les valeurs estimées par les modèles mathématiques quadratiques obtenus à l'aide de la méthodologie de surface de réponse (MSR). L'analyse des résultats révèle une corrélation étroite entre les valeurs expérimentales et les valeurs estimées dans la majorité des cas, mettant ainsi en évidence la fiabilité des modèles mathématiques pour prédire la rugosité de surface. Cette observation renforce la validité de l'approche de la MSR dans l'étude de l'usinage, fournissant des outils précieux pour l'optimisation des paramètres de coupe afin d'obtenir des résultats de rugosité ciblés.



**Figure IV. 10 :** Courbes des valeurs de comparaison entre les critères de la rugosité (Ra et Rz) pour les deux plaquettes testées

### IV. 3. 2. Analyse de l'effet des paramètres de coupe sur les efforts de coupe

#### IV. 3. 2. 1. Analyse de la variance (ANOVA) pour les efforts de coupe

Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour les trois composantes des efforts de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) générées par les deux types de plaquettes de coupe en céramique, à savoir la plaquette de géométrie wiper et la plaquette de géométrie conventionnelle, sont présentés en détail dans les Tableau IV. 10, Tableau IV. 11 et Tableau IV. 12.. L'analyse a été réalisée en utilisant un niveau de signification  $\alpha = 0,05$ , ce qui correspond à un niveau de confiance de 95%. Ces tableaux fournissent les informations suivantes pour chaque facteur et chaque interaction : les degrés de liberté (ddl), la somme des carrés des écarts (SCE), les carrés moyens (CM), la probabilité (Prob.) et la contribution en pourcentage (Cont. %). Ces résultats permettent d'identifier les facteurs et les interactions significatifs qui influencent les efforts de coupe, fournissant ainsi des indications précieuses pour comprendre les mécanismes d'usinage associés aux différentes géométries de plaquette de coupe en céramique.

Une analyse approfondie des valeurs de l'effort axial  $F_x$ , présentées dans le Tableau IV.7, ainsi que des coefficients du Tableau IV. 10, permet de classer les quatre facteurs étudiés (type de géométrie de l'outil, vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) et leurs interactions par ordre d'influence sur l'effort axial. La profondeur de passe se positionne en première position avec une contribution de 93,87 %. Cette prédominance s'explique par le fait qu'une augmentation de la profondeur de passe conduit à une section de copeau plus importante, nécessitant ainsi des efforts de coupe plus importants pour éliminer le copeau et déformer le matériau. Des résultats similaires ont été rapportés par Aouici et al. [89] dans une étude sur le tournage dur de l'acier AISI H11 traité à 50 HRC à l'aide d'un outil en CBN7020.

L'avance par tour se place en deuxième position avec une contribution de 2,15 %. Quant à la vitesse de coupe et aux interactions telles que «  $r \times f$  », «  $f \times ap$  » et «  $ap \times Vc$  », elles ont une influence très faible sur  $F_x$ . Par ailleurs, nous avons remarqué que le rayon de bec, la géométrie de la plaquette de coupe et les autres interactions n'ont pas d'effet significatif sur l'effort de coupe axial, comme le montre une valeur de probabilité supérieure à 0,05. Ces constatations mettent en évidence les facteurs prédominants et permettent de comprendre les mécanismes sous-jacents à la génération de l'effort axial lors du processus d'usinage, ce qui contribue à l'optimisation des paramètres de coupe pour réduire l'effort de coupe et améliorer la qualité de l'usinage.

**Tableau IV. 10:** Analyse de la variance (ANOVA) de l'effort axial  $F_x$

Source	SCM	ddl	CM	F-value	Prob.	Cont. %	Remarque
<b>Modèle</b>	46175.08	15	3078.34	60.36	< 0.0001		Significatif
<b>A-Gp</b>	97.66	1	97.66	1.92	0.1745	0.21	Non significatif
<b>B-r, mm</b>	192.68	1	192.68	3.78	0.0594	0.42	Non significatif
<b>C-f, mm/tr</b>	986.04	1	986.04	19.34	< 0.0001	2.15	Significatif
<b>D-ap, mm</b>	43110.37	1	43110.37	845.36	< 0.0001	93.87	Significatif
<b>E-Vc, m/min</b>	514.76	1	514.76	10.09	0.003	1.12	Significatif
<b>AB</b>	79.63	1	79.63	1.56	0.2191	0.17	Non significatif

AC	62.89	1	62.89	1.23	0.2737	0.14	Non significatif
AD	47.23	1	47.23	0.9262	0.3419	0.10	Non significatif
AE	25.59	1	25.59	0.5019	0.483	0.06	Non significatif
BC	265.81	1	265.81	5.21	0.0281	0.58	Significatif
BD	18.68	1	18.68	0.3663	0.5486	0.04	Non significatif
BE	48.01	1	48.01	0.9414	0.3381	0.10	Non significatif
CD	228.27	1	228.27	4.48	0.041	0.50	Significatif
CE	10.55	1	10.55	0.2069	0.6518	0.02	Non significatif
DE	236.02	1	236.02	4.63	0.0379	0.51	Significatif
Résiduel	1937.86	38	51				
Total	48112.94	53					

À partir du Tableau IV. 11, l'analyse de variance des résultats concernant l'effort radial ( $F_y$ ) révèle que les cinq facteurs étudiés, à savoir la géométrie de la plaquette, le rayon de bec, l'avance, la profondeur de passe et la vitesse de coupe, ainsi que certaines interactions, ont un impact significatif sur l'effort radial. Les interactions significatives incluent «  $Gp \times r$  », «  $Gp \times ap$  », «  $r \times f$  », «  $r \times ap$  » et «  $f \times Vc$  ». La profondeur de passe se positionne en première position avec une contribution de 48,45 %. Cela indique que l'augmentation de la profondeur de passe a un effet notable sur l'effort radial, probablement en raison de la modification de la déformation du matériau et de la forme du copeau. L'avance se classe en deuxième position avec une contribution de 21,48 %, soulignant ainsi son influence sur l'effort radial. Le rayon de bec arrive en troisième position avec une contribution de 19,17 %, suggérant son rôle dans la génération de l'effort radial. En revanche, les interactions «  $Gp \times f$  », «  $Gp \times Vc$  », «  $r \times Vc$  », «  $f \times ap$  » et «  $ap \times Vc$  » ne présentent aucun effet significatif sur l'effort radial ( $R_y$ ). Ces résultats mettent en évidence les facteurs prédominants qui influencent l'effort radial lors de l'usinage, permettant ainsi de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents à la génération de cet effort. Cette compréhension approfondie est cruciale pour l'optimisation des paramètres d'usinage afin de minimiser l'effort radial et améliorer la qualité globale du processus d'usinage.

**Tableau IV. 11:** Analyse de la variance (ANOVA) de l'effort radial  $F_y$

Source	SCM	dll	CM	F-value	Prob.	Cont. %	Remarque
Modèle	1.21E+05	15	8049.24	98.19	< 0.0001		Significatif
A-Gp	1390.46	1	1390.46	16.96	0.0002	1.15	Significatif
B-r, mm	23156.32	1	23156.32	282.48	< 0.0001	19.17	Significatif
C-f, mm/tr	25953.98	1	25953.98	316.61	< 0.0001	21.48	Significatif
D-ap, mm	58539.11	1	58539.11	714.11	< 0.0001	48.45	Significatif
E-Vc, m/min	2334.16	1	2334.16	28.47	< 0.0001	1.93	Significatif
AB	675.39	1	675.39	8.24	0.0067	0.56	Significatif
AC	6.75	1	6.75	0.0824	0.7757	0.01	Non significatif
AD	777.36	1	777.36	9.48	0.0038	0.64	Significatif
AE	0.0155	1	0.0155	0.0002	0.9891	0.00	Non significatif
BC	390.21	1	390.21	4.76	0.0354	0.32	Significatif
BD	6797.98	1	6797.98	82.93	< 0.0001	5.63	Significatif
BE	34.58	1	34.58	0.4219	0.5199	0.03	Non significatif
CD	329.1	1	329.1	4.01	0.0523	0.27	Non significatif
CE	396.53	1	396.53	4.84	0.034	0.33	Significatif
DE	32.08	1	32.08	0.3914	0.5353	0.03	Non significatif

<b>Résiduel</b>	3115.06	38	81.98				
<b>Total</b>	1.24E+05	53					

Le Tableau IV. 12 présente les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour l'effort tangentiel ( $F_y$ ). On observe que tous les facteurs étudiés, à savoir la profondeur de passe ( $a_p$ ), l'avance ( $f$ ), le rayon de bec ( $r$ ) et la vitesse de coupe ( $V_c$ ), à l'exception de la géométrie de la plaquette de coupe, ont un effet significatif sur l'effort tangentiel avec des contributions respectives de (62,22 %, 30,70 %, 2,22 % et 1,01 %). Les interactions «  $G_p \times f$  », «  $f \times a_p$  » et «  $a_p \times V_c$  » ont un faible effet sur l'effort tangentiel ( $F_y$ ), comme le démontrent leurs contributions respectives de (0,44 %, 2,51 % et 0,49 %). En revanche, les autres interactions n'ont pas d'effet significatif sur l'effort tangentiel.

**Tableau IV. 12:** Analyse de la variance (ANOVA) de l'effort tangentiel  $F_z$

Source	SCM	dll	CM	F-value	Prob.	Cont. %	Remarque
<b>Modèle</b>	1.53E+05	15	10171.13	136.18	< 0.0001		Significatif
<b>A-Gp</b>	5.81	1	5.81	0.0778	0.7818	0.00	Non significatif
<b>B-r, mm</b>	3363.57	1	3363.57	45.04	< 0.0001	2.22	Significatif
<b>C-f, mm/tr</b>	46606.72	1	46606.72	624.02	< 0.0001	30.70	Significatif
<b>D-<math>a_p</math>, mm</b>	94454.23	1	94454.23	1264.66	< 0.0001	62.22	Significatif
<b>E-<math>V_c</math>, m/min</b>	1540.19	1	1540.19	20.62	< 0.0001	1.01	Significatif
<b>AB</b>	194.09	1	194.09	2.6	0.1152	0.13	Non significatif
<b>AC</b>	667.49	1	667.49	8.94	0.0049	0.44	Significatif
<b>AD</b>	1.3	1	1.3	0.0174	0.8957	0.00	Non significatif
<b>AE</b>	6.69	1	6.69	0.0896	0.7663	0.00	Non significatif
<b>BC</b>	63.96	1	63.96	0.8564	0.3606	0.04	Non significatif
<b>BD</b>	248.95	1	248.95	3.33	0.0758	0.16	Non significatif
<b>BE</b>	31.76	1	31.76	0.4252	0.5183	0.02	Non significatif
<b>CD</b>	3810.27	1	3810.27	51.02	< 0.0001	2.51	Significatif
<b>CE</b>	58.63	1	58.63	0.785	0.3812	0.04	Non significatif
<b>DE</b>	749.64	1	749.64	10.04	0.003	0.49	Significatif
<b>Résiduel</b>	2838.13	38	74.69				
<b>Total</b>	1.55E+05	53					

La Figure IV. 11 illustre un diagramme circulaire qui permet une meilleure visualisation des résultats de l'analyse des variances et facilite la comparaison des contributions de chaque facteur. Selon cette figure, on constate que la profondeur de passe est le facteur prédominant pour les trois composantes des efforts de coupe (axial, radial et tangentiel). Cette domination s'explique par l'augmentation de la section du copeau qui se produit avec l'augmentation de la profondeur de passe. Cela entraîne une augmentation du volume de métal à déformer, ce qui nécessite des efforts de coupe importants pour enlever le copeau. Cependant, il est déconseillé de travailler avec une profondeur de passe trop faible, car cela entraîne une pression extrêmement élevée qui pourrait endommager l'arête de coupe. Par conséquent, il est crucial de trouver un équilibre entre une profondeur de passe suffisamment grande pour permettre un enlèvement efficace du copeau, tout en évitant des contraintes excessives sur l'outil.

D'autre part, à mesure que la profondeur de passe augmente, les conditions de coupe deviennent plus sévères en raison de l'augmentation de la section du copeau. Il est donc

important de prendre en compte ces facteurs lors de la détermination des paramètres de coupe afin d'optimiser l'efficacité et la qualité de l'usinage. La Figure IV. 11 offre une vue d'ensemble des contributions relatives des différents facteurs et souligne l'importance de la profondeur de passe dans les efforts de coupe. Ces informations sont essentielles pour orienter les décisions de conception d'outils et les stratégies d'usinage, en vue d'améliorer les performances et la fiabilité du processus d'usinage.

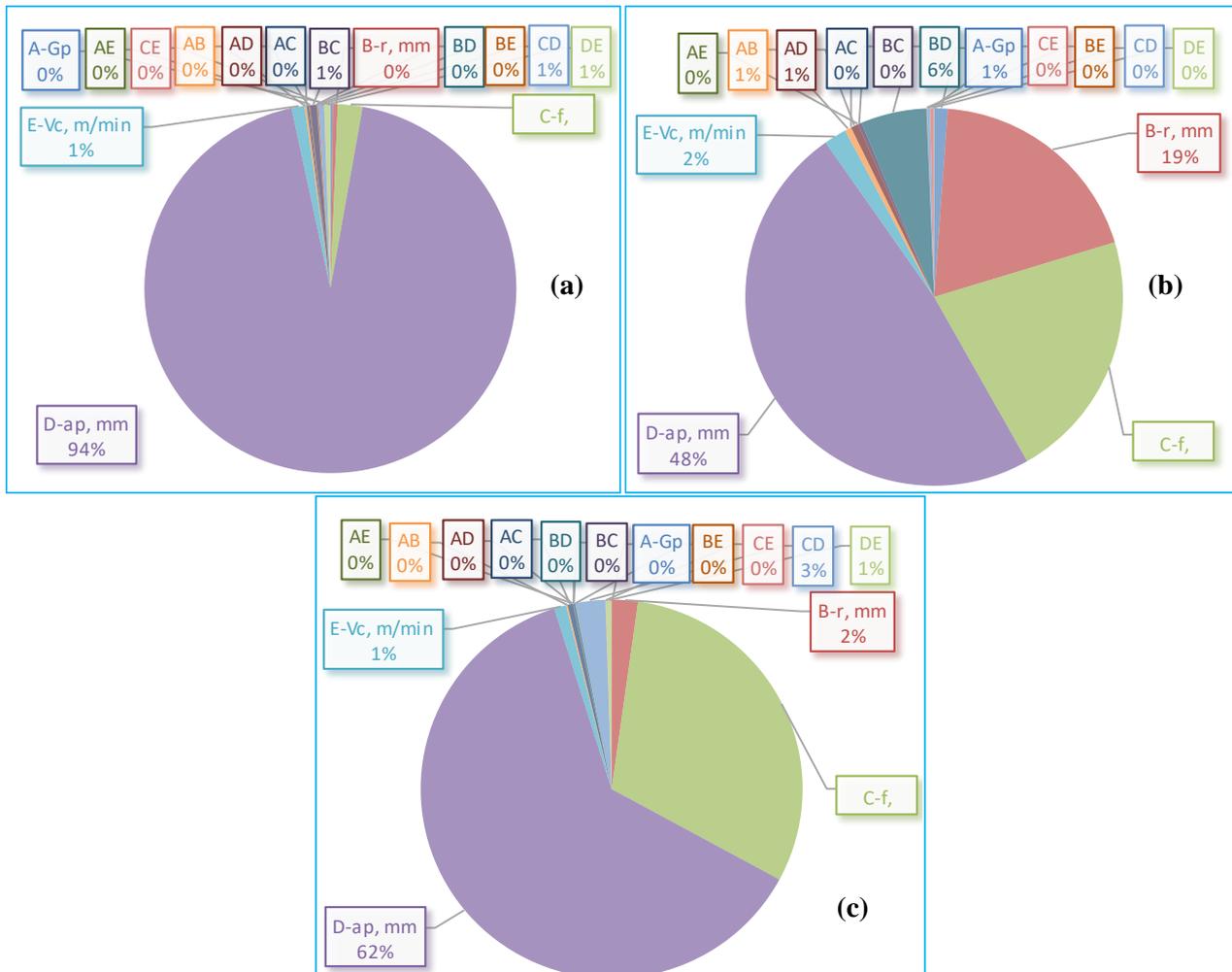


Figure IV. 11 : Diagramme circulaire des effets des paramètres de coupe sur la rugosité (a) Fx, (b) Fy et (c) Fz

#### IV. 3. 2. 2. Analyse de régression pour des efforts de coupe

La corrélation entre les variables de sortie étudiées et les paramètres de coupe est établie à l'aide d'un modèle numérique basé sur la méthodologie de surface de réponse (RMS). Ces modèles de régression permettent de prédire les facteurs de réponse inconnus dans les opérations d'usinage.

L'analyse de régression des efforts de coupe (Fx, Fy et Fz) en fonction des paramètres de coupe tels que le régime de coupe, le rayon de bec et la géométrie de la plaquette de coupe a conduit aux équations (IV-5 à IV-10). Les coefficients de détermination  $R^2$  correspondants sont de (95,97%, 97,48% et 98,17 %) respectivement. Ces valeurs indiquent la proportion de

la variance des efforts de coupe expliquée par les variables indépendantes dans chaque modèle. Ces résultats sont issus d'une étude portant sur l'usinage dur de l'acier AISI H11 en utilisant deux plaquettes de coupe, l'une de géométrie wiper et l'autre conventionnelle. Les équations obtenues fournissent des relations quantitatives entre les paramètres de coupe et les efforts de coupe, ce qui permet de prédire et de contrôler plus efficacement les performances d'usinage.

Il convient de noter que les coefficients de détermination élevés indiquent une bonne adéquation des modèles de régression aux données expérimentales, renforçant ainsi la validité et la fiabilité des résultats obtenus. Ces informations sont essentielles pour la compréhension des mécanismes d'usinage, l'optimisation des paramètres de coupe et l'amélioration globale de la qualité et de l'efficacité des opérations d'usinage.

$$F_x = (G_p, r, f, a_p, V_c)$$

$$F_x_{Gp\_Wiper} = +10.92725 - 35.9836 \times r - 124.05336 \times f + 376.13349 \times a_p \quad \text{IV-5}$$

$$+ 0.044574 \times V_c + 143.44959 \times r \times f - 22.81771 \times r \times a_p$$

$$+ 0.066413 \times r \times V_c + 545.39027 \times f \times a_p - 0.212879 \times f \times V_c$$

$$- 0.60415 \times a_p \times V_c$$

$$F_x_{Gp\_Conv} = +1.81579 - 28.54749 \times r - 78.78538 \times f + 399.67137 \times a_p \quad \text{IV-6}$$

$$+ 0.013114 \times V_c + 143.44959 \times r \times f - 22.81771 \times r \times a_p$$

$$+ 0.066413 \times r \times V_c + 545.39027 \times f \times a_p - 0.212879 \times f \times V_c$$

$$- 0.60415 \times a_p \times V_c$$

$$F_x = (G_p, r, f, a_p, V_c)$$

$$F_y_{Gp\_Wiper} = +77.29524 - 68.06244 \times r + 385.7725 \times f - 47.32197 \times a_p \quad \text{IV-7}$$

$$+ 0.036359 \times V_c + 173.80303 \times r \times f + 435.26237 \times r \times a_p$$

$$+ 0.056368 \times r \times V_c + 654.85244 \times f \times a_p - 1.30515 \times f \times V_c$$

$$- 0.222744 \times a_p \times V_c$$

$$F_y_{Gp\_Conv} = +28.76684 - 46.4055 \times r + 400.6047 \times f + 48.16755 \times a_p \quad \text{IV-8}$$

$$+ 0.035586 \times V_c + 173.80303 \times r \times f + 435.26237 \times r \times a_p$$

$$+ 0.056368 \times r \times V_c + 654.85244 \times f \times a_p - 1.30515 \times f \times V_c$$

$$- 0.222744 \times a_p \times V_c$$

$$F_x = (G_p, r, f, a_p, V_c)$$

$$F_z_{Gp\_Wiper} = -8.25082 + 12.39022 \times r - 58.33572 \times f + 309.7359 \times a_p \quad \text{IV-9}$$

$$+ 0.07758 \times V_c + 70.36743 \times r \times f + 83.29523 \times r \times a_p$$

$$- 0.054018 \times r \times V_c + 2228.23324 \times f \times a_p + 0.501847 \times f \times V_c$$

$$- 1.07672 \times a_p \times V_c$$

$$Fz_{Gp\_Conv} = -18.39299 + 0.780496 \times r + 89.13816 \times f + 313.64151 \times ap \quad \text{IV-10}$$

$$+ 0.061495 \times Vc + 70.36743 \times r \times f + 83.29523 \times r \times ap$$

$$- 0.054018 \times r \times Vc + 2228.23324 \times f \times ap + 0.501847 \times f \times Vc$$

$$- 1.07672 \times ap \times Vc$$

Les Figure IV. 12, Figure IV.13 et Figure IV.14 présentent les surfaces de réponse tridimensionnelles de l'effort axial ( $F_x$ ), radial ( $F_y$ ) et tangentiel ( $F_t$ ) en fonction des facteurs étudiés ( $G_p$ ,  $r$ ,  $f$ ,  $ap$ ,  $V_c$ ) lors du tournage dur de l'acier X38CrMoV5-1 en utilisant deux plaquettes de coupe de géométrie wiper et conventionnelle. L'analyse de ces figures révèle que la profondeur de passe est le paramètre le plus influent sur les trois composantes des efforts de coupe. Il est clairement observé que l'augmentation de la profondeur de passe entraîne une augmentation significative des efforts de coupe, quel que soit le type de plaquette de coupe utilisé (wiper ou conventionnelle). Cette tendance est cohérente avec les résultats précédemment mentionnés qui indiquent que la profondeur de passe est le facteur dominant sur les efforts de coupe.

Ces surfaces de réponse tridimensionnelles offrent une visualisation précise des interactions entre les facteurs de coupe et les efforts de coupe correspondants. Elles permettent de mieux comprendre les variations des forces de coupe en fonction des paramètres de coupe étudiés.

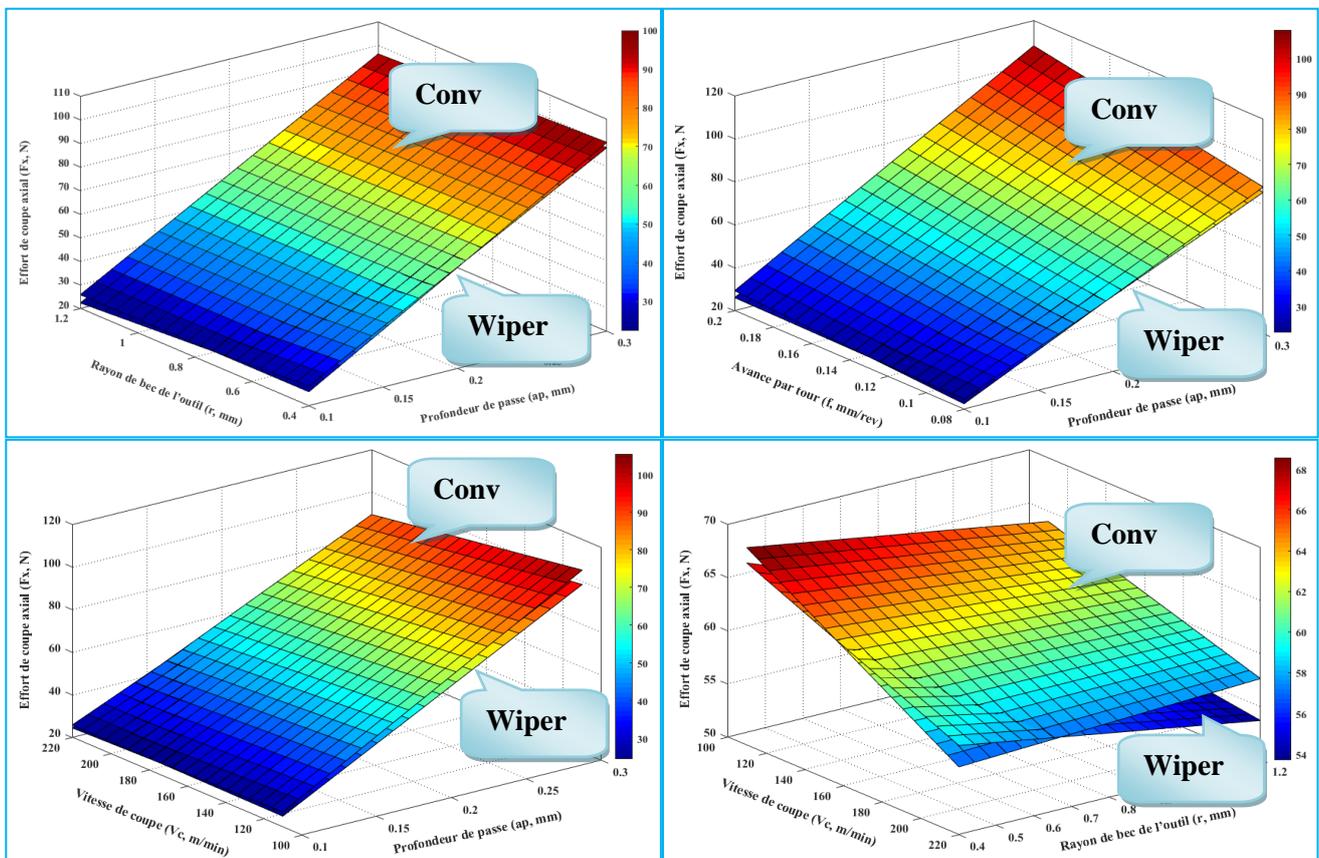
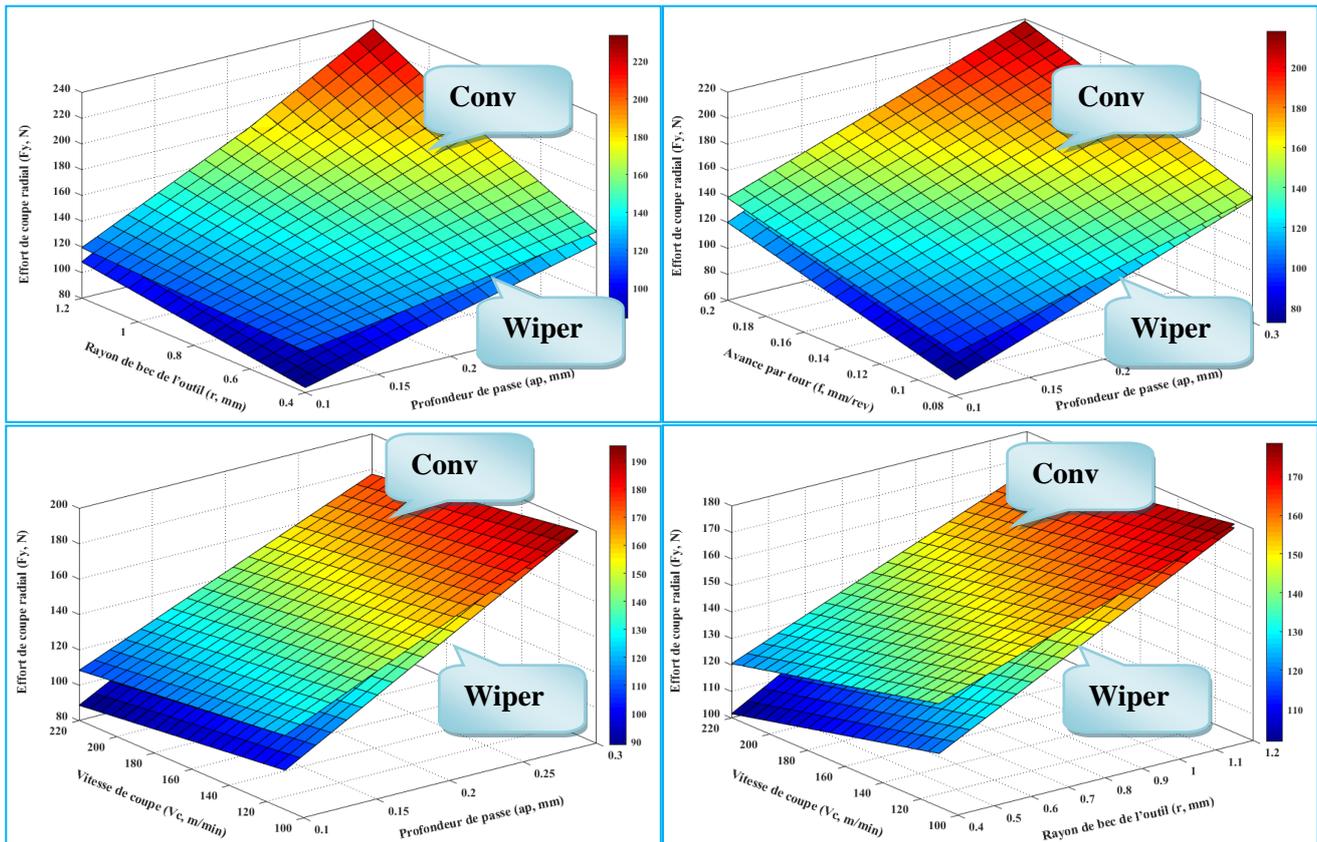


Figure IV. 12 : Evolution de l'effort de coupe axial  $F_x$  en fonction de  $V_c$ ,  $r$ ,  $f$  et  $ap$  pour les deux plaquettes de coupe testées de géométrie wiper et standard

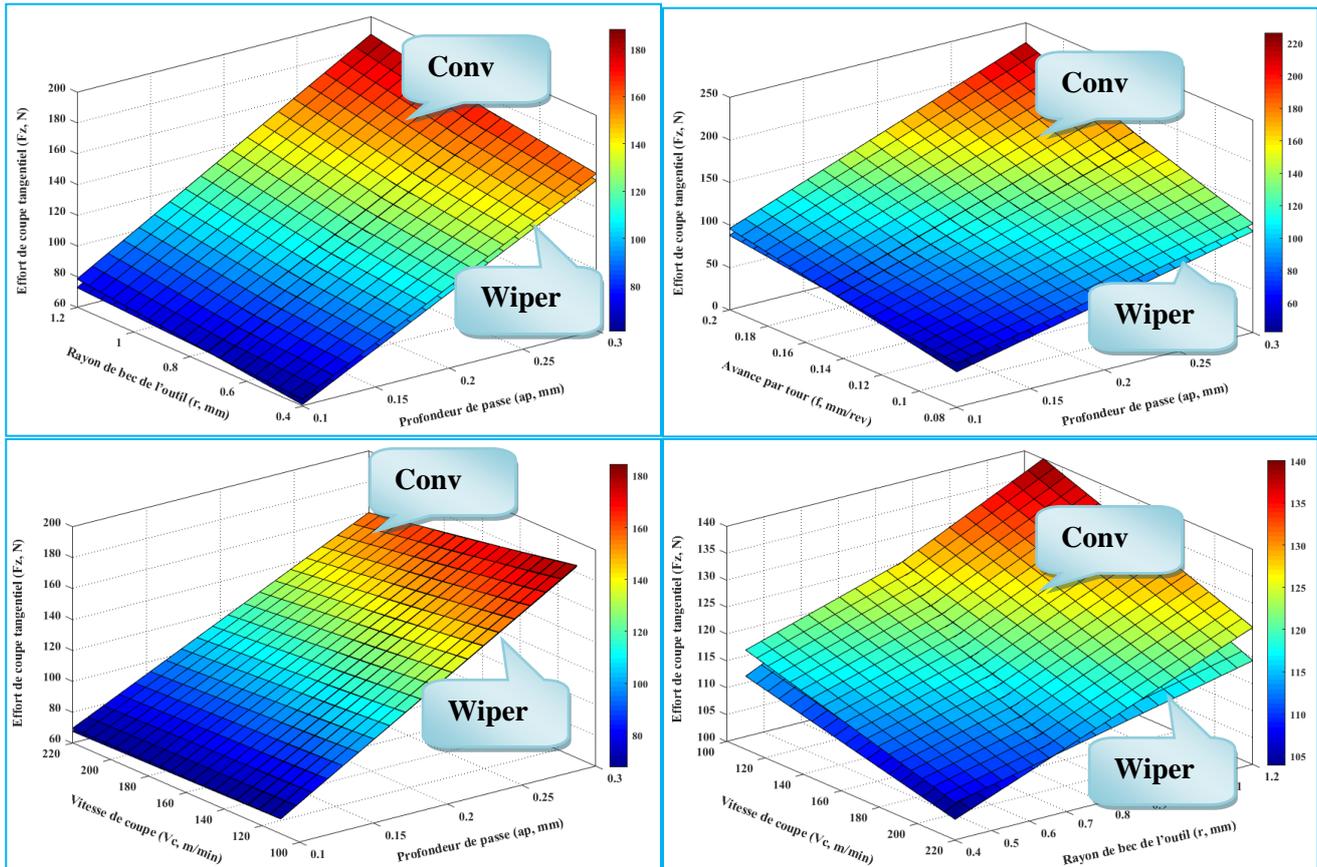


**Figure IV.13 :** Evolution de l'effort de coupe radial  $F_y$  en fonction de  $V_c$ ,  $r$  et  $a_p$  pour les deux plaquettes de coupe testées de géométrie wiper et standard

Dans la Figure IV. 12, on peut observer que les valeurs de l'effort axial et leur évolution en fonction des différents facteurs étudiés sont similaires pour les deux géométries de plaquettes. Cela signifie que le changement de géométrie de coupe n'a aucun impact sur l'effort axial. De plus, nous avons remarqué que l'effet de l'augmentation du rayon de bec, de la vitesse de coupe et de l'avance par tour est très faible par rapport à l'effet de la variation de la profondeur de passe. En résumé, l'analyse des résultats indique que lors de l'usinage de finition, les plaquettes de géométrie wiper génèrent des efforts de coupe similaires.

La Figure IV.13 présente les effets des interactions sur les surfaces de réponse 3D estimées pour les composantes de l'effort de coupe radial ( $F_y$ ) en fonction des cinq facteurs étudiés. Pour chaque surface de réponse, les variables non représentées sont maintenues constantes (au niveau médian). Les courbes en 3D des surfaces de réponse démontrent que les efforts de coupe radiaux sont plus sensibles à l'augmentation de la profondeur de passe qu'aux autres paramètres tels que l'avance par tour et la vitesse de coupe. De plus, ils sont inversement proportionnels à l'évolution de la vitesse de coupe.

Ces observations soulignent l'importance de la profondeur de passe dans le contrôle des efforts de coupe axiaux et radiaux, tandis que d'autres paramètres tels que le rayon de bec, la vitesse de coupe et l'avance par tour ont une influence relativement faible. Ces informations sont cruciales pour la sélection et l'optimisation des paramètres de coupe afin de minimiser les efforts de coupe et d'obtenir des résultats d'usinage de haute qualité.



**Figure IV.14 :** Evolution de l'effort de coupe tangentiel  $F_z$  en fonction de  $V_c$ ,  $r$ ,  $f$  et  $a_p$  pour les deux plaquettes de coupe testées de géométrie wiper et standard

Comme le montre la Figure IV.14, pour les deux géométries de plaquettes de coupe, l'effort tangentiel augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe et du rayon de bec de l'outil. Cela s'explique par l'élargissement de la zone d'action de coupe. De plus, l'effort tangentiel atteint sa valeur maximale à des niveaux élevés de profondeur de passe et d'avance. L'analyse de la surface de réponse met également en évidence que lorsque la vitesse de coupe diminue de 220 m/min à 100 m/min et que le rayon de coupe augmente de 0.4mm à 1.2mm, avec une avance et une profondeur de coupe constantes, l'effort tangentiel augmente de 35 N par rapport à sa valeur initiale de 105N. Cela indique que la vitesse de coupe a peu d'effet sur l'effort tangentiel par rapport à l'effet causé par la profondeur de passe.

Dans l'ensemble, en comparant les valeurs des trois composantes des efforts de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) en fonction des paramètres de coupe obtenus avec les quatre plaquettes de coupe utilisées, on remarque que la plaquette de géométrie wiper génère des efforts de coupe légèrement inférieurs à ceux de la plaquette de coupe de géométrie conventionnelle. Dans une étude réalisée par J. Paulo Davim et L. Figueira [128], qui a comparé une plaquette de coupe de géométrie wiper à une plaquette de forme standard, il a été conclu que l'outil de coupe en céramique Wiper est plus performant que l'outil de coupe en céramique traditionnel, en particulier en ce qui concerne la rugosité de surface de la pièce.

### IV. 3. 2. 3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La Figure IV.15 présente une comparaison graphique entre les valeurs expérimentales mesurées des trois composantes des efforts de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) pour les deux plaquettes de coupe testées en céramique, à savoir la géométrie wiper et la géométrie standard, et les valeurs estimées par les modèles mathématiques obtenus à l'aide de la méthodologie de surface de réponse (MSR) avec une modélisation quadratique.

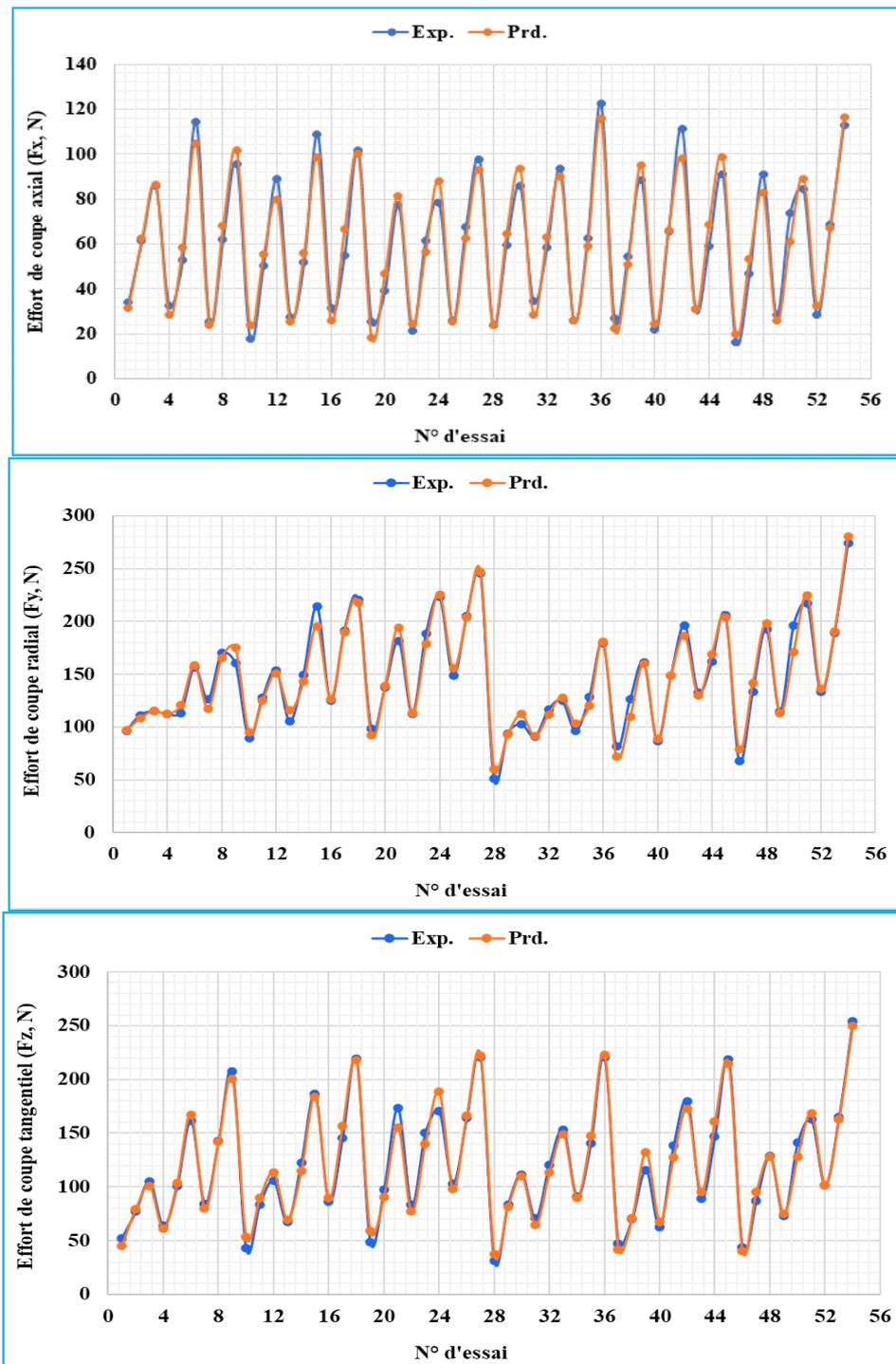


Figure IV.15 : Courbes des valeurs expérimentales et estimées des efforts de coupe

Cette comparaison permet d'évaluer la précision des modèles mathématiques dans la prédiction des efforts de coupe. On peut observer que, dans l'ensemble, les valeurs estimées par les modèles mathématiques sont en bonne corrélation avec les valeurs expérimentales mesurées. Cependant, il est important de noter qu'il peut y avoir des écarts entre les valeurs prédites et les valeurs réelles en raison de divers facteurs tels que des variations expérimentales, des erreurs de mesure ou des interactions non prises en compte par le modèle.

Néanmoins, la comparaison graphique des valeurs mesurées et estimées permet de valider l'adéquation des modèles mathématiques développés à partir des données expérimentales et de démontrer leur capacité à prédire les efforts de coupe pour différentes conditions de coupe et géométries de plaquettes. Cela renforce la fiabilité et l'applicabilité des modèles de surface de réponse utilisés dans cette étude pour optimiser les paramètres de coupe et prédire les performances d'usinage.

L'analyse des résultats met en évidence une concordance remarquable entre les valeurs expérimentales et les valeurs estimées. Cette constatation permet de conclure de manière significative que les modèles développés à partir de la méthodologie de surface de réponse fournissent des résultats fiables. Les écarts entre les valeurs expérimentales et estimées sont minimales, démontrant ainsi la capacité des modèles à prédire avec précision les performances d'usinage. Cette cohérence renforce la confiance accordée aux modèles de surface de réponse utilisés dans cette étude pour optimiser les paramètres de coupe et prédire les efforts de coupe.

La fiabilité des modèles de surface de réponse est essentielle dans le contexte de l'usinage, car elle permet de prendre des décisions éclairées pour améliorer l'efficacité et la qualité du processus. En exploitant ces modèles, il devient possible d'identifier les combinaisons optimales de paramètres de coupe qui minimisent les efforts de coupe tout en maximisant les performances d'usinage. Ainsi, les résultats obtenus confirment la validité et l'applicabilité des modèles de surface de réponse utilisés dans cette thèse de doctorat, apportant une contribution significative à la compréhension et à l'optimisation des processus d'usinage.

#### **IV. 4. Analyse de l'intégrité surface**

Dans cette section, nous abordons l'étude de la micro-géométrie, c'est-à-dire la rugosité de la surface, en analysant la topographie en 2D et 3D. L'objectif est de caractériser les défauts de surface présents sur les profils usinés lors du processus d'usinage de l'acier dur X38CrMoV5-1, en utilisant des plaquettes de coupe en céramique mixte revêtues, dotées d'une géométrie spécifique, et avec les conditions de coupe suivantes :  $V_c = 160$  m/min,  $f = 0,14$  mm/tr,  $a_p = 0,2$  mm et  $r = 0,8$  mm.

La mesure de l'état de surface est réalisée à l'aide d'un interféromètre à lumière blanche, plus précisément un rugosimètre optique 3D de marque AltiSurf® 500. Les paramètres de profil en deux dimensions et de surface en trois dimensions sont analysés selon les normes internationales ISO 4287, ISO 13565-2 et 3, ainsi que ISO 25178.

Ces normes garantissent une méthodologie rigoureuse pour l'évaluation et la quantification des caractéristiques de la surface, permettant ainsi une comparaison précise des résultats obtenus. Les paramètres de rugosité, tels que la rugosité moyenne arithmétique ( $R_a$ ), la hauteur maximale du profil ( $R_z$ ), la distance moyenne entre les pics et les creux ( $R_{Sm}$ ), ainsi que d'autres paramètres spécifiques, sont extraits des données de mesure et analysés pour fournir des informations détaillées sur l'intégrité de la surface usinée.

Cette étude approfondie de la micro-géométrie de la surface joue un rôle essentiel dans la compréhension et l'amélioration de la qualité des pièces usinées. En évaluant les défauts de surface et en identifiant les sources potentielles de rugosité, il est possible de mettre en place des stratégies d'optimisation pour obtenir des surfaces plus lisses et conformes aux spécifications requises.

#### **IV. 4. 1. Paramètres de profil (2D) d'état de surface**

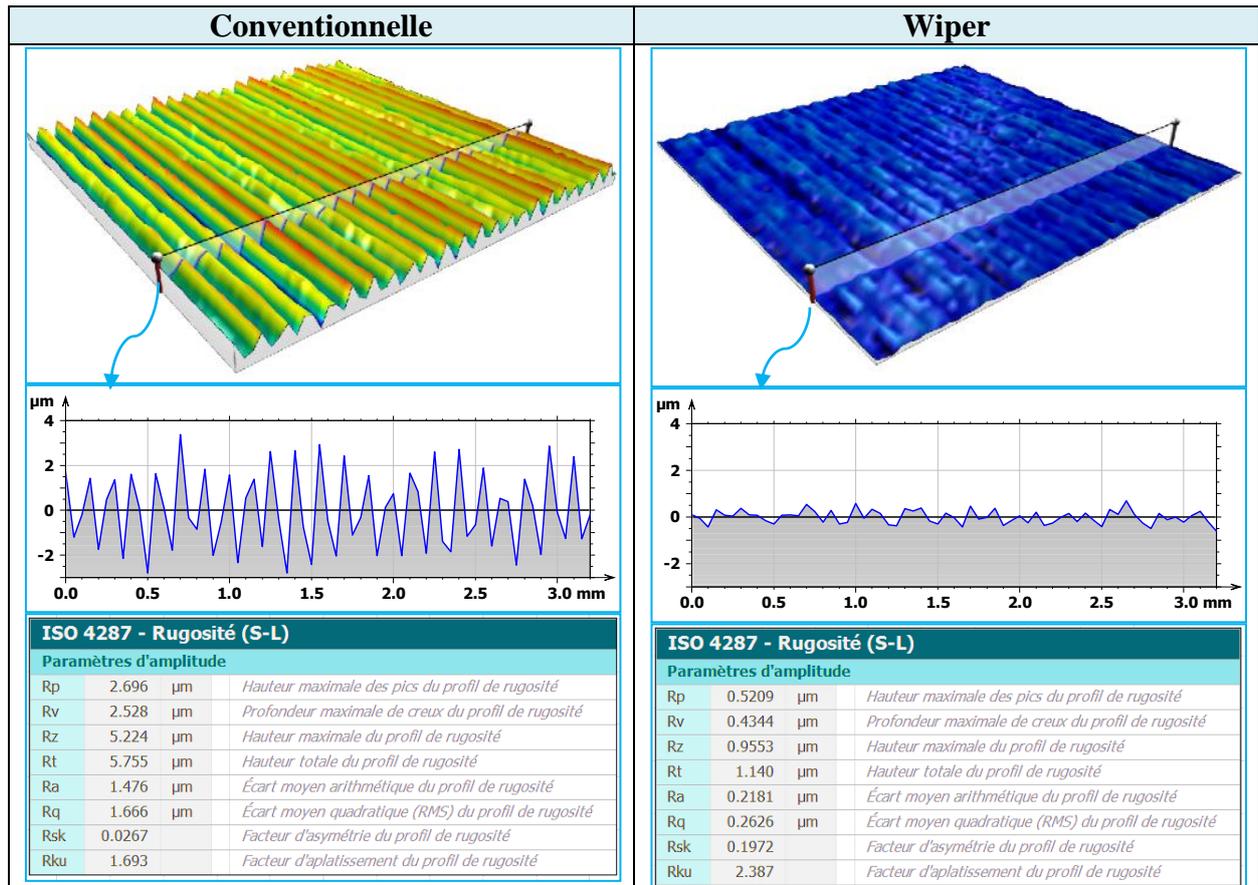
##### **IV. 4. 1. 1. Paramètres d'amplitude de profil 2D**

Les normes ISO fournissent un large éventail de paramètres pour évaluer la rugosité de surface. Dans cette étude, nous nous concentrons sur les paramètres de profil les plus couramment utilisés dans le domaine de la fabrication mécanique, tels que définis par la norme ISO 4287. Cette norme est la référence principale pour les paramètres de profil dans le système GPS (spécification géométrique des produits). Elle établit les termes et les équations des paramètres généraux. En utilisant ces paramètres, il est possible d'identifier les différences significatives entre les surfaces usinées avec les deux géométries de plaquette de coupe. Cette information est essentielle pour prendre des décisions éclairées concernant le choix des outils de coupe et les paramètres d'usinage afin d'obtenir les niveaux de rugosité souhaités et d'améliorer la qualité des pièces usinées.

La Figure IV.16 présente les paramètres d'amplitude selon la norme ISO 4287, ainsi que les profils 2D de quatre surfaces obtenues lors du tournage dur en utilisant des plaquettes de coupe de géométrie wiper et conventionnelle. Les profils 2D représentent des valeurs de rugosité pure, car les composantes d'ondulation ont été filtrées. Il est clairement visible que les profils 2D des surfaces usinées avec la plaquette de coupe de géométrie wiper présentent de petites formes de pics et de creux par rapport aux profils obtenus avec la plaquette de coupe de géométrie standard.

D'après les résultats de mesure présentés dans cette figure, nous pouvons observer des valeurs de paramètres conformes à la norme ISO 4287, tels que  $R_p=0.5209 \mu\text{m}$ ,  $R_v=0.4344 \mu\text{m}$ ,  $R_z=0.9553 \mu\text{m}$ ,  $R_t=1.140 \mu\text{m}$ ,  $R_a=0.2181 \mu\text{m}$  et  $R_q=0.2626 \mu\text{m}$ . Ces valeurs sont considérablement inférieures aux paramètres obtenus avec la deuxième plaquette de coupe de géométrie conventionnelle, qui sont de  $R_p=2.696 \mu\text{m}$ ,  $R_v=2.528 \mu\text{m}$ ,  $R_z=5.224 \mu\text{m}$ ,  $R_t=5.755 \mu\text{m}$ ,  $R_a=1.476 \mu\text{m}$  et  $R_q=1.666 \mu\text{m}$ . Ces résultats indiquent que la plaquette de coupe de géométrie wiper produit une meilleure qualité de surface.

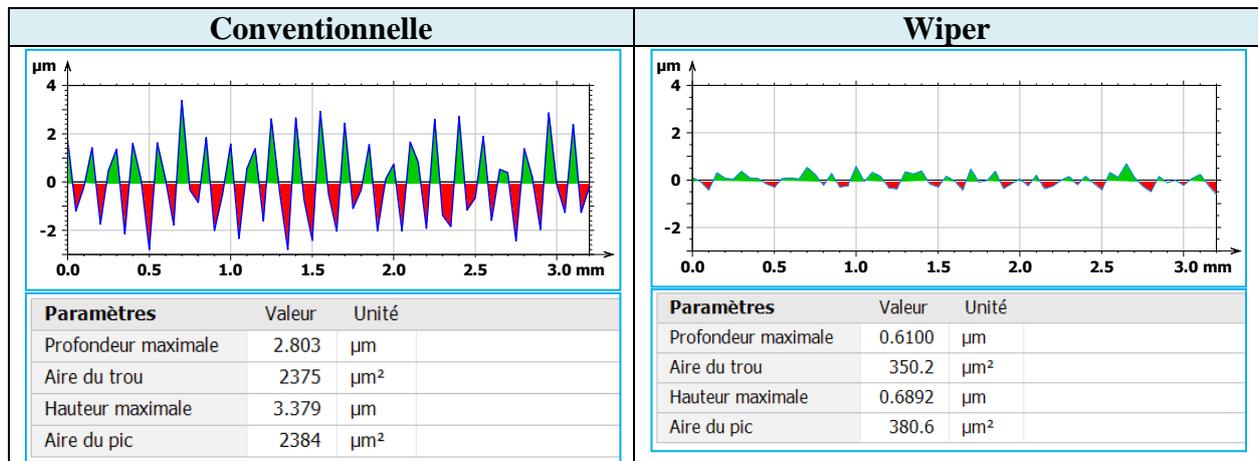
Les paramètres de rugosité tels que Rp (hauteur du profil primaire), Rv (hauteur du profil de vallée), Rz (hauteur maximale du profil), Rt (hauteur totale du profil), Ra (rugosité moyenne arithmétique) et Rq (rugosité quadratique moyenne) fournissent des mesures quantitatives de l'état de surface. Comparativement, les valeurs obtenues avec la plaquette de géométrie wiper sont nettement inférieures, ce qui indique une réduction significative des irrégularités de surface et une amélioration de la finition de la pièce usinée. Cela confirme l'efficacité de la plaquette de coupe de géométrie wiper pour obtenir un meilleur état de surface.



**Figure IV.16:** Paramètres d'amplitude (ISO 4287) et profils de surface 2D réalisés en tournage dur à sec avec les deux plaquettes de coupe testées (conventionnelle et wiper)

La Figure IV.17 présente les résultats de l'analyse de l'aire et de la profondeur des crêtes et des creux des quatre profils de surface 2D réalisés. Les mesures de profondeur et de hauteur maximale obtenues avec les deux plaquettes de coupe, à savoir la géométrie wiper et la géométrie standard, sont respectivement de 0.610 μm et 2.803 μm, et de 0.6892 μm et 3.375 μm. Une observation importante est que le profil de surface usiné avec l'outil de géométrie wiper présente les valeurs les plus faibles en termes de profondeur, de hauteur et d'aire des crêtes et des creux. Cette constatation indique que la plaquette de coupe wiper permet d'obtenir une finition de surface plus fine. Les valeurs réduites de profondeur et de hauteur des crêtes et des creux montrent que la plaquette de coupe wiper génère moins d'irrégularités et de défauts de surface par rapport à la plaquette de coupe de géométrie standard. La diminution de ces paramètres est essentielle pour améliorer la qualité de la surface usinée,

réduire les risques de friction ou d'usure prématurée et garantir des performances optimales de la pièce.



**Figure IV.17:** Analyse de l'aire et la profondeur des creux et des crêtes des profils de surface 2D réalisés en tournage dur à sec avec les deux plaquettes de coupe testées (conventionnelle et wiper)

Ces résultats, revêtent une importance cruciale dans le domaine de la fabrication mécanique, en particulier en ce qui concerne la rugosité de surface. Les plaquettes de coupe de géométrie wiper se distinguent par leurs performances supérieures en termes d'usinage et de qualité de surface, ce qui a un impact positif sur la productivité et la durée de vie des outils de coupe. L'amélioration de la finition de surface grâce à l'utilisation de la plaquette de coupe wiper est également essentielle pour la fonctionnalité et l'esthétique des produits fabriqués. Une surface lisse et uniforme favorise un ajustement précis des pièces, facilite les opérations d'assemblage et réduit les frottements et les interactions indésirables entre les composants.

En résumé, les résultats obtenus confirment l'avantage indéniable de la plaquette de coupe de géométrie wiper dans l'obtention d'une finition de surface de haute qualité. Cette avancée contribue de manière significative à l'amélioration des performances d'usinage et à la satisfaction des exigences de qualité dans différents domaines industriels. Ainsi, cette étude ouvre de nouvelles perspectives pour optimiser les processus de production et obtenir des produits finis de meilleure qualité dans le domaine de la fabrication mécanique.

## IV. 4. 2. Paramètres surfaciques 3D d'état de surface

### IV. 4. 2. 1. Paramètres d'amplitude

La norme ISO 4287 offre une méthode pratique pour étendre la plupart des paramètres de rugosité du domaine 2D au domaine 3D. Les paramètres d'amplitude, qui décrivent les propriétés liées à l'amplitude d'une surface, sont définis par la différence de hauteur. La norme ISO 25178 définit six paramètres spécifiquement conçus pour caractériser ces propriétés d'amplitude, regroupés en deux catégories : les paramètres moyens des ordonnées et les paramètres extrêmes des pics et des vallées.

La plupart des paramètres de l'ISO 4287 peuvent facilement être étendus pour le cas 3D. Les paramètres d'amplitude dépendent de l'écart d'hauteur, pour la description des propriétés liées à l'amplitude d'une surface. Six paramètres sont conçus pour caractériser la propriété d'amplitude des surfaces, définis selon la norme ISO 25178. Ils sont classés en deux catégories, la moyenne des ordonnées et les paramètres extrêmes des pics et des vallées.

La Figure IV.18 présente les paramètres d'amplitude conformément à la norme ISO 25178, ainsi que la représentation en topographie 3D de quatre surfaces obtenues lors du processus de tournage dur en utilisant des plaquettes de coupe de géométrie wiper et conventionnelle. Les surfaces sont visualisées sous deux vues isométriques après avoir filtré les composantes d'ondulation. Les graphes obtenus montrent clairement des pics et des vallées bien définis, ce qui permet d'évaluer la qualité des surfaces usinées. Lors du processus de tournage avec une seule arête de coupe, la surface générée présente un sillon hélicoïdal résultant de la forme du bec de l'outil et du mouvement hélicoïdal de la pièce-outil généré par la machine-outil. Les deux surfaces obtenues avec la plaquette de coupe wiper présentent des pics plats et écrasés, ce qui les distingue de la forme des pics aigus générés par les plaquettes conventionnelles revêtues.

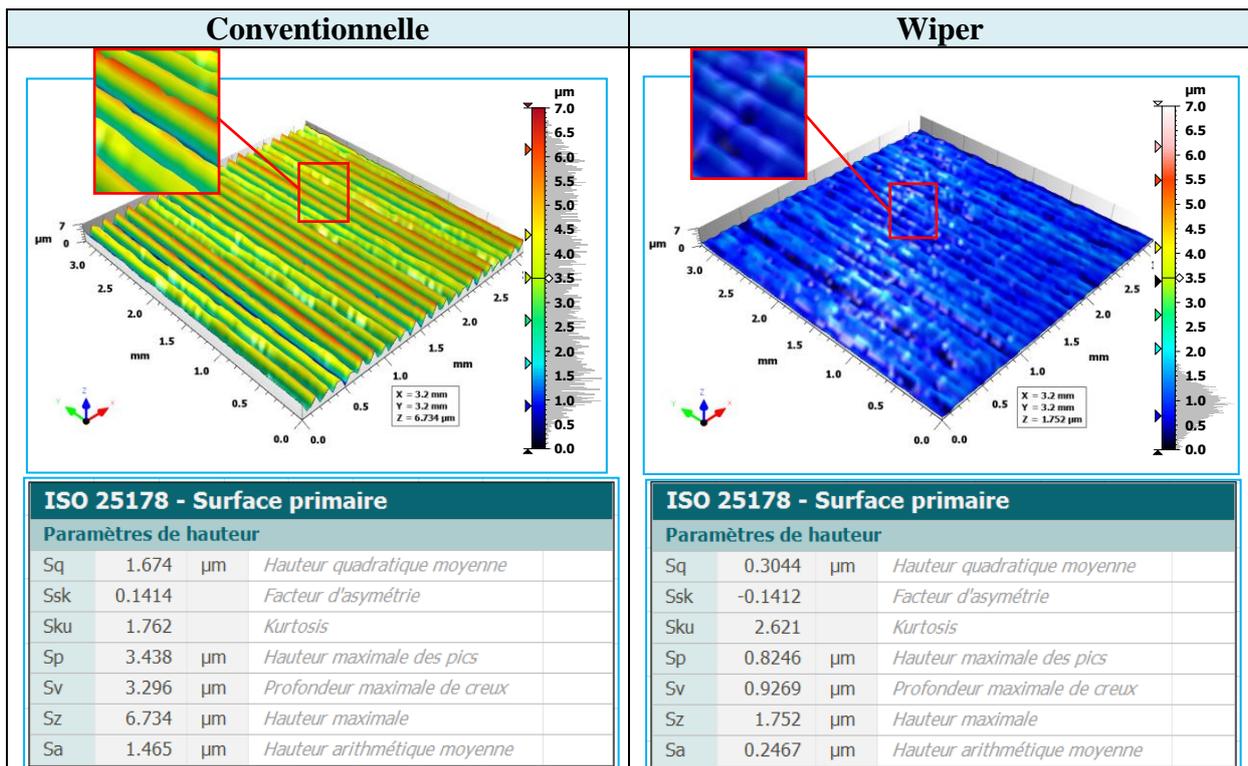


Figure IV.18: Paramètres (ISO 25178) et topographie 3D de surface réalisés en tournage dur à sec

En examinant les paramètres d'amplitude, on remarque que pour la plaquette de coupe wiper, la hauteur arithmétique moyenne (Sa) est de 0.2467μm, la quadratique moyenne (Sq) est de 0.3044μm et la maximale (Sz) est de 1.752μm. En revanche, pour la plaquette de coupe conventionnelle, les valeurs correspondantes sont de Sa=1.465μm, Sq=1.674μm et Sz=6.734μm. Ces paramètres d'amplitude démontrent clairement que les plaquettes de coupe

wiper génèrent des valeurs de rugosité de surface considérablement plus faibles que celles produites par les plaquettes conventionnelles.

Les résultats obtenus soulignent l'avantage des plaquettes de coupe de géométrie wiper en termes de qualité de surface, avec des valeurs de paramètres d'amplitude considérablement réduites par rapport aux plaquettes conventionnelles. Ces résultats démontrent l'influence de la géométrie de la plaquette de coupe sur la forme des pics et des vallées, ce qui joue un rôle crucial dans la qualité de la surface usinée. Ainsi, il est essentiel de choisir soigneusement la géométrie de la plaquette de coupe lors des opérations de tournage afin d'obtenir des surfaces de haute qualité.

#### IV. 4. 2. 2. Paramètres fonctionnels

Les paramètres fonctionnels sont dérivés de la courbe d'Abbott, qui est obtenue en intégrant la distribution des hauteurs sur toute la surface. Ces paramètres sont utilisés pour caractériser l'aspect fonctionnel de la surface, tels que l'usure, la lubrification et le contact. Ils fournissent une vision globale de la surface en tant que paramètres de champ, offrant une exploration statistique de ses propriétés.

##### a) Paramètres de taux de portance

La Figure IV.19 présente la courbe Abbott-Firestone pour les deux surfaces obtenues lors du tournage dur avec les outils de coupe wiper et conventionnel. Il est observable que la répartition des pics et des vallées dépend de la géométrie de l'outil utilisé.

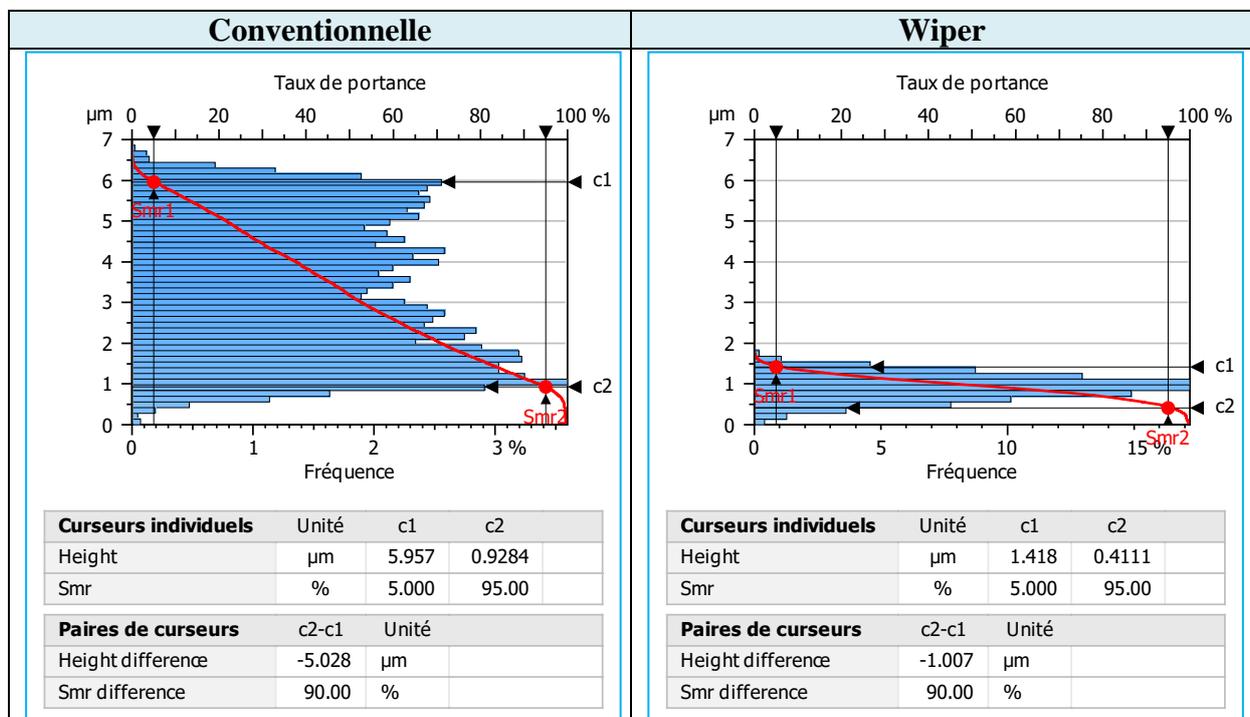


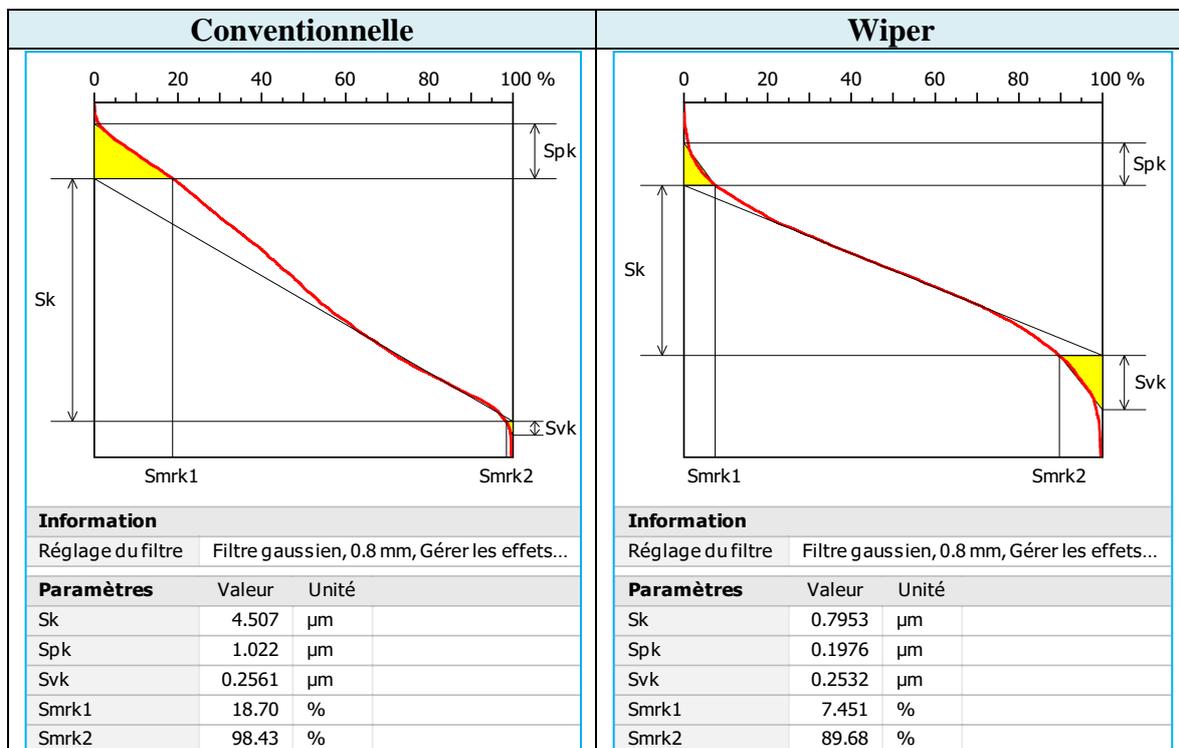
Figure IV.19: : Représentation de la courbe Abbott-Firestone réalisée avec les deux plaquettes de coupe testées

L'analyse des histogrammes de profondeur des deux surfaces usinées avec les différents outils de coupe peut fournir des informations supplémentaires pour comparer leur rugosité de surface. Les lignes rouges continues sur les histogrammes représentent la courbe d'aire portante (*Bearing Area Curve* « *BAC* »), également connue sous le nom de courbe Abbott-Firestone. La BAC est calculée en intégrant la fonction de distribution d'amplitude et indique le pourcentage ou la fraction linéaire d'un profil au-dessus d'une certaine hauteur. La subdivision de la courbe d'Abbott en sous-sections peut faciliter l'interprétation des résultats de la rugosité de surface. La courbe Abbott-Firestone constitue une caractéristique pertinente pour évaluer les propriétés fonctionnelles des surfaces et leur utilisation potentielle. Elle permet de distinguer différentes surfaces présentant la même valeur de  $R_a$  ou d'autres caractéristiques de hauteur. En général, chaque type de surface se distingue par le tracé spécifique de sa courbe d'Abbott.

Selon la Figure IV. 12, les diagrammes à barres démontrent de manière évidente que les fractions des pics et des vallées par rapport à la hauteur totale dépendent distinctement du type de géométrie de l'outil. Pour les surfaces usinées avec des plaquettes de coupe wiper, la majorité des pics et des vallées se situent entre  $0,4111 \mu\text{m}$  et  $1,1418 \mu\text{m}$ , tandis qu'avec une plaquette de géométrie conventionnelle, ils se trouvent entre  $0,9284 \mu\text{m}$  et  $5,957 \mu\text{m}$ .

### b) Les paramètres $S_k$

Les paramètres mentionnés sont dérivés de la courbe d'Abbott, qui est obtenue en intégrant la distribution des hauteurs sur toute la surface. La division de la courbe d'Abbott (BAC) en sous-sections peut faciliter l'interprétation des résultats de la rugosité de surface.



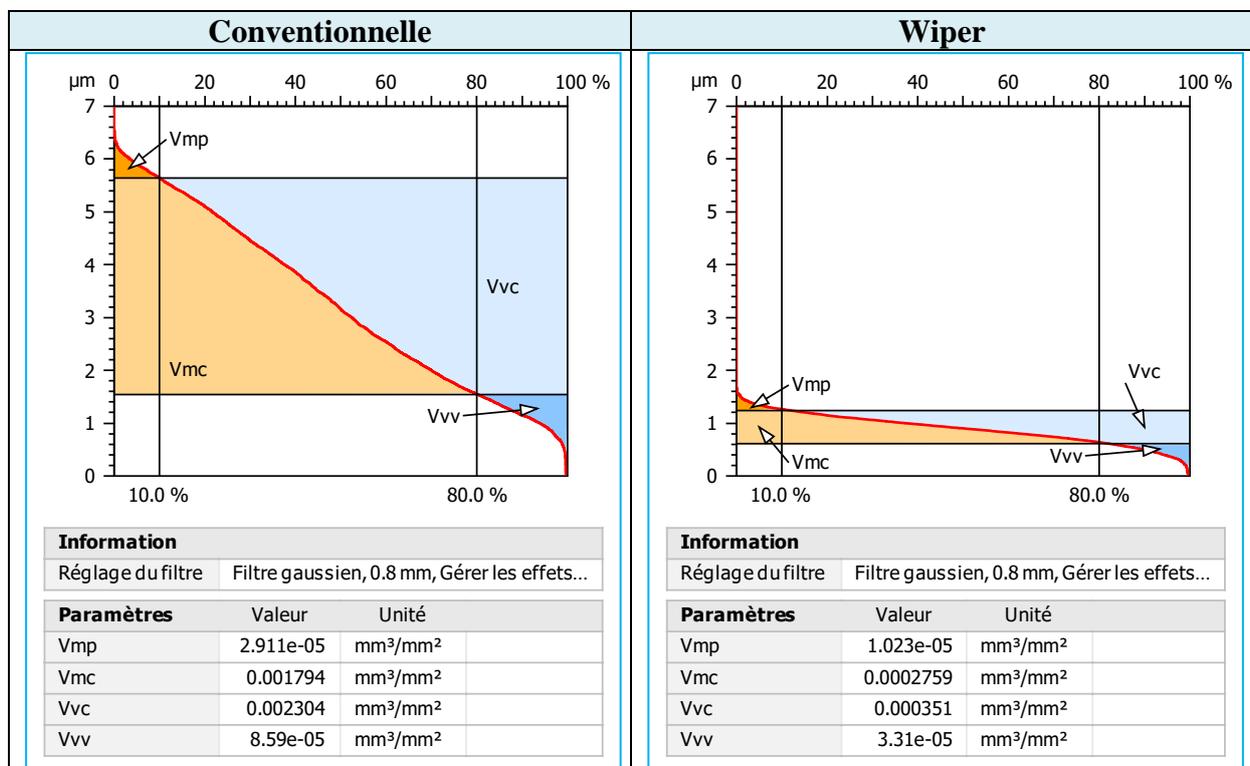
**Figure IV.20:** Paramètres fonctionnels «  $S_k$  » et courbe d'Abbott-Firestone pour les surfaces réalisées avec les deux plaquettes de coupe testées

À cet effet, une ligne droite peut être tracée en utilisant une méthode de régression pour représenter plus de 40% de la partie centrale de la BAC. Les trois sous-sections du BAC comprennent la profondeur de rugosité du noyau ( $S_k$ ), la hauteur maximale de pic ( $S_{pk}$ ) et la profondeur de vallée réduite ( $S_{vk}$ ). Il est souhaitable d'avoir une surface avec de petits pics, car ces pics tendent à s'user lors des premières étapes d'utilisation, tandis que  $S_k$  peut être considérée comme une caractéristique à long terme de la surface (rugosité).

Selon la Figure IV.20, l'augmentation du rayon du bec de l'outil a entraîné un déplacement ascendant de la courbe d'Abbott vers des profondeurs plus faibles. Cette figure met en évidence le fait qu'une géométrie de plaquette de type wiper conduit à une surface extrêmement précise. Pour une plaquette wiper, la valeur de  $S_{pk}$  est de  $0,1976 \mu\text{m}$ , tandis que pour une plaquette de coupe conventionnelle,  $S_{pk}$  est de  $1,022 \mu\text{m}$ .

### c) Les paramètres de volume

La Figure IV.21 présente les paramètres fonctionnels de volume, qui constituent une étape intermédiaire vers la définition de paramètres fonctionnels de volume considérés comme plus pertinents. Comme les paramètres précédents, ces paramètres sont calculés à partir de la courbe d'Abbott en utilisant deux seuils de taux de portance fixés à 10% et 80%. Ces paramètres permettent de caractériser non seulement les propriétés fonctionnelles courantes des surfaces, mais aussi d'interpréter l'usure et les propriétés tribologiques.



**Figure IV.21:** Paramètres volumiques des surfaces réalisées avec les deux plaquettes de coupe testées

La famille de paramètres de volume revêt une grande importance pratique et peut être utilisée pour évaluer numériquement le rapport de surface des matériaux et obtenir des valeurs

absolues de volume par unité de surface. À partir de cette figure, il est possible de remarquer que le volume de matière des pics ( $V_{mp}$ ) diminue d'un facteur de 2,85 pour la plaquette de coupe de géométrie standard. De même, le volume de matière du cœur ( $V_{mc}$ ) diminue de 6,5 fois pour la céramique de géométrie conventionnelle.

## IV. 5. Analyse de l'usure de l'outil de coupe

### IV. 5. 1. Evolution de l'usure en fonction du temps de coupe

Afin d'évaluer l'impact de la géométrie wiper des plaquettes de coupe sur leur durée de vie et de comparer leurs performances en termes d'usure par rapport à une géométrie standard, des essais de chariotage de longue durée ont été réalisés sur des éprouvettes en acier faiblement allié X38CrMoV5-1 traité à 50 HRC. Deux types de plaquettes de coupe ont été utilisés : des outils en céramique mixte revêtus de TiN avec une géométrie de type wiper, et une autre de type conventionnel. Les essais ont été menés avec une vitesse de coupe de " $V_c=160$  m/min", une avance par tour de " $f=0.08$  mm/tr", une profondeur de passe de " $a_p=0.2$  mm" et un rayon de bec de " $r=1.2$  mm".

L'objectif de ces opérations était de déterminer les courbes d'usure en fonction du temps d'usinage, afin de comparer les performances des deux types de plaquettes.

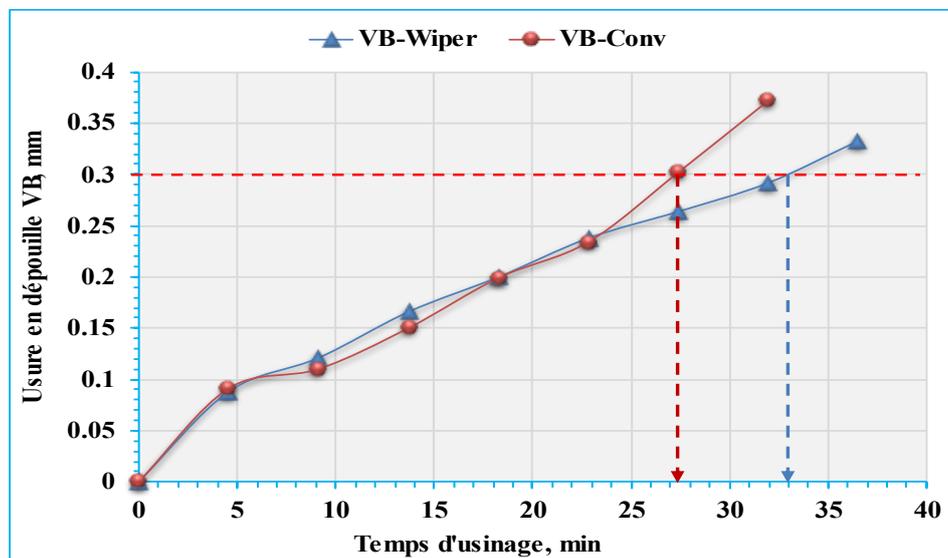


Figure IV. 22 : Evolution de l'usure des plaquettes de coupe testées en fonction du temps de coupe

Les performances des différentes plaquettes de coupe utilisées ont été évaluées en fonction d'une usure en dépouille admissible [VB] de 0,3 mm. Au-delà de cette limite, des mesures d'usure et de rugosité ont été effectuées dans le but d'observer le comportement global de ces plaquettes de coupe dans des conditions extrêmes lors du tournage dur d'un acier traité avec des outils revêtus. La durée de vie ( $T$ ) d'un outil est définie selon la norme ISO 3685 comme "le temps total de coupe nécessaire pour atteindre un critère de durée de vie spécifique". Les

résultats de l'évolution de l'usure en dépouille des quatre plaquettes de coupe testées en fonction du temps d'usinage sont présentés dans la Figure IV. 22.

D'après cette figure, il est observé que la progression de l'usure VB des deux types de plaquettes de coupe étudiées suit la loi universelle de l'usure selon la norme ISO 8688-1/1989. Cette évolution peut être caractérisée par trois périodes principales, une progression typique comprenant une phase de rodage, une phase d'usure normale et une phase d'usure catastrophique :

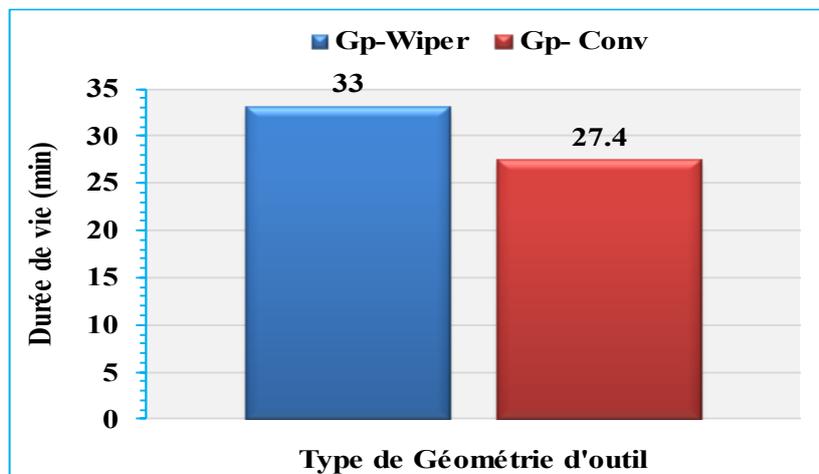
- **Phase d'usure initiale ou de rodage** : Cette période correspond aux premières secondes de travail et se distingue par une usure intensive. Pendant cette phase, l'outil subit un ajustement initial et s'adapte à la surface de la pièce à usiner.
- **Phase d'usure progressive ou normale** : Après la phase de rodage, l'usure évolue à un rythme relativement plus lent et suit une tendance plus ou moins linéaire. Cette phase est caractérisée par une résistance accrue à l'usure, où l'outil maintient ses propriétés de coupe et continue à fournir des performances satisfaisantes.
- **Phase d'usure catastrophique** : Au fur et à mesure que l'outil continue à travailler, la température à l'interface entre l'outil et la pièce ainsi qu'entre l'outil et les copeaux augmente. Cette augmentation de température dans les zones de contact de la partie active de l'outil accélère les mécanismes d'usure par abrasion et par diffusion. Logiquement, l'usure augmente brusquement et l'outil perd ses qualités de coupe, ce qui se traduit par une détérioration de la rugosité et de la précision dimensionnelle. Cette phase marque la limite de la durée de vie de l'outil.

Ces observations mettent en évidence l'importance de surveiller et de gérer la durée de vie des outils afin de maintenir des performances d'usinage optimales.

Les Figure IV. 22 et Figure IV. 23 mettent en évidence l'impact de la géométrie des plaquettes de coupe sur la durée de vie des outils utilisés dans cette étude. Selon la courbe, pour une plaquette de géométrie wiper et un temps d'usinage de 4,75 minutes, l'usure en dépouille VB atteint une valeur de 0,088 mm. À la fin de l'usinage ( $t = 33$  minutes), l'usure en dépouille atteint 0,30 mm. Cela représente une augmentation de 241 %. La durée de vie de cette plaquette est de 33 minutes. En revanche, lors de la première opération de tournage avec la plaquette de géométrie conventionnelle, l'usure en dépouille VB est mesurée à 0,091 mm. Cependant, la durée de vie de l'outil est de 27,4 minutes, et à la fin de l'usinage, l'usure en dépouille atteint 0,30 mm. Cela représente une augmentation de 237 %. La durée de vie de cette plaquette est de 27,4 minutes.

Ces résultats démontrent que la plaquette de coupe avec une géométrie wiper présente une durée de vie légèrement supérieure à celle de la plaquette de géométrie conventionnelle. Cependant, les deux types de plaquettes montrent une augmentation significative de l'usure en dépouille au cours de l'usinage, ce qui limite leur durée de vie. Il est donc important de

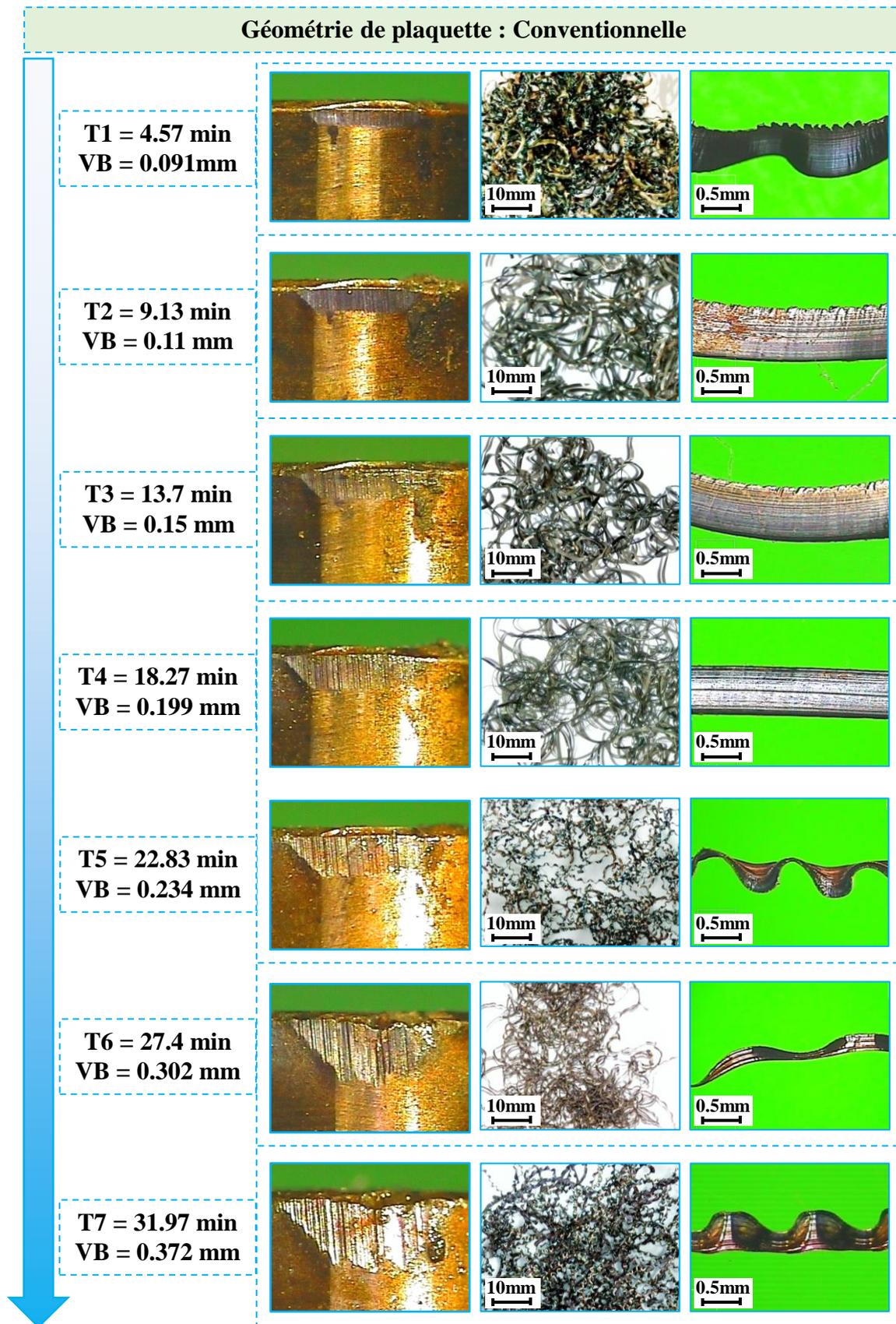
surveiller attentivement l'usure des outils et de planifier leur remplacement afin de maintenir des performances d'usinage optimales.



**Figure IV. 23** : Progression de la durée de vie lors du tournage de l'acier X38CrMoV5-1 avec des plaquettes de coupe wiper et conventionnelle, pour  $[VB]=0,3\text{mm}$

Les Figures Figure IV.24 et Figure IV.25 présentent respectivement la morphologie de l'usure en dépouille VB et la formation des copeaux en fonction du temps d'usinage pour les deux types de plaquettes de coupe testées, à savoir la plaquette de géométrie conventionnelle et la plaquette de géométrie wiper. Il est observé que dans les deux cas, l'usure en dépouille se développe le long d'une bande régulière qui s'élargit avec le temps. Les zones d'usure sont principalement concentrées sur le bec de l'outil et la surface d'attaque. Ces observations indiquent que les deux types de plaquettes de coupe sont bien adaptés pour l'usinage de l'acier AISI H11 traité à 50 HRC dans les conditions de coupe spécifiées ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$  et  $r$ ).

L'analyse des résultats de l'étude sur la durée de vie des outils en céramique mixte revêtus de TiN, avec les deux géométries de coupe, lors de l'usinage à sec de l'acier dur, démontre que la plaquette de coupe de géométrie wiper présente de meilleures performances que celle de géométrie standard. Après 27,4 minutes d'usinage, la valeur d'usure en dépouille "VB" enregistrée sur la plaquette de coupe wiper est de 0,264 mm. Cependant, l'usure en dépouille de la plaquette de géométrie conventionnelle dépasse la valeur admissible d'usure en dépouille  $V_b=0,302$  mm. Dans ces conditions de coupe, les outils de coupe de géométrie wiper affichent de meilleures performances par rapport aux outils de coupe de géométrie standard, notamment en termes de durée de vie de l'outil.



**Figure IV.24:** Micrographies et images de l'évolution de l'usure en dépouille VB et de la forme des copeaux en fonction du temps d'usinage de la plaquette conventionnelle

Géométrie de plaquette : Wiper



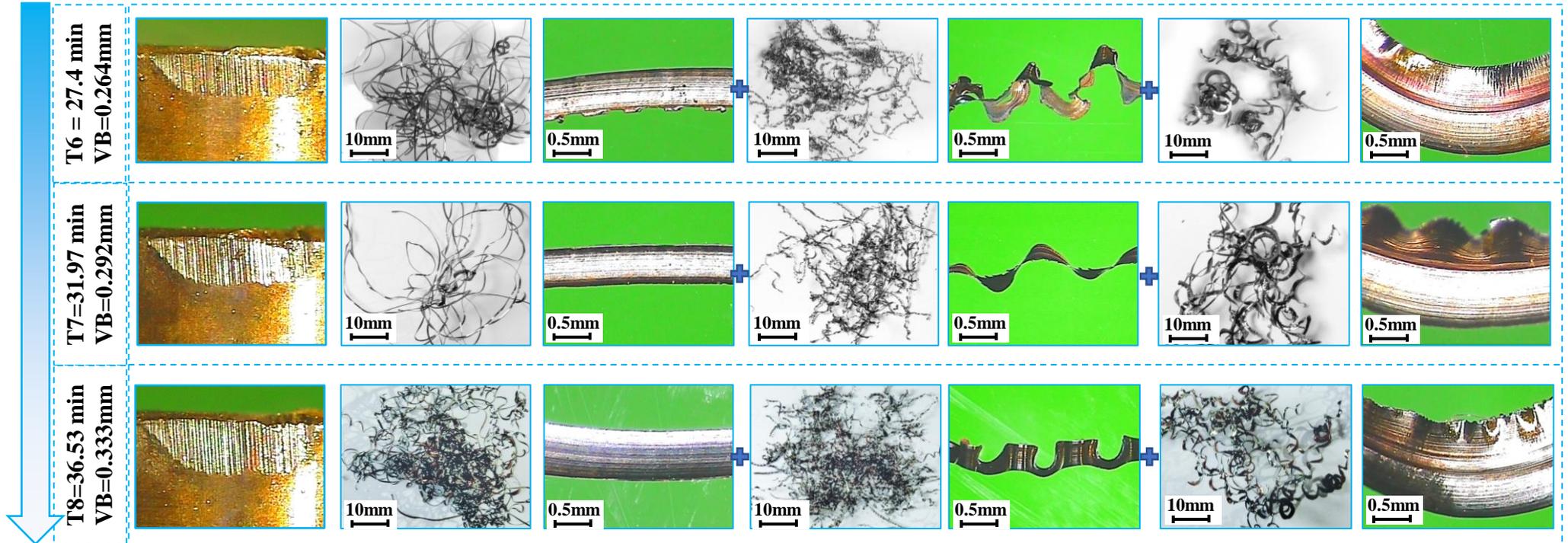


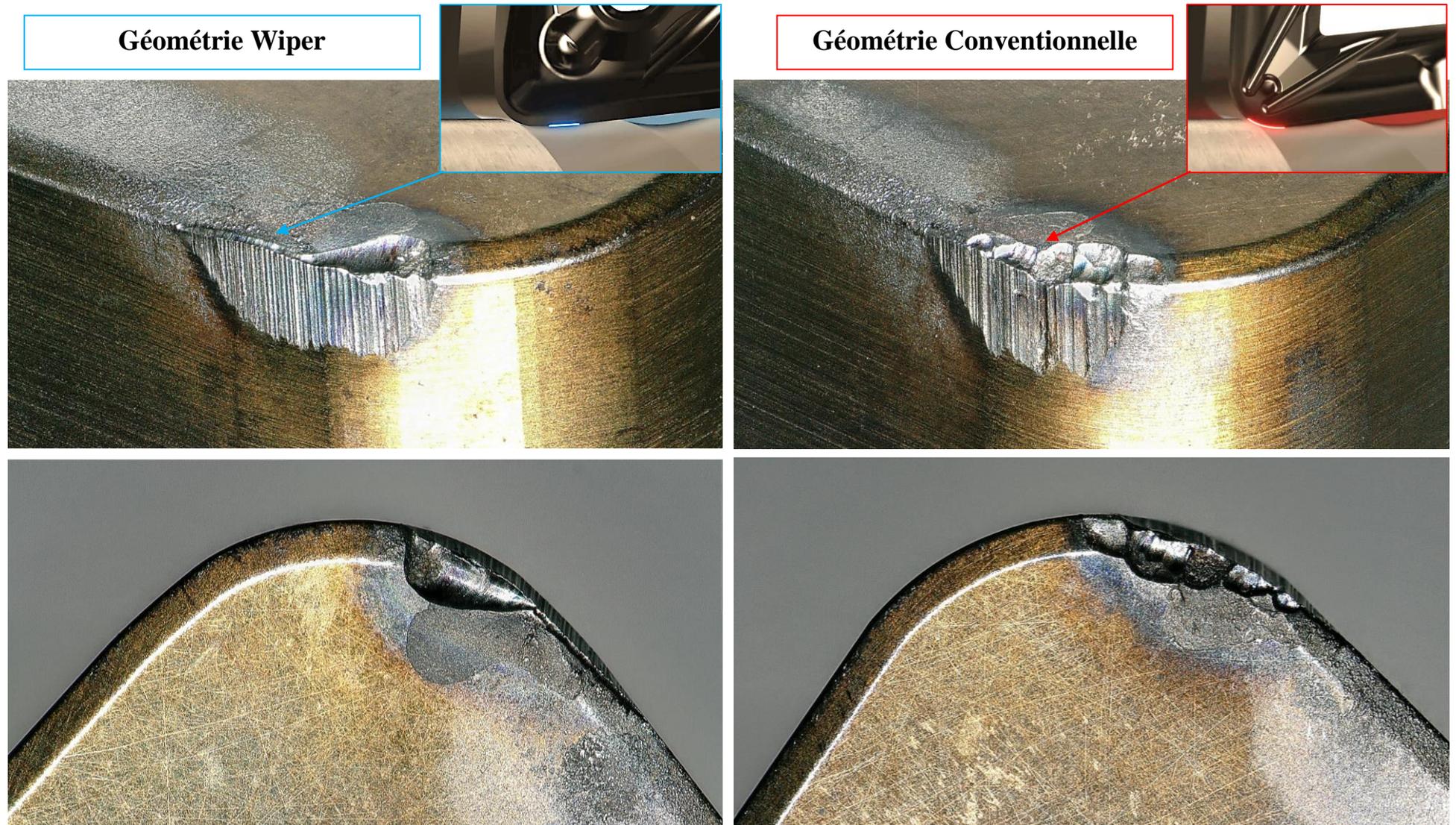
Figure IV.25: Micrographies et images de l'évolution de l'usure en dépouille VB et de la forme des copeaux en fonction du temps d'usinage de la plaquette wiper

La formation des copeaux est influencée par les conditions de coupe, la rhéologie et les propriétés thermoplastiques du matériau, le cisaillement variable dans la zone de coupe, la nature du contact outil-copeau et la réponse vibratoire de la machine-outil. Pour comprendre les mécanismes de coupe et comparer les deux types de plaquettes de coupe, il est essentiel d'analyser les copeaux. Dans cette partie de l'étude, nous avons examiné la relation entre l'évolution de l'usure des plaquettes de coupe et la forme des copeaux. À intervalles réguliers de 4,57 minutes d'usinage, les copeaux ont été collectés et examinés à l'aide d'un microscope optique, tant sur le plan géométrique que métallurgique. Les conditions de coupe ( $V_c = 160$  m/min,  $f = 0,08$  mm/tr,  $a_p = 0,2$  mm et  $r = 1,2$  mm) ont été maintenues constantes.

Les résultats de l'analyse de la formation des copeaux montrent macroscopiquement que l'usinage de l'acier dur avec une plaquette de coupe conventionnelle produit un copeau continu tout au long de la durée de vie de l'outil, dont la forme change en fonction de l'usure de la plaquette. Cela s'explique par le fait que cette géométrie de plaquette présente une seule surface de contact avec la pièce à usiner (le rayon de bec de l'outil/pièce). Selon la Figure IV.24, on observe qu'au début de l'usinage, pendant la phase de rodage, la forme du copeau est en arc continu. Ensuite, le copeau prend la forme d'un ruban continu et ne présente aucune instabilité pendant la deuxième phase d'usure progressive, qui évolue de manière relativement lente et linéaire. En revanche, à partir de 20 minutes d'usinage, correspondant à la troisième phase d'usure catastrophique, la forme du copeau devient hélicoïdale, s'enchevêtre en arc ondulant ou se détache avec formation de bandes de cisaillement intenses. Ces copeaux sont formés par une localisation de la déformation et un cisaillement catastrophique.

En ce qui concerne les résultats de la formation des copeaux générés par la seconde plaquette de coupe étudiée (géométrie wiper), ils sont présentés dans la Figure IV.25. Nous avons constaté que l'usinage de l'acier dur avec une plaquette de coupe de géométrie wiper produit plusieurs types de copeaux tout au long de la durée de vie de l'outil, en fonction de l'évolution de l'usure en dépouille. Comme expliqué précédemment dans le premier chapitre (Figure I.5), les plaquettes de coupe de géométrie wiper ont deux surfaces de contact avec le matériau à usiner. La première surface est définie par le contact entre le rayon de bec de l'outil et la pièce, tandis que la seconde surface est formée par le contact entre le méplat de la plaquette et la surface usinée, permettant ainsi d'essuyer les aspérités et de laisser une texture supérieure.

D'après cette figure, au début de l'usinage et pendant la phase d'usure initiale, nous observons deux types de copeaux. Le premier est généré par l'enlèvement de matière principale avec le rayon de bec de l'outil, présentant une forme de ruban continu. Le second type de copeau est formé par l'essuyage de la surface par le méplat de la plaquette de coupe de géométrie wiper, créant une forme d'arc continu. À partir de 10 minutes d'usinage, correspondant à la phase d'usure normale, nous avons remarqué la présence de trois types de copeaux. Le premier est un ruban continu correspondant à la matière enlevée par le rayon de bec de l'outil.



**Figure IV. 26 :** Images de l'usure en dépouille VB et en cratère par un microscope numérique des deux plaquettes de coupe wiper et conventionnelle à la fin de l'usinage

Un deuxième type de copeau présente une forme d'arc continue, tandis qu'un troisième type correspond à la fusion de ces deux copeaux, formant ainsi un seul copeau. Cette observation s'explique par le fait que la zone d'usure s'élargit jusqu'à atteindre la deuxième surface de contact entre le méplat de la plaquette et la pièce à usiner.

L'usure de l'outil joue un rôle crucial dans la détermination de la durée de vie de l'outil ainsi que dans l'intégrité de la surface obtenue lors de l'usinage. La Figure IV. 26 présente des images de la face de coupe des outils de coupe des deux types de plaquettes (wiper et conventionnelle) à la fin de l'usinage, obtenues à l'aide d'un microscope numérique. Les images montrent que les deux outils ne présentaient pas une excellente résistance au flux de copeaux à haute température sur leur face de coupe. Après 36,53 minutes d'usinage pour la plaquette de géométrie wiper et 31,97 minutes pour la plaquette de géométrie conventionnelle, nous remarquons la présence d'une large bande d'usure en dépouille VB et également une usure en forme de cratère sur le chanfrein de la plaquette de coupe.

D'après les images de la Figure IV. 26, pour les deux types de plaquettes de coupe, la couche mince de revêtement en TiN a été arrachée autour de l'usure en cratère après cette durée d'usinage. Cette situation est attribuée à l'augmentation des contraintes résiduelles et au frottement des copeaux contre la surface d'attaque de l'outil à haute température. Un revêtement réussi doit présenter une adhérence adéquate et des conditions de contrainte favorables pour éviter l'écaillage. L'écaillage des outils peut s'être produit en raison d'une mauvaise adhérence entre le revêtement et le matériau du substrat. Par ailleurs, nous pouvons également observer, pour les deux plaquettes de coupe, la présence d'usure par abrasion avec des marques abrasives ressemblant à des micro-rayures.

L'analyse des images montre clairement les conséquences de l'usure sur les outils de coupe. Après une durée d'usinage prolongée, les plaquettes de coupe présentent des signes d'usure significatifs, tels que l'usure en dépouille VB et les cratères sur les chanfreins. Ces phénomènes sont attribués à divers facteurs, tels que l'augmentation des contraintes résiduelles et le frottement intense des copeaux à haute température. Il est essentiel que les revêtements de surface possèdent une adhérence appropriée et des caractéristiques de contrainte favorables pour éviter l'écaillage.

Les deux types de plaquettes de coupe présentent des signes d'usure par abrasion, manifestés par des marques abrasives sous la forme de micro-rainures. Ces marques sont le résultat du contact répété entre les copeaux et la surface d'attaque de l'outil. L'usure par abrasion peut altérer la qualité de la surface usinée et affecter les performances globales de l'outil.

Des analyses approfondies au microscope à balayage électronique (MEB) ont été réalisées pour examiner l'usure des plaquettes de coupe à géométrie wiper et conventionnelle lors de l'usinage de l'acier AISI H11. Les micrographies présentées dans les figures IV. 27, IV. 28, IV. 29 et IV. 30 montrent clairement les phénomènes d'usure en dépouille et en cratère des outils, avec le temps total d'usinage indiqué entre parenthèses.

La présence d'une bande de rayures (marques linéaires parallèles) sur la surface en dépouille des outils indique la présence de mécanismes d'usure abrasive et adhésive. En effet, l'abrasion, la diffusion et l'adhérence sont des mécanismes d'usure importants, notamment sur les faces de dépouille et de dégagement des plaquettes de coupe. De plus, on peut observer une usure en cratère, ce qui suggère un mécanisme d'usure par diffusion, principalement au niveau de la face de coupe. Ces mécanismes d'usure par abrasion, adhérence et diffusion sont actifs dans les deux types d'outils étudiés.

L'usure par abrasion est généralement considérée comme le mécanisme d'usure principal lors du tournage dur. Cependant, en raison des températures élevées et des contraintes importantes associées au tournage dur, l'usure par diffusion peut également se produire. Des réactions chimiques, telles que l'oxydation à haute vitesse en raison des températures élevées de coupe, peuvent également se produire. Les propriétés chimiques des matériaux des outils de coupe et des pièces à usiner peuvent jouer un rôle crucial, en particulier à des vitesses de coupe élevées où la température de coupe peut accélérer les réactions chimiques.

Les observations montrent que les deux types de plaquettes de coupe, à géométrie wiper et conventionnelle, sont affectés par l'usure adhésive. L'usure par diffusion activée chimiquement est plus prononcée dans le cas des matériaux d'outils de coupe en céramique revêtus de TiN. Ces résultats mettent en évidence l'importance de comprendre les mécanismes d'usure et les interactions chimiques qui se produisent lors de l'usinage. Ils soulignent également la nécessité de développer des matériaux d'outils et des revêtements de surface adaptés pour améliorer la résistance à l'usure et prolonger la durée de vie des outils de coupe dans des conditions de coupe exigeantes.

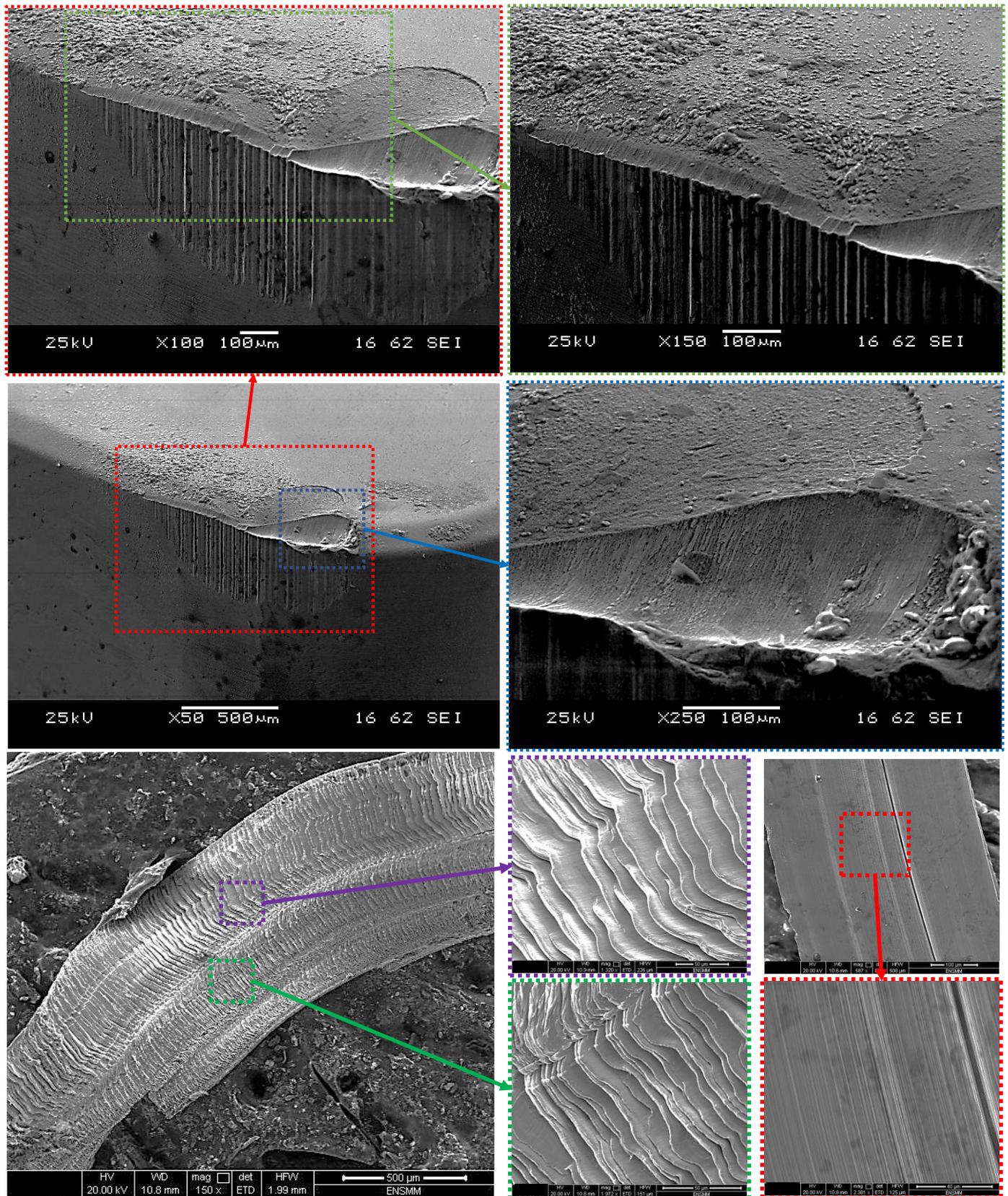


Figure IV. 27 : Morphologie de l'usure en dépouille VB, en cratère et un copeau par MEB de la plaquette de coupe de géométrie Wiper à la fin de l'usinage « T=36.53min »

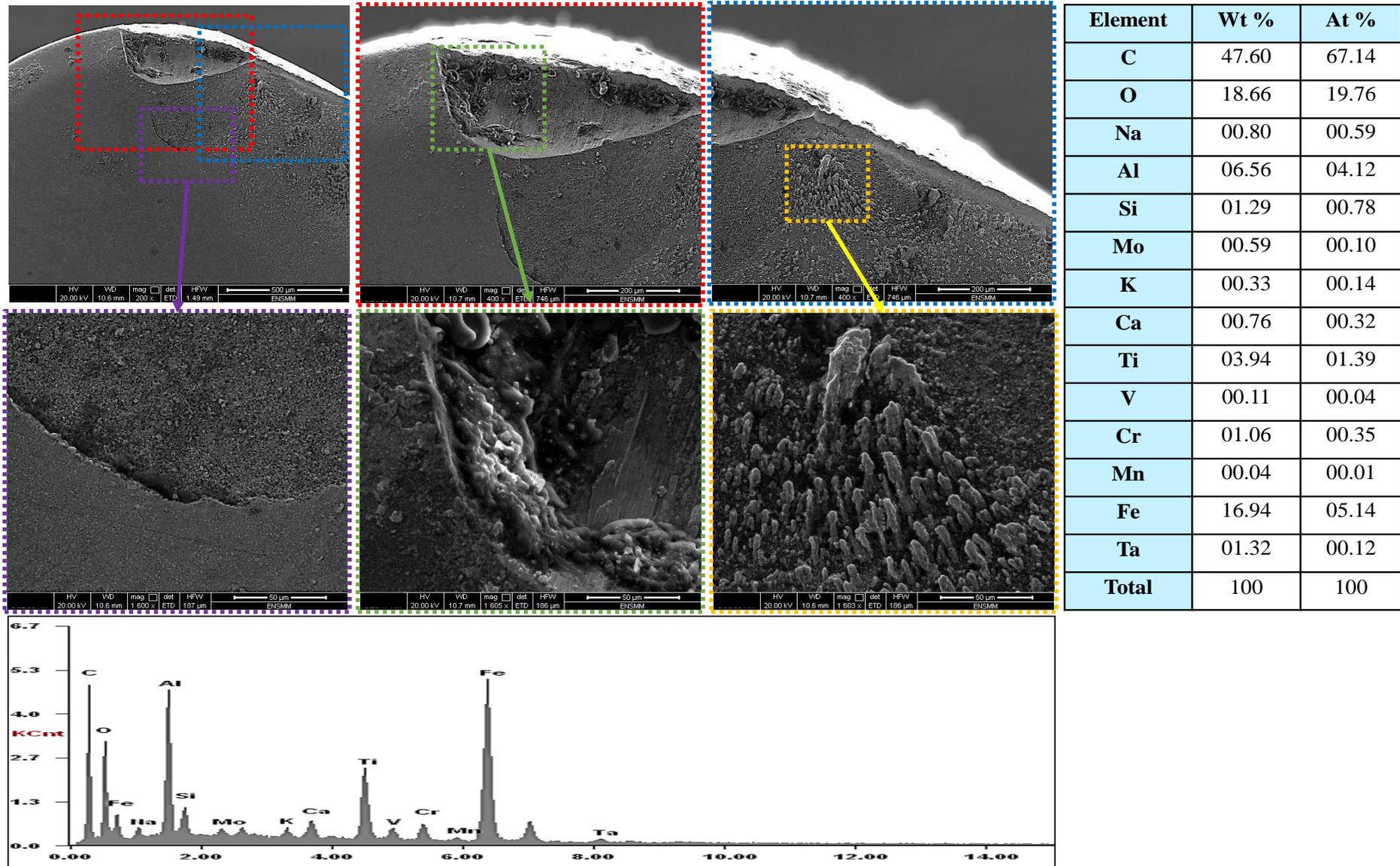


Figure IV. 28 : Analyse EDS et micrographie au MEB de l'usure en cratère de la plaquette de coupe de géométrie conventionnelle à la fin de l'usinage « T=31.97min »

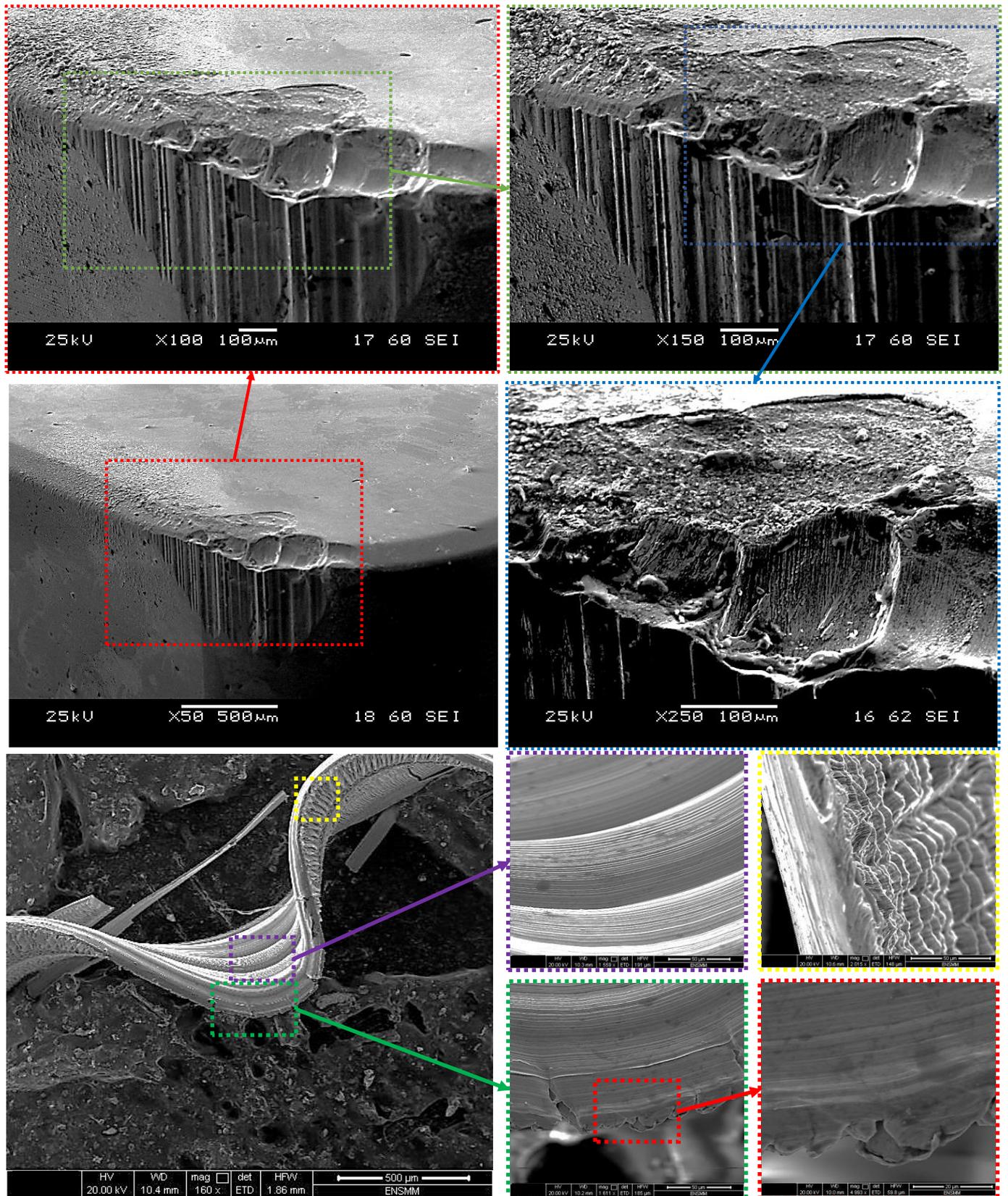


Figure IV. 29 : Morphologie de l'usure en dépouille VB, en cratère et un copeau par MEB de la plaquette de coupe de géométrie conventionnelle à la fin de l'usinage « T=31.97min »

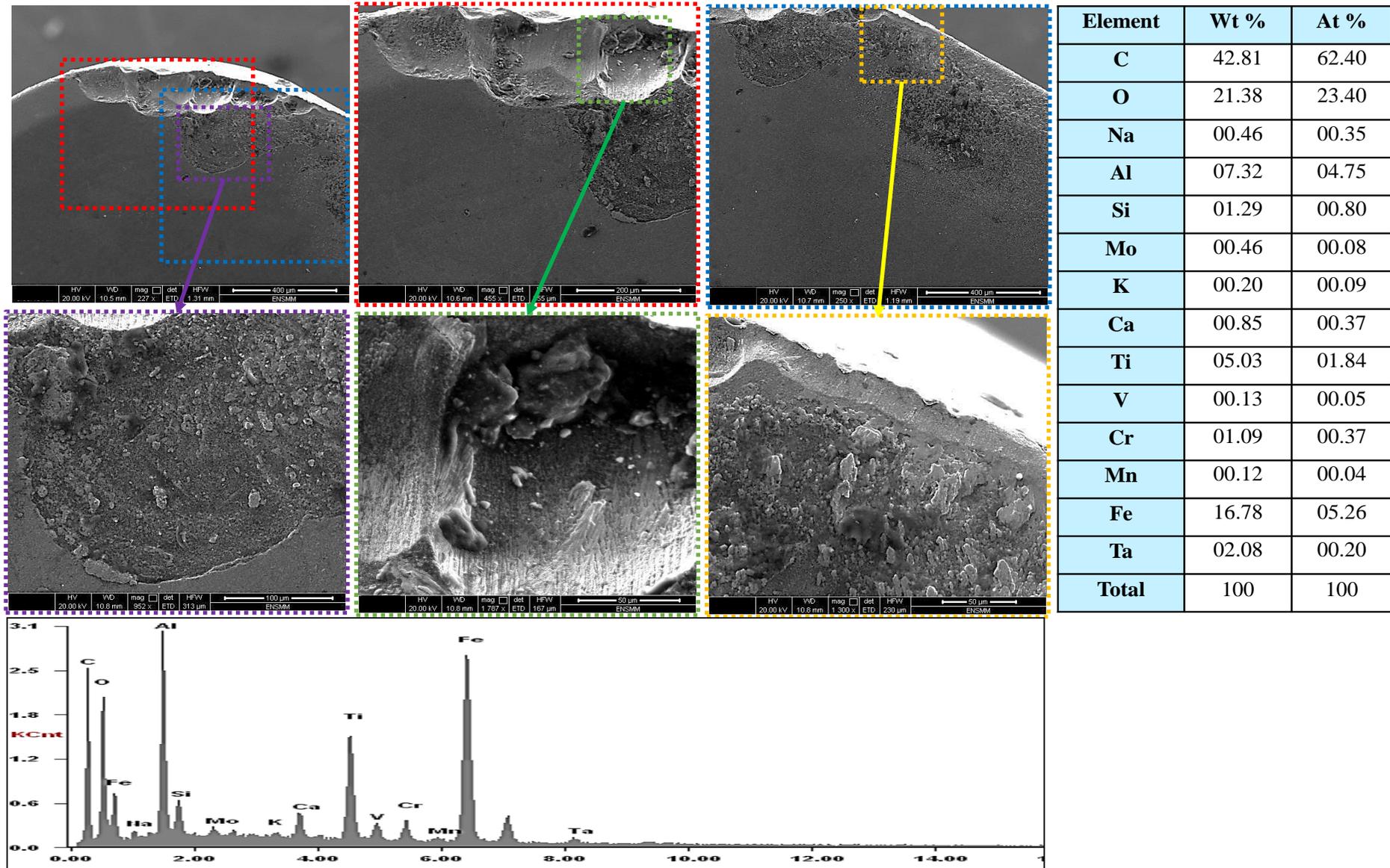


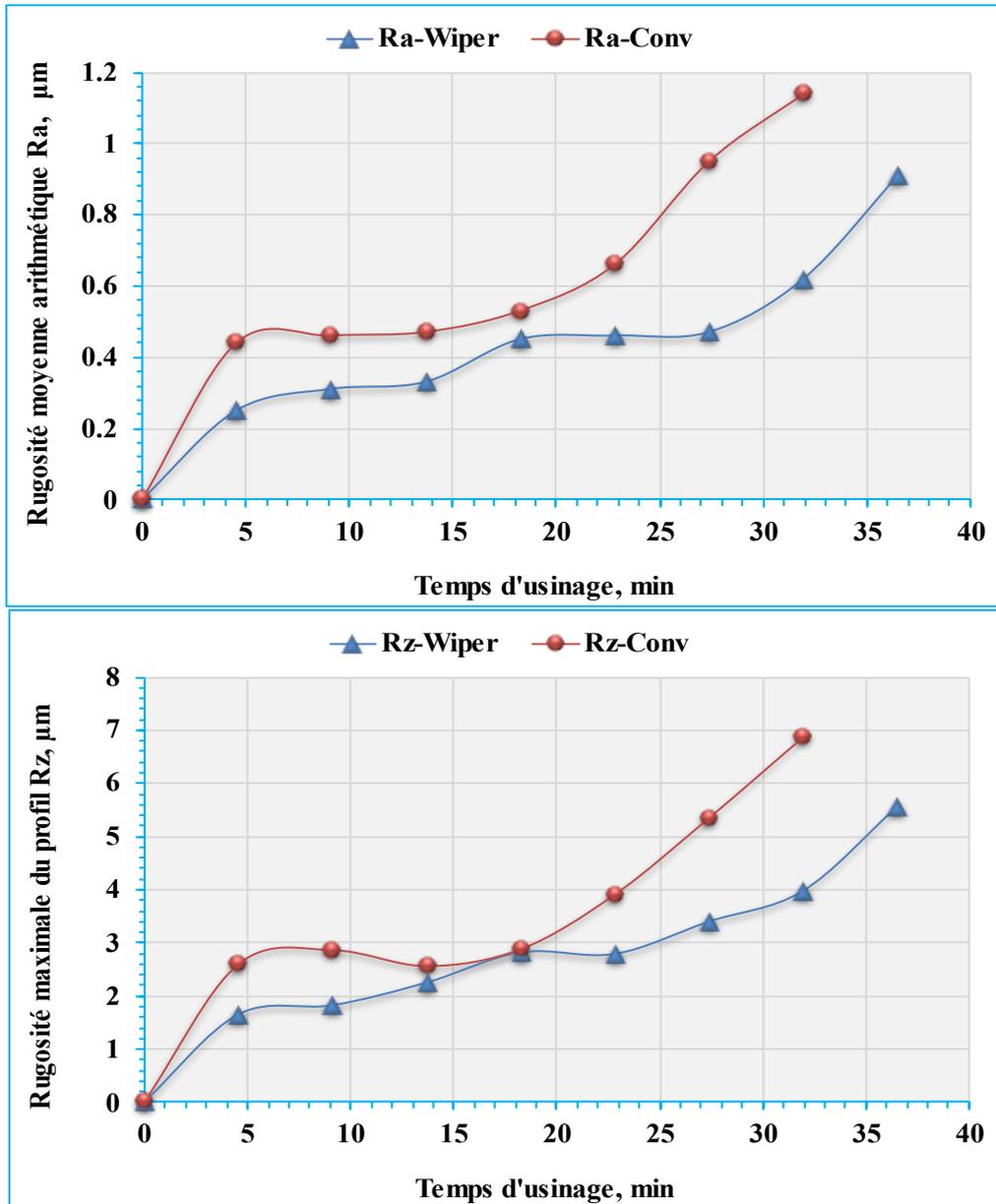
Figure IV. 30 : Analyse EDS et micrographie au MEB de l'usure en cratère de la plaquette de coupe de géométrie conventionnelle à la fin de l'usinage « T=31.97min »

Les résultats d'analyse au microscope électronique à balayage (MEB) des surfaces d'attaque des deux plaquettes de coupe (wiper et conventionnelle) sont présentés dans les figures Figure IV. 28 et Figure IV. 30. Nous pouvons observer que l'usure des deux outils est une combinaison d'adhérence, d'écaillage et d'abrasion, ce qui a été confirmé par le spectre EDS. Les copeaux collés, l'adhérence du matériau de la pièce et les signes d'accumulation de matériau sur l'outil sont clairement visibles sur la face de coupe des outils de coupe.

La morphologie des copeaux et le mécanisme de formation des copeaux jouent un rôle crucial dans la compréhension des performances de l'outil de coupe. Les figures Figure IV. 27 et Figure IV. 29 montrent les résultats de la numérisation des copeaux produits à la fin de l'usinage des deux plaquettes étudiées, réalisée à l'aide du microscope électronique à balayage (MEB). Nous pouvons observer que la plaquette wiper, en fin de vie, génère de larges copeaux qui résultent de la fusion des deux copeaux produits par l'enlèvement de matériau avec le rayon de bec de l'outil et par la surface méplat de la plaquette. En revanche, les plaquettes de coupe à géométrie conventionnelle génèrent des copeaux hélicoïdaux. D'après ces deux figures, les copeaux formés par les deux plaquettes de coupe présentent une forte dentelure avec la formation complète de dents dentelées primaires et secondaires.

#### **IV. 5. 2. Evolution de la rugosité de surface en fonction de temps d'usinage**

Dans cette section, nous avons également mesuré la rugosité de la surface usinée en fonction du temps de coupe et donc de l'usure de l'outil. L'impact du temps de coupe sur la qualité de la surface usinée est souvent discuté dans les études sur l'usinage de matériaux difficiles. Des mesures de rugosité de surface ont été effectuées à chaque intervalle de coupe de 100 mm. Trois lectures ont été prises à trois points différents de la circonférence, espacés de 120 degrés. Les Figure IV. 31 et Figure IV. 32 présentent l'évolution des paramètres de rugosité ( $R_a$  et  $R_z$ ) en fonction du temps d'usinage pour les deux plaquettes de coupe testées, à savoir la géométrie wiper et la géométrie conventionnelle, avec des valeurs de  $V_c$  (vitesse de coupe) de 160 m/min,  $f$  (avance) de 0,08 mm/tr,  $a_p$  (profondeur de passe) de 0,20 mm et un rayon de bec de 1,2 mm.



**Figure IV. 31 :** Influence du temps d'usinage sur des critères de rugosité (a) Ra et (b) Rz, des deux plaquettes de coupe testées pour  $V_c = 160 \text{ m / min}$ ,  $f = 0,08 \text{ mm}$ ,  $a_p = 0,20 \text{ mm}$  et  $r=1.2\text{mm}$

Il est observé que tout au long de l'usinage, les valeurs de rugosité de surface (Ra et Rz) obtenues avec les plaquettes de géométrie wiper sont nettement inférieures à celles des plaquettes conventionnelles. De plus, les deux figures permettent d'expliquer cette relation de la manière suivante.

Dans la première plage de temps, où la durée d'usinage est inférieure à 16 minutes, les deux types de plaquettes de coupe offrent une meilleure qualité de surface, indépendamment du rayon de bec. Cependant, lorsque l'usure excessive en dépouille se développe au-delà de 16 minutes, l'augmentation de l'effort de coupe et de la température peut perturber le processus d'usinage, ce qui se traduit par une dégradation de la qualité de surface. Par exemple, à la fin de l'usinage, la durée de vie de l'outil a été enregistrée comme suit :  $T_{Gp\_wiper} = 33 \text{ min}$ ,  $T_{Gp\_Conv} = 27.4 \text{ min}$ . Ces valeurs correspondent aux critères de rugosité de surface (Ra et Rz) avec des valeurs de

(0.64 et 4.3)  $\mu\text{m}$  pour la plaquette de coupe de géométrie wiper, et des valeurs de (0.95 et 5.34)  $\mu\text{m}$  pour la plaquette de coupe de forme standard.

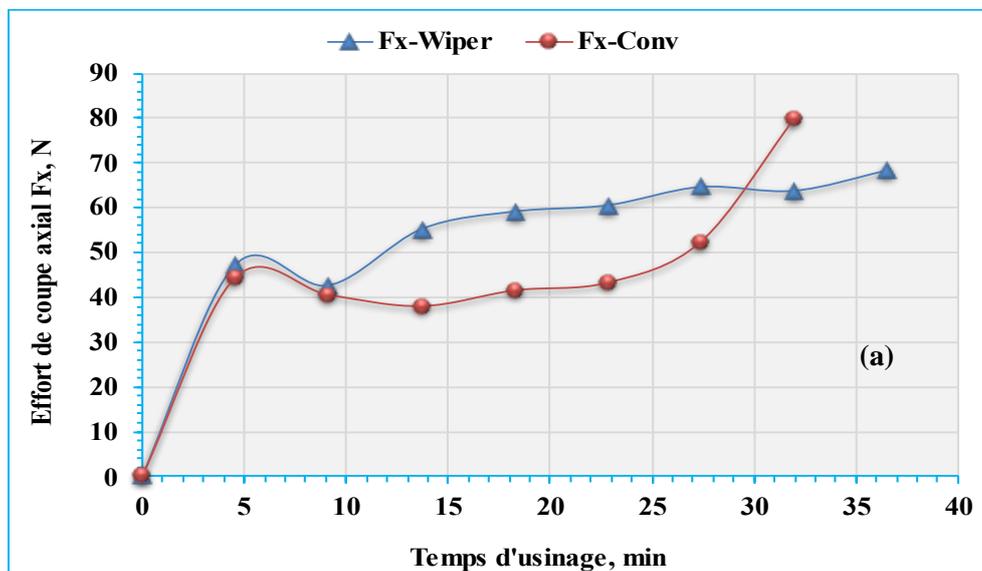
#### IV. 5. 3. Évolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage

La Figure IV. 32 (a, b et c) présente l'évolution des trois composantes de l'effort de coupe en fonction du temps d'usinage lors du tournage dur de l'acier AISI H11 traité à 60 HRC, utilisant les plaquettes de coupe de géométrie wiper et conventionnelle, avec les paramètres de coupe suivants :  $V_c = 160 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,08 \text{ mm/tr}$ ,  $a_p = 0,20 \text{ mm}$  et  $r = 1,2 \text{ mm}$ .

Il est observé que les efforts de coupe augmentent au fur et à mesure de l'usure en dépouille. Cette augmentation est due à l'évolution de l'usure sur les surfaces de coupe et de dépouille de l'outil. En conséquence, la surface de contact entre la pièce et l'outil augmente, ce qui entraîne une augmentation des forces de friction et des forces de coupe.

L'analyse des résultats présentés dans cette figure montre également que, au début de l'usinage, les courbes des efforts de coupe des deux plaquettes de coupe testées sont très similaires, mais les valeurs obtenues avec la plaquette wiper sont légèrement supérieures à celles obtenues avec la plaquette de géométrie conventionnelle.

Après 9 minutes d'usinage, les deux courbes commencent à diverger et les valeurs des efforts de coupe générés par la plaquette de coupe wiper augmentent de manière significative par rapport à l'autre plaquette. Cette augmentation est due à la forme de bec de l'outil utilisé par la plaquette wiper. Contrairement à la géométrie standard, l'arête de coupe de la plaquette wiper présente un grand rayon principal complété par plusieurs rayons plus petits. Lorsque la géométrie wiper est en contact avec la pièce pendant une durée supérieure à celle du rayon de nez équivalent de la plaquette de géométrie standard, elle a tendance à essuyer ou à polir la surface usinée, ce qui produit une texture de surface plus lisse. Cela entraîne une augmentation des frottements dans la zone de coupe.



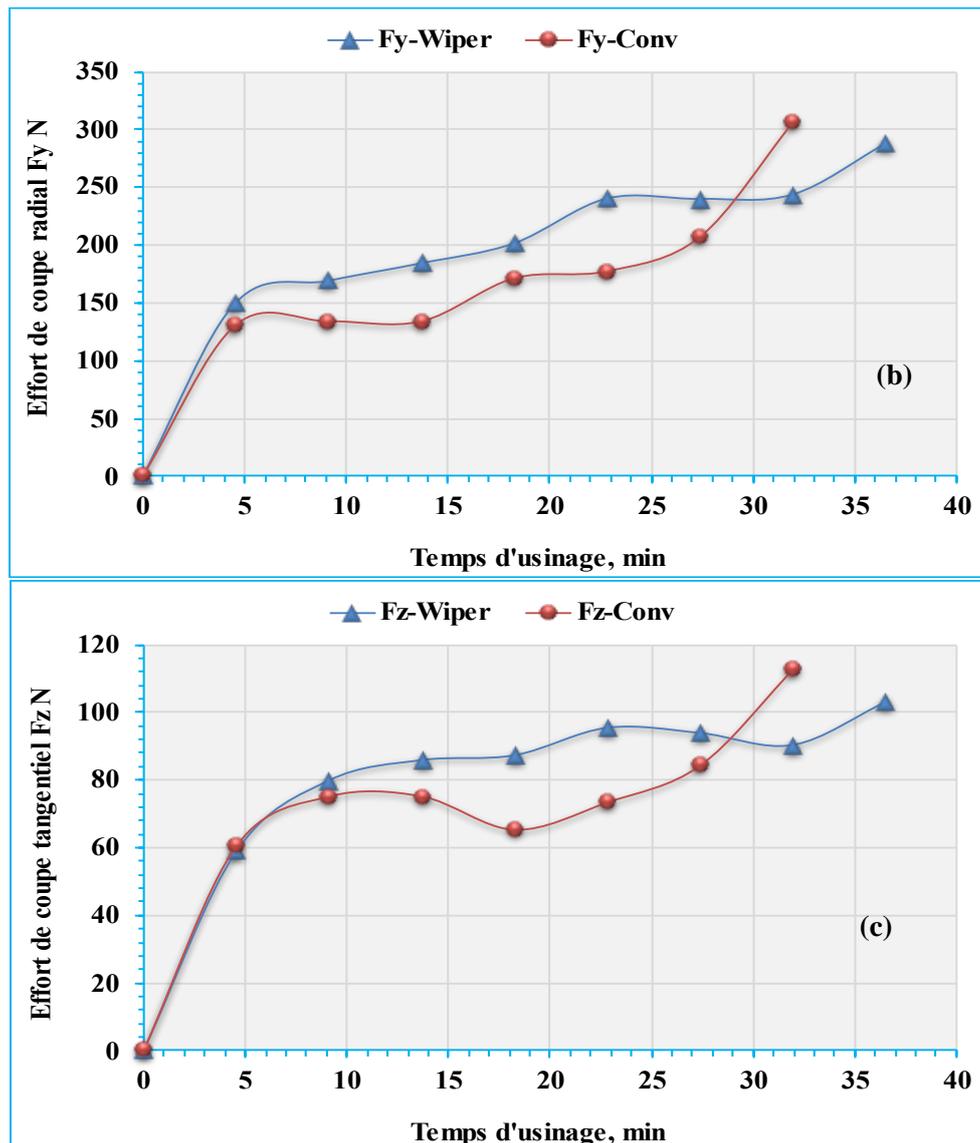


Figure IV. 32 : Influence du temps d'usinage sur des efforts de coupe (a)  $R_a$  et (b)  $R_z$  et (c)  $R_z$ , des deux plaquettes de coupe testées pour  $V_c = 160$  m / min,  $f = 0,08$  mm,  $a_p = 0,20$  mm et  $r=0.8$ mm

#### IV. 5. 4. Analyse tridimensionnelle 3D de l'usure des outils

Pour comparer et analyser les performances des géométries d'outils de coupe en termes de durée de vie, il est nécessaire d'étudier les performances d'usure des deux plaquettes de coupe en examinant les modes et les mécanismes d'usure qui se produisent à la surface des outils lors du tournage d'aciers durs. Plusieurs essais et méthodes permettent de tirer des conclusions sur l'influence des conditions de coupe sur la durée de vie de l'outil, en suivant l'usure en dépouille conformément à la norme ISO 3685. De plus, des technologies avancées telles que la microscopie à variation de focalisation (FVM) seront également utilisées pour permettre une évaluation approfondie des modes d'usure des outils et des mesures tridimensionnelles de l'usure en volume 3D (écaillage) et de l'arête rapportée.

Boing et al. [137] ont proposé et appliqué des paramètres d'usure tridimensionnels basés sur la microscopie à variation focale (FVM) pour évaluer le processus d'usinage, en particulier le

tournage d'aciers trempés avec des outils PCBN. Les paramètres WRM (volume de matériau retiré de l'outil), WMD (profondeur maximale du défaut dans l'outil), WAA (zone d'outil affectée), WAM (volume de matériau collé sur l'outil) et WMH (hauteur maximale du défaut sur l'outil) peuvent être utilisés pour identifier le niveau d'usure de l'outil et comme données complémentaires pour discuter des phénomènes d'usinage, tels que les mécanismes d'usure de l'outil. De plus, l'effet de la variation des paramètres de processus (par exemple, la vitesse de coupe et la dureté du matériau usiné) sur la distribution de l'usure de l'outil est facilement identifiable avec les paramètres d'usure tridimensionnels, qui englobent tous les phénomènes d'usure de l'outil dans une mesure d'usure tridimensionnelle.

Cette partie de la thèse s'est focalisée sur l'analyse et la comparaison du niveau d'usure des deux plaquettes de coupe à géométrie wiper et standard en utilisant les nouveaux paramètres d'usure tridimensionnels (usure volumique 3D) basés sur le microscope à variation de focalisation (FVM) Alicona Infinite Focus G5. Ce microscope optique a été utilisé pour effectuer ces analyses, fournissant une compréhension approfondie de l'usure de l'outil dans tous les cas étudiés. Le FVM est un interféromètre à lumière blanche qui permet d'obtenir des mesures précises et détaillées. Grâce au système de mesure 3D, plusieurs aspects ont été étudiés, tels que l'usure volumique tridimensionnelle des plaquettes et la rugosité des copeaux et des pièces usinées, conformément à la norme ISO 4288. De plus, le microscope offre la capacité de numériser de grandes zones des pièces grâce à un mouvement automatique horizontal le long des axes X et Y (assemblage d'images). La résolution verticale du microscope est de 10 nm, tandis que la résolution latérale est de 400 nm.

#### IV. 5. 4. 1 Procédures de numérisation 3D et de post-traitement

Avant de procéder aux essais de tournage, chaque arête de coupe a été mesurée à l'aide du système FVM afin de créer une géométrie de référence pour le calcul de l'usure volumique 3D. Après les essais d'usinage, les arêtes de coupe ont été à nouveau mesurées. La Figure IV. 33 présente les procédures appliquées dans ce processus.

Les paramètres résultants extraits du processus à l'aide du logiciel Alicona sont :

- **Volume des pics  $V_p$**  : le volume total de matériau dépassant la surface de référence de l'insert d'origine ;
- **Volume des vallées  $V_v$**  : le volume total de matériau sous la surface de référence de l'insert d'origine ;
- **Volume des pics incrémentaux  $V_{pdiscr}$**  : le volume total de matière dépassant la surface de référence délimitée par la passe précédente ;
- **Volume des Vallées Incrementales  $V_{vdiscr}$**  : le volume total de matériau sous la surface de référence délimitée par la passe précédente.

Les paramètres  $V_p$  et  $V_{pdiscr}$  permettent d'estimer l'arête rapportée sur le bec de l'outil, tandis que  $Vv$  et  $Vvdiscr$  permettent d'évaluer l'usure volumique 3D. L'ISO 8785 :1998 [138] définit les termes et paramètres liés aux imperfections de surface.

**Tableau V.13** : Paramètres d'usure tridimensionnels (3D)

Paramètre	Unité	Définition
$W_{RM}$	$\mu\text{m}^3$	Volume de matière enlevée de l'outil par rapport à la surface de référence
$W_{MD}$	$\mu\text{m}$	Profondeur maximale du défaut par rapport à la surface de référence
$W_{AA}$	$\mu\text{m}^2$	Zone d'outil affectée par rapport à la surface de référence
$W_{AM}$	$\mu\text{m}^3$	Volume de matière adhérente sur l'outil par rapport à la surface de référence
$W_{MH}$	$\mu\text{m}$	Défaut de hauteur maximum par rapport à la surface de référence

En superposant les ensembles de données (arête de coupe avant et après les tests d'usinage) et en utilisant les paramètres extraits de ce processus à l'aide du logiciel "MEASURE SUITE" (voir Figure IV. 33), il devient possible d'identifier les paramètres d'usure tridimensionnels proposés par Boing et al. [137], tels que définis dans le tableau. Les paramètres  $W_{RM}$  (Volume des pics retiré de l'outil) et  $W_{MD}$  (Profondeur maximale du défaut dans l'outil) représentent le phénomène se produisant sous la surface de référence, et ils indiquent l'usure de l'outil selon la norme ISO 3685:1993. Ils mesurent les changements de forme de l'outil par rapport à sa forme d'origine pendant la coupe, résultant de la perte progressive de matériau de l'outil ou de la déformation.

Cependant, l'interaction entre l'arête de coupe et la pièce pendant l'usinage peut entraîner l'adhérence de matériau sur l'arête de coupe ou sur les surfaces de dégagement après le processus d'usinage, ce qui fait également partie du système tribologique et contribue à l'usure de l'outil. Dans ce cas, les paramètres  $W_{AM}$  (Volume de matériau collé sur l'outil) et  $W_{MH}$  (Hauteur maximale du défaut sur l'outil) indiquent les défauts présents au-dessus de la surface de référence. Le paramètre  $W_{AA}$  (Zone d'outil affectée) englobe toutes les altérations des surfaces d'arête de coupe utilisées par rapport aux surfaces de référence (fraîches) [137].

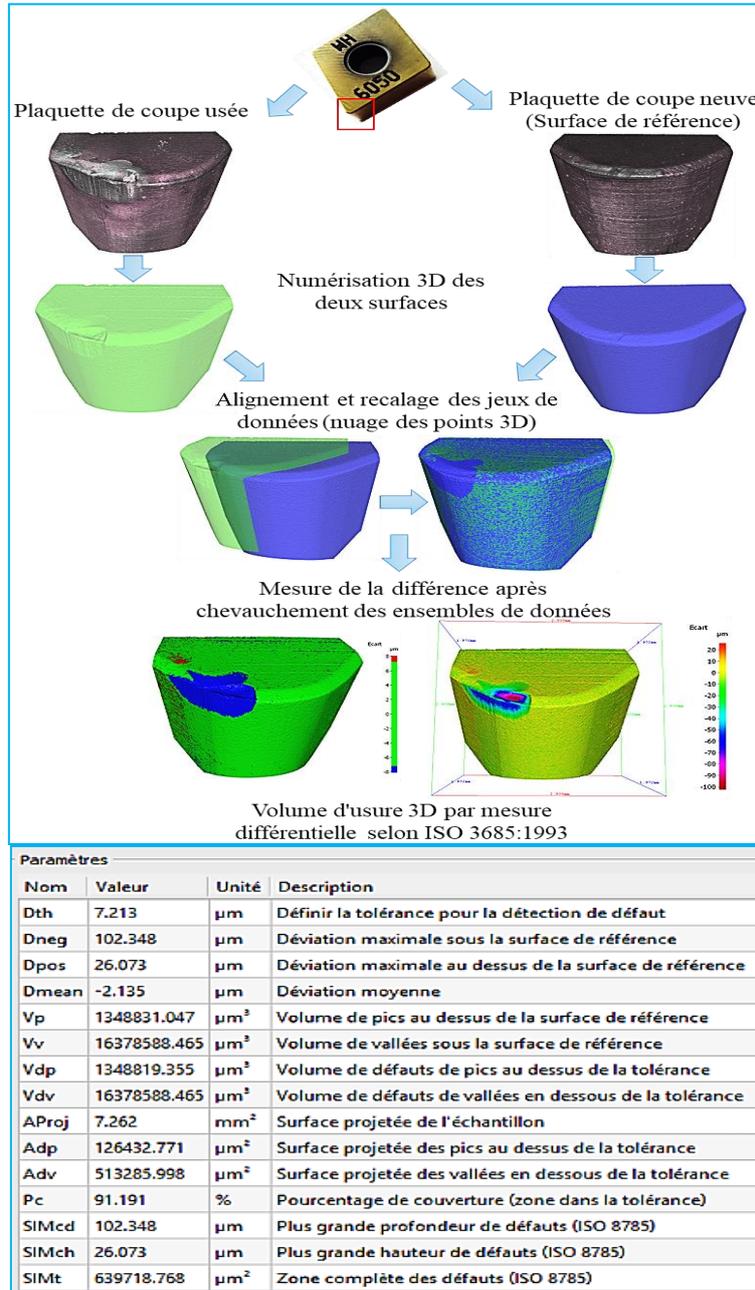
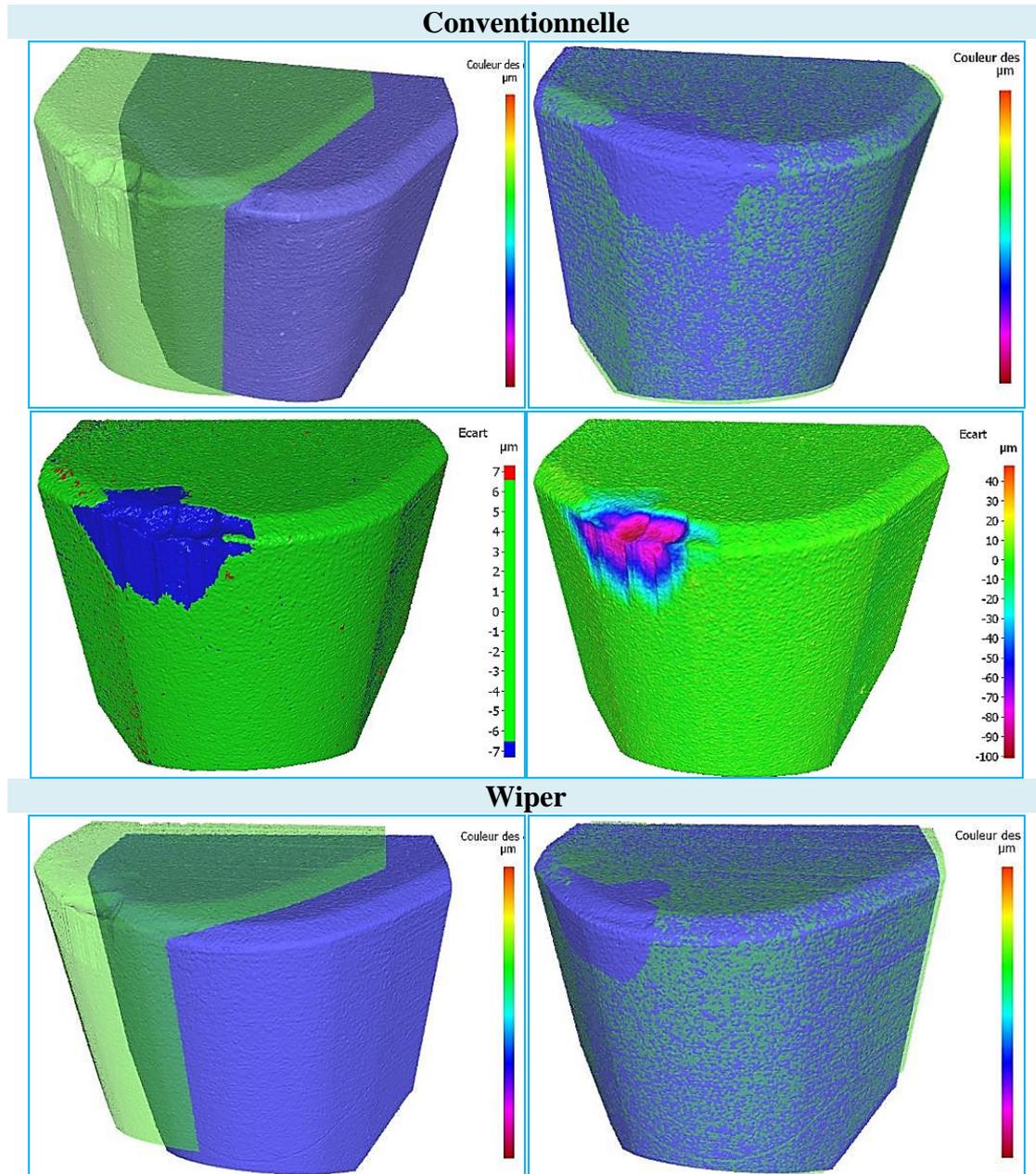


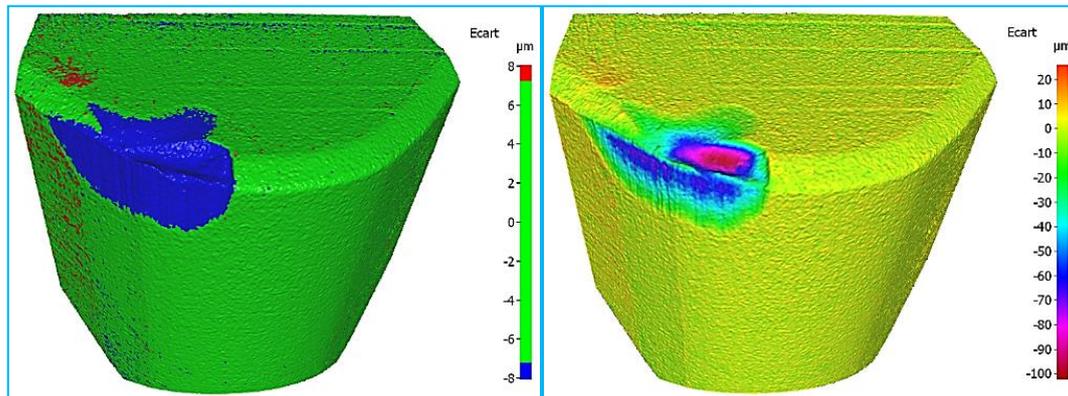
Figure IV. 33 : Illustration de la méthodologie utilisée pour identifier le volume d'usure tridimensionnel.

Les résultats obtenus avec le microscope à variation de focalisation (FVM) sont pratiquement similaires à ceux obtenus avec le microscope numérique Keyence pour analyser l'usure en dépouille. Par conséquent, le même support a été utilisé et une procédure similaire avec le microscope a été suivie pour capturer les topographies 3D des arêtes de coupe (images 3D). Les paramètres tridimensionnels basés sur la technologie de variation de focalisation sont un outil approprié pour évaluer la progression de l'usure et la morphologie des arêtes de coupe, principalement dans le processus de tournage à un seul point.

Ces paramètres ont également un fort potentiel pour être utilisés dans d'autres processus et outils d'usinage, tels que le micro-fraisage, le micro-perçage, les composants d'ultra-précision et

l'usure des fraises à bout hémisphérique, pour n'en citer que quelques-uns. Ils permettent d'obtenir une compréhension approfondie de l'usure des arêtes de coupe et de surveiller leur évolution au fil du temps. Ainsi, ils contribuent à l'amélioration des performances des outils d'usinage et à l'optimisation des processus de fabrication de pièces de précision.





**Figure IV.34:** Topographie 3D des zones d'usure des deux plaquettes de coupe testées (conventionnelle et wiper)

La Figure IV.34 illustre les topographies 3D des zones d'usure des deux plaquettes de coupe testées après des durées d'usinage de  $T=31.97$  min et  $36.53$  min, correspondant à la fin de leur durée de vie. Le Tableau 14 présente les paramètres statistiques extraits de ce processus à l'aide du logiciel "MEASURE SUITE" pour les deux plaquettes de coupe testées (wiper et conventionnelle). La Figure IV.35 montre la micro-géométrie d'arête de la plaquette de coupe à géométrie standard avant et après l'usinage des deux plaquettes de coupe testées.

Ces données fournissent des informations précieuses sur l'évolution de l'usure des arêtes de coupe au cours du processus d'usinage. Les topographies 3D permettent d'observer les changements de forme et de surface des arêtes de coupe, mettant en évidence les zones d'usure et les altérations subies par les plaquettes de coupe. Les paramètres statistiques extraits fournissent une évaluation quantitative de l'usure, permettant de comparer les performances des deux types de plaquettes de coupe.

La micro-géométrie d'arête des plaquettes de coupe à géométrie standard avant et après l'usinage est également présentée, offrant une vue détaillée de l'évolution de la forme des arêtes de coupe. Ces informations sont essentielles pour comprendre les mécanismes d'usure et pour évaluer l'efficacité des plaquettes de coupe dans des conditions d'usinage spécifiques.

Ces résultats contribuent à l'avancement des connaissances sur l'usure des plaquettes de coupe et fournissent des informations précieuses pour l'amélioration des outils d'usinage et l'optimisation des processus de fabrication.

**Tableau 14 :** Paramètres statistiques extraits de ce processus avec le logiciel « MEASURE SUITE » des deux plaquettes de coupe testées (conventionnelle et wiper)

Paramètres 3D d'usure				
Nom	Gp-Wiper	GP-Standard	Unité	Description
Vp	1348831.047	828793.152	$\mu\text{m}^3$	Volume de pics au-dessus de la surface de référence
Vv	16378588.47	17950410.59	$\mu\text{m}^3$	Volume de vallées sous la surface de référence
Vdp	1348819.355	828793.152	$\mu\text{m}^3$	Volume de défauts de pics au-dessus de la tolérance
Vdv	16378588.47	17950410.59	$\mu\text{m}^3$	Volume de défauts de vallées en dessous de la tolérance
SIMcd	102.348	100.964	$\mu\text{m}$	Plus grande profondeur de défauts (ISO 8785)
SIMch	26.073	47.91	$\mu\text{m}$	Plus grande hauteur de défauts (ISO 8785)

<b>SIMt</b>	639718.768	597853.296	$\mu\text{m}^2$	Zone complète des défauts (ISO 8785)
<b>Dth</b>	7.213	6.538	$\mu\text{m}$	Définir la tolérance pour la détection de défaut
<b>Dneg</b>	102.348	100.964	$\mu\text{m}$	Déviations maximale sous la surface de référence
<b>Dpos</b>	26.073	47.91	$\mu\text{m}$	Déviations maximale au-dessus de la surface de référence
<b>Dmean</b>	-2.135	-2.439	$\mu\text{m}$	Déviations moyenne
<b>AProj</b>	7.262	7.226	$\text{mm}^2$	Surface projetée de l'échantillon
<b>Adp</b>	126432.771	86856.107	$\mu\text{m}^2$	Surface projetée des pics au-dessus de la tolérance
<b>Adv</b>	513285.998	510997.19	$\mu\text{m}^2$	Surface projetée des vallées en dessous de la tolérance
<b>Pc</b>	91.191	91.727	%	Pourcentage de couverture (zone dans la tolérance)

L'analyse des images topographiques des deux plaquettes de coupe a révélé que la plaquette de coupe à géométrie wiper présentait la plus petite cavité en cratère sur sa face de coupe. Cette observation a été confirmée par l'analyse des paramètres d'usure tridimensionnels des deux plaquettes de coupe, comme indiqué dans le Tableau 15. Les valeurs de ces paramètres ont été calculées en se basant sur la médiane des deux répétitions effectuées.

Il est intéressant de noter que le volume de matière enlevée de l'outil par rapport à la surface de référence ( $W_{RM} = 16378588.47 \mu\text{m}^3$ ) était plus faible pour la plaquette de coupe à géométrie wiper que pour la plaquette de coupe à géométrie standard ( $W_{RM} = 17950410.59 \mu\text{m}^3$ ). Cela suggère que la plaquette de coupe à géométrie wiper présente une usure moins prononcée et une meilleure résistance à l'enlèvement de matière par rapport à la plaquette de coupe à géométrie standard. En ce qui concerne les autres paramètres, aucune différence significative n'a été observée entre les deux plaquettes de coupe dans des conditions identiques. Cela indique que, pour ces paramètres spécifiques, les performances des deux plaquettes étaient similaires.

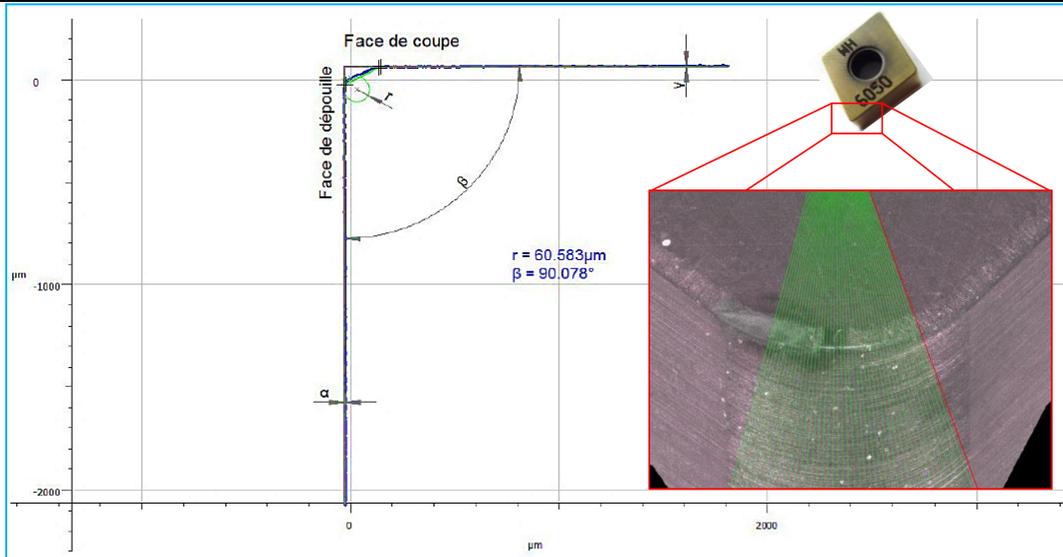
Ces résultats soulignent l'importance de la géométrie des plaquettes de coupe dans l'usure et la durée de vie de l'outil. La plaquette de coupe à géométrie wiper semble présenter des avantages en termes de réduction de l'usure et de prolongation de la durée de vie de l'outil, ce qui peut avoir des implications importantes pour l'efficacité et la rentabilité des opérations d'usinage.

Cependant, il convient de noter que ces observations sont basées sur les conditions spécifiques de l'étude et qu'elles peuvent varier en fonction des paramètres d'usinage et des matériaux travaillés. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour approfondir notre compréhension des performances des plaquettes de coupe et de l'impact de leur géométrie sur l'usure et la durée de vie de l'outil dans différentes applications industrielles.

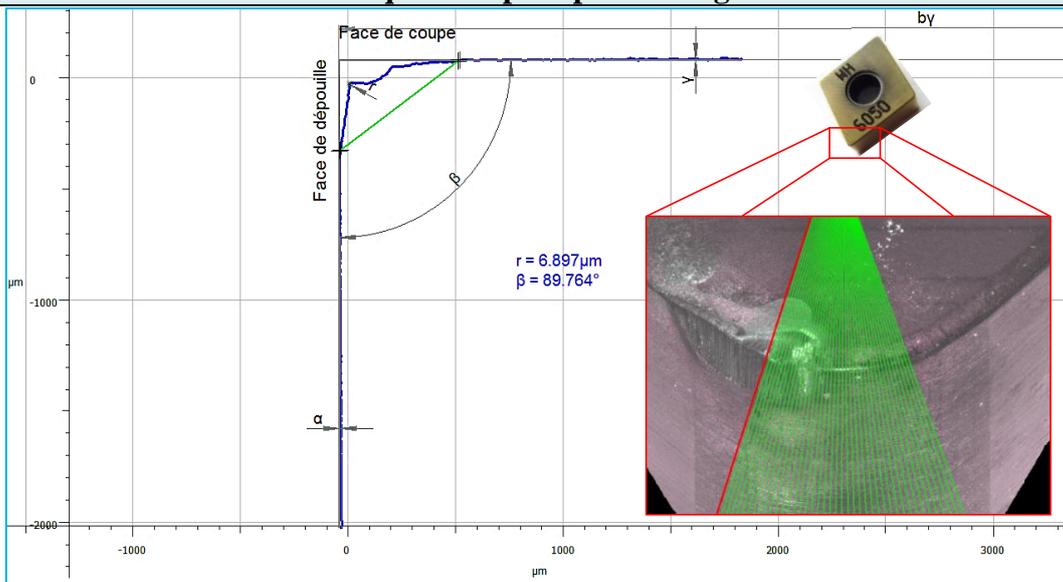
**Tableau 15** : Paramètres 3D d'usure des deux plaquettes de coupe testées (conventionnelle et wiper)

<b>Paramètres d'usure 3D</b>			
<b>Nom</b>	<b>Gp-Wiper</b>	<b>GP-Standard</b>	<b>Unité</b>
<b><math>W_{RM}</math></b>	16378588.47	17950410.59	$\mu\text{m}^3$
<b><math>W_{MD}</math></b>	26.073	47.91	$\mu\text{m}$
<b><math>W_{AA}</math></b>	639718.768	597853.296	$\mu\text{m}^2$
<b><math>W_{AM}</math></b>	1348831.047	828793.152	$\mu\text{m}^3$
<b><math>W_{MH}</math></b>	102.348	100.964	$\mu\text{m}$

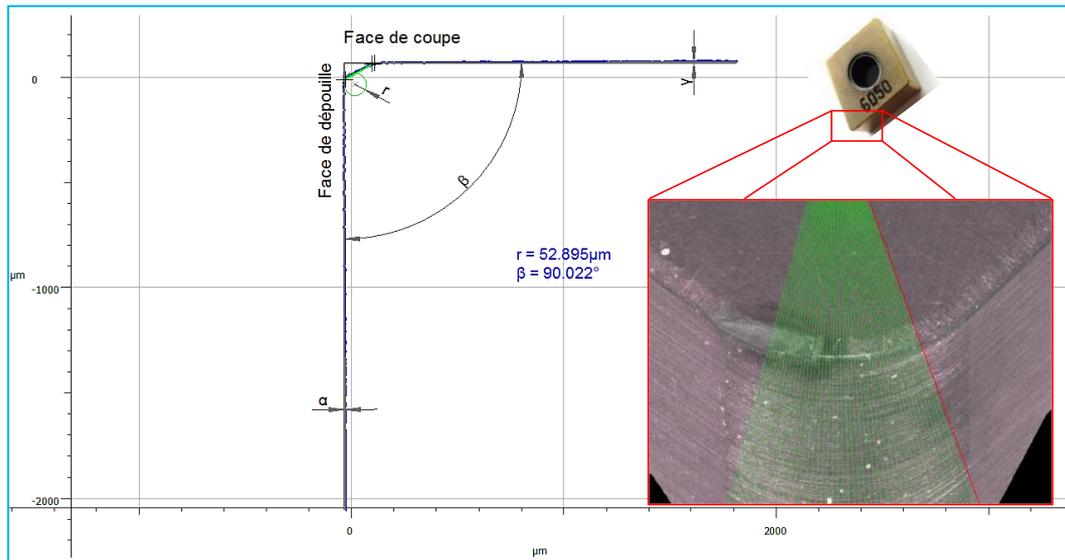
### Plaquette wiper avant usinage



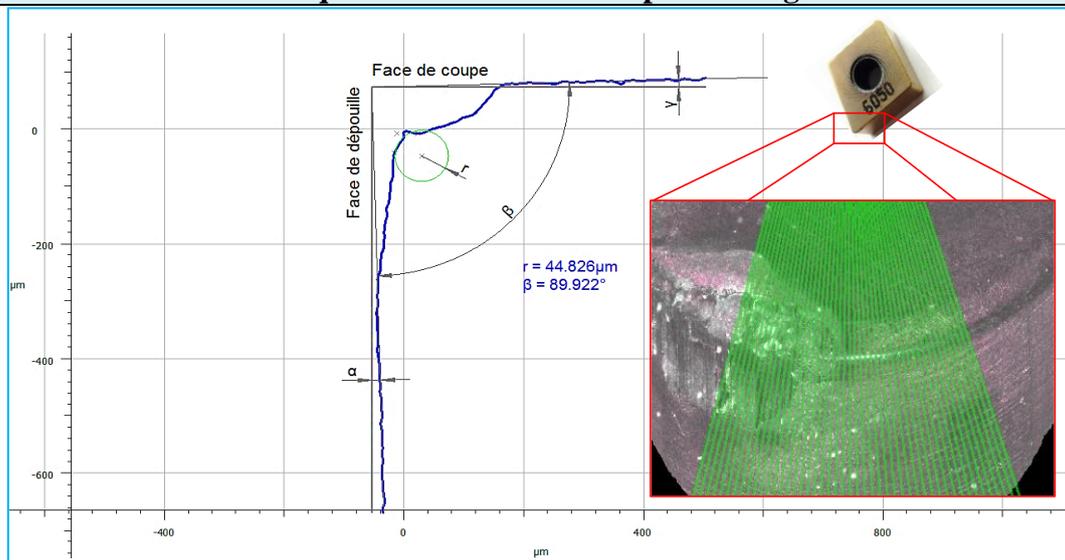
### Plaquette wiper après usinage



### Plaquette conventionnelle avant usinage



**Plaquette conventionnelle après usinage**



**Figure IV.35:** Micro-géométrie d'arête de la plaquette de coupe à géométrie standard avant et après usinage des deux plaquettes de coupe testées

## IV. 6. Conclusion

Dans ce chapitre de recherche, nous avons entrepris une étude approfondie afin de mieux comprendre l'impact de la géométrie de l'outil sur l'usinabilité de l'acier X38CrMoV5-1, traité à 50 HRC, en utilisant des plaquettes de coupe en céramique avec des géométries d'outil wiper et conventionnelles. Pour obtenir des résultats fiables et significatifs, nous avons utilisé une approche expérimentale combinant des méthodes unifactorielles et multifactorielles. L'objectif principal de cette étude était de déterminer la plage de fonctionnement optimale du couple outil/matière (plaquettes de coupe en céramique de forme wiper (CC6050WH) et conventionnelle (CC6050WG) / acier X38CrMoV5-1) lors de l'usinage à sec. Afin d'atteindre cet objectif, nous avons appliqué la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) pour développer des modèles mathématiques exprimant la relation entre les paramètres du régime de coupe et les paramètres technologiques étudiés.

Ensuite, nous avons procédé à l'analyse de la micro-géométrie et de l'intégrité de la surface en utilisant des techniques d'analyse de la topographie de surface 2D et 3D. De plus, nous avons étudié l'évolution de l'usure des outils (2D et 3D) en fonction du temps d'usinage, en évaluant son impact sur les composantes de l'effort de coupe, la rugosité de surface et la formation des copeaux, ainsi que les différents mécanismes impliqués.

Les résultats obtenus ont révélé des différences significatives entre les plaquettes de coupe à géométrie wiper et conventionnelle. Nous avons observé que la plaquette de coupe à géométrie wiper présentait une usure volumique plus faible et une cavité en cratère plus petite sur sa face de coupe par rapport à la plaquette de coupe à géométrie conventionnelle. Ces observations ont été confirmées par l'analyse des paramètres d'usure 3D et des images topographiques.

Par ailleurs, nous avons constaté que l'usure de l'outil avait un impact sur les caractéristiques de l'effort de coupe, la rugosité de surface et la formation des copeaux. Nous avons identifié différents mécanismes d'usure, tels que l'usure abrasive, l'usure adhésive et l'usure par diffusion, qui contribuent à la dégradation de l'outil.

De plus, cette étude a démontré l'efficacité des techniques d'analyse de la topographie de surface 2D et 3D, telles que le microscope numérique et le microscope à variation de focalisation, pour évaluer l'usure des outils et la qualité de la surface usinée. Ces techniques offrent une vision détaillée des défauts, des altérations et des mécanismes d'usure, permettant ainsi d'optimiser les paramètres d'usinage et de contrôler la performance de l'outil.

En résumé, ce chapitre de thèse a approfondi notre compréhension de l'impact de la géométrie de l'outil sur l'usinabilité de l'acier X38CrMoV5-1. Les résultats obtenus ont des implications pratiques significatives pour l'industrie de l'usinage, en fournissant des informations précieuses pour améliorer les performances des outils, prolonger leur durée de vie, améliorer la qualité de la surface usinée et accroître l'efficacité globale du processus d'usinage. Cette étude a également fourni des éclaircissements importants aux ingénieurs et chercheurs travaillant dans le domaine de l'usinage, en les aidant à prendre des décisions éclairées concernant le choix de l'outil et les paramètres d'usinage appropriés pour l'acier X38CrMoV5-1. Pour étendre ces résultats à d'autres conditions d'usinage et matériaux, ainsi que pour explorer de nouvelles techniques d'analyse, des recherches supplémentaires sont nécessaires. Ces perspectives futures ouvrent des opportunités pour optimiser davantage les performances des outils et améliorer les processus d'usinage dans divers domaines industriels.

## Modélisation et optimisation des paramètres technologiques d'usinage

« La modélisation et l'optimisation des processus jouent un rôle crucial dans l'amélioration continue de l'efficacité et de la rentabilité des opérations industrielles »

Jane Smith

### Sommaire

<b>V. 1. Introduction.....</b>	<b>- 188 -</b>
<b>V. 2. Résultats des expériences.....</b>	<b>- 188 -</b>
<b>V. 1. Modélisation des paramètres technologique d'usinage .....</b>	<b>- 189 -</b>
V. 1. 1. Modélisation par la méthode de surface de réponse (RSM) .....	- 189 -
V. 1. 1. 1. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface Ra.....	- 189 -
V. 1. 1. 2. Analyse de la variance de la force de coupe spécifique (Kc).....	- 190 -
V. 1. 1. 3. Analyse de variance du taux d'enlèvement de matière (MRR) .....	- 190 -
V. 1. 1. 4. Modélisation mathématique à base de RSM .....	- 191 -
V. 1. 1. 5. Effet des paramètres d'usinage sur les facteurs de réponse de surface.....	- 193 -
(a) La rugosité de surface Ra.....	- 193 -
(b) Force de coupe spécifique (Kc).....	- 194 -
(c) Taux d'enlèvement de matière (MRR) .....	- 195 -
V. 1. 2. Modélisation par la méthode des réseaux de neurones artificiel (ANN).....	- 196 -
V. 1. 2. 1. Modélisation mathématique à base d'ANN de Ra .....	- 198 -
(a) Architecture neurale du Ra.....	- 198 -
(b) Modèles mathématiques du Ra .....	- 199 -
V. 1. 2. 2. Modélisation mathématique à base d'ANN de Kc .....	- 201 -
(a) Architecture neurale du Kc .....	- 201 -
(b) Modèles mathématiques du Kc .....	- 202 -
V. 1. 2. 3. Modélisation mathématique à base d'ANN du MRR.....	- 203 -
(a) Architecture neurale du MRR .....	- 203 -
(b) Modèles mathématiques du MRR.....	- 204 -
V. 1. 2. 4. Résultats comparatifs des modèles ANN et RSM.....	- 205 -
<b>V. 2. Optimisation multi-objectif des paramètres d'usinage.....</b>	<b>- 211 -</b>
V. 2. 1. Optimisation MO des paramètres d'usinage par la méthode de fonction de désirabilité- 211 -	

---

V. 2. 2.	Optimisation MO des paramètres d'usinage par la méthode d'Analyse Relationnelle Grise	- 215 -
V. 2. 3.	Optimisation MO des paramètres d'usinage par la méthode des Algorithmes Génériques (GA)	- 220 -
V. 2. 3. 1.	Définition et concept de base de GA.....	- 220 -
V. 2. 3. 2.	Fonction objective.....	- 223 -
V. 2. 3. 3.	Résultats de l'optimisation MO par GA.....	- 224 -
V. 2. 4.	Optimisation MO des paramètres d'usinage par la méthode d'Algorithme de tri génétique non dominé (NSGA-II) .....	- 227 -
V. 2. 4. 1.	Résultats de l'optimisation MO par NSGAI.....	- 228 -
V. 2. 5.	Conclusion.....	- 231 -

---

## V. 1.Introduction

Ce chapitre se consacre à la présentation des modèles mathématiques développés pour étudier les différents phénomènes d'usinage. Les techniques de modélisation avancées utilisées comprennent la Méthodologie de surface de réponse (RSM) et les Réseaux de Neurones Artificiels (ANN). Ces modèles établissent la relation entre les paramètres de coupe et les paramètres technologiques étudiés. Une analyse statistique basée sur l'analyse de la variance (ANOVA) est effectuée pour explorer l'influence des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage et identifier les facteurs et interactions significatifs. Une évaluation comparative des différentes méthodes de modélisation est également présentée.

La deuxième partie de ce chapitre présente les résultats de l'étude d'optimisation multi-objectif basée sur un plan d'expérience de Taguchi (L36) pour déterminer les paramètres de coupe optimaux. Différentes méthodes d'optimisation avancées sont utilisées, notamment la Méthodologie de surface de réponse (RSM) avec l'approche de la fonction désirabilité (DF), l'analyse relationnelle grise (Grey), la méthode des algorithmes génétiques (GA) et l'algorithme de tri génétique non-dominé (NSGA-II). Les valeurs optimales des paramètres de coupe sont déterminées en fonction des objectifs d'optimisation pour chaque paramètre technologique d'usinage. Une analyse comparative des différentes méthodes d'optimisation est également réalisée. Ce chapitre fournit ainsi une approche détaillée de la modélisation des phénomènes d'usinage et de l'optimisation des paramètres de coupe, en utilisant des techniques avancées telles que la RSM, les ANN et les méthodes d'optimisation multi-objectif. Les résultats obtenus sont essentiels pour guider les ingénieurs et chercheurs dans la prise de décisions éclairées concernant les paramètres d'usinage et l'amélioration des performances de l'usinage.

## V. 2.Résultats des expériences

Les résultats de la rugosité de surface Ra, l'effort de coupe spécifique Kc (N/mm<sup>2</sup>) et le taux d'enlèvement de matière (mm<sup>3</sup>/min) sont présentées dans le Tableau V.1, ont été obtenues selon la matrice de planification des expériences pour un plan incomplet de Taguchi L<sub>36</sub> (1<sup>2</sup>×3<sup>3</sup>).

Les résultats de l'effort de coupe spécifique (Kc) et le taux d'enlèvement de matière (MRR) présentés dans le Tableau V.1, sont calculés par les deux équations suivantes :

$$Kc = \frac{Fc}{S} = \frac{Fc}{f \times ap} \quad V.1$$

$$MRR = Vc \cdot f \cdot ap \cdot 1000 \quad V.2$$

**Tableau V.1** : Paramètres d'usinage avec la conception expérimentale et leurs résultats (Ra, Kc et MRR)

Test N°	r (mm)	Vc (m/min)	f (mm/rev)	ap (mm)	Ra (µm)	Kc (MPa)	MRR (mm <sup>3</sup> /min)
1	0.8	100	0.08	0.1	0.67	2551.25	800

2	0.8	150	0.14	0.3	0.63	1859.05	6300
3	0.8	200	0.2	0.5	1.14	1678.7	20000
4	0.8	100	0.08	0.1	0.66	2713.75	800
5	0.8	150	0.14	0.3	0.61	1886.67	6300
6	0.8	200	0.2	0.5	1.36	1622.4	20000
7	0.8	100	0.08	0.3	0.29	2457.5	2400
8	0.8	150	0.14	0.5	0.58	1883.29	10500
9	0.8	200	0.2	0.1	1.30	1540	4000
10	0.8	100	0.08	0.5	0.36	2517.5	4000
11	0.8	150	0.14	0.1	0.67	2415	2100
12	0.8	200	0.2	0.3	1.10	1682.67	12000
13	0.8	100	0.14	0.5	0.63	2008.29	7000
14	0.8	150	0.2	0.1	1.24	1565.5	3000
15	0.8	200	0.08	0.3	0.31	2482.92	4800
16	0.8	100	0.14	0.5	0.68	1904	7000
17	0.8	150	0.2	0.1	1.28	2124	3000
18	0.8	200	0.08	0.3	0.27	2127.92	4800
19	1.2	100	0.14	0.1	0.63	2852.14	1400
20	1.2	150	0.2	0.3	0.79	1931.5	9000
21	1.2	200	0.08	0.5	0.30	2757.75	8000
22	1.2	100	0.14	0.3	0.41	2552.14	4200
23	1.2	150	0.2	0.5	0.52	1333.9	15000
24	1.2	200	0.08	0.1	0.26	3195	1600
25	1.2	100	0.2	0.3	0.82	2090	6000
26	1.2	150	0.08	0.5	0.33	2254	6000
27	1.2	200	0.14	0.1	0.51	2833.57	2800
28	1.2	100	0.2	0.3	0.92	2111.67	6000
29	1.2	150	0.08	0.5	0.26	2280.25	6000
30	1.2	200	0.14	0.1	0.54	3315	2800
31	1.2	100	0.2	0.5	0.66	1907.5	10000
32	1.2	150	0.08	0.1	0.29	3061.25	1200
33	1.2	200	0.14	0.3	0.46	2402.62	8400
34	1.2	100	0.2	0.1	1.13	2708.5	2000
35	1.2	150	0.08	0.3	0.20	2630	3600
36	1.2	200	0.14	0.5	0.33	2278.43	14000

## V. 1. Modélisation des paramètres technologique d'usinage

### V. 1. 1. Modélisation par la méthode de surface de réponse (RSM)

#### V. 1. 1. 1. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface Ra

Les résultats de l'analyse de variance ANOVA pour la rugosité de surface Ra obtenues par la plaquette de coupe en céramique non revêtue ont été présentés dans le chapitre III partie 2.1.1.

### V. 1. 1. 2. Analyse de la variance de la force de coupe spécifique (Kc)

Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de la force de coupe spécifique obtenue avec la plaquette de coupe en céramique non revêtue sont présentés dans le Tableau V.2. Cette analyse a été réalisée en utilisant un niveau de signification  $\alpha$  de 0,05, correspondant à un niveau de confiance de 95%. Les tableaux fournissent les informations sur les degrés de liberté (ddl), la somme des carrés des écarts (SCE), les carrés moyens (CM), les probabilités (Prob.) et les contributions en pourcentage (Cont. %) de chaque facteur et des différentes interactions. Il est important de noter que les effets des facteurs  $r$ ,  $f$ ,  $ap$  et des interactions ( $r \times ap$ ) et ( $Vc \times Vc$ ) sont tous significatifs, avec des contributions respectives de 17,45%, 33,85%, 33,57%, 6,71% et 4,14%. Ces résultats indiquent que les facteurs  $ap$  et  $f$  sont les plus importants pour influencer la force de coupe spécifique (Kc). Des conclusions similaires ont été rapportées par Aouici et al. [20] lors de leur étude sur le tournage de l'acier AISI D3 traité thermiquement à une dureté de 60 HRC en utilisant un insert en céramique.

**Tableau V.2 :** Analyse de la variance (ANOVA) de la force de coupe spécifique (Kc) de la plaquette en céramique non revêtues

Source	DF	Sum of squares	F-value	Prob.	Cont.%	Remarks
<b>Modèle</b>	13	7574674.5	16.37	< 0.0001		Significant
<i>r</i>	1	900541.66	25.31	< 0.0001	17.45	Significant
<i>Vc</i>	1	7348.72	0.21	0.654	0.14	Insignificant
<i>f</i>	1	1747208.43	49.1	< 0.0001	33.85	Significant
<i>ap</i>	1	1732880.85	48.7	< 0.0001	33.57	Significant
<i>r</i> × <i>Vc</i>	1	43796.28	1.23	0.2792	0.85	Insignificant
<i>r</i> × <i>f</i>	1	296.46	0.01	0.9281	0.01	Insignificant
<i>r</i> × <i>ap</i>	1	346329.3	9.73	0.005	6.71	Significant
<i>Vc</i> × <i>f</i>	1	26115.98	0.73	0.4009	0.51	Insignificant
<i>Vc</i> × <i>ap</i>	1	53637.2	1.51	0.2325	1.04	Insignificant
<i>f</i> × <i>ap</i>	1	19536.37	0.55	0.4666	0.38	Insignificant
<i>r</i> × <i>r</i>	0	0			0.00	Insignificant
<i>Vc</i> × <i>Vc</i>	1	213945.75	6.01	0.0226	4.14	Significant
<i>f</i> × <i>f</i>	1	11165.6	0.31	0.581	0.22	Insignificant
<i>ap</i> × <i>ap</i>	1	58815.23	1.65	0.2119	1.14	Insignificant
<b>Residual</b>	22	782859.7			15.17	
<b>Lack of Fit</b>	13	426812.95	0.83	0.6316	8.27	Insignificant
<b>Pure Error</b>	9	356046.74			6.90	
<b>Cor Total</b>	35	5161617.83				

### V. 1. 1. 3. Analyse de variance du taux d'enlèvement de matière (MRR)

D'après les résultats de l'analyse de variance présentés dans le Tableau V.3, il est clair que la profondeur de passe est le facteur ayant la plus grande influence sur le taux d'enlèvement de matière, avec une contribution de 51,17%. Ensuite, l'avance et la vitesse de coupe ont également un impact significatif, avec des contributions respectives de 14,15% et 8,67%. Les interactions entre les facteurs ( $r \times ap$ ,  $vc \times f$ ,  $vc \times ap$  et  $f \times ap$ ) sont moins importantes et varient entre 4,66% et 0,22%. Les autres termes ne présentent pas de signification statistique pour le taux d'enlèvement de matière.

**Tableau V.3 :** Analyse de la variance (ANOVA) du taux d'enlèvement de matière de la plaquette de coupe en céramique non revêtue.

	Sum of squares	DF	Mean square	F-value	Prob.	Cont. %	Remarks
<b>Modèle</b>	8.46E+08	13	6.51E+07	965.41	< 0.0001		Significant
<i>r</i>	0	1	0	0	1	0.00	Insignificant
<i>Vc</i>	7.34E+07	1	7.34E+07	1090.01	< 0.0001	8.67	Significant
<i>f</i>	1.20E+08	1	1.20E+08	1780.11	< 0.0001	14.15	Significant
<i>ap</i>	4.34E+08	1	4.34E+08	6433.69	< 0.0001	51.17	Significant
<i>r</i> × <i>Vc</i>	3573.05	1	3573.05	0.053	0.82	0.00	Insignificant
<i>r</i> × <i>f</i>	3573.05	1	3573.05	0.053	0.82	0.00	Insignificant
<i>r</i> × <i>ap</i>	1.89E+06	1	1.89E+06	28.06	< 0.0001	0.22	Significant
<i>Vc</i> × <i>f</i>	7.37E+06	1	7.37E+06	109.36	< 0.0001	0.87	Significant
<i>Vc</i> × <i>ap</i>	2.90E+07	1	2.90E+07	429.68	< 0.0001	3.42	Significant
<i>f</i> × <i>ap</i>	3.95E+07	1	3.95E+07	585.5	< 0.0001	4.66	Significant
<i>r</i> × <i>r</i>	0	1	0	0	1	0.02	Insignificant
<i>Vc</i> × <i>Vc</i>	1.45E+05	1	1.45E+05	2.15	0.1564	0.00	Insignificant
<i>f</i> × <i>f</i>	1.45E+05	1	1.45E+05	2.15	0.1564	0.02	Insignificant
<i>ap</i> × <i>ap</i>	0	1	0	0	1	0.00	Insignificant
<b>Residual</b>	1.4824	22	0.0674				
<b>Lack of Fit</b>	1.4824	13	0.114				
<b>Pure Error</b>	0	9	0				
<b>Cor Total</b>	847.12	35					

#### V. 1. 1. 4. Modélisation mathématique à base de RSM

La corrélation entre les variables dépendantes (*Ra*, *Kc* et *MRR*) et les variables indépendantes étudiées (*r*, *Vc*, *f* et *ap*) pour la plaquette de coupe en céramique mixte sans revêtement a été établie à l'aide d'une régression linéaire multiple. Les équations suivantes permettent de représenter cette relation fonctionnelle :

$$\begin{aligned}
 Ra_{\text{Uncoatedinsert}} = & 1.3505 + 0.4027r - 0.0143Vc + 2.9869f \\
 & - 1.3806ap + 9.0351 \times 10^{-4} r \times Vc - 6.7659r \times f \\
 & - 0.5949r \times ap + 5.2689 \times 10^{-3} Vc \times f + 7.6309 \times 10^{-3} Vc \times ap \\
 & - 3.9268f \times ap + 0.000r^2 + 3.1857 \times 10^{-5} Vc^2 \\
 & + 35.1406f^2 + 1.5963ap^2
 \end{aligned} \tag{V. 3}$$

( $R^2 = 96.28\%$ )

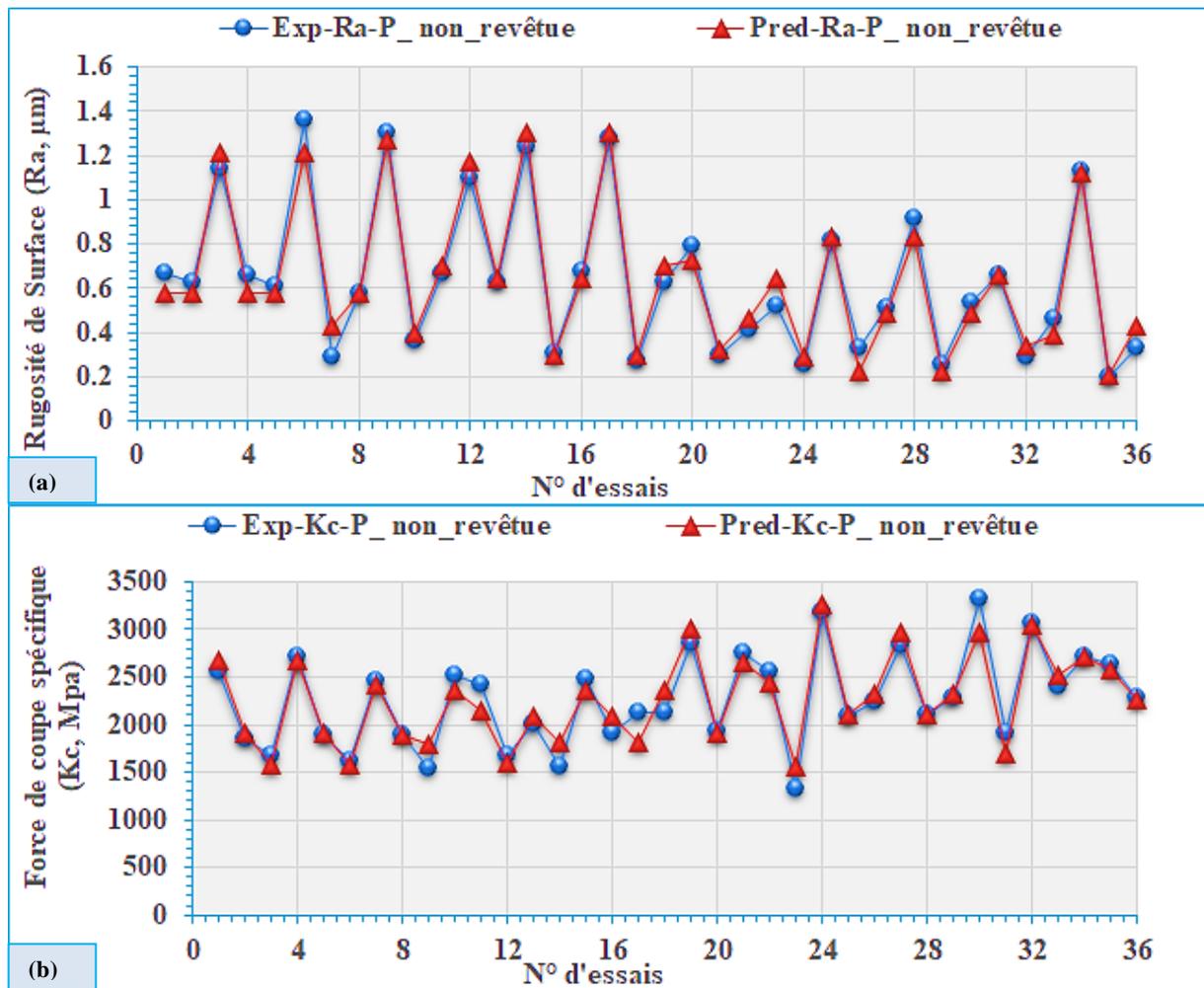
$$\begin{aligned}
 Kc_{\text{Uncoatedinsert}} = & 3658.9496 + 1129.3734r - 28.3004Vc + 1811.4832f \\
 & + 149.5978ap + 6.1783r \times Vc - 423.5981r \times f \\
 & - 3493.1599r \times ap - 17.8604Vc \times f + 6.3554Vc \times ap \\
 & - 3196.1769f \times ap + 0.000r^2 + 0.07428Vc^2 \\
 & - 11784.1949f^2 + 2490.3765ap^2
 \end{aligned} \tag{V. 4}$$

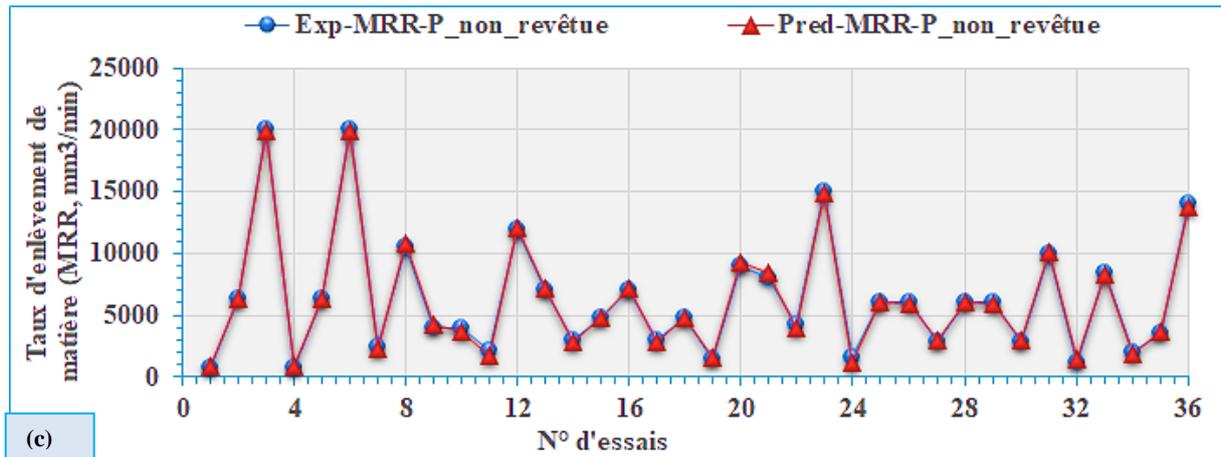
( $R^2 = 90.63\%$ )

$$\begin{aligned}
 MRR = & 3.4660 + 1.9779r - 0.0265Vc - 55.4739f \\
 & - 12.8431ap + 1.7647 \times 10^{-3} r \times Vc + 1.4706r \times f \\
 & - 8.1618r \times ap + 0.3Vc \times f + 0.1477Vc \times ap \\
 & + 143.6275f \times ap + 0.000r^2 - 6.1177 \times 10^{-5} Vc^2 \\
 & + 42.4837f^2 + 2.2088 \times 10^{-14} ap^2
 \end{aligned}
 \tag{V.5}$$

$(R^2 = 99.83\%)$

Les Figure V.1 (a, b et c) illustrent la comparaison entre les valeurs expérimentales des réponses Ra, Kc et MRR, et les valeurs prédites par les modèles mathématiques (quadratiques) obtenus grâce à la méthodologie de surface de réponse (MSR). Ces figures démontrent clairement une superposition entre les mesures expérimentales et les valeurs estimées. Cette observation indique que les valeurs prédites des différents paramètres technologiques étudiés se rapprochent davantage des valeurs expérimentalement obtenues. Les résultats de cette comparaison démontrent que les modèles quadratiques sont capables de représenter de manière satisfaisante le système dans le domaine expérimental spécifié.





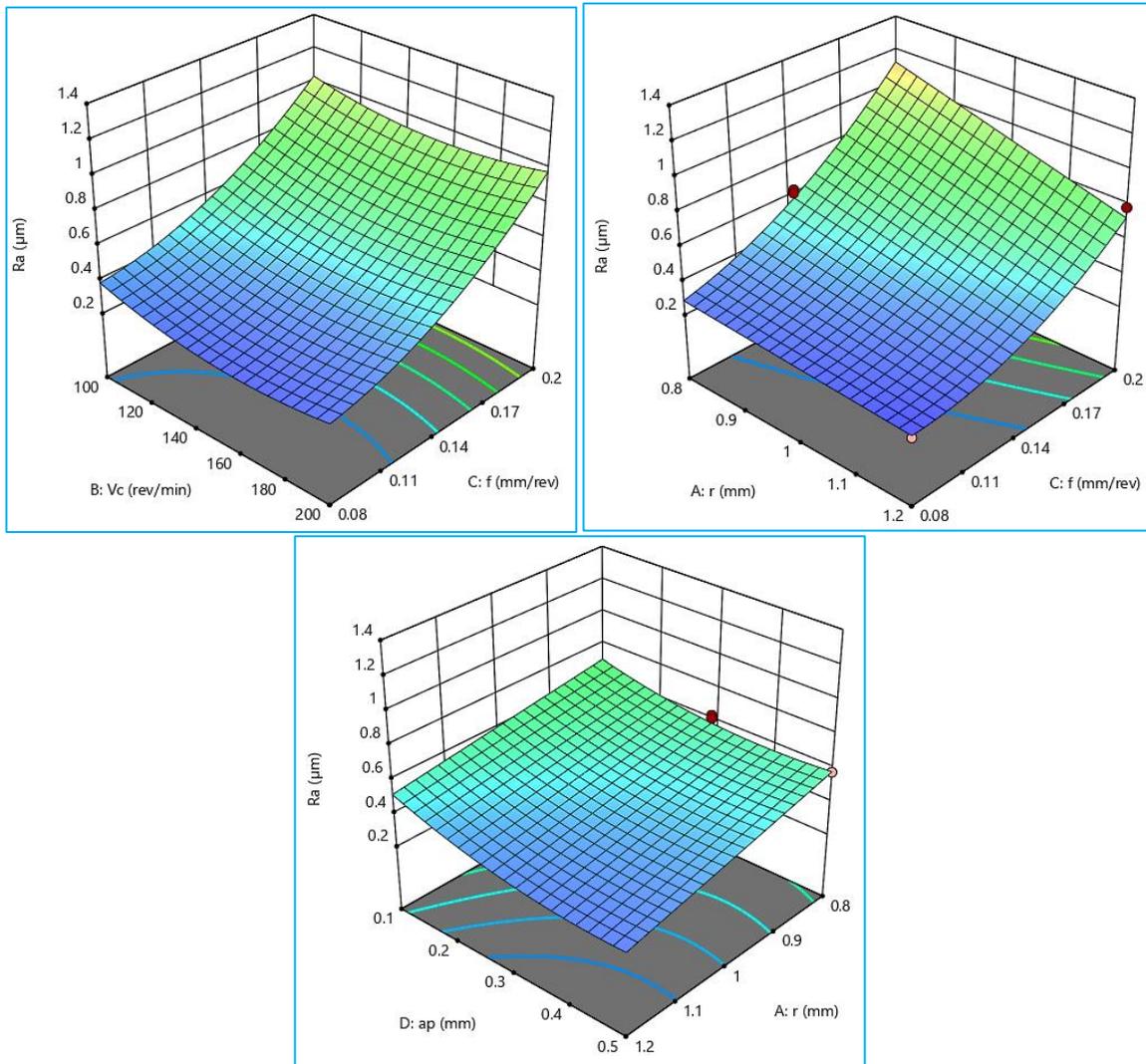
**Figure V.1:** Courbes des valeurs de comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (a) Ra, (b) Kc et (c) MRR de la plaquette de coupe non revêtue

### V. 1. 1. 5. Effet des paramètres d'usinage sur les facteurs de réponse de surface

Des représentations graphiques en trois dimensions (3D) basées sur ces modèles quadratiques ont été créées afin d'étudier l'impact de chaque paramètre de coupe sur les réponses étudiées (Ra, Kc et MRR) lors du tournage à haute dureté de l'acier X38CrMoV5-1 (50HRC) à l'aide d'une plaquette de coupe en céramique non revêtue. Ces graphiques de surface de réponse permettent d'évaluer plus en détail la relation entre les paramètres du processus et les résultats obtenus. Les graphiques en 3D présentent la variation des réponses en fonction de deux variables, tandis que la troisième variable est maintenue constante à trois valeurs différentes. Le dernier paramètre d'usinage, qui n'est pas représenté dans les graphiques, est maintenu à sa valeur moyenne dans chaque représentation graphique.

#### (a) La rugosité de surface Ra

La Figure V.2 présente la représentation graphique en trois dimensions (3D) de la surface de réponse du critère de rugosité Ra. Cette surface de réponse est établie en fonction de deux combinaisons de paramètres : l'avance et la profondeur de passe ( $f \times a_p$ ), ainsi que la vitesse de coupe et l'avance par tour ( $V_c \times f$ ). Ces paramètres ont été étudiés lors du processus de tournage à haute dureté de l'acier ASI H11, en utilisant une plaquette de coupe en céramique non revêtue. Cette représentation graphique permet de visualiser et d'analyser les variations de la rugosité Ra en fonction de ces combinaisons spécifiques de paramètres de coupe.



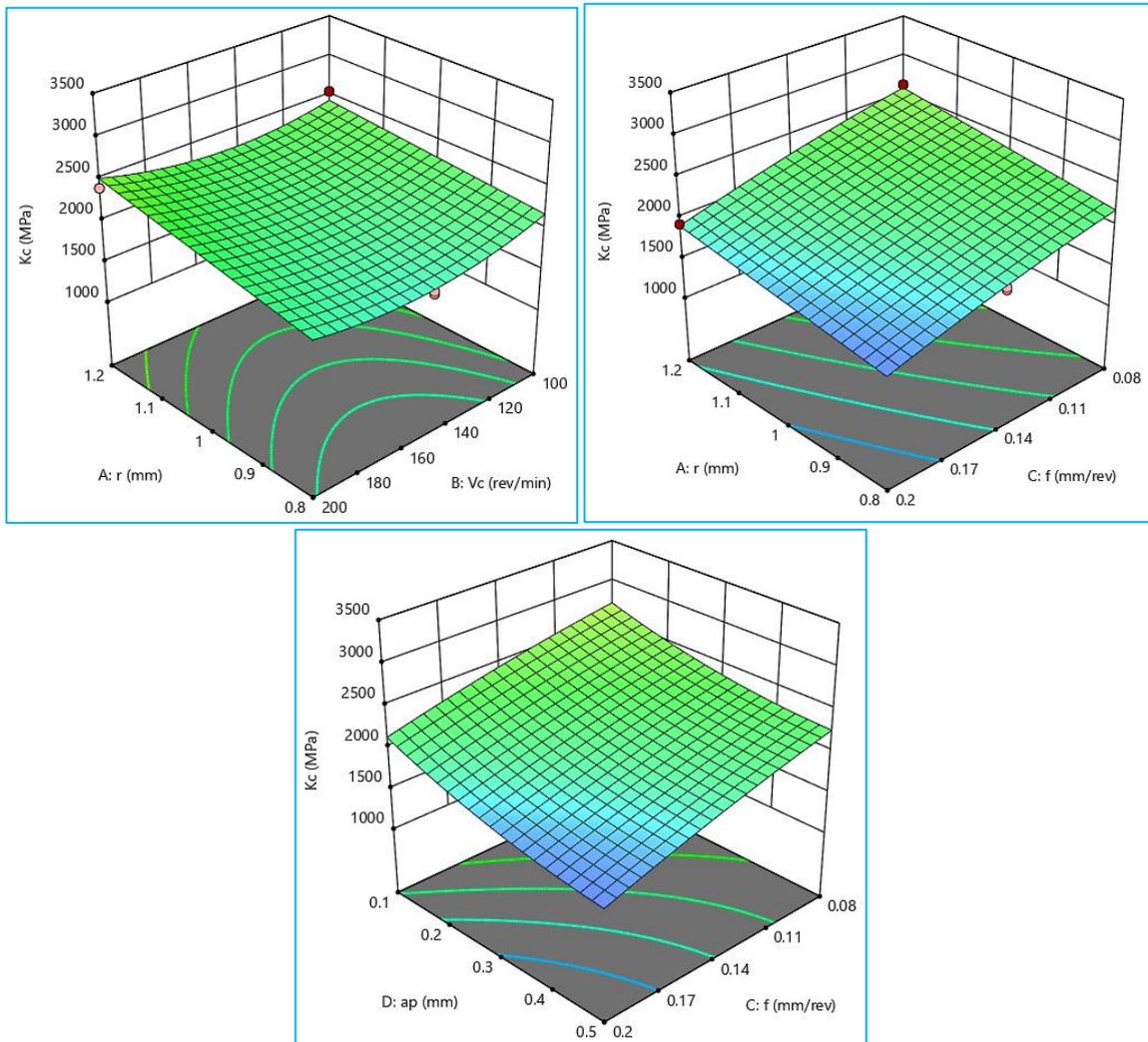
**Figure V.2:** Tracés de surface 3D pour les effets d'interaction des paramètres de coupe sur  $R_a$

Il est clairement observé que, pour des valeurs données de profondeur et de vitesse de coupe, le critère de rugosité «  $R_a$  » augmente de manière significative avec l'augmentation de l'avance, quelles que soient les valeurs de «  $r$  » et «  $a_p$  ». Ce comportement est attribué au mouvement hélicoïdal de la pièce-outil et à la forme de l'outil, ce qui génère des rainures hélicoïdales. Cependant, l'effet de la vitesse d'avance «  $f$  » est plus prononcé lorsque les valeurs de «  $r$  » sont faibles et que les valeurs de «  $V_c$  » et «  $a_p$  » sont élevées. Par ailleurs, on constate que l'augmentation de la vitesse de coupe «  $V_c$  » et de l'avance «  $f$  » conduit simultanément à une dégradation remarquable de la qualité de la surface, et les valeurs les plus basses de «  $R_a$  » sont obtenues pour de faibles valeurs de «  $f$  » et «  $a_p$  », ainsi que pour des valeurs élevées de «  $r$  » et «  $V_c$  ». Ces résultats sont cohérents avec les observations rapportées par Aouici et al. [20].

### (b) Force de coupe spécifique ( $K_c$ )

La Figure V.3 montre les tracés de surface en trois dimensions (3D) de l'effort de coupe spécifique en fonction de l'interaction des quatre facteurs étudiés : le rayon de bec, la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe. Ces tracés de surface 3D sont obtenus à partir du processus de tournage à haute dureté de l'acier X38CrMoV5-1 en utilisant une

plaquette de coupe en céramique mixte non revêtue. Ces graphiques permettent d'analyser et de visualiser l'effet conjoint de ces quatre facteurs sur l'effort de coupe spécifique.



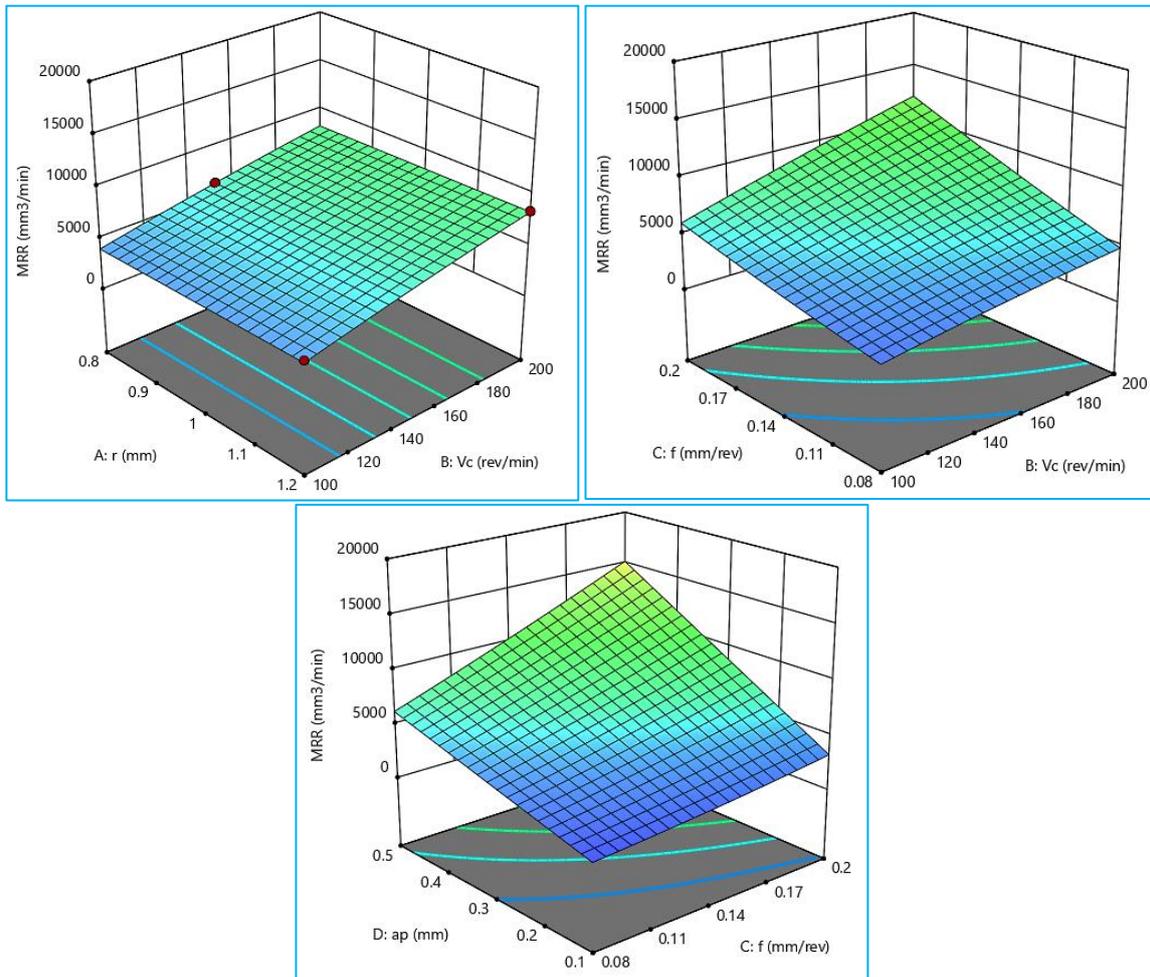
**Figure V.3:** Tracés de surface 3D pour les effets d'interaction des paramètres de coupe sur  $K_c$

Il a été observé que l'avance et la profondeur de passe sont les facteurs qui ont le plus grand impact sur l'effort de coupe spécifique, noté " $K_c$ ". L'augmentation de ces deux facteurs entraîne une augmentation de  $K_c$ , ce qui est dû à l'élargissement de la zone d'action de coupe. L'effort de coupe spécifique atteint sa valeur maximale à des niveaux élevés d'avance par tour ( $a_p$ ) et d'avance ( $f$ ). Par ailleurs, les tracés de surface démontrent que la vitesse de coupe et le rayon de bec de l'outil ont pratiquement aucun effet sur l'effort de coupe spécifique.

### (c) Taux d'enlèvement de matière (MRR)

La Figure V.4 présente la variation du taux d'enlèvement de matière (MRR) en fonction des différents facteurs de coupe étudiés, à savoir le rayon de bec de l'outil ( $r$ ), la profondeur de passe ( $a_p$ ), l'avance par tour ( $f$ ) et la vitesse de coupe ( $V_c$ ), en utilisant une plaquette de coupe en céramique sans revêtement. On observe que l'MRR n'est pas statistiquement influencé par la variation du rayon de bec de l'outil. Cependant, il augmente de manière significative avec l'augmentation des trois autres facteurs de coupe, à savoir la profondeur de passe, l'avance par

tour et la vitesse de coupe. La valeur maximale de l'MRR est obtenue lorsque les trois paramètres atteignent leurs valeurs les plus élevées simultanément.



**Figure V.4:** Tracés de surface 3D pour les effets d'interaction des paramètres de coupe sur MRR

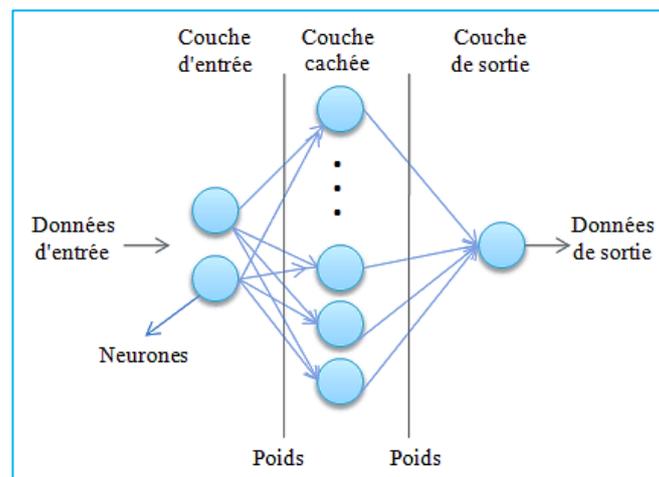
### V. 1. 2. Modélisation par la méthode des réseaux de neurones artificiel (ANN)

Les réseaux de neurones, également connus sous le nom de réseaux de neurones artificiels ou de systèmes de traitement parallèle, sont utilisés pour développer des modèles qui imitent le traitement de l'information par le cerveau humain. Le cerveau humain est remarquablement efficace pour résoudre des problèmes impliquant de grandes quantités de données incertaines et bruitées. Les réseaux de neurones tentent de reproduire le fonctionnement des neurones biologiques et sont ainsi capables de prendre des décisions intelligentes.

L'unité fondamentale de traitement dans un réseau de neurones est appelée un neurone. Chaque neurone possède une mémoire locale et effectue des opérations de traitement de l'information spécifiques à sa localisation. Ces neurones sont interconnectés par des connexions unidirectionnelles, formant ainsi des réseaux à plusieurs niveaux. Chaque neurone a une sortie unique qui se divise en plusieurs connexions collatérales. Tous les neurones transportent le même signal - le signal de sortie du neurone - qui peut prendre la forme de n'importe quel type mathématique. Le traitement effectué par chaque neurone est entièrement localisé, dépendant

uniquement des valeurs actuelles du signal d'entrée reçu par les connexions entrantes et des valeurs stockées dans la mémoire locale du neurone.

Généralement, un réseau neuronal comporte une couche d'entrée pour recevoir des données provenant de l'environnement extérieur, une couche de sortie pour transmettre des informations aux utilisateurs ou aux périphériques externes, et éventuellement des couches cachées entre les deux. Les couches cachées ne sont pas directement en contact avec l'environnement et leur fonction est de traiter l'information à l'intérieur du réseau. La structure d'un réseau de neurones est caractérisée par son architecture d'interconnexion entre les neurones, la fonction d'activation utilisée pour convertir les entrées en sorties, ainsi que l'algorithme d'apprentissage utilisé. En général, un réseau de neurones est représenté graphiquement, comme illustré dans la Figure V.5.



**Figure V.5:** Architecture graphique d'un réseau de neurone artificiel

Les neurones les plus couramment utilisés sont ceux dont la fonction de transfert  $f$  est une fonction non linéaire, généralement une tangente hyperbolique, d'une combinaison linéaire des entrées :  $f = \tanh \sum_{i=1}^n w_i x_i$

Avec  $x_i$  sont les variables d'entrées du neurone, les  $w_i$  sont des paramètres ajustables et  $n$  le nombre.

Dans le cadre de cette étude, nous avons effectué une modélisation mathématique basée sur les réseaux de neurones artificiels (ANN) pour prédire l'effort de coupe spécifique (Kc), le critère de rugosité (Ra) et le taux d'enlèvement de matière (MRR). Nous avons étudié ces variables en fonction de quatre facteurs : le rayon de bec de l'outil, l'avance par tour, la profondeur de passe et la vitesse de coupe, lors du tournage dur de l'acier AISI H11 avec une plaquette de coupe non revêtue. Nous avons utilisé les logiciels statistiques "JMP 13" et Matlab pour l'apprentissage et la validation des réseaux de neurones.

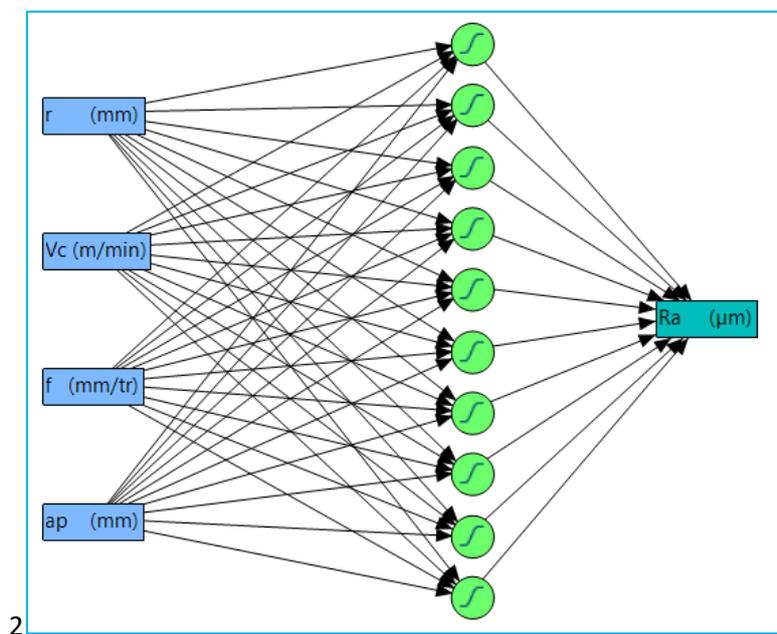
Plusieurs modèles ANN ont été conçus et testés pour déterminer l'architecture optimale, la fonction d'activation la plus appropriée et le meilleur algorithme d'entraînement. Les critères principaux utilisés pour évaluer les performances des modèles étaient l'erreur moyenne de prédiction (MPE), l'erreur quadratique moyenne (RSME) et le coefficient de détermination ( $R^2$ ) pour tous les modèles du réseau (apprentissage, validation, test).

Le plan expérimental comprenait 36 essais, dont 24 ont été utilisés pour l'apprentissage du réseau et 12 pour la validation. Les essais de validation ont été sélectionnés de manière aléatoire afin de tester l'efficacité du réseau dans la prédiction des résultats.

### V. 1. 2. 1. Modélisation mathématique à base d'ANN de Ra

#### (a) Architecture neurale du Ra

La modélisation du critère de rugosité Ra en fonction des paramètres de coupe a été réalisée en utilisant une structure de réseau de neurones 3-10-1, comme illustré dans la Figure V.6. Pour la phase d'apprentissage du réseau neuronal, nous avons utilisé 24 essais, tandis que 12 essais ont été choisis de manière arbitraire pour valider l'ensemble du réseau. La sélection de la structure optimale a été basée sur le coefficient de détermination  $R^2$  et l'erreur racine carrée (RMSE) pour les ensembles d'apprentissage et de validation.



**Figure V.6:** Architecture neurale choisie pour la rugosité de surface Ra

La structure optimale choisie comprend quatre nœuds dans la couche d'entrée, correspondant au nombre de paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $r$  et  $a_p$ ), dix nœuds dans la couche cachée utilisant une fonction de transfert tangente hyperbolique, et un nœud dans la couche de sortie utilisant une fonction de transfert linéaire. Cette configuration a été sélectionnée en raison de sa capacité à capturer les relations complexes entre les paramètres de coupe et le critère de rugosité Ra.

Le choix de cette structure optimale a été guidé par l'objectif de maximiser l'ajustement du modèle aux données d'apprentissage tout en assurant une bonne généralisation du réseau pour les données de validation. En utilisant cette structure de réseau de neurones, nous avons pu obtenir des prédictions précises du critère de rugosité Ra en fonction des paramètres de coupe étudiés.

Chaque réseau a été entraîné avec des poids et des biais initiaux différents, et les données initiales ont été divisées de manière distincte en ensembles d'apprentissage, de validation et de test. Il est important de noter que les ensembles de test fournissent une mesure fiable de la généralisation pour chaque réseau spécifique, mais pas pour l'ensemble des réseaux, car les données constituant un ensemble de test pour un réseau peuvent être utilisées pour l'apprentissage ou la validation par d'autres réseaux de neurones. C'est pourquoi l'ensemble de données d'origine a été divisé en deux parties distinctes afin de préserver un ensemble de test totalement indépendant.

La performance de chaque réseau a été évaluée en calculant le coefficient de corrélation entre les prédictions du réseau et les valeurs expérimentales, en utilisant les ensembles de données d'apprentissage, de validation et de test. Cette évaluation nous a permis d'analyser la capacité de chaque réseau à reproduire avec précision les résultats expérimentaux et à généraliser au-delà des données d'apprentissage.

En adoptant cette approche, nous avons pu évaluer et comparer la performance de chaque réseau neuronal, en prenant en compte à la fois la précision des prédictions sur les données d'apprentissage, de validation et de test, ainsi que leur capacité à généraliser au-delà de l'ensemble d'apprentissage initial. Cela nous a permis de sélectionner les réseaux les plus performants pour la modélisation des critères de coupe étudiés.

### (b) Modèles mathématiques du Ra

La sortie de chaque neurone de la couche cachée, représentée par les termes H1 à H10, contribue à la prédiction précise et à la modélisation du critère de rugosité de surface Ra en fonction des paramètres de coupe étudiés. Cette contribution est obtenue en multipliant la somme pondérée des sorties des dix neurones de la couche cachée par une fonction de transfert linéaire, comme décrit dans l'équation V.6. Ainsi, le modèle mathématique du critère de rugosité Ra est défini par cette équation.

En utilisant cette approche, nous avons pu capturer les relations complexes entre les paramètres de coupe et la rugosité de surface Ra. Chaque terme H1 à H10 représente une composante importante dans la prédiction de la rugosité de surface, et leur contribution combinée permet d'obtenir des résultats précis. Ces résultats démontrent l'efficacité de l'architecture du réseau neuronal dans la modélisation du critère de rugosité Ra en fonction des paramètres de coupe, ouvrant ainsi la voie à une meilleure compréhension et optimisation des procédés de coupe.

$$\mathbf{Ra} = 0.14496 \times \mathbf{H}_1 + -0.18583 \times \mathbf{H}_2 + 0.13356 \times \mathbf{H}_3 + 0.42618 \times \mathbf{H}_4 + 1.07940 \times \mathbf{H}_5 + -0.28527 \times \mathbf{H}_6 + -0.59042 \times \mathbf{H}_7 + -0.12010 \times \mathbf{H}_8 + 0.85834 \times \mathbf{H}_9 + 0.36343 \times \mathbf{H}_{10} + 1.1958; \quad \dots \text{ (V.6)}$$

$$\mathbf{H}_1 = \tanh(0.5 \times (-4.97864 \times r - 0.01720 \times Vc + 27.09194 \times f + 1.73564 \times ap + 1.88688))$$

$$\mathbf{H}_2 = \tanh(0.5 \times (-1.79438 \times r + 0.03569 \times Vc - 3.01508 \times f - 3.51099 \times ap - 0.81813))$$

$$\mathbf{H}_3 = \tanh(0.5 \times (-9.78606 \times r - 0.00232 \times Vc - 20.97611 \times f - 3.52396 \times ap + 14.00378))$$

$$\mathbf{H}_4 = \tanh(0.5 \times (1.04626 \times r + 0.01590 \times Vc + 31.00628 \times f + 7.92595 \times ap - 9.59481))$$

$$\mathbf{H}_5 = \tanh(0.5 \times (-3.95524 \times r + 0.00643 \times Vc + 17.45684 \times f - 5.54164 \times ap + 2.38724))$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{H}_6 &= \tanh(0.5 \times (-3.32564 \times r - 0.00920 \times Vc - 20.68076 \times f - 0.65041 \times ap + 8.69747)) \\
 \mathbf{H}_7 &= \tanh(0.5 \times (-2.40823 \times r - 0.02011 \times Vc + 22.93406 \times f - 12.48451 \times ap + 6.94203)) \\
 \mathbf{H}_8 &= \tanh(0.5 \times (1.01444 \times r - 0.04436 \times Vc - 11.24504 \times f + 1.04923 \times ap + 7.56600)) \\
 \mathbf{H}_9 &= \tanh(0.5 \times (4.06386 \times r - 0.01149 \times Vc - 22.86612 \times f - 1.67910 \times ap + 0.14898)) \\
 \mathbf{H}_{10} &= \tanh(0.5 \times (-2.22722 \times r - 0.05111 \times Vc + 14.63720 \times f - 11.07753 \times ap + 11.68696));
 \end{aligned}$$

Le Tableau V.4 présente les résultats du coefficient de détermination R2, de la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et du nombre d'essais utilisés lors de la phase d'apprentissage et de validation de la structure optimale sélectionnée.

Le coefficient de détermination R2 évalue la proportion de la variation observée dans la rugosité de surface Ra qui peut être expliquée par les paramètres de coupe. Une valeur élevée de R2 indique une meilleure adéquation du modèle aux données expérimentales.

La racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) mesure l'écart entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs réelles de la rugosité de surface Ra. Une valeur plus faible de RMSE indique une meilleure précision du modèle dans la prédiction des résultats expérimentaux.

Le tableau indique également le nombre d'essais utilisés pour l'apprentissage et la validation de la structure optimale. Ces essais ont été soigneusement sélectionnés afin d'obtenir une représentativité adéquate des données et d'assurer une évaluation fiable de la performance du modèle.

Les valeurs présentées dans le Tableau V.4 permettent d'évaluer quantitativement la performance de la structure optimale choisie et d'apprécier l'efficacité du modèle dans la prédiction de la rugosité de surface Ra en fonction des paramètres de coupe. Ces mesures sont cruciales pour évaluer la validité et la robustesse des résultats obtenus au cours de cette étude.

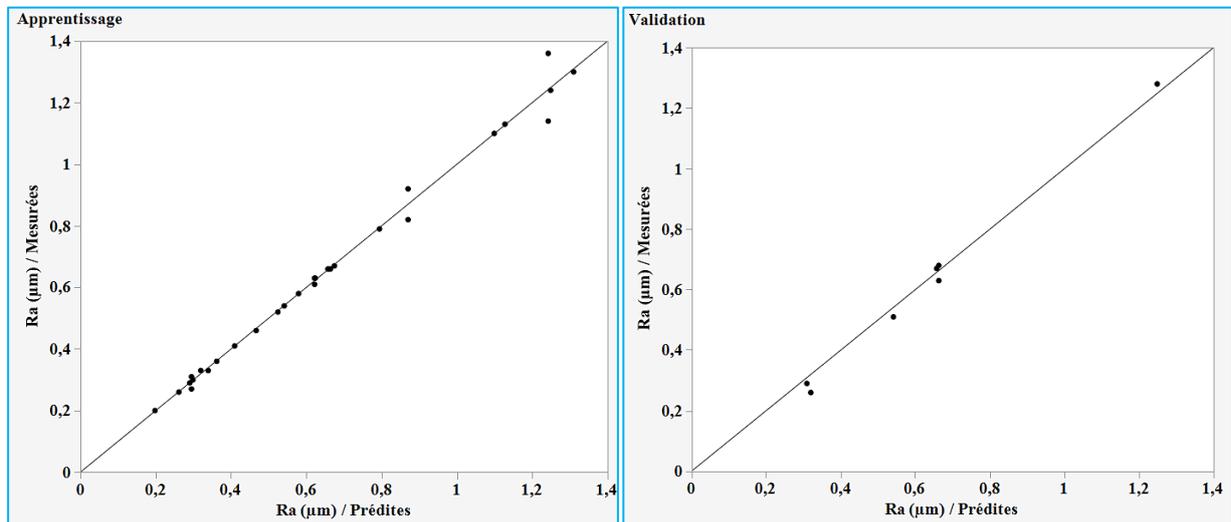
**Tableau V.4 :** Conditions de la modélisation de l'effort de coupe par la méthode (ANN)

Mesures	Apprentissage	Validation
Coefficient de détermination (R <sup>2</sup> )	0.9907	0.9893
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0.0326	0.0325
Somme fréquences	29	7

La Figure V.7 présente les valeurs expérimentales du critère de rugosité de surface en fonction de leurs valeurs prédites par le modèle basé sur les réseaux de neurones artificiels (RNA). Il est clairement observé que la plupart des points d'intersection se trouvent à proximité de la ligne médiane, ce qui démontre la robustesse de la méthode de modélisation utilisant les RNA.

L'alignement des points d'intersection avec la ligne médiane indique que le modèle basé sur les RNA est capable de capturer avec précision les variations de la rugosité de surface prédite par rapport aux résultats expérimentaux. Cela confirme la validité et l'efficacité de la méthode de modélisation utilisée dans cette étude.

La proximité des points d'intersection avec la ligne médiane indique également que les prédictions du modèle sont généralement cohérentes avec les valeurs réelles de la rugosité de surface. Cela suggère que le modèle est capable de généraliser correctement au-delà des données d'apprentissage, ce qui est essentiel pour une utilisation fiable dans des situations réelles.



**Figure V.7:** Corrélation entre les données prédites et expérimentales en utilisant les données d'apprentissage, de validation et de test pour Ra

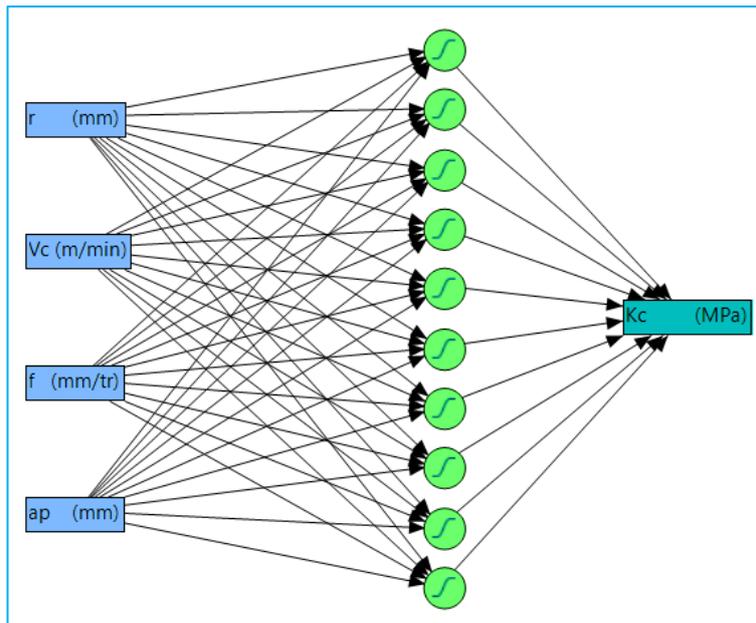
### V. 1. 2. 2. Modélisation mathématique à base d'ANN de Kc

#### (a) Architecture neurale du Kc

La modélisation de l'effort de coupe spécifique en fonction des paramètres de coupe a été réalisée en utilisant une structure de réseau neuronal 3-10-1, comme illustrée dans la Figure V.8. Dans la phase d'apprentissage du réseau neuronal, un total de 29 essais ont été utilisés, tandis que pour la validation globale du réseau, 7 essais ont été sélectionnés de manière arbitraire.

La structure du réseau neuronal 3-10-1 signifie qu'il y a trois neurones dans la couche d'entrée correspondant aux paramètres de coupe, dix neurones dans la couche cachée, et un neurone dans la couche de sortie. Cette configuration a été choisie en raison de sa capacité à capturer les relations complexes entre les paramètres de coupe et l'effort de coupe spécifique.

La sélection de la structure optimale du réseau a été basée sur l'évaluation du coefficient de détermination  $R^2$  et de l'erreur racine carrée (RMSE) pour les ensembles d'apprentissage et de validation. La structure optimale choisie se compose de quatre nœuds dans la couche d'entrée, correspondant aux quatre paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $r$  et  $a_p$ ). La couche cachée est composée de dix nœuds utilisant une fonction de transfert tangent hyperbolique, et la couche de sortie est constituée d'un seul nœud avec une fonction de transfert linéaire.



**Figure V.8:** Architecture neurale choisie pour l'effort de coupe spécifique Kc

**(b) Modèles mathématiques du Kc**

La somme des sorties des dix neurones de la couche cachée multipliée par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle mathématique du l'effort de coupe spécifique indiqué dans l'équation V.7. Les termes de H1 à H10 sont les sorties de chaque neurone de la couche cachée de l'architecture.

$$Kc = 738.54046 \times H_1 - 1692.00490 \times H_2 + 567.413091 \times H_3 + 219.43091 \times H_4 + 385.15295 \times H_5 - 1021.30891 \times H_6 + 219.10437 \times H_7 - 240.32044 \times H_8 + 27.30326 \times H_9 - 722.54495 \times H_{10} + 2418.069496; \quad \dots (V.7)$$

$$H_1 = \tanh(0.5 \times (-8.48758 \times r - 0.01715 \times Vc - 10.83666 \times f + 4.99095 \times ap + 11.19111))$$

$$H_2 = \tanh(0.5 \times (-2.88545 \times r + 0.00989 \times Vc + 7.94151 \times f - 0.97367 \times ap + 0.57237))$$

$$H_3 = \tanh(0.5 \times (2.96628 \times r + 0.04409 \times Vc + 52.37316 \times f - 3.08162 \times ap - 15.24441))$$

$$H_4 = \tanh(0.5 \times (2.33725 \times r - 0.00289 \times Vc + 15.69722 \times f + 9.09510 \times ap - 7.09364))$$

$$H_5 = \tanh(0.5 \times (-8.22736 \times r - 0.03592 \times Vc + 9.63959 \times f - 0.09785 \times ap + 12.30643))$$

$$H_6 = \tanh(0.5 \times (-3.52252 \times r - 0.00036 \times Vc + 15.91712 \times f + 4.83905 \times ap + 0.41924))$$

$$H_7 = \tanh(0.5 \times (-11.31576 \times r - 0.00969 \times Vc + 7.79252 \times f - 11.58531 \times ap + 17.49755))$$

$$H_8 = \tanh(0.5 \times (3.14632 \times r - 0.01282 \times Vc + 17.58250 \times f - 9.57793 \times ap + 0.47100))$$

$$H_9 = \tanh(0.5 \times (-6.94786 \times r + 0.01478 \times Vc - 29.29661 \times f + 10.43357 \times ap + 3.97910))$$

$$H_{10} = \tanh(0.5 \times (-4.03061 \times r - 0.04541 \times Vc + 0.77086 \times f + 9.22574 \times ap + 8.45710));$$

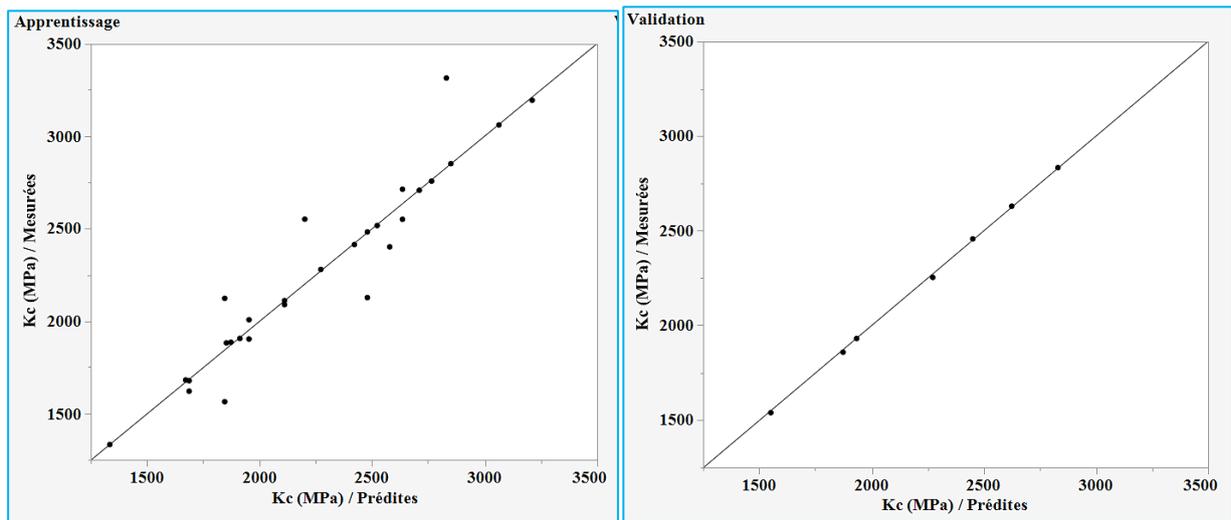
Le Tableau V.5 présente les valeurs du coefficient de détermination R<sup>2</sup>, de la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le nombre des essais utilisées pour la phase d'apprentissage et de validation de la structure optimale choisie.

**Tableau V.5 :** Conditions de la modélisation de l'effort de coupe spécifique par la méthode (ANN)

Mesures	Apprentissage	Validation
Coefficient de détermination (R <sup>2</sup> )	0.9017	0.9994

Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	154.54	9.92
Somme fréquences	29	7

La Figure V.9 illustre les tracés des valeurs expérimentales en fonction de leurs valeurs prédites correspondant à l'effort de coupe spécifique. À partir de cette figure nous remarquons que l'ensemble des points d'intersection entre les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches de la ligne médiane pour les ensembles d'apprentissage et de validation (avec une inclinaison de 45°), ce qui prouve l'efficacité du modèle des réseaux de neurone artificiel.



**Figure V.9:** Corrélation entre les données prédites et expérimentales en utilisant les données d'apprentissage, de validation et de test pour Kc

### V. 1. 2. 3. Modélisation mathématique à base d'ANN du MRR

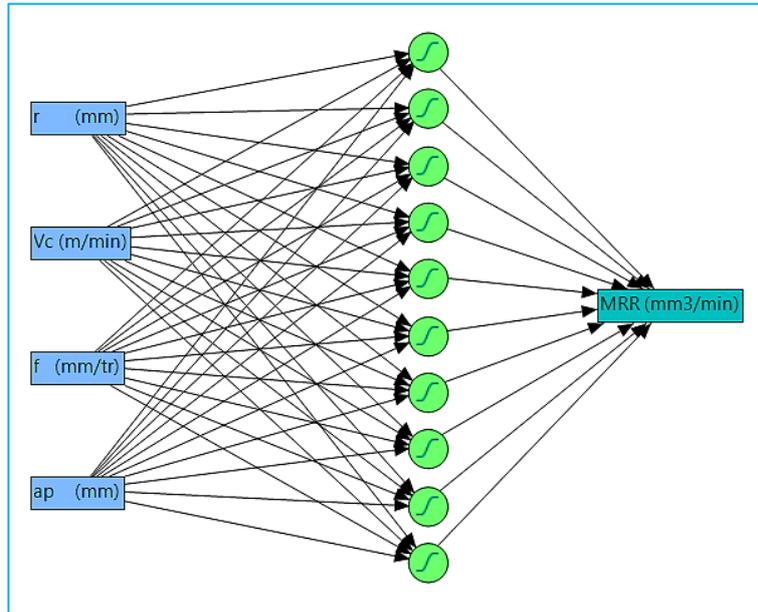
#### (a) Architecture neurale du MRR

Après avoir testé plusieurs configurations d'architectures neurales, nous avons sélectionné la structure 3-10-1 (illustrée à la Figure V.10) du réseau de neurones qui a donné les meilleurs résultats dans la modélisation de la réponse MRR. Cette structure optimale est composée d'une couche d'entrée avec quatre nœuds correspondant aux paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $r$  et  $a_p$ ), une couche cachée avec dix nœuds utilisant une fonction de transfert tangente hyperbolique, et une couche de sortie avec un seul nœud utilisant une fonction de transfert linéaire.

De la même manière que pour les configurations précédentes, nous avons utilisé 24 essais pour l'apprentissage du réseau neuronal et 12 essais choisis aléatoirement pour valider le modèle. Cette division des données en ensembles d'apprentissage et de validation permet d'évaluer la performance du réseau neuronal de manière fiable et de s'assurer de sa capacité à généraliser au-delà des données d'apprentissage.

La sélection de cette structure optimale a été basée sur les résultats obtenus en termes de précision de la modélisation de la réponse MRR. En utilisant cette architecture de réseau neuronal, nous avons pu capturer efficacement les relations complexes entre les paramètres de

coupe et la réponse MRR, ce qui est essentiel pour comprendre et optimiser les processus d'usinage



**Figure V.10:** Architecture neurale choisie pour l'effort de coupe spécifique MRR

**(b) Modèles mathématiques du MRR**

La somme des sorties des dix neurones de la couche cachée multipliée par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle mathématique du l'effort de coupe spécifique indiqué dans l'équation V.8.

$$\begin{aligned} \mathbf{MRR} = & 722.49887 \times \mathbf{H}_1 - 3893.88073 \times \mathbf{H}_2 + 1011.09883 \times \mathbf{H}_3 - 6089.35292 \times \mathbf{H}_4 - \\ & 6464.40651 \times \mathbf{H}_5 + 3548.66567 \times \mathbf{H}_6 + 2274.12229 \times \mathbf{H}_7 - 6080.79588 \times \mathbf{H}_8 + \\ & 1548.91671 \times \mathbf{H}_9 - 3078.35995 \times \mathbf{H}_{10} + 10671.90135; \end{aligned} \quad \dots \text{(V.8)}$$

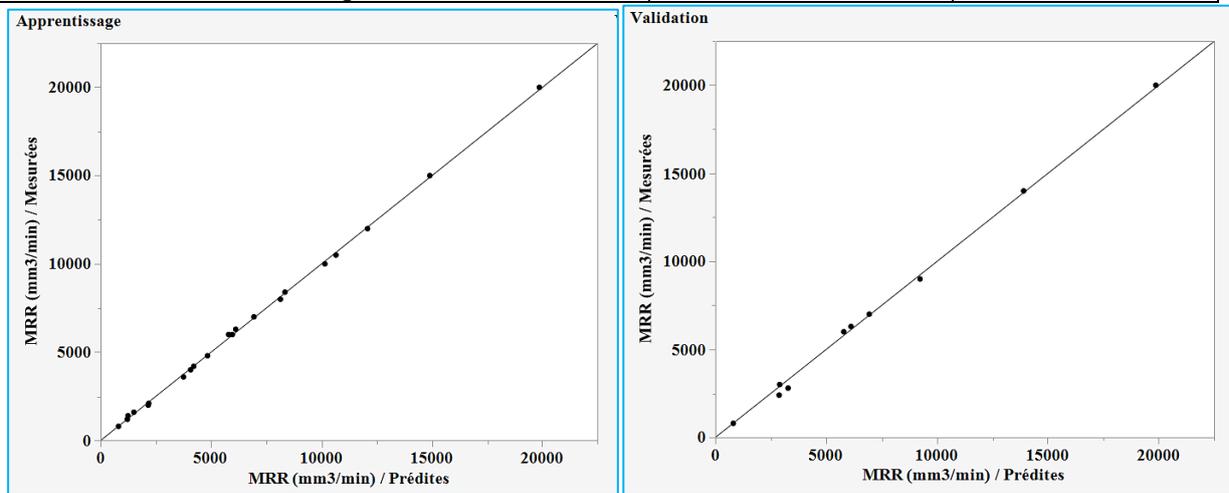
Les coefficients de H1 à H10 sont les équations des sorties de chaque neurone de la couche cachée de MRR :

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_1 &= \tanh(0.5 \times (1.02232 \times r + 0.00327 \times Vc - 0.43550 \times f + 0.81516 \times ap - 1.62077)) \\ \mathbf{H}_2 &= \tanh(0.5 \times (-1.38245 \times r + 0.01006 \times Vc + 0.64414 \times f - 7.60009 \times ap + 1.18437)) \\ \mathbf{H}_3 &= \tanh(0.5 \times (-0.59141 \times r - 0.00010 \times Vc + 4.04649 \times f + 2.60062 \times ap - 0.87452)) \\ \mathbf{H}_4 &= \tanh(0.5 \times (-0.68633 \times r + 0.09283 \times Vc - 17.75749 \times f - 5.94947 \times ap + 10.13589)) \\ \mathbf{H}_5 &= \tanh(0.5 \times (3.29090 \times r - 0.01611 \times Vc - 16.98010 \times f + 1.71379 \times ap + 1.07259)) \\ \mathbf{H}_6 &= \tanh(0.5 \times (-0.77079 \times r + 0.00700 \times Vc + 13.59768 \times f + 5.10245 \times ap - 4.71019)) \\ \mathbf{H}_7 &= \tanh(0.5 \times (0.83257 \times r - 0.00782 \times Vc - 6.14829 \times f - 1.46680 \times ap + 1.19275)) \\ \mathbf{H}_8 &= \tanh(0.5 \times (-1.82193 \times r + 0.00888 \times Vc + 5.94740 \times f + 2.89115 \times ap - 0.73419)) \\ \mathbf{H}_9 &= \tanh(0.5 \times (0.63325 \times r + 0.00534 \times Vc - 4.58759 \times f + 2.51773 \times ap - 1.12909)) \\ \mathbf{H}_{10} &= \tanh(0.5 \times (-0.02380 \times r - 0.00222 \times Vc + 14.99870 \times f - 4.92241 \times ap - 1.49500)); \end{aligned}$$

Le Tableau V.6 présente les valeurs du coefficient de détermination  $R^2$ , de la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le nombre des essais utilisées pour la phase d'apprentissage et de validation de la structure optimale choisie.

**Tableau V.6 :** Conditions de la modélisation de l'effort de coupe spécifique par la méthode (ANN)

Mesures	Apprentissage	Validation
Coefficient de détermination ( $R^2$ )	0.9994	0.9975
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	110.36	267.96
Somme fréquences	24	12



**Figure V.11:** Corrélation entre les données prédites et expérimentales en utilisant les données d'apprentissage, de validation et de test pour  $K_c$

La Figure V.11 les tracés des valeurs expérimentales en fonction de leurs valeurs prédites correspondant au taux d'enlèvement de matière (MRR). L'observation de cette figure révèle que tous les points d'intersection entre les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches de la ligne médiane pour les ensembles d'apprentissage et de validation, avec une inclinaison de  $45^\circ$ . Cette proximité indique l'efficacité du modèle basé sur les réseaux de neurones artificiels.

La bonne concordance entre les valeurs prédites et les valeurs expérimentales suggère que le modèle des réseaux de neurones a réussi à capturer les relations complexes entre les paramètres de coupe et le taux d'enlèvement de matière. Les résultats obtenus confirment la capacité du modèle à généraliser au-delà des données d'apprentissage, ce qui est crucial pour sa validité et son utilité dans des conditions opérationnelles réelles.

#### V. 1. 2. 4. Résultats comparatifs des modèles ANN et RSM

Dans cette partie de notre étude, nous avons effectué une comparaison entre les modèles prédictifs développés à l'aide de la méthode de surface de réponse (RSM) et de la méthode des réseaux de neurones artificiels (ANN). Cette comparaison a été réalisée en utilisant plusieurs critères d'évaluation, tels que l'erreur carrée moyenne (MSE), la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur absolue moyenne (MAD), la moyenne absolue des erreurs en pourcentage (MAPE) et le coefficient de détermination ( $R^2$ ). Les formules de calcul de ces différents critères d'erreur sont présentées dans le tableau V.10.

Nous avons comparé les résultats de prédiction des deux méthodes, RSM et ANN, pour la rugosité de surface ( $R_a$ ), l'effort de coupe spécifique et le taux d'enlèvement de matière. Les résultats de cette comparaison sont résumés dans les tableaux 7, 8 et 9, respectivement.

Ces tableaux mettent en évidence les performances des deux méthodes en termes de précision et d'adéquation aux données expérimentales. Les critères d'évaluation utilisés nous permettent de mesurer l'écart entre les valeurs prédites par les modèles et les valeurs réelles mesurées lors des essais.

L'analyse des résultats obtenus nous permet de déterminer quelle méthode, RSM ou ANN, offre la meilleure adéquation aux données et la capacité la plus précise à prédire les caractéristiques étudiées. Ces informations sont essentielles pour guider le choix de la méthode la plus appropriée à utiliser dans le contexte spécifique de notre étude.

**Tableau V.7 :** Comparaison entre les résultats mesurés et prédits par RSM et ANN pour la rugosité de surface  $R_a$

N° de test	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ ) expérimentales	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ ) prédites par RSM	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ ) prédites par ANN	Erreur % de prédiction absolue RSM	Erreur % de prédiction absolue ANN
1	0.67	0.58	0.65	12.94	2.28
2	0.63	0.58	0.58	7.89	8.71
3	1.14	1.21	1.22	6.14	7.40
4	0.66	0.58	0.65	11.62	0.80
5	0.61	0.58	0.58	4.87	5.72
6	1.36	1.21	1.22	11.03	9.98
7	0.29	0.43	0.39	48.10	33.89
8	0.58	0.58	0.59	0.59	1.27
9	1.30	1.27	1.34	2.31	3.25
10	0.36	0.40	0.31	12.06	13.03
11	0.67	0.70	0.78	5.21	16.36
12	1.10	1.17	1.19	6.36	8.27
13	0.63	0.64	0.68	0.87	7.52
14	1.24	1.30	1.22	4.84	1.88
15	0.31	0.30	0.29	3.13	7.32
16	0.68	0.64	0.68	6.54	0.39
17	1.28	1.30	1.22	1.56	4.95
18	0.27	0.30	0.29	11.22	6.41
19	0.63	0.70	0.63	11.78	0.07
20	0.79	0.73	0.78	7.48	1.33
21	0.30	0.32	0.33	8.20	10.06
22	0.41	0.46	0.54	11.12	31.13
23	0.52	0.64	0.52	22.94	0.09
24	0.26	0.29	0.27	13.27	1.96
25	0.82	0.83	0.88	0.67	7.82
26	0.33	0.22	0.22	34.79	31.83
27	0.51	0.49	0.52	3.90	1.38
28	0.92	0.83	0.88	10.27	3.90
29	0.26	0.22	0.22	17.23	13.48
30	0.54	0.49	0.52	9.24	4.25
31	0.66	0.66	0.68	0.38	3.56

32	0.29	0.34	0.29	16.45	1.33
33	0.46	0.39	0.47	14.30	3.20
34	1.13	1.12	1.08	0.88	4.69
35	0.20	0.21	0.25	6.30	25.17
36	0.33	0.43	0.39	29.09	18.05

**Tableau V.8 :** Comparaison entre les résultats mesurés et prédits par RSM et ANN pour l'effort de coupe spécifique Kc

N° de test	Kc (MPa) expérimentales	Kc (MPa) prédites par RSM	Kc (MPa) prédites par ANN	Erreur % de prédiction absolue RSM	Erreur % de prédiction absolue ANN
1	2551.25	2667.38	2635.11	4.55	3.29
2	1859.05	1912.62	1872.17	2.88	0.71
3	1678.70	1586.88	1686.18	5.47	0.45
4	2713.75	2667.38	2635.11	1.71	2.90
5	1886.67	1912.62	1872.17	1.38	0.77
6	1622.40	1586.88	1686.18	2.19	3.93
7	2457.50	2413.58	2450.56	1.79	0.28
8	1883.29	1883.25	1852.30	0.00	1.65
9	1540.00	1794.45	1550.06	16.52	0.65
10	2517.50	2359.02	2522.72	6.30	0.21
11	2415.00	2141.22	2421.25	11.34	0.26
12	1682.67	1591.05	1670.92	5.44	0.70
13	2008.29	2088.78	1952.61	4.01	2.77
14	1565.50	1809.26	1844.63	15.57	17.83
15	2482.92	2353.99	2478.95	5.19	0.16
16	1904.00	2088.78	1952.61	9.70	2.55
17	2124.00	1809.26	1844.63	14.82	13.15
18	2127.92	2353.99	2478.95	10.62	16.50
19	2852.14	3009.28	2850.61	5.51	0.05
20	1931.50	1911.69	1932.54	1.03	0.05
21	2757.75	2660.36	2764.56	3.53	0.25
22	2552.14	2437.68	2200.76	4.48	13.77
23	1333.90	1564.52	1333.56	17.29	0.03
24	3195.00	3273.41	3211.66	2.45	0.52
25	2090.00	2110.78	2110.53	0.99	0.98
26	2254.00	2317.34	2271.92	2.81	0.80
27	2833.57	2962.55	2830.27	4.55	0.12
28	2111.67	2110.78	2110.53	0.04	0.05
29	2280.25	2317.34	2271.92	1.63	0.37
30	3315.00	2962.55	2830.27	10.63	14.62
31	1907.50	1700.06	1912.14	10.87	0.24
32	3061.25	3057.50	3064.03	0.12	0.09
33	2402.62	2518.06	2578.27	4.80	7.31
34	2708.50	2720.73	2710.00	0.45	0.06
35	2630.00	2587.80	2624.17	1.60	0.22
36	2278.43	2272.79	2272.62	0.25	0.25

**Tableau V.9 :** Comparaison entre les résultats mesurés et prédits par RSM et ANN pour le taux d'enlèvement de matière MRR

N° de test	MRR (mm <sup>3</sup> /min) expérimentales	MRR (mm <sup>3</sup> /min) prédites par RSM	MRR (mm <sup>3</sup> /min) prédites par ANN	Erreur % de prédiction absolue RSM	Erreur % de prédiction absolue ANN
------------	---	---	---	------------------------------------	------------------------------------

		<b>RSM</b>	<b>ANN</b>		
<b>1</b>	800.00	941.18	806.68	17.65	0.84
<b>2</b>	6300.00	6300.00	6113.57	0.00	2.96
<b>3</b>	20000.00	19858.82	19857.60	0.71	0.71
<b>4</b>	800.00	941.18	806.68	17.65	0.84
<b>5</b>	6300.00	6300.00	6113.57	0.00	2.96
<b>6</b>	20000.00	19858.82	19857.60	0.71	0.71
<b>7</b>	2400.00	2317.65	2870.92	3.43	19.62
<b>8</b>	10500.00	10876.47	10649.82	3.59	1.43
<b>9</b>	4000.00	4305.88	4068.90	7.65	1.72
<b>10</b>	4000.00	3694.12	4076.42	7.65	1.91
<b>11</b>	2100.00	1723.53	2174.60	17.93	3.55
<b>12</b>	12000.00	12082.35	12077.56	0.69	0.65
<b>13</b>	7000.00	7105.88	6936.38	1.51	0.91
<b>14</b>	3000.00	2894.12	2896.29	3.53	3.46
<b>15</b>	4800.00	4800.00	4836.80	0.00	0.77
<b>16</b>	7000.00	7105.88	6936.38	1.51	0.91
<b>17</b>	3000.00	2894.12	2896.29	3.53	3.46
<b>18</b>	4800.00	4800.00	4836.80	0.00	0.77
<b>19</b>	1400.00	1523.53	1234.40	8.82	11.83
<b>20</b>	9000.00	9229.41	9225.88	2.55	2.51
<b>21</b>	8000.00	8476.47	8135.02	5.96	1.69
<b>22</b>	4200.00	3970.59	4209.41	5.46	0.22
<b>23</b>	15000.00	14876.47	14897.11	0.82	0.69
<b>24</b>	1600.00	1123.53	1500.91	29.78	6.19
<b>25</b>	6000.00	6000.00	5962.83	0.00	0.62
<b>26</b>	6000.00	5876.47	5787.64	2.06	3.54
<b>27</b>	2800.00	2923.53	3275.91	4.41	17.00
<b>28</b>	6000.00	6000.00	5962.83	0.00	0.62
<b>29</b>	6000.00	5876.47	5787.64	2.06	3.54
<b>30</b>	2800.00	2923.53	3275.91	4.41	17.00
<b>31</b>	10000.00	10170.59	10149.75	1.71	1.50
<b>32</b>	1200.00	1476.47	1206.61	23.04	0.55
<b>33</b>	8400.00	8323.53	8343.48	0.91	0.67
<b>34</b>	2000.00	1829.41	2154.61	8.53	7.73
<b>35</b>	3600.00	3676.47	3749.30	2.12	4.15
<b>36</b>	14000.00	13723.53	13899.16	1.97	0.72

L'analyse comparative des résultats de prédiction des modèles RSM et ANN pour les réponses Ra, Kc et MRR, ainsi que les pourcentages d'erreur absolue correspondants présentés dans les tableaux 7, 8 et 9, révèle des différences significatives entre les deux méthodes. Globalement, les modèles ANN montrent de meilleures performances avec des erreurs de prédiction plus faibles par rapport aux modèles RSM.

En examinant les résultats spécifiques, nous constatons que les valeurs maximales d'erreur absolue pour la méthode RSM sont de (48,10 %, 17,83 % et 29,78 %) respectivement pour les critères Ra, Kc et MRR. En revanche, les modèles ANN présentent des erreurs maximales plus faibles, atteignant (33,39 %, 17,29 % et 19,62 %) respectivement pour les mêmes critères.

Ces résultats indiquent que les modèles ANN sont plus précis et fournissent des prédictions plus proches des valeurs réelles pour les réponses étudiées. Les erreurs absolues plus faibles

obtenues avec les modèles ANN témoignent de leur capacité à capturer les relations complexes entre les paramètres de coupe et les réponses Ra, Kc et MRR.

Il convient de souligner que ces conclusions sont basées sur l'analyse des pourcentages d'erreur absolue et ne prennent pas en compte d'autres aspects tels que la complexité de la modélisation, la stabilité des prédictions ou la sensibilité aux variations des paramètres d'entrée.

**Tableau V.10 : Fonction d'erreur et ses équations**

Fonction d'erreur	Équation
Erreur absolue moyenne :	$MAD = \sum_{t=1}^n \frac{ E_t - P_t }{n} \quad (V.9)$
Erreur absolue moyenne en (%) :	$MAPE = \sum_{t=1}^n \frac{ E_t - P_t /E_t}{n} \times 100 \quad (V.10)$
Erreur quadratique moyenne :	$RMSE = \sum_{t=1}^n \sqrt{\frac{(E_t - P_t)^2}{n}} \quad (V.11)$
Coefficient de corrélation :	$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (P_t - E_t)}{\sum_{t=1}^n (P_t - Y_e)^2} \quad (V.12)$
<p><b>n</b> le nombre d'expérience, <b>Et</b> la valeur expérimentale de la ième expérience, <b>Pt</b> la valeur prédite de la ième expérience, <b>Ye</b> la réponse moyenne observée dans les expériences.</p>	

Le tableau V.11 présente les valeurs de R<sup>2</sup>, RMSE, MAPE et MAD obtenues à l'aide des modèles mathématiques développés par la méthode de surface de réponse (RSM) et l'approche des réseaux de neurones artificiels (ANN) pour les trois réponses étudiées (Ra, Kc et MRR). Les résultats de ce tableau mettent en évidence la supériorité des modèles ANN par rapport aux modèles RSM.

En examinant les valeurs, nous remarquons que les erreurs absolues moyennes en pourcentage (MAPE) des prédictions RSM pour les trois réponses sont généralement comprises dans une fourchette de ±10%. En revanche, les modèles ANN atteignent une valeur maximale de 2,539% pour le MAPE. De plus, les erreurs absolues moyennes (MAD) des modèles ANN restent inférieures à 23,989, tandis que les modèles RSM atteignent une valeur de 112,736.

**Tableau V.11 : Performances des modélisations RSM et ANN.**

	RSM				ANN			
	R <sup>2</sup>	RMSE	MAPE%	MAD	R <sup>2</sup>	RMSE	MAPE%	MAD
<b>Ra</b>	0.9628	0.065	10.433	0.052	0.9907	0.021	2.539	0.011
<b>Kc</b>	0.9063	147.466	5.348	112.736	0.9017	32.286	1.094	23.989
<b>MRR</b>	0.9983	0.204	5.363	0.160	0.9994	0.006	0.121	0.004

En ce qui concerne la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), les modèles ANN présentent des valeurs faibles pour les trois critères étudiés, allant de 0,021 à 32,286, tandis que les modèles RSM varient de 0,065 à 147,466. De plus, les modèles ANN pour les critères Ra et MRR atteignent un coefficient de détermination (R<sup>2</sup>) très proche de l'unité (R<sup>2</sup> =

0,99), à l'exception du modèle Kc qui atteint un R<sup>2</sup> de 0,90. Les modèles RSM affichent des valeurs de R<sup>2</sup> comprises entre 0,90 et 0,99.



**Figure V.12:** Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées par RSM et ANN

La comparaison graphique des valeurs expérimentales (mesurées) de Ra, Fz, Pc et des valeurs estimées par les modèles mathématiques obtenus à partir des méthodes RSM et ANN

est présentée dans la Figure V.12. L'analyse des résultats montre une proximité entre les valeurs expérimentales et les valeurs estimées par les deux méthodes, mais les modèles ANN présentent une meilleure corrélation avec les valeurs expérimentales par rapport aux modèles RSM. Cette supériorité de l'approche ANN peut être attribuée à sa capacité à détecter les relations non linéaires.

En conclusion, pour une étude statistique approfondie et une modélisation prédictive plus précise, il est recommandé d'utiliser à la fois l'approche ANN et la méthode RSM, car ces deux méthodes sont complémentaires. Cependant, il convient de souligner que la méthode RSM est plus adaptée pour l'identification et la classification des facteurs principaux et de leurs interactions significatives dans le modèle.

## **V. 2. Optimisation multi-objectif des paramètres d'usinage**

### **V. 2. 1. Optimisation MO des paramètres d'usinage par la méthode de fonction de désirabilité**

L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à déterminer, au sein du domaine expérimental, une configuration des facteurs qui permet de satisfaire au mieux les exigences spécifiées en termes de réponse. Dans le cadre de l'optimisation des paramètres de coupe, chaque paramètre a été étudié à quatre niveaux différents selon la méthodologie de surface de réponse (RSM). Cette planification nécessite le choix de quatre niveaux pour chaque variable afin d'explorer la région de la surface de réponse autour de l'optimum. La RSM est une méthode permettant d'optimiser les réponses en identifiant la combinaison optimale des paramètres d'entrée, que ce soit pour une seule réponse ou pour un ensemble de réponses. Une optimisation réussie doit satisfaire aux conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble.

L'optimisation des réponses multiples repose sur la méthode de désirabilité, qui permet de trouver un compromis entre différentes réponses en utilisant une fonction de désirabilité. Cette fonction permet de regrouper des critères ayant des unités différentes en assignant des valeurs entre 0 et 1 à chaque critère. Une valeur de désirabilité de 0, indiquant une désirabilité élémentaire nulle, signifie que la configuration correspondante est inacceptable pour la réponse sélectionnée, tandis qu'une valeur de désirabilité de 1 représente le cas idéal.

L'objectif principal de cette étude est d'atteindre les niveaux souhaités de rugosité de surface ( $R_a$ ), d'effort de coupe spécifique ( $K_c$ ) et de taux d'enlèvement de matière (MRR) en utilisant les paramètres de coupe optimaux. Pour atteindre cet objectif, l'exploitation de la fonction de désirabilité pour l'optimisation apparaît comme une technique utile. Dans ce contexte, l'objectif est de minimiser la rugosité de surface ( $R_a$ ) et l'effort de coupe spécifique ( $K_c$ ), tout en maximisant le taux d'enlèvement de matière (MRR).

Pour résoudre ce type de problème de planification des paramètres, une fonction objective,  $F(x)$ , est définie comme suit [143]:

$$DF = \left( \prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j}} \quad (\text{V.13})$$

$$F(x) = -DF$$

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

$$d_i = 0 \text{ Si } Y_i \leq \text{Inf}_i$$

$$d_i = \left[ \frac{Y_i - \text{Inf}_i}{T_i - \text{Inf}_i} \right] \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq T_i \quad (\text{V.14})$$

$$d_i = \left[ \frac{Y_i - \text{Sup}_i}{T_i - \text{Sup}_i} \right] \quad \text{Si } T_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \quad (\text{V.15})$$

$$d_i = 0 \text{ Si } Y_i \geq \text{Sup}_i$$

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

$$d_i = 0 \text{ Si } Y_i \leq \text{Inf}_i$$

$$d_i = \left[ \frac{Y_i - \text{Inf}_i}{\text{Sup}_i - \text{Inf}_i} \right] \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \quad (\text{V.16})$$

$$d_i = 1 \text{ Si } Y_i \geq \text{Sup}_i$$

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

$$d_i = 1 \text{ Si } Y_i \leq \text{Inf}_i$$

$$d_i = \left[ \frac{\text{Sup}_i - Y_i}{\text{Sup}_i - \text{Inf}_i} \right] \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \quad (\text{V.17})$$

$$d_i = 0 \text{ Si } Y_i \geq \text{Sup}_i$$

Afin de minimiser l'objectif, il est crucial de sélectionner une configuration optimale qui maximise la fonction de désirabilité combinée DF. En d'autres termes, il s'agit de minimiser  $F(x)$  dans le cas d'une minimisation, et d'effectuer l'inverse dans le cas d'une maximisation. Les contraintes de coupe adoptées pour notre étude sont répertoriées dans le Tableau V.12.

Tableau V.12 : Conditions d'optimisation

Paramètre	Objectif	Limite inf.	Limite sup.	Poids inf.	Poids sup.	Importance
Rayon de bec (mm)	Gamme	0.80	1.20	1	1	3
Vitesse de coupe ( $V_c$ )	Gamme	100	200	1	1	3
Avance ( $f$ )	Gamme	0.08	0.20	1	1	3
Profondeur de passe ( $ap$ )	Gamme	0.10	0.50	1	1	3
$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Minimiser	0.2	1.36	1	1	3
$K_c$ (MPa)	Minimiser	1333.9	3315	1	1	3
$MRR$ ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )	Maximiser	800	20000	1	1	3

Les résultats de l'optimisation multi-objectif des paramètres de coupe à l'aide de la méthode de désirabilité fonction sont présentés dans le Tableau V.13. Nous avons constaté que les valeurs de désirabilité sont inférieures à la valeur idéale de désirabilité (égale à 1). Pour la rugosité de surface, les valeurs optimales obtenues se situent entre  $0.634 \mu\text{m}$  et  $0.644 \mu\text{m}$ , tandis que pour l'effort de coupe spécifique, elles se situent entre  $159.351 \text{ MPa}$  et  $160.359 \text{ MPa}$ . En ce qui concerne le taux d'enlèvement de matière (MRR), les meilleures valeurs trouvées se situent entre  $1651.979 \text{ mm}^3/\text{min}$  et  $1644.572 \text{ cm}^3/\text{min}$ . L'ensemble des graphiques de désirabilité est illustré dans la Figure V.13.

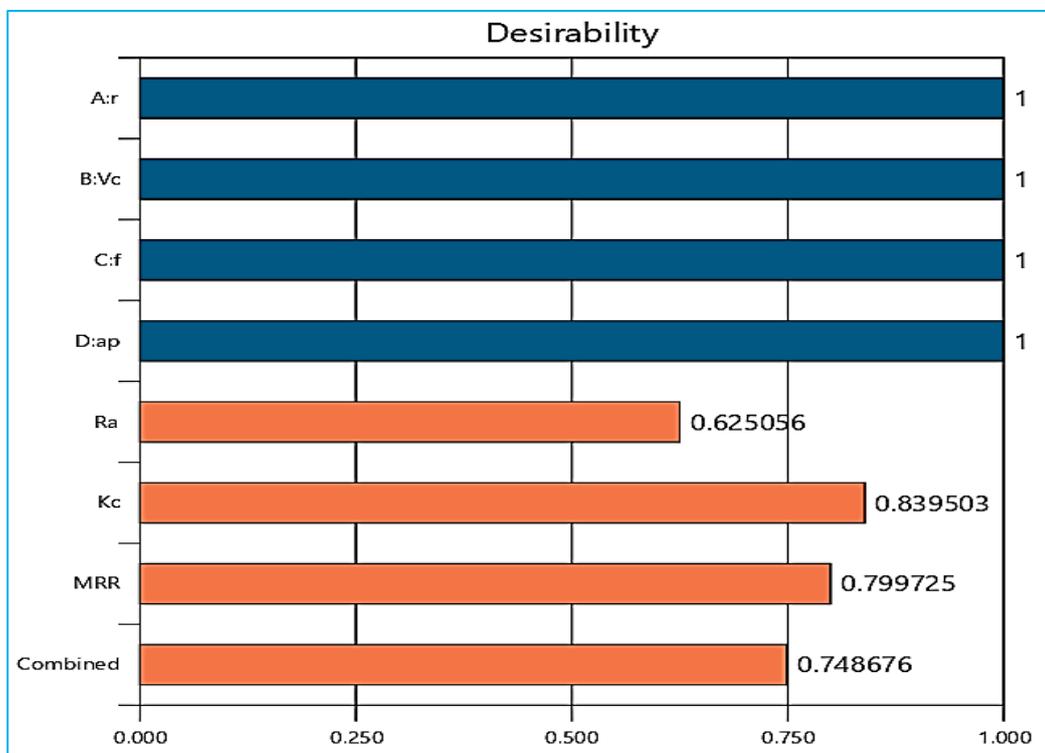
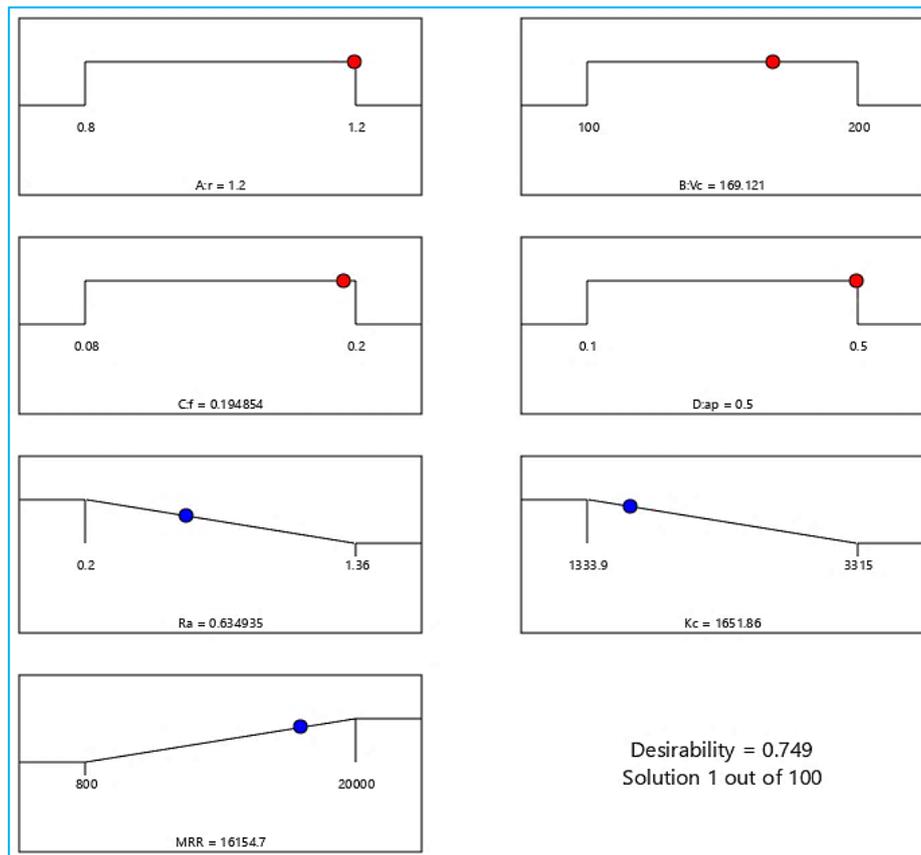


Figure V.13: Graphiques de bar de désirabilité pour les trois cas d'optimisation

**Tableau V.13 : Résultats d'optimisation par DF**

N°	r	Vc	f	ap	Ra	Kc	MRR	Désirabilité
<b>1</b>	<b>1.2</b>	<b>169.041</b>	<b>0.195</b>	<b>0.5</b>	<b>0.634</b>	<b>1652.253</b>	<b>16140.088</b>	<b>0.749</b>
2	1.2	169.402	0.195	0.5	0.636	1652.205	16187.471	0.749
3	1.2	169.56	0.194	0.5	0.633	1656.696	16159.471	0.749
4	1.2	168.402	0.195	0.5	0.633	1649.202	16090.473	0.749
5	1.2	169.447	0.195	0.5	0.64	1648.865	16229.305	0.749
6	1.2	168.552	0.196	0.5	0.638	1644.512	16160.379	0.749
7	1.2	169.492	0.196	0.5	0.644	1644.572	16281.501	0.749
8	1.2	167.636	0.195	0.5	0.631	1646.968	16016.607	0.749
9	1.2	168.291	0.196	0.5	0.643	1638.561	16190.881	0.749
10	1.2	167.476	0.195	0.5	0.636	1640.82	16062.443	0.749

Les régimes de coupe adopter pour l'obtention de ces valeurs, correspond aux plages des conditions de coupe suivantes : (r=1.2, Vc= 168.989 – 167.771 m/min, f = 0,195 – 0.199mm/tr, ap= 0.5 mm).



**Figure V.14:** Diagramme d'optimisation de réponses multiples de (Ra, Kc et MRR).

La Figure V.14 présente les valeurs optimales exactes des paramètres d'entrée (r, Vc, f et ap) ainsi que celles des paramètres technologiques étudiés (Ra, Kc et MRR). D'après cette figure, il est observé que les solutions obtenues pour la rugosité de surface (Ra) et l'effort de coupe spécifique (Kc) sont légèrement éloignées de l'objectif fixé. En revanche, le débit de matière enlevée (MRR) dépasse la valeur moyenne de l'intervalle allant de 800 mm<sup>3</sup>/min à 20000 mm<sup>3</sup>/min.

### V. 2. 2. Optimisation MO des paramètres d'usinage par la méthode d'Analyse Relationnelle Grise

L'analyse relationnelle grise (GRA) est utilisée dans le but de convertir un problème d'optimisation multi-objectif en un seul objectif. Cette étude vise à déterminer la combinaison optimale des paramètres de tournage qui permettra de minimiser la rugosité de surface tout en maximisant le volume de copeau enlevé. Pour ce faire, les étapes suivantes sont entreprises dans le cadre de l'Analyse Relationnelle Grise (GRA) basée sur la méthode de Taguchi.

La nuance relationnelle grise est employée pour transformer un problème d'optimisation à objectifs multiples en un problème à objectif unique. Afin de déterminer les combinaisons optimales des conditions de coupe permettant de minimiser la rugosité de surface, la force de coupe spécifique et de maximiser la productivité (MRR), une technique d'optimisation paramétrique multi-réponses basée sur l'Analyse Relationnelle Grise a été utilisée. Un réseau orthogonal approprié basé sur Taguchi (L36 ( $2^1 \times 3^3$ )) a été sélectionné et l'expérience a été menée conformément à la disposition du réseau orthogonal de Taguchi. Les étapes de l'analyse relationnelle grise sont les suivantes :

#### **Étape 1: Normalisation des réponses des caractéristiques de qualité (génération relationnelle grise)**

Les données expérimentales sont normalisées dans une plage de 0 à 1. Ce processus est appelé génération relationnelle grise. Deux types de normalisation des données différents ont été appliqués en fonction de nos besoins : la minimisation pour les caractéristiques où "plus petit est mieux" (comme Ra et Kc) et la maximisation pour la caractéristique où "plus grand est meilleur" (comme le MRR). La normalisation est effectuée à l'aide des équations suivantes :

- Le plus petit est le meilleur (Ra et Kc)

$$X_i^*(k) = \frac{\max(X_i^0(k)) - X_i^0(k)}{\max(X_i^0(k)) - \min(X_i^0(k))} \quad (\text{V.18})$$

- Le plus grand est le meilleur (MRR)

$$X_i^*(k) = \frac{X_i^k(k) - \min(X_i^0(k))}{\max(X_i^0(k)) - \min(X_i^0(k))} \quad (\text{V.19})$$

Dans cette étude, les expériences sont numérotées de 1 à 36 ( $i = 1, 2, \dots, 36$ ), et les paramètres sont désignés par la lettre "k" ( $k = 1, 2, \dots, 4$ ). La valeur normalisée du kème élément de la séquence (après génération relationnelle grise) est représentée par  $X_i^*(k)$ , tandis que  $\max X_i^0(k)$  correspond à la valeur maximale de  $X_i^0(k)$  et  $\min X_i^0(k)$  à la valeur minimale de  $X_i^0(k)$  pour la kème réponse. Les données traitées après la génération relationnelle grise pour les deux inserts sont présentées dans la Figure V.14. Les valeurs normalisées sont comprises entre 0 et 1. Une valeur normalisée plus élevée indique une meilleure performance, et la meilleure valeur normalisée est égale à 1.

**Tableau V.14** : Valeurs normalisées pour les résultats expérimentaux (Ra, Kc et MRR) (génération relationnelle grise)

Run no	Ra	Kc	MRR
1	0.59	0.39	0
2	0.63	0.73	0.29
3	0.19	0.83	1
4	0.6	0.3	0
5	0.65	0.72	0.29
6	0	0.85	1
7	0.92	0.43	0.08
8	0.67	0.72	0.51
9	0.05	0.9	0.17
10	0.86	0.4	0.17
11	0.59	0.45	0.07
12	0.22	0.82	0.58
13	0.63	0.66	0.32
14	0.1	0.88	0.11
15	0.91	0.42	0.21
16	0.59	0.71	0.32
17	0.07	0.6	0.11
18	0.94	0.6	0.21
19	0.63	0.23	0.03
20	0.49	0.7	0.43
21	0.91	0.28	0.38
22	0.82	0.39	0.18
23	0.72	1	0.74
24	0.95	0.06	0.04
25	0.47	0.62	0.27
26	0.89	0.54	0.27
27	0.73	0.24	0.1
28	0.38	0.61	0.27
29	0.95	0.52	0.27
30	0.71	0	0.1
31	0.6	0.71	0.48
32	0.92	0.13	0.02
33	0.78	0.46	0.4
34	0.2	0.31	0.06
35	1	0.35	0.15
36	0.89	0.52	0.69

**Étape 2 : coefficient relationnel gris**

Un coefficient relationnel gris est calculé pour afficher la relation entre les résultats expérimentaux normalisés idéaux (optimaux) et réels. Le coefficient relationnel gris peut être calculé comme suit :

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \psi\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \psi\Delta_{\max}} \quad 0 < \xi_i(k) \leq 1 \quad (\text{V.20})$$

$$\Delta_{0i}(k) = \|X_0^*(k) - X_i^*(k)\| \quad (\text{V.21})$$

$$\Delta_{\min} = \min_{\forall j \in i} \min_{\forall k} \|X_0^*(k) - X_i^*(k)\| \quad (\text{V.22})$$

$$\Delta_{\max} = \max_{\forall j \in i} \max_{\forall k} \|X_0^*(k) - X_i^*(k)\| \quad (\text{V.23})$$

- $\Delta_{0i}(k)$  est la différence en valeur absolue entre  $x_0^k(k)$  et  $x_i^k(k)$ ,
- $\Delta_{\min}$  est la plus petite valeur de  $\Delta_{0i}(k)$
- $\Delta_{\max}$  est la plus grande valeur de  $\Delta_{0i}(k)$  coefficient de distinction et sa valeur est comprise entre 0 à 1
- La valeur de  $\psi$  est en générale égale à (0,5)

La valeur du coefficient  $\psi$  a été prise (0,5). Les valeurs des coefficients "Gris Rationnelle Coefficients" est présentés dans le Tableau V.15.

**Tableau V.15 :** Evaluation des coefficients relationnels  $\Delta_{0i}$  et Gray  $\xi_i(k)$  avec  $\psi = 0,5$  pour chacune des réponses.

Run no.	Evaluation of $\Delta_{0i}$			Grey relational coefficient $\xi_i(k)$ with $\psi = 0.5$		
	Ra	Kc	MRR	Ra	Kc	MRR
1	0.41	0.61	1	0.55	0.45	0.33
2	0.37	0.27	0.71	0.57	0.65	0.41
3	0.81	0.17	0	0.38	0.74	1
4	0.4	0.7	1	0.56	0.42	0.33
5	0.35	0.28	0.71	0.59	0.64	0.41
6	1	0.15	0	0.33	0.77	1
7	0.08	0.57	0.92	0.87	0.47	0.35
8	0.33	0.28	0.49	0.6	0.64	0.5
9	0.95	0.1	0.83	0.35	0.83	0.38
10	0.14	0.6	0.83	0.78	0.46	0.38
11	0.41	0.55	0.93	0.55	0.48	0.35
12	0.78	0.18	0.42	0.39	0.74	0.55
13	0.37	0.34	0.68	0.57	0.59	0.42
14	0.9	0.12	0.89	0.36	0.81	0.36
15	0.09	0.58	0.79	0.84	0.46	0.39
16	0.41	0.29	0.68	0.55	0.63	0.42
17	0.93	0.4	0.89	0.35	0.56	0.36
18	0.06	0.4	0.79	0.89	0.56	0.39
19	0.37	0.77	0.97	0.57	0.39	0.34
20	0.51	0.3	0.57	0.5	0.62	0.47
21	0.09	0.72	0.63	0.85	0.41	0.44
22	0.18	0.61	0.82	0.73	0.45	0.38
23	0.28	0	0.26	0.64	1	0.66

24	0.05	0.94	0.96	0.91	0.35	0.34
25	0.53	0.38	0.73	0.48	0.57	0.41
26	0.11	0.46	0.73	0.82	0.52	0.41
27	0.27	0.76	0.9	0.65	0.4	0.36
28	0.62	0.39	0.73	0.45	0.56	0.41
29	0.05	0.48	0.73	0.91	0.51	0.41
30	0.29	1	0.9	0.63	0.33	0.36
31	0.4	0.29	0.52	0.56	0.63	0.49
32	0.08	0.87	0.98	0.87	0.36	0.34
33	0.22	0.54	0.6	0.69	0.48	0.45
34	0.8	0.69	0.94	0.38	0.42	0.35
35	0	0.65	0.85	1	0.43	0.37
36	0.11	0.48	0.31	0.82	0.51	0.62

### Étape 3 : Classement relationnel gris et classement relationnel gris

Le coefficient relationnel gris moyen représente la note relationnelle grise qui indique la relation entre les séries. Cependant, l'importance de chaque caractéristique de qualité est différente. La note relationnelle grise est calculée selon l'équation suivante (V.24) :

$$\alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (\text{V.24})$$

où « n » représente le nombre de caractéristiques de performance (dans cette étude, « n » est égal à 3).

Une note relationnelle plus élevée indique que la valeur expérimentale est plus proche de la valeur normalisée idéale, ce qui signifie que la combinaison de paramètres correspondante se rapproche davantage de la valeur optimale.

L'ordre "1" est attribué à la note relationnelle grise la plus élevée. Les notes relationnelles grises, calculées à partir de l'équation (V.20), pour les outils de coupe (plaquettes revêtues et non revêtues), ainsi que l'ordre relationnel gris, sont présentés dans le tableau V.16.

**Tableau V.16 : Qualité Grise GRG et son ordre.**

Run no.	Grey relational grade GRG ( $\alpha_i$ )	Order
1	0.584	13
2	0.559	18
3	0.622	5
4	0.573	15
5	0.558	19
6	0.621	6
7	0.594	10
8	0.546	23
9	0.61	8
10	0.532	25
11	0.561	17
12	0.548	22
13	0.502	33
14	0.604	9

15	0.594	11
16	0.509	31
17	0.515	28
18	0.642	2
19	0.531	26
20	0.514	29
21	0.549	21
22	0.514	30
23	0.683	1
24	0.635	3
25	0.476	34
26	0.573	16
27	0.556	20
28	0.464	36
29	0.593	12
30	0.522	27
31	0.504	32
32	0.631	4
33	0.535	24
34	0.467	35
35	0.617	7
36	0.581	14

#### Étape 4: Sélection des niveaux optimaux des paramètres de processus

D'après le tableau V.16 et la Figure V.15, il est observé que l'expérience 23, avec les paramètres de contrôle correspondants, présente la plus haute note relationnelle grise pour la plaquette de coupe non revêtue. Cela indique que l'expérience 23 représente le réglage optimal des facteurs de rotation, permettant d'obtenir simultanément une rugosité de surface minimale, une force de coupe spécifique réduite et un taux d'enlèvement de matière maximal, parmi toutes les autres expériences réalisées pour les plaquettes en céramique non revêtues et revêtues respectivement.

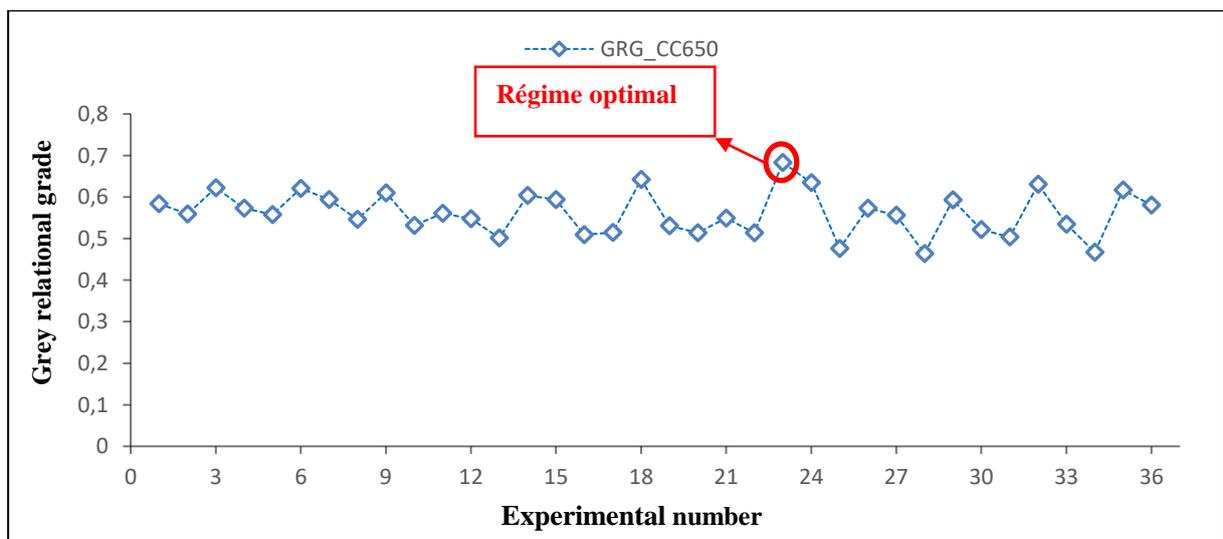


Figure V.15: Qualité Relationnelle Grise (GRG)

Le réglage optimal des paramètres de processus pour plusieurs caractéristiques d'usinage, en utilisant l'analyse relationnelle grise (GRA), correspond aux niveaux 03 pour les paramètres  $a_p$  et  $f$ , ainsi qu'aux niveaux 02 pour les paramètres  $V_c$  et  $r$ , lors de l'utilisation de l'outil en céramique non revêtu.

### **V. 2. 3. Optimisation MO des paramètres d'usinage par la méthode des Algorithmes Génériques (GA)**

#### **V. 2. 3. 1. Définition et concept de base de GA**

Les algorithmes génétiques sont des techniques de recherche probabilistes aléatoires qui imitent le processus naturel d'évolution et d'hérédité pour converger vers un optimum. Ce processus d'évolution et d'adaptation des individus dans la nature repose sur le principe de la "survie du plus apte" selon Darwin, où les individus les plus adaptés ont plus de chances de survivre et de se reproduire, engendrant ainsi de nouvelles générations encore plus performantes. Holland (1975) [139] a démontré que la simulation informatique de ce processus d'adaptation naturelle pouvait être utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation. Goldberg (1989) [140] fournit une vue d'ensemble détaillée des différents aspects des algorithmes génétiques. Dans ces algorithmes, la population, la politique de sélection, les opérateurs génétiques et les critères d'arrêt jouent un rôle crucial dans la recherche de solutions efficaces.

Il y a plusieurs raisons de choisir un algorithme génétique. Tout d'abord, lors de la conception de l'algorithme, il est possible d'utiliser n'importe quel langage informatique ou mathématique pour son implémentation, sans avoir besoin d'un logiciel d'optimisation spécifique. De plus, ces algorithmes sont reconnus pour leur robustesse : ils ne nécessitent pas de point de départ initial pour l'optimisation et ils sont relativement résistants à la convergence vers des extrémums locaux. Une autre caractéristique intéressante des algorithmes génétiques est leur capacité à améliorer les solutions au fur et à mesure de l'optimisation. Plus on leur accorde de temps, plus ils se rapprochent de l'optimum. Même si l'algorithme n'a pas eu le temps de converger, il est généralement capable de fournir une solution valide, même si elle n'est pas optimale, ce qui est toujours préférable à l'absence de réponse [16].

La mise en œuvre d'un algorithme génétique commence par la création d'une population aléatoire de chromosomes. Ensuite, ces structures sont évaluées et sélectionnées pour la reproduction, de sorte que les chromosomes représentant les meilleures solutions aient une plus grande chance de se reproduire que ceux représentant des solutions moins performantes. Ainsi, la qualité d'une solution est définie par rapport à la population actuelle. Une population subit ensuite trois opérations fondamentales : la reproduction (pour remplacer la population par un grand nombre de bons individus présentant des valeurs élevées de fitness), le croisement (pour créer de nouveaux chromosomes en combinant différentes paires de chromosomes de la population) et la mutation (pour apporter de légères modifications aléatoires aux chromosomes). Ces opérations sont répétées pour former une génération. Le processus se répète jusqu'à ce que le système converge vers la précision requise après plusieurs générations.

Les algorithmes génétiques se sont révélés très puissants pour trouver le minimum global. L'organigramme du processus d'algorithme génétique est présenté à la figure I.32.

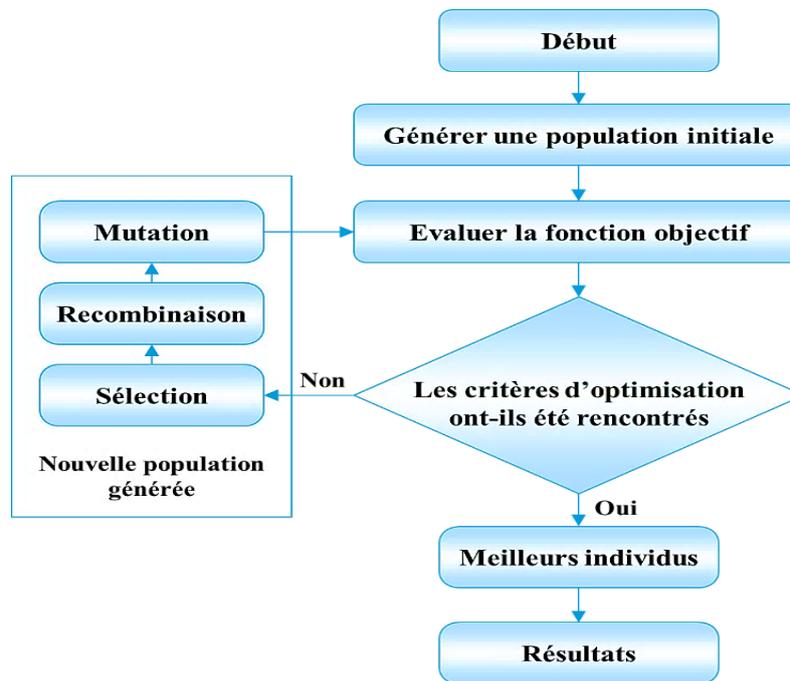


Figure V.16: L'organigramme du processus d'algorithme génétique [40].

- **Population initiale**

La technique de recherche commence par la génération aléatoire d'une population initiale. La population est un sous-ensemble de l'espace de solution total à un moment donné du processus de résolution. Chaque solution réalisable du problème, appelée chromosome, est représentée par un individu de la population. Les chromosomes sont des combinaisons de symboles, appelés gènes, qui représentent les caractéristiques individuelles du chromosome. Les générations suivantes (les enfants) sont générées à partir de la population actuelle (les parents) par un processus appelé sélection.

L'algorithme génétique démarre avec une population composée de N individus, codés selon une méthode spécifique. Le choix des individus a un impact significatif sur la vitesse de convergence de l'algorithme. Lorsque la position de l'optimum dans l'espace de recherche est totalement inconnue, il est préférable de répartir la population sur l'ensemble de l'espace de recherche. En revanche, si des informations préalables sur le problème sont disponibles, il est judicieux de générer les individus dans une zone spécifique afin d'accélérer la convergence.

- **Codage des éléments de la population initiale :**

Chaque individu de la population est représenté par un chromosome ou un génotype, qui est codé sous la forme de chaînes de bits contenant toutes les informations nécessaires pour décrire un point dans l'espace de recherche. Ce type de codage présente plusieurs avantages, notamment la possibilité de créer des opérateurs de croisement et de mutation simples. De plus, les premiers résultats de convergence théorique ont été obtenus en utilisant ce type de codage.

Il existe trois principaux types de codage : binaire, gray et réel. Le choix du codage est crucial, car l'efficacité d'un algorithme génétique dépend largement de ce choix.

- **Sélection pour la reproduction**

Une opération de sélection est nécessaire afin de choisir les chromosomes qui conduiront à une amélioration de la qualité des solutions. La sélection est un processus qui consiste à choisir parmi tous les individus de la population ceux qui participeront à la création de la nouvelle génération. Ce choix est principalement basé sur les valeurs d'adaptation de chaque individu. Un individu ayant une valeur élevée de la fonction objectif a une plus grande probabilité d'être sélectionné pour participer à la reproduction de la prochaine génération. La reproduction est le premier opérateur appliqué à une population. Dans ce processus, les chromosomes individuels sont copiés dans une chaîne distincte appelée "pool d'accouplement" en fonction de leur valeur de fitness. Cela signifie que les chromosomes ayant une meilleure valeur de fitness ont une probabilité plus élevée de contribuer à une ou plusieurs progénitures dans la génération suivante.

- **Opérateurs génétiques**

Les opérateurs génétiques les plus couramment utilisés sont le croisement et la mutation. L'exploration de l'espace de recherche dépend essentiellement de ces opérateurs génétiques.

L'opérateur de croisement agit sur deux chromosomes et génère une descendance. Le croisement implique l'échange de sous-chaînes entre les parents sélectionnés. C'est un mécanisme d'héritage où la descendance hérite de certaines caractéristiques de ses parents. Ce processus permet la création de nouveaux individus en échangeant des informations entre les chromosomes (individus). Tout d'abord, deux individus sont sélectionnés au sein de la nouvelle population issue de la reproduction, formant ainsi un couple. Ensuite, un site de croisement est choisi aléatoirement. Enfin, avec une probabilité donnée  $p_c$ , les segments finaux des deux parents sont échangés autour de ce site. Les opérateurs de croisement standard couramment utilisés sont le croisement simple, le croisement partiellement adapté, le croisement d'ordre et le croisement cyclique. Selon les besoins spécifiques de l'application, d'autres types de croisement peuvent également être utilisés.

L'opérateur de mutation apporte des modifications aléatoires à un ou plusieurs éléments d'une chaîne de solution selon une règle probabiliste. Il modifie les génotypes avec une faible probabilité  $P_m$  (fixée par l'utilisateur) pour la valeur d'un ou plusieurs allèles d'un chromosome. En général, la mutation ne permet pas d'obtenir de meilleures solutions, mais elle maintient la diversité dans l'évolution des individus, évite les optima locaux et protège contre une perte irréversible de caractéristiques individuelles. Selon Goldberg (1989) [139], lorsqu'elle est utilisée avec parcimonie en combinaison avec la reproduction et le croisement, la mutation constitue une assurance contre la perte précoce de caractéristiques importantes.

- **Critères de résiliation**

Pour obtenir une solution optimale, la population générée est évaluée en utilisant un critère de fitness spécifique. Différentes conditions peuvent être utilisées pour déterminer la résiliation de l'algorithme génétique :

- L'algorithme s'arrête lorsque le nombre de générations atteint une valeur prédéfinie. Cela permet de contrôler le nombre d'itérations effectuées et peut être utilisé pour définir une limite de temps globale pour l'algorithme.
- L'algorithme s'arrête après avoir fonctionné pendant une durée égale à une limite de temps prédéfinie. Cela permet de définir une contrainte temporelle pour l'exécution de l'algorithme.
- L'algorithme s'arrête lorsque la valeur de la fonction de fitness pour le meilleur individu de la population actuelle est inférieure ou égale à une limite de fitness préétablie. Cela signifie que la population a atteint une solution suffisamment proche de l'optimum recherché.
- L'algorithme s'arrête lorsque la variation relative moyenne de la valeur de la fonction de fitness sur les dernières générations devient inférieure à une tolérance prédéfinie pour la fonction. Cela indique que la population converge vers une solution stable et qu'une amélioration significative est peu probable.
- L'algorithme s'arrête s'il n'y a pas d'amélioration de la fonction objectif pendant un intervalle de temps égal à une limite de décrochage prédéterminée. Cela permet de détecter les situations où l'algorithme stagne et ne parvient pas à trouver de meilleures solutions.
- Ces critères de résiliation peuvent être utilisés individuellement ou en combinaison, en fonction des besoins spécifiques du problème et des contraintes de l'application. Ils assurent une terminaison appropriée de l'algorithme génétique tout en garantissant que des solutions de qualité sont obtenues dans les limites définies.

### V. 2. 3. 2. Fonction objective

L'objectif de cette étude est de trouver le régime optimal pour quatre paramètres de coupe étudiés ( $r$ ,  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) afin de minimiser la rugosité de surface ( $R_a$ ), l'effort de coupe spécifique ( $K_c$ ) et d'optimiser la production en maximisant le taux d'enlèvement de matière (MRR). Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé l'approche des algorithmes génétiques en nous basant sur les modèles mathématiques obtenus grâce à la méthode RSM, ce qui nous permet de déterminer les régimes de coupe optimaux.

Les algorithmes génétiques suivent le principe de "la survie du plus apte", ce qui les rend naturellement adaptés pour résoudre des problèmes de maximisation. Afin de transformer un problème de maximisation en un problème de minimisation, une fonction de fitness  $F(x)$  dérivée de la fonction objectif est utilisée. La fonction de fitness fréquemment utilisée est la suivante :

$$F(x) = \frac{1}{(1+f(x))} \quad (V.25)$$

Dans notre étude, nous avons utilisé la boîte à outils d'optimisation de MATLAB pour la mise en œuvre de la méthode des algorithmes génétiques. Après plusieurs essais en utilisant

cette boîte à outils, la combinaison optimale des paramètres qui a conduit aux valeurs minimales de la fonction de fitness était la suivante : une taille de population de 1000 et une plage de population initiale. Le taux de croisement utilisé était de 0,8 et la fonction de mutation utilisée était la mutation "uniforme". La fonction de mise à l'échelle utilisée était la fonction "rang" et la fonction de sélection utilisée était la fonction "uniforme".

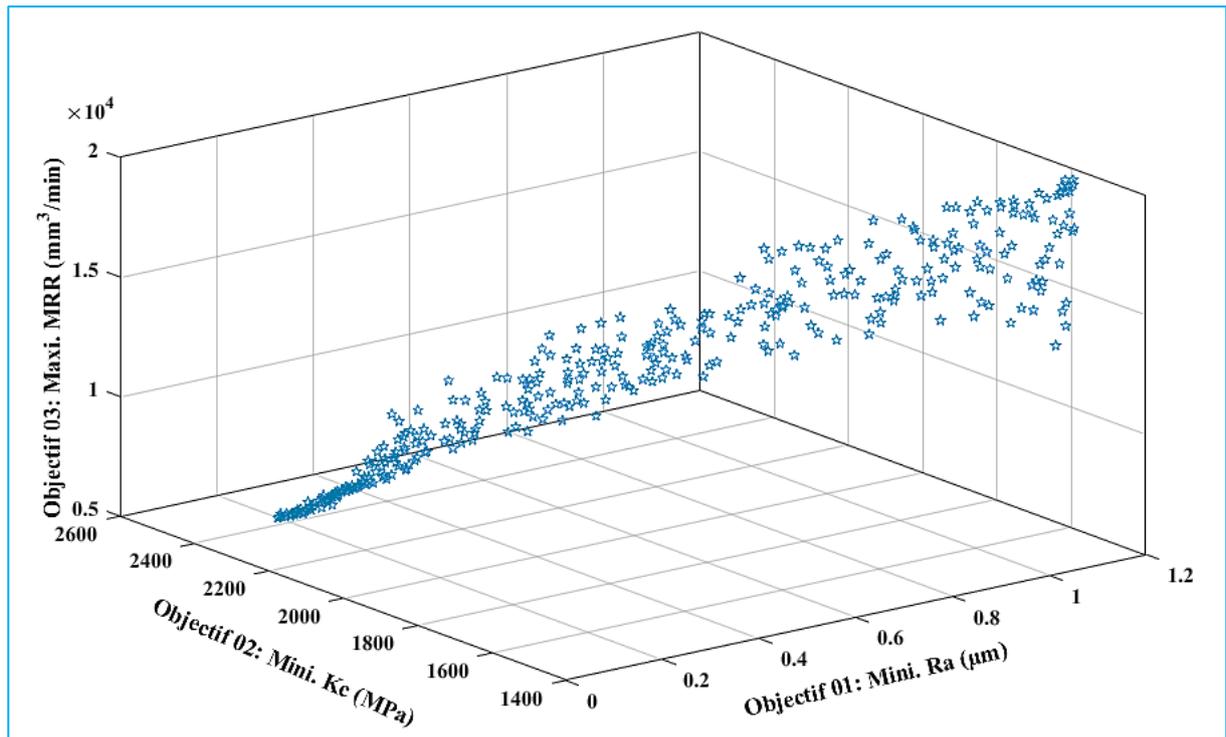
En utilisant ces paramètres optimaux, nous avons pu obtenir des résultats satisfaisants dans la recherche de régimes de coupe optimaux pour minimiser la rugosité de surface, l'effort de coupe spécifique et maximiser le taux d'enlèvement de matière.

### V. 2. 3. 3. Résultats de l'optimisation MO par GA

L'optimisation des problèmes d'ingénierie est une tâche complexe et souvent difficile à aborder. Ces problèmes sont généralement multi-objectifs et comportent des paramètres ou des contraintes qui se comportent de manière aléatoire. La principale difficulté d'un problème multi-objectif réside dans le fait qu'il n'existe pas de définition unique de la solution optimale. Il est simplement possible de déterminer quelles solutions sont préférables à d'autres, mais il n'y a pas de solution qui soit meilleure que toutes les autres. Ainsi, résoudre un problème multi-objectif ne consiste pas à rechercher une solution optimale unique, mais plutôt à obtenir un ensemble de solutions satisfaisantes. L'optimisation multi-objectifs a pour principal avantage de rendre les décisions plus faciles et moins subjectives.

Les résultats de l'optimisation multi-objectifs obtenus par la méthode MOGA basée sur les modèles RSM sont présentés dans les Figure V.17 et Figure V.18 sous forme de graphiques de front de Pareto. Ces graphiques illustrent l'ensemble des solutions possibles pour les régimes optimaux composés de quatre paramètres de coupe (rayon de bec de l'outil, vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) permettant de minimiser Ra et Kc tout en maximisant MRR. Cette représentation graphique est très utile pour les décideurs. Par exemple, on peut observer qu'il est possible de réduire Kc de 2400 à 2000 MPa en sacrifiant seulement 0,1  $\mu\text{m}$  de Ra, tout en permettant d'augmenter le taux d'enlèvement de matière de 5000 à 10000  $\text{mm}^3/\text{min}$ .

L'analyse de ces résultats montre une diversité de solutions qui peuvent être utilisées en fonction des besoins. D'après la Figure V.18, dans le cas de l'optimisation pour minimiser Kc et maximiser MRR, le front de Pareto montre à quel point les solutions sont dispersées le long des axes Kc et MRR. Il met en évidence les effets contradictoires des conditions de coupe sur Kc et MRR, c'est-à-dire que le taux d'enlèvement de matière augmente avec l'augmentation de l'effort de coupe spécifique. Ainsi, si l'on souhaite mettre en place un régime d'usinage où le MRR est maximal et l'effort de coupe spécifique est moins important, les points situés dans le coin inférieur droit du graphique sont les plus appropriés. En revanche, si l'objectif est de minimiser l'effort de coupe spécifique, sans tenir compte de la productivité, les points situés dans le coin supérieur gauche du graphique sont les plus adaptés. Par exemple, il est possible de doubler le MRR de 5000 à 10000  $\text{mm}^3/\text{min}$  en augmentant Kc de seulement 300 MPa. La diversité des solutions permet de nombreux raisonnements similaires, que ce soit pour la productivité, les efforts de coupe ou l'amélioration de la rugosité de surface.

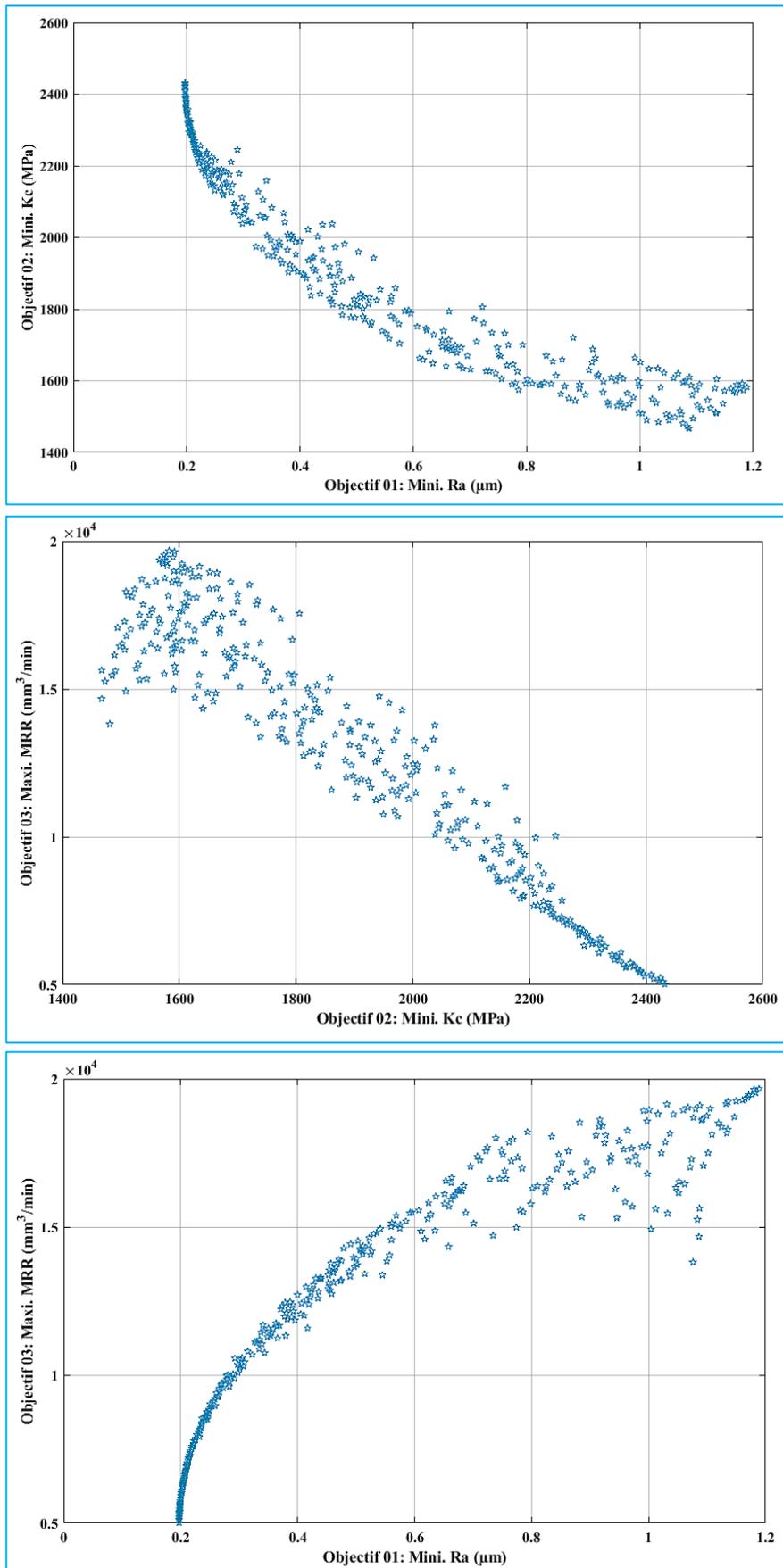


**Figure V.17:** Graphe 3D de front de Pareto des trois fonctions objectifs (minimiser Ra et Kc et maximiser MRR)

**Tableau V.17 :** Quelques régimes optimaux obtenues par GA avec le même degré d'importance entre les trois réponses Ra, Kc et MRR

N°	r	Vc	f	ap	Ra	Kc	MRR
1	1.17	170.79	0.18	0.49	0.57	1758.61	14953.96
2	1.20	166.01	0.19	0.49	0.58	1704.18	15077.39
3	1.17	176.31	0.18	0.49	0.59	1794.71	15198.14
4	1.19	178.59	0.18	0.48	0.59	1796.36	15468.82
5	1.16	177.19	0.18	0.49	0.60	1787.70	15490.67
6	1.20	175.59	0.19	0.48	0.61	1751.54	15563.48
7	1.17	160.95	0.19	0.49	0.61	1662.39	14858.03
8	1.16	158.84	0.19	0.49	0.62	1658.24	14586.65
9	1.15	173.80	0.18	0.48	0.62	1746.75	15275.79
10	1.18	175.97	0.19	0.49	0.62	1740.72	15819.80

Le tableau V.17 présente les résultats de l'optimisation par algorithme génétique des trois réponses étudiées, à savoir Ra, Kc et MRR, en accordant la même importance à ces trois objectifs d'optimisation. On peut observer que les régimes de coupe adoptés pour obtenir un compromis entre les valeurs de Ra, Kc et MRR correspondent aux plages suivantes de conditions de coupe pour la plaquette de coupe en céramique mixte non revêtue: (r) compris entre 1,16 et 1,20 mm, (Vc) comprise entre 170,79 et 178,59 m/min, (f) comprise entre 0,18 et 0,19 mm/tr, et (ap) comprise entre 0,48 et 0,49 mm. Les valeurs optimales des réponses sont les suivantes : Ra se situe entre 0,57 et 0,62  $\mu\text{m}$ , Kc entre 161,54 et 1796,36 MPa, et MRR entre 14586,65 et 15819,80 mm<sup>3</sup>/min.



**Figure V.18:** Graphe de front de Pareto des trois fonctions objectifs (minimiser Ra et Kc et maximiser MRR)

#### V. 2. 4. Optimisation MO des paramètres d'usinage par la méthode d'Algorithme de tri génétique non dominé (NSGA-II)

L'algorithme NSGA (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) est un algorithme génétique largement utilisé pour l'optimisation multi-objectifs. Cependant, il a été critiqué pour sa complexité de calcul, son manque d'élitisme et la nécessité de choisir une valeur optimale pour le partage des paramètres.

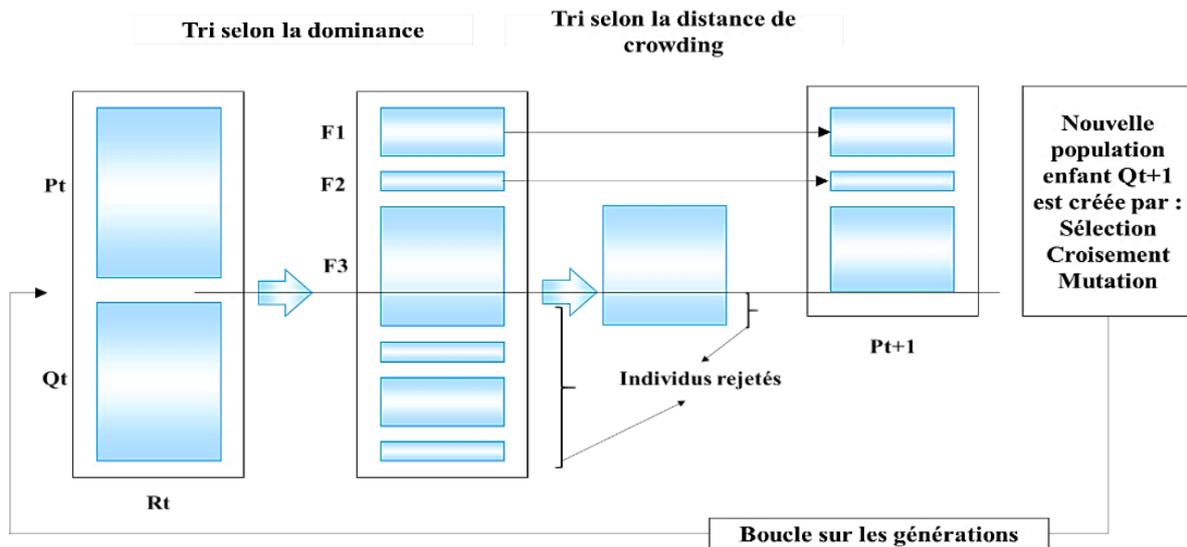
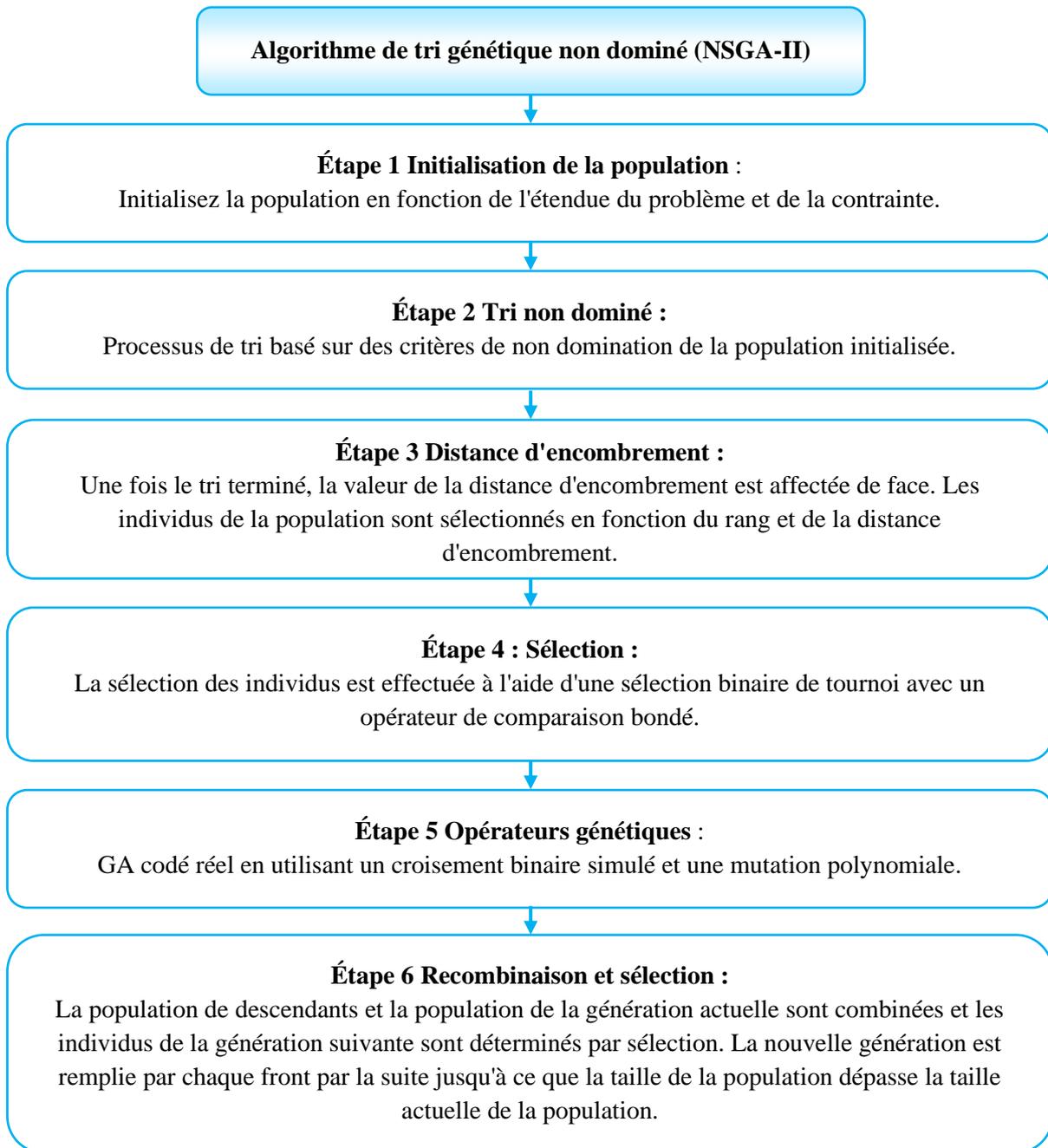


Figure V.19: Principe de fonctionnement de l'algorithme NSGA-II [45]

Une version améliorée appelée NSGA-II a été développée pour surmonter ces limitations. NSGA-II utilise un meilleur algorithme de tri, intègre l'élitisme et ne nécessite pas de choix préalable de paramètres de partage. Il est considéré comme l'un des meilleurs et des plus efficaces algorithmes d'optimisation multi-objectifs, car il ne nécessite aucun réglage de paramètres. NSGA-II utilise également une méthode de tri basée sur le principe de non-dominance, ce qui le rend plus rapide.

Cet algorithme est conçu avec une approche élitiste qui permet de conserver uniquement les meilleures solutions au fil des générations, en utilisant le concept de dominance. Le fonctionnement de l'algorithme NSGA-II est illustré dans la Figure V.19 [45].

De manière générale, on peut décrire grossièrement NSGA-II comme présenté dans la Figure V.20. Cet algorithme est utilisé pour rechercher les solutions optimales dans les problèmes d'optimisation multi-objectifs, en générant une population de solutions candidates et en les évaluant en fonction de leurs performances par rapport aux objectifs fixés. NSGA-II sélectionne ensuite les solutions les plus prometteuses et les fait évoluer au fil des générations pour trouver un ensemble de solutions satisfaisantes qui couvrent un large spectre de compromis entre les objectifs.



**Figure V.20:** Procédure de l'algorithme de tri génétique non dominé (NSGA-II)

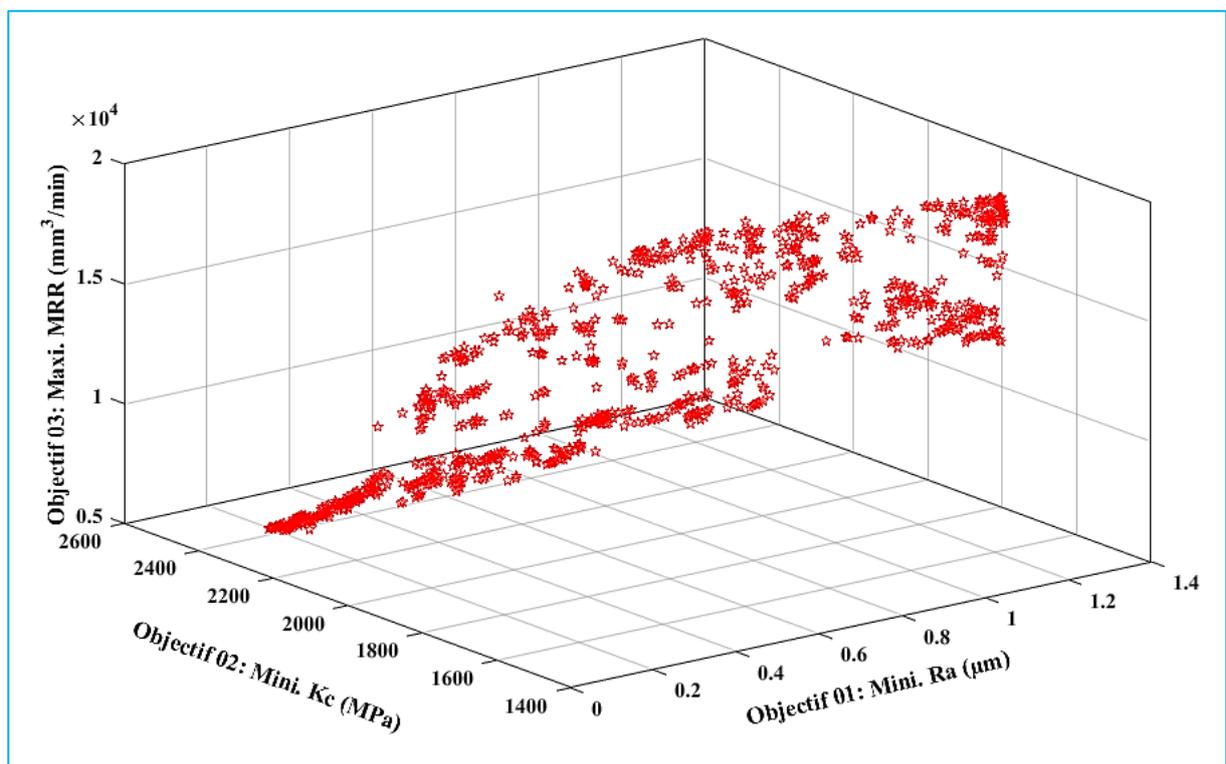
#### V. 2. 4. 1. Résultats de l'optimisation MO par NSGAI

Les résultats de l'optimisation multi-objectifs obtenus à l'aide de la méthode NSGA-II, basée sur les modèles RSM, sont présentés dans les Figure V.21 et Figure V.22 sous forme de graphiques de front non dominé. Chaque étoile dans ces graphiques représente un régime optimal obtenu par la méthode NSGA-II, composé de quatre paramètres de coupe (rayon de bec de l'outil, vitesse de coupe, avance et profondeur de passe), visant à minimiser Ra et Kc tout en maximisant MRR. Cette représentation graphique offre une plus grande flexibilité dans le choix des régimes de coupe optimaux.

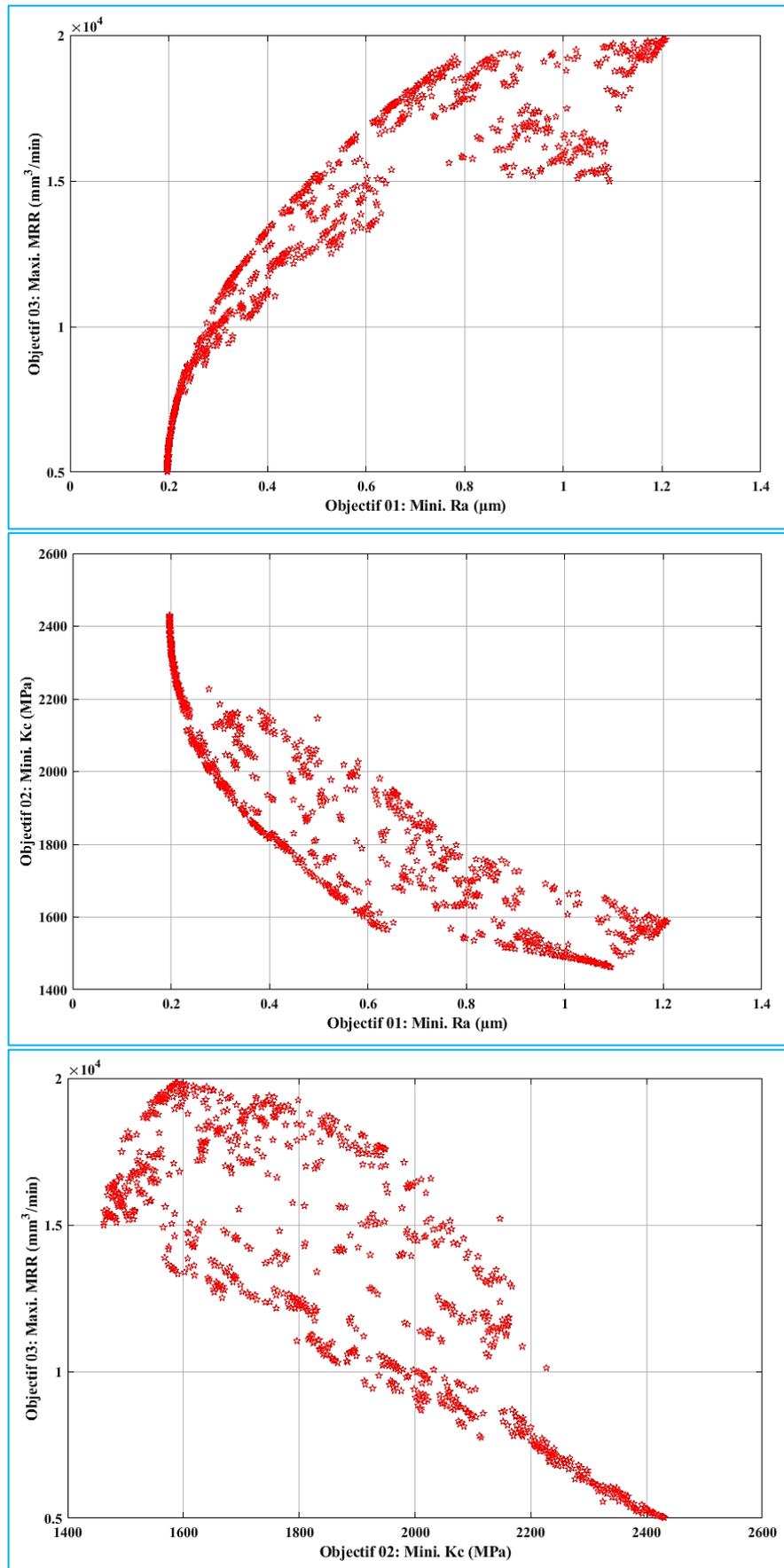
La Figure V.21 présente une vue en trois dimensions du front de Pareto, qui représente l'ensemble des solutions non dominées. Cette figure met en évidence la diversité des solutions qui peuvent être utilisées en fonction des besoins. Ces solutions ont été obtenues en accordant le même degré d'importance aux trois fonctions objectives optimisées. En d'autres termes, il s'agit de trouver un régime optimal permettant d'obtenir les valeurs minimales possibles de Ra et Kc, tout en maximisant la productivité, et ce, avec un degré d'importance équivalent pour chaque objectif.

Comme le montre la Figure V.22, les solutions qui conduisent à une rugosité élevée sont également associées à des valeurs élevées d'effort de coupe spécifique et à des taux d'enlèvement de matière faibles. Cependant, on peut observer qu'il est possible de réduire Kc de 2300 à 1900 MPa en sacrifiant seulement 0,1  $\mu\text{m}$  de Ra, ce qui permet également de doubler le taux d'enlèvement de matière par rapport à sa valeur initiale.

Ces résultats mettent en évidence la possibilité de trouver des compromis entre les objectifs de minimisation de la rugosité, de l'effort de coupe spécifique et de maximisation du taux d'enlèvement de matière. Ils offrent ainsi des informations précieuses pour la prise de décision dans le choix des régimes de coupe optimaux, en fonction des préférences et des contraintes spécifiques à chaque application.



**Figure V.21:** Graphe 3D de front non dominé des trois fonctions objectives (minimiser Ra et Kc et maximiser MRR) pour différentes représentations



**Figure V.22:** Graphes de front non dominé des trois fonctions objectifs (minimiser Ra et Kc et maximiser MRR) pour différentes représentations

D'après l'observation de la Figure V.18, qui représente le front de Pareto pour le cas d'optimisation (minimisation de  $K_c$  et maximisation de MRR), on constate que les solutions sont dispersées le long des axes  $K_c$  et MRR. De plus, cette représentation graphique met en évidence les effets contradictoires des conditions de coupe sur  $K_c$  et MRR, indiquant que le taux d'enlèvement de matière augmente avec l'augmentation de l'effort de coupe spécifique.

Ainsi, si l'objectif principal est de mettre en place un régime d'usinage visant à atteindre un MRR maximal avec un effort de coupe spécifique moins important, alors les points situés dans le coin inférieur droit du graphique sont les plus appropriés. Ces points correspondent aux régimes de coupe qui permettent d'obtenir un fort taux d'enlèvement de matière tout en minimisant l'effort de coupe spécifique.

En revanche, si l'objectif est de minimiser au maximum l'effort de coupe spécifique, sans tenir compte de la productivité, alors les points situés dans le coin supérieur gauche du graphique sont les plus adaptés. Ces points correspondent aux régimes de coupe qui permettent d'obtenir une faible valeur d'effort de coupe spécifique, même si cela implique un taux d'enlèvement de matière plus faible.

Ces observations soulignent l'importance de prendre en compte les compromis entre le taux d'enlèvement de matière, l'effort de coupe spécifique et d'autres paramètres de performance lors de la sélection des régimes de coupe optimaux. Les différentes solutions présentes sur le front de Pareto offrent des possibilités de choix en fonction des priorités et des contraintes spécifiques à chaque situation d'usinage.

### **V. 2. 5. Conclusion**

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons effectué une modélisation mathématique détaillée des phénomènes étudiés lors du tournage dur de l'acier traité à 50 HRC avec une plaquette de coupe en céramique mixte non revêtue. Nous avons utilisé deux approches avancées, la Méthodologie de Surface de Réponse (RSM) et les Réseaux de Neurones Artificiels (ANN), pour établir des modèles de prédiction reliant les paramètres de coupe (rayon de bec de l'outil, vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) aux paramètres technologiques d'usinage étudiés (rugosité de surface  $R_a$ , contrainte de cisaillement  $K_c$  et débit de matière enlevée MRR). Les résultats ont démontré que les modèles obtenus avec les deux approches étaient en bon accord avec les données expérimentales, mais les modèles basés sur les réseaux de neurones artificiels se sont révélés plus précis. Ces modèles mathématiques ont une importance significative sur le plan industriel, car ils permettent de faire des prédictions fiables des performances d'usinage.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons abordé l'optimisation multi-objectifs visant à déterminer les régimes optimaux de coupe. Nous avons utilisé cinq méthodes d'optimisation avancées : la méthodologie de surface de réponse avec l'approche de la fonction de désirabilité (DF), l'analyse relationnelle grise (Grey), la méthode des algorithmes génétiques (GA) et l'algorithme génétique de tri non-dominé (NSGA-II). L'objectif était de trouver les

valeurs optimales des paramètres de coupe pour maximiser le débit de matière enlevée (MRR), tout en minimisant à la fois l'effort de coupe spécifique et la rugosité de surface ( $R_a$ ).

En conclusion, ce chapitre a abouti à la création de modèles mathématiques précis et validés, permettant de prédire avec fiabilité les paramètres technologiques d'usinage en fonction des paramètres de coupe. De plus, les méthodes d'optimisation avancées ont permis d'identifier les régimes optimaux des conditions de coupe, en prenant en compte les objectifs de maximisation du MRR et de minimisation de l'effort de coupe spécifique ainsi que de la rugosité de surface. Ces résultats ouvrent des perspectives prometteuses pour l'industrie, offrant des possibilités d'amélioration des performances d'usinage et de prise de décisions éclairées lors de la sélection des paramètres de coupe appropriés.

## Conclusion Générale

---

*« All progress, all success springs from thinking. »*

---

Thomas Edison

Aujourd'hui, plus que jamais, les industriels cherchent à gagner du temps et à diminuer les coûts de fabrication tout en respectant l'environnement. Malgré ces considérations, les concepts liés à l'usinage ont principalement évolué grâce à de nombreux essais expérimentaux, sans bénéficier de véritables approches scientifiques. Parmi les procédés de mise en forme des pièces mécaniques les plus utilisés dans l'industrie automobile, l'usinage des aciers traités avec des duretés élevées supérieures à 45 HRC présente des défis importants, et le tournage dur se distingue par sa compétitivité.

La première partie de cette thèse se consacre à l'étude de l'influence des différents paramètres de coupe, tels que le matériau, la forme, le revêtement, la géométrie de l'outil et les conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe et rayon du bec de l'outil), sur les indicateurs de performance d'usinage tels que l'usure de l'outil, les efforts de coupe, la rugosité de surface et le taux d'enlèvement de matière. Cela est réalisé lors du tournage dur à sec d'un acier traité en utilisant des outils de coupe de géométries et de matériaux différents. L'objectif est de fournir des outils permettant de choisir de manière intelligente les conditions de coupe à partir d'un nombre suffisant d'expériences, en utilisant la méthodologie des plans d'expériences. Le principe général des plans d'expériences consiste à étudier uniquement certains points du domaine expérimental, tout en appréhendant le phénomène physique étudié dans l'ensemble du domaine considéré.

La deuxième partie de la thèse vise à développer des modèles mathématiques de prédiction du processus de coupe pour l'optimisation des conditions de coupe. Cela est réalisé en utilisant des techniques de modélisation et d'optimisation avancées basées sur des algorithmes d'intelligence artificielle, dans lesquels on recherche un ensemble de solutions optimales, connu sous le nom d'ensemble optimal. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les paramètres de coupe et les paramètres technologiques d'usinage étudiés, en vue de maximiser les performances d'usinage et de minimiser les coûts.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons exploré, modélisé et optimisé plusieurs phénomènes qui interviennent lors de l'usinage dur de l'acier X38CrMoV5-1 traité à 50 HRC, en utilisant des plaquettes de coupe en céramique mixte avec des géométries Wiper et conventionnelles, ainsi que des plaquettes de coupe en céramique mixte Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiC revêtues et non revêtues.

Les résultats obtenus, présentés dans les différents chapitres de cette thèse, ont conduit aux conclusions suivantes :

- Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) ont montré que les critères de rugosité de surface Ra et Rt, obtenus à partir des deux types de plaquettes de coupe (revêtue en TiN et non revêtue), ont tendance à diminuer avec l'augmentation du rayon de coupe à une vitesse d'avance constante. La meilleure rugosité de surface a été obtenue avec la vitesse d'avance la plus faible et le rayon de coupe le plus élevé pour les deux types de plaquettes de coupe en céramique.
- La plaquette de coupe en céramique mixte non revêtue offre une meilleure finition de surface par rapport à la plaquette revêtue avec une couche mince de TiN lors du tournage dur à sec de l'acier X38CrMoV5-1 traité à 50 HRC.
- La plaquette de coupe en céramique mixte non revêtue génère des efforts de coupe plus faibles que la plaquette revêtue.
- Les plaquettes de coupe en céramique non revêtues, avec les deux rayons de bec ( $r=0.8\text{mm}$  et  $r=1.2\text{mm}$ ), présentent des performances supérieures à celles des plaquettes revêtues en céramique avec une couche mince de nitrure de titane (TiN) ( $r=0.8\text{mm}$  et  $r=1.2\text{mm}$ ), en termes d'usure, de durabilité, d'efforts de coupe et de rugosité de surface.
- Les composantes de l'effort de coupe varient presque linéairement avec l'avance et la profondeur de coupe, mais présentent des comportements différents avec la vitesse de coupe. Initialement, les forces de coupe diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe, mais restent presque inchangées dans la plage de vitesse de coupe plus élevée pour les deux types d'outils de coupe en céramique.
- L'analyse de la topographie des surfaces usinées en 3D montre que les paramètres fonctionnels 2D et 3D, obtenus à partir de la courbe d'Abbott, se rapprochent davantage de la rugosité de surface mesurée que les paramètres traditionnels. La plate-forme optique de métrologie modulaire est donc un outil d'investigation important dans l'étude de la rugosité de surface.
- Les deux types de matériaux d'outils de coupe en céramique subissent une usure abrasive progressive avec l'augmentation du temps de coupe. L'usure adhésive est plus prononcée lors de l'usinage de matériaux plus durs. Le matériau d'outil de coupe en céramique d'alumine revêtue en TiN est plus affecté par l'usure adhésive. L'usure par diffusion activée chimiquement est plus élevée dans les matériaux d'outil de coupe en céramique revêtue au TiN, tandis que l'outil en céramique conventionnelle non revêtue est moins affecté par l'usure par diffusion.

- Dans la comparaison des valeurs de VB entre les deux types de plaquettes, il est clair que la céramique non revêtue offre de meilleures performances que la céramique revêtue. En effet, la valeur d'usure en dépouille "VB" enregistrée sur la céramique revêtue après 28,7 minutes est de 0,255 mm, dépassant ainsi la valeur d'usure en dépouille admissible  $V_b=0,1$  mm. Dans ces conditions de coupe, les outils de coupe en céramique non revêtus, pour les deux rayons de coupe étudiés, présentent de meilleures performances que les outils de coupe en céramique revêtus en TiN, notamment en termes de durée de vie de l'outil. Les sollicitations mécaniques et thermiques auxquelles l'outil est soumis sont donc très importantes, avec des températures pouvant atteindre jusqu'à 1000°C. Cela affecte négativement le revêtement en TiN de la céramique et impacte la durée de vie de l'outil par rapport à l'outil en céramique non revêtu, pouvant être attribué à une réaction de comportement thermomécanique ou chimique du revêtement.
- L'usure est l'un des facteurs à prendre en compte, car son évolution endommage et dégrade la surface des pièces. Malgré l'évolution de VB jusqu'à 0,3 mm, la majorité des valeurs enregistrées de Ra n'ont pas dépassé la valeur de 1,5  $\mu\text{m}$  pour les deux types de plaquettes de coupe non revêtues.
- L'analyse des résultats de l'étude unifactorielle met en évidence les points suivants :
  - La céramique conventionnelle utilisée à une faible vitesse de coupe  $V_c=100$  m/min génère des efforts moins importants par rapport à l'autre plaquette Wiper. De plus, l'analyse montre que l'usinage avec la céramique de géométrie Wiper à des vitesses de coupe élevées engendre des efforts plus faibles que ceux des plaquettes conventionnelles, en raison de leurs formes géométriques respectives.
  - L'effort tangentiel est fortement influencé par l'avance, suivi de l'effort radial, puis de l'effort axial.
  - Pour les deux géométries de coupe, il est constaté que la plaquette Wiper produit des efforts de coupe légèrement plus importants que la plaquette conventionnelle, en raison de l'effet de la géométrie du bec de la plaquette. Le plat de planage présent sur la plaquette Wiper, au point de raccordement du rayon et du côté de la plaquette, provoque davantage de frottement, ce qui augmente les efforts de coupe.
  - En ce qui concerne les valeurs de rugosité obtenues par les deux types de plaquettes de coupe en fonction de la variation de l'avance par tour, il est confirmé que l'outil de forme Wiper produit des valeurs de rugosité inférieures à celles de la plaquette conventionnelle.
  - Les états de surface usinés par la plaquette Wiper sont meilleurs que ceux obtenus par la plaquette de forme conventionnelle, quelles que soient les conditions de coupe testées (vitesse de coupe, avance par tour et profondeur de passe). Ceci est attribué à l'effet de la géométrie spéciale de l'outil.
- Les états de surface obtenus lors de l'usinage avec la plaquette en céramique Wiper sont nettement supérieurs à ceux obtenus avec la plaquette de forme conventionnelle, quelles que

soient les conditions de coupe testées (vitesse de coupe, avance par tour et profondeur de passe). Cette amélioration est principalement attribuable à l'effet de la géométrie spéciale de l'outil.

- Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) démontrent que la géométrie de surface est le facteur le plus important influençant la rugosité Ra, avec une contribution de 53,31 %. Le second facteur ayant un impact sur Ra est la vitesse d'avance, avec une contribution de 21,79 %.
- L'analyse de la durée de vie des outils en céramique mixte revêtue de TiN, avec deux géométries de coupe, lors de l'usinage à sec d'un acier dur, montre que la plaquette de coupe de géométrie Wiper présente de meilleures performances que celle de géométrie standard. La valeur d'usure en dépouille "VB" enregistrée sur la plaquette de coupe Wiper après 27,4 minutes est de 0,264 mm. Cependant, l'usure en dépouille de la plaquette de géométrie conventionnelle dépasse la valeur d'usure en dépouille admissible  $V_b=0,302$  mm. Dans ces conditions de coupe, les outils de coupe de géométrie Wiper présentent de meilleures performances que les outils de coupe de géométrie standard, en particulier en ce qui concerne la durée de vie de l'outil.
- L'analyse de la formation des copeaux révèle macro-graphiquement que l'usinage d'un acier dur avec une plaquette de coupe conventionnelle génère un copeau unique tout au long de la durée de vie de l'outil, dont la forme change et évolue en fonction de l'usure de la plaquette. Au début de l'usinage et pendant la période initiale d'usure ou de rodage, la forme du copeau est continue en arc. Ensuite, la forme du copeau devient un ruban continu sans instabilité pendant la période d'usure progressive normale, évoluant à une vitesse relativement plus lente et devenant au moins linéaire. Cependant, à partir de 20 minutes d'usinage, correspondant à la troisième période d'usure appelée phase d'usure catastrophique, la forme du copeau devient hélicoïdale, entrelacée ou en arcs ondulants, voire détachée, avec une formation intense de bandes de cisaillement. Ces copeaux sont formés par une localisation de la déformation et par un cisaillement catastrophique.
- En ce qui concerne les résultats de la formation des copeaux générés par la plaquette de coupe de géométrie Wiper, il a été observé que cette plaquette génère plusieurs types de copeaux tout au long de la durée de vie de l'outil, en fonction de l'évolution de l'usure en dépouille. Étant donné que ces plaquettes ont deux surfaces de contact avec le matériau à usiner, la première surface étant définie par le contact entre le rayon du bec de l'outil et la pièce, et la seconde par le contact entre le méplat de la plaquette et la surface usinée, elles permettent d'essuyer les pics de la surface, laissant une texture supérieure.
- L'analyse et la comparaison du niveau d'usure des deux plaquettes de coupe de géométrie Wiper et standard ont été réalisées en utilisant de nouveaux paramètres d'usure tridimensionnels (usure volumique 3D) basés sur le microscope à variation de focus (FVM). Le microscope optique utilisé dans cette analyse était le FVM Alicona Infinite Focus G5, qui a permis d'obtenir une compréhension approfondie de l'usure de l'outil dans tous les cas examinés.

- La comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédites par les méthodes de Réponse de Surface (RSM) et les Réseaux de Neurones Artificiels (ANN) nous a conduit à conclure que les deux méthodes sont fiables, en particulier les réseaux de neurones artificiels.
- L'optimisation multi-objectifs utilisant l'approche de la fonction de désirabilité (DFA) s'est avérée être un outil utile permettant de proposer des régimes optimaux pour les quatre objectifs souhaités.
- L'analyse relationnelle grise (GRA) a été utilisée pour résoudre le problème complexe de l'optimisation simultanée de plusieurs réponses en convertissant l'optimisation multi-objectifs en un seul objectif d'optimisation équivalent.
- L'approche RSM-GA est un outil de modélisation intéressant qui permet de prédire des facteurs incontrôlables avec une précision et d'optimiser les paramètres de coupe pour contrôler la qualité d'usinage.
- L'optimisation multi-objectifs en utilisant la méthode NSGA-II pour optimiser simultanément (MRR-max, Ra-min et Kc-min) nous donne plusieurs combinaisons de choix.
- L'optimisation équivalente d'un objectif unique dans cette analyse est appelée grade relationnel gris (GRG). La valeur la plus élevée de celui-ci correspond à la combinaison des niveaux optimaux des paramètres de coupe.
- La comparaison entre les cinq méthodes d'optimisation utilisées montre que ces méthodes ont favorisé la minimisation de la rugosité de surface, tandis que certaines ont favorisé une productivité maximale.
- En conclusion, cette thèse a contribué à l'avancement des connaissances dans le domaine de l'usinage dur des aciers à haute dureté. Les résultats obtenus ont permis une meilleure compréhension de l'influence des paramètres de coupe sur les performances d'usinage, ainsi que le développement de modèles mathématiques prédictifs pour l'optimisation des conditions de coupe. Ces avancées ouvrent la voie à une approche plus scientifique et plus efficace de l'usinage dur, permettant aux industriels de prendre des décisions éclairées pour améliorer la productivité, réduire les coûts et respecter les contraintes environnementales. Des perspectives futures peuvent inclure l'exploration de nouveaux matériaux d'outils, l'optimisation multi-objectifs et l'intégration de technologies de pointe pour une meilleure maîtrise de l'usinage dur.
- Enfin, des références bibliographiques et des annexes complètent ce travail de recherche, offrant ainsi une base solide pour des études ultérieures dans ce domaine.

# Perspectives

---

*« All progress, all success springs from thinking. »*

---

Thomas Edison

La thèse de doctorat a apporté des avancées significatives dans le domaine de l'usinage dur des aciers traités à haute dureté. Les résultats obtenus ont permis d'acquérir une compréhension approfondie de l'impact des paramètres de coupe sur les performances d'usinage, ainsi que de développer des modèles mathématiques prédictifs pour optimiser les conditions de coupe. Cependant, il existe encore plusieurs axes de recherche à explorer pour approfondir les connaissances et améliorer les méthodes de modélisation et d'optimisation. Dans cette perspective, je souhaite poursuivre mes travaux de recherche en explorant les domaines suivants:

1. Une étude approfondie de l'effet de la lubrification, en mettant l'accent sur le système MQL, sur la réduction de la température de coupe et des contraintes résiduelles serait bénéfique. Cela permettrait d'évaluer l'efficacité du système MQL pour améliorer les performances d'usinage des pièces difficilement usinables en réduisant les effets thermiques et mécaniques indésirables. Il serait intéressant d'investiguer l'impact de différentes méthodes de lubrification, notamment la lubrification à quantité minimale (MQL), sur les performances d'usinage des aciers dure avec des outils CBN. Cette étude permettrait de mieux comprendre les interactions entre la lubrification, les propriétés des matériaux et les paramètres de coupe, et d'optimiser les conditions de lubrification pour améliorer les performances d'usinage.
2. Il est essentiel de caractériser l'évolution de la température de coupe, des contraintes résiduelles et des vibrations lors de l'usinage des pièces difficilement usinables. Cette étude permettrait de mieux comprendre les mécanismes de génération de chaleur, de contraintes et de vibrations, et d'identifier les paramètres de coupe optimaux pour minimiser ces effets indésirables.
3. La modélisation numérique de la coupe des matériaux durs en 3D par la méthode des éléments finis est une perspective prometteuse pour mieux comprendre les interactions entre l'outil de coupe et le matériau. En utilisant cette approche, il serait possible de

prédire avec précision les forces de coupe, les déformations du matériau et les contraintes résiduelles, ce qui permettrait d'optimiser les paramètres de coupe pour améliorer les performances d'usinage.

4. L'utilisation de méthodes de modélisation alternatives, telles que la logique floue et les SVM, pourrait permettre de développer des modèles plus précis pour prédire les performances d'usinage et optimiser les paramètres de coupe. De plus, l'application d'algorithmes d'optimisation avancés tels que le PSO et PSOMO pourrait aider à trouver des solutions optimales pour des problèmes d'optimisation multi-objectifs.
5. L'analyse vibratoire peut être utilisée comme un outil de surveillance et de prédiction de la durée de vie des plaquettes de coupe. Une étude approfondie de cette méthode permettrait de développer des modèles prédictifs fiables basés sur l'analyse des vibrations, ce qui faciliterait la planification de la maintenance des outils et l'amélioration de l'efficacité de l'usinage.
6. Approche plus holistique : Une perspective intéressante serait d'adopter une approche plus holistique de l'usinage dur, en prenant en compte non seulement les paramètres de coupe, mais également d'autres facteurs tels que l'environnement de travail, les vibrations, la stabilité du système d'usinage, etc. Cela permettrait de développer une compréhension plus complète des processus d'usinage dur et de proposer des solutions plus intégrées et efficaces.
7. Applications industrielles : La thèse de doctorat a jeté les bases pour des applications industrielles dans le domaine de l'usinage dur des aciers traités à haute dureté. Il serait intéressant de poursuivre la collaboration avec des entreprises du secteur pour tester et valider les résultats obtenus dans des environnements de production réels. Cela permettrait de démontrer la faisabilité et l'efficacité des approches développées et d'ouvrir la voie à leur adoption généralisée par l'industrie.

En conclusion, la thèse de doctorat en détail a jeté les bases pour de futures recherches et développements visant à améliorer l'usinage dur des aciers traités à haute dureté, avec pour objectif ultime d'améliorer la productivité, la qualité et l'efficacité des processus d'usinage. Ces perspectives de recherche offrent des opportunités d'explorer des directions prometteuses, de renforcer les collaborations interdisciplinaires et les partenariats industriels, et de favoriser le transfert des connaissances vers le secteur manufacturier. En poursuivant ces axes de recherche, il sera possible d'approfondir les connaissances sur le processus de tournage des pièces difficilement usinables, de développer des méthodes de modélisation et d'optimisation plus avancées, et d'apporter des avancées significatives dans l'industrie manufacturière en améliorant l'efficacité et la qualité de l'usinage.

## Références bibliographiques

- [1] **Christophe RAMIREZ**, (2017). Critères d'optimisation des alliages de Titane pour améliorer leur Usinabilité, thèse de doctorat, ENSAM de Cluny.
- [2] **Astakhov V. P.**, (2010). Geometry of Single-Point Turning Tools and Drills. Fundamentals and Practical Applications. London : Springer.
- [3] **Poulachon G.**, (2004). Usinabilité des matériaux difficiles : application aux aciers durcis. Techniques de l'ingénieur, BM7048.
- [4] **PAGÈS C.**, (2003). Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage à sec de finition, Thèse de doctorat.
- [5] **OUTILS COUPANTS**, (2005). Tournage dur, TRAMETAL, pp. 6-12.
- [6] **Chou Y.K., Song H.**, (2004). Tool nose radius effects on finish hard turning. J Mater Process Technol; 148(2): 259–268.
- [7] **Davim J. P.**, (2011). Machining of hard materials. London : Springer-Verlag. ISBN 1849964505, 9781849964500. doi:10.1007/978-1-84996-450-0.
- [8] **Graham T. Smith**, (2008). Cutting Tool Technology, Industrial Handbook. ISBN 978-1-84800-205-0.
- [9] **M. Habak**, (2006). Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier a roulement 100Cr6. Thèse de doctorat de Mécanique - Matériaux – Procédés. ENAM.
- [10] **Rami MOHAMMAD**, (2011). Etude de l'évolution des caractéristiques des plaquettes de coupe en tournage à sec. Mise en place de critères d'aide à la décision du changement de plaquette. Application au cas de l'ébauche de turbines de pompage. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse.
- [11] **Yaltese Mohamed ATHMANE**, (2005). Étude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur. Thèse de doctorat de l'université Badji Mokhtar- ANNABA.
- [12] **Vincent WAGNER**, (2011). Amélioration de la productivité en usinage d'un titane réfractaire : le Ti5553. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse.
- [13] **Richard Leach**, (2013). Characterisation of Areal Surface Texture, Springer Heidelberg New York Dordrecht London. ISBN 978-3-642-36458-7. DOI 10.1007/978-3-642-36458-7.
- [14] **A. Cornet et J.-P. Deville**, (1998). Physique et ingénierie des surfaces. EDP Sciences, Monographie de matérialogie. ISBN : 2-86883-352-7. ISSN : 1275-3807.

- [15] **François Blateyron**, (2006). Guide de métrologie des surfaces. Digital Surf, <https://guide.digitalsurf.com/fr/guide.html>.
- [16] **Sumit Bhowmik, Jagadish, Kapil Gupta**, (2019). Modeling and Optimization of Advanced Manufacturing Processes. Springer Briefs in applied sciences and technology Manufacturing and surface engineering. ISBN 978-3-030-00036-3. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-00036-3>.
- [17] **Yigit, K.**, (2007). Predictive modeling and optimization of hard turning Investigations of effects on cutting tool micro geometry.
- [18] **Van Luttervelt, C.A., Childs, T.H.C., Jawahir, I.S., Klocke, F., Venuvinod, P.K., Altintas, Y., Armarego, E., Dornfeld, D., Grabec, I., Leopold, J., Lindstrom, B., Lucca, D., Obikawa, T., Sato, H.**, (1998). Present Situation and Future Trends in Modelling of Machining Operations Progress Report of the CIRP Working Group “Modelling of Machining Operations.” CIRP Ann. - Manuf. Technol. 47, 587–626.
- [19] **Girish Kant**, (2016). Prediction and Optimization of Machining Parameters for Minimizing Surface Roughness and Power Consumption during Turning of AISI 1045 Steel. These de doctorat de Birla Institute of Technology & Science, PILANI.
- [20] **Aurelien Maurel-Pantel**, (2009). Etude expérimentale et modélisation par éléments finis du procédé de fraisage : Applications à l’identification paramétrique des lois de comportement. Thèse de doctorat de l’université de Franche-Comté.
- [21] **Ceretti, E., Lazzaroni, C., Menegardo, L., Altan, T.**, (2000). Turning simulations using a three-dimensional FEM code. J. Mater. Process. Technol. 98, 99–103.
- [22] **Guo, Y.B., Liu, C.R.**, (2002). 3D FEA Modeling of Hard Turning. J. Manuf. Sci. Eng. 124, 189.
- [23] **Ohbuchi, Y., Obikawa, T.**, (2003). Finite Element Modeling of Chip Formation in the Domain of Negative Rake Angle Cutting. J. Eng. Mater. Technol. 125, 324.
- [24] **Özel, T., Altan, T.**, (2000). Determination of workpiece flow stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting. Int. J. Mach. Tools Manuf. 40, 133–152.
- [25] **Mustapha RGUIG**, (2005). Méthodologie des surfaces de réponse pour l’analyse en fiabilité des plates-formes pétrolières offshore fissurées. Thèse de doctorat de l’université de NANTES.
- [26] **R. Venkata Rao**, (2011) Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processes, International Research and Development. Springer-Verlag London Limited. ISBN 978-0-85729-014-4, DOI 10.1007/978-0-85729-015-1.

- [27] **Claude Rosental**, (1998). Histoire de la logique floue. Une approche sociologique des pratiques de démonstration. *Revue de Synthèse*, vol. 4, 4, octobre-décembre 1998, pp. 575-602.
- [28] **A. ANTHONISAN**, (2011). A study on backpropagation neural net and fuzzy inference system based medical diagnosis and performance prediction. Thèse de doctorat Faculty of science and humanities BHARATH university.
- [29] **D. DUBOIS**, H. PRADE, (1980). *Fuzzy sets and systems: Theory and applications*. Academic Press, Mathematics in Sciences and Engineering vol.144.
- [30] **Bernadette BOUCHON-MEUNIER**, (1995). *La logique floue et ses applications* Addison, Wesley.
- [31] **DJOKHRAB Ala Eddine**, (2015). Planification et Optimisation de Trajectoire d'un Robot Manipulateur à 6 D. D. L. par des Techniques Neuro-Floues. Thèse de doctorat de l'université de Biskra.
- [32] **Jyh-Shing Roger Jang**, (1993). ANFIS Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics* 23(3):665 – 685.
- [33] **Vapnik V.** (1995), *The nature of statistical learning theory*, Berlin Heidelberg, New York, Springer-Verlag.
- [34] **Vapnik V.**, Golowich S., and Smola A. (1997), 'Support vector method for function approximation regression estimation and signal processing', *Proceedings of the 1996 Neural Information Processing Systems Conference NIPS 1996*, CO, USA, MIT Press, Cambridge, pp.281–287.
- [35] **Kyoung-Jae Kim** (2003), 'Financial time series forecasting using support vector machines', *Neurocomputing*, Vol.55, No. (1–2), pp.307–319.
- [36] **Rao, R.**, (2011). *Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processes*, Media. Springer Verlag, Heidelberg New York.
- [37] **Lin C.L.**, (2004). Use of the Taguchi method and grey relational analysis turning operations with multiple performance characteristics, materials and manufacturing processes, 19, No. 2, pp. 209-220.
- [38] **Deng J.**, (1989). Introduction to grey system theory. *J Grey System*, 1, pp. 1–24.
- [39] **Tosun**, (2006) Determination of optimum parameters for multiperformance characteristics in drilling by using grey relational analysis. *Int J Advanced Manufacturing Technology*, 28, pp. 450–455.

- [40] **Kevin Subrin.**, (2014). Optimisation du comportement de cellules robotiques par gestion des redondances: application à la découpe de viande et a l'Usinage Grande Vitesse.
- [41] **R. Eberhart**, J. Kennedy, (1995). A new optimizer using particle swarm theory, Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, MHS'95, pp. 39 – 43.
- [42] **J. Kennedy**, R. Eberhart, (1997). A discrete binary version of the particle swarm algorithm, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation, USA, Oct.12-15.
- [43] **Y.Cooren**, (2008). Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'Optimisation par Essaim Particulaire. Applications en génie médical et en électronique. Thèse de Doctorat de L'université PARIS 12 Val de MARNE.
- [44] **A. EL DOR**, (2012). Perfectionnement des algorithmes d'Optimisation par Essaim Particulaire. Applications en segmentation d'images et en électronique', Thèse de doctorat de l'université PARIS-EST.
- [45] **Deb K**, Pratap A., Agarwal S. et Meyarivan T. (2002). —A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, No2, pp.182–197.
- [46] **Davim, JP.**, (2010). Machining of Hard Materials. Springer London. DOI 10.1007/978-1-84996-450-460.
- [47] **Poulachon, G.**, Bandyopadhyay, BP., Jawahir, IS., Pheulpin, S., Seguin, E., (2003). The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools. Int. J. Machine Tools & Manuf. 43, 139–144.
- [48] **Chavoshi SZ**, Tajdari M, (2010). Surface roughness modelling in hard turning operation of AISI 4140 using CBN cutting tool. Int. J. Mater. Forming, Vol. 3, No.4, pp. 233-239.
- [49] **Fnides, B**, Yallese MA & Aouici H. (2008). Hard turning of hot work steel AISI H11: Evaluation of cutting pressures, resulting force and temperature. Mechanika. Kaunas: Technologija, Vol. 4, no.72, pp. 59-63.
- [50] **Bouacha K**, Yallese MA, Mabrouki T & Rigal J-F. (2010). Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool. Int. J. Refractory Metals and Hard Materials Vol. 28, pp. 349-361.

- [51] **Fnides, B**, Yallese MA, Mabrouki T & Rigal JF (2009). Surface roughness model in turning hardened hot worksteel using mixed ceramic tool. *Mechanika. Kaunas: Technologija*, Vol. 3, no. 77, pp. 68-73.
- [52] **Remadna, M.**, Rigal, J-F., (2006). Evolution during time of tool wear and cutting forces in the case of hard turning with CBN inserts. *J. Mater. Process. Technol.* 178(1–3), 67–75.
- [53] **Yallese, M.A.**, Boulanouar, L., Chaoui, K., (2004). Usinage de l'acier 100Cr6 trempé par un outil en nitrure de bore cubique. *Mécanique & Industries* 5, 355–368.
- [54] **Huang, Y.**, Dawson, TG., (2005). Tool crater wear depth modeling in CBN hard turning. *Wear* 258(9), 1455–1461.
- [55] **Benga, GC.**, Abrão, A.M., (2003). Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools, *J. Mater. Process. Technol.* 143-144, 237–241.
- [56] **De Godoy, V.A.A.**, Diniz, A.E., (2011). Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools. *J. Mater. Process. Technol.* 211, 1014–1025.
- [57] **Dewes RC** & Aspinwall DK (1997). A review of ultra-high-speed milling of hardened steels. *J. Materials Processing Technol.* Vol. 69, pp. 1-17.
- [58] **Darwish, SM.**, (2000). The impact of the tool material and the cutting parameters on surface roughness of supermet 718 nickel superalloy. *J. Mater. Process. Technol.* 97, 10–18.
- [59] **R. Ferreira, D. Carou, C.H. Lauro, J.P. Davim**, (2016). Surface roughness investigation in the hard turning of steel using ceramic tools, *Mater. Manuf. Process.* 31 648-652.
- [60] **W. Grzesik**, (2008). Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools, *Wear* 265, 327–335
- [61] **Grzesik W.**, Wanat, T., (2005). Comparative assessment of surface roughness produced by hard machining with mixed ceramic tools including 2D and 3D analysis. *J. Mater. Process. Technol.* 169, 364–371.
- [62] **Mohamed Elbah**, Mohamed Athmane Yallese, Hamdi Aouici, Tarek Mabrouki, Jean-François Rigal, (2013), Comparative assessment of wiper and conventional ceramic tools on surface roughness in hard turning AISI 4140 steel, *Measurement* 46, 3041–3056.
- [63] **Grzesik, W.**, (2009). Wear development on wiper Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiC mixed ceramic tools in hard machining of high strength steel. *Wear* 266, 1021–1028.

- [64] **Mohamed Athmane Yallese**, Kamel Chaouib, Nasserredine Zeghib, Lakhdar Boulanouar, Jean-François Rigal, (2009). Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool. *Journal of Materials Processing Technology* 209, 1092–1104.
- [65] **K. Aslantas**, I. Uzun, A. Cicek, (2012). Tool life and wear mechanism of coated and uncoated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiCN mixed ceramic tools in turning hardened alloy steel. *Wear* 274–275, 442–451.
- [66] **G. Byrne**, D. Dornfeld, B. Denkena, (2003). Advancing Cutting Technology, *CIRP Ann.- Manuf. Technol.* 52 483–507. doi:10.1016/S0007-8506 (07) 60200-5.
- [67] **B. Denkena**, D. Biermann, (2014). Cutting edge geometries, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 63 631–653. doi: 10.1016/j.cirp.2014.05.009.
- [68] **ISO 3685**, (1993). Tool life testing with single-point turning tools, ISO Standard, 3685.
- [69] **D.García-Jurado**, J.M.Mainé, M.Batista, L.Shaw, T.Hausotte, M.Marcos. (2013). Metrological Evaluation of Secondary Adhesion Wear effects in the Dry Turning of UNS-A92024-T3 Alloy through Focus- Variation Microscopy (FVM). *Procedia Engineering* 63, 804 – 811.
- [70] **J.M. Mainé**, M. Batista, D. García-Jurado, L. Shaw, M. Marcos. (2013). FVM based Methodology for Evaluating Adhesion Wear of Cutting Tools. *Procedia CIRP* 8, 552 – 557
- [71] **Radoslaw W. Maruda**, Grzegorz M. Krolczyk, Eugene Feldshtein, Piotr Nieslony, Bozena Tyliczszak, Franci Pusavec. (2016). Tool Wear Characterizations In Finish Turning Of Aisi 1045 Carbon Steel For MQCL Conditions. *wear*.12.006.
- [72] **Davies**, M.A., Chou, Y., Evans, C.J., (1996). On chip morphology, tool wear and cutting mechanics in finish hard turning, *Production Engineering Research*, 45(1): 77-82.
- [73] **Komanduri, R., Brown, R.H.**, (1981). On the mechanics of chip segmentation in machining, *J. of Engineering for Industry, Trans. ASME*, 103: 33-51.
- [74] **Poulachon G**, Moisan A., (2000). Hard turning: chip formation mechanisms and metallurgical aspects. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* August, 122(3): 406-412.
- [75] **Lee T.H.**, Mathew, P., (2007). Experimental and theoretical investigation of AISI D2 hardened steel machining with varying nose radius CBN tools. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2(2): 254-269.

- [76] **John, B.**, Gerald, B., (2002) The mechanism of chip formation in machining of hardened steels, *ASME J. Manuf Sci. Eng.*, 124: 528-534.
- [77] **Aco Antić**, Dražan Kozak, Borut Kosec, Goran Šimunović, Tomislav Šarić, Dušan Kovačević, Robert Čep, (2013). Influence of tool wear on the mechanism of chips segmentation and tool vibration, *Tehnički vjesnik* 20, 1, 105-112.
- [78] **Rech, J.**, Moison, A., (2003). Surface integrity in finish hard turning of case-hardened steels, *hit. J. Mach. Tools Manuf*, 43:543-550.
- [79] **Chou, Y.K.**, Evans, C.J, Barash, M.M., (2002). Experimental investigation on CBN turning of hardened AISI 52100 steel, *J. Mater. Process. Technol.*, 124: 274-283.
- [80] **Chou, Y.K.**, Song, Hui., (2004). Tool nose radius effects on finish hard turning, *J. Mater. Process. Technol.*, 148 : 259-268.
- [81] **Davim, J.P.**, Figueira, L., (2006) Machinability evaluation in hard turning of cold work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical techniques. *Journal of Materials Design*, 28: 1186-1191.
- [82] **Grzesik W.**, K. Zak, (2012). Surface integrity generated by oblique machining of steel and iron parts, *Journal of Materials Processing Technology* 212 2586– 2596.
- [83] **Grzesik W.**, K. Zak, (2014). Characterization of Surface Integrity Produced by Sequential Dry Hard Turning and Ball Burnishing Operations, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* JUNE, Vol. 136 / 031017-1.
- [84] **Davim, J.P.**, (2001). A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments. *J. Mater. Process. Technol.* 116, 3–6.
- [85] **Suresh, P.V.S.**, Venkateswara Rao, P., Deshmukh, S.G., (2002). A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 42, 675–680.
- [86] **Öktem, H.**, Erzurumlu, T., Kurtaran, H., (2005). Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness. *J. Mater. Process. Technol.* 170, 11–16.
- [87] **Sahin, Y.**, Motorcu, A.R., (2005). Surface roughness model for machining mild steel with coated carbide tool. *Mater. Des.* 26, 321–326.
- [88] **Palanikumar, K.**, (2007). Modeling and analysis for surface roughness in machining glass fibre reinforced plastics using response surface methodology. *Mater. Des.* 28, 2611–2618.

- [89] **Aouici H.**, Yallese M. A., Chaoui K., Mabrouki T., Rigal J. F., (2012). Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: prediction model and cutting conditions optimization, *Measurement* 45 344–353.
- [90] **Sidda Reddy B.**, Suresh Kumar J., Vijaya Kumar Reddy and Padmanabhan G. (2009), ‘Application of soft computing for the prediction of warpage of plastic injection molded parts’, *Journal of Engineering science and Technology review*, Vol.2, No.1, pp.52–62.
- [91] **Szecszi, T.**, (1999). Cutting force modeling using artificial neural networks 93, 344–349.
- [92] **Oktem, H.**, Erzurumlu, T., Erzincanli, F., (2006). Prediction of minimum surface roughness in end milling mold parts using neural network and genetic algorithm. *Mater. Des.* 27, 735–744.
- [93] **Mangesh R. Phate**, V. H. Tatwawadi, (2014). ANN Based Model Development for Material Removal Rate in Dry Turning in Indian Context. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering* Vol:8, No:1.
- [94] **Korkut, I.**, Acir, A., Boy, M., (2011). Application of regression and artificial neural network analysis in modelling of tool–chip interface temperature in machining. *Expert Syst. Appl.* 38, 11651–11656.
- [95] **Zain, A.M.**, Haron, H., Sharif, S., (2012). Integrated ANN – GA for estimating the minimum value for machining performance. *Int. J. Prod. Res.* 50, 191–213.
- [96] **Om Prakash Yadav**, Nanua Singh, Ratna Babu Chinnam and Parveen S.Goel (2003), ‘A fuzzy logic based approach to reliability improvement estimation during product development, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol.80, No.1, pp.63–74.
- [97] **Yue Jiao, Shuting Lei**, Pei Z.J., and Lee. E.S. (2004), ‘Fuzzy adaptive networks in machining process modeling: surface roughness prediction for turning operations’, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.44, No.15, pp.1643–1651.
- [98] **Daniel Kirby E.**, and Joseph C Chen, (2007), ‘Development of a fuzzy-netsbased surface roughness prediction system in turning operations’, *Computers & Industrial Engineering*, Vol.53, No.1, pp. 30–42.
- [99] **Sivarao** (2009), ‘Mamdani fuzzy inference system modeling to predict surface roughnes in laser machining’, *International Journal of Intelligent Information Technology Application*, Vol.2, No.1, pp.12–18.

- [100] **Iman Attarzadeh** and Siew Hock Ow (2010), ‘A Novel Algorithmic Cost Estimation Model Based on Soft Computing Technique’, *International Journal of Computer Science*, Vol.6, No.2, pp.117–125.
- [101] **Sathiyasekar K.**, Thyagarajah K., and Krishnan A. (2011), ‘Nero fuzzy based predict the insulation quality of high voltage rotating machine’, *Expert Systems with Applications*, Vol.38, No.1, pp.1066–1072.
- [102] **Sikorska J.Z.**, Hodkiewicz M., and Ma L. (2011), ‘Prognostic modeling options for Remaining useful life estimation by industry’, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.25, No.5, pp.1803–1836.
- [103] **Altah Hossain**, Aatur rahman, Mohiuddin A.K.M and Yulfian Aminanda (2012), ‘Fuzzy logic system for tractive performance prediction of an intelligent air-cushiontrack vehicle’, *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, Vol.6, No.1, pp.1–7.
- [104] **Wang Zhaoqiang**, Hu Changhua, Wang Wenbin, Si Xiaosheng, Zhou Zhijie (2012), ‘An off-online fuzzy modelling method for fault prognosis with an application’, *Proceedings of the IEEE Conference on Prognostics and System Health Management (PHM)*, Beijing, China, pp.1–7.
- [105] **Ship-PengLo**, (2003). An adaptive-network based fuzzy inference system for prediction of workpiece surface roughness in end milling. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 142, Issue 3, Pages 665-675.
- [106] **Nikos Tsourveloudis**, (2010). Predictive Modeling of the Ti6Al4V Alloy Surface Roughness. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 60(3):513-530. DOI: 10.1007/s10846-010-9427-6.
- [107] Adel T. Abbas, Mohanad Alata, Adham E. Ragab, Magdy M. El Rayes, and Ehab A. E Danaf, (2017). Prediction Model of Cutting Parameters for Turning High Strength Steel Grade-H: Comparative Study of Regression Model versus ANFIS.
- [108] **S. Hossain**, N. Ahmad, (2012). Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) based surface roughness prediction model for ball end milling operation. *Engineering. Mechanical, Engineering Research*. DOI:10.5897/JMER10.079.
- [109] **Chun-Hsin Wu**, Jan-Ming Ho and Lee D.T. (2004). Travel-time prediction with Support vector regression. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, Vol.5, No.4, pp.276–281.

- [110] **Chiang Hong** and Wei-Chiang (2006). Predicting Engine Reliability by Support Vector Machines. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 28, Nos. 1-2, pp. 154-161.
- [111] **Zhao F**, Chen J and Xu W (2008). Condition prediction based on wavelet packet transform and least squares support vector machine methods. *Proceedings of the IMech E, Part E:J.Process Mechanical Engineering*, Vol.223, pp.71–79.
- [112] **Xiaoh Wang** (2009). Intelligent modeling and predicting surface roughness in end milling. *Proceedings of the fifth IEEE international conference on Natural Computation*, Tianjin, pp. 521–525.
- [113] **Divya Tomar**, Ruchi Arya and sonali Agarwal, (2011). Prediction of profitability of industries using weighted SVR. *International Journal of Computer Science and Engineering*, Vol.3, No.5, pp.1938–1944.
- [114] **Wahyu Caesarendra**, Achmad Widodo and Bo-Suk Yang (2011). Combination of probability approach and support vector machine towards machine health prognostics. *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol.26, No.2, pp.165–173.
- [115] **Çaydaş, U.**, Ekici, S., (2012). Support vector machines models for surface roughness prediction in CNC turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *J. Intell. Manuf.* 23, 639–650.
- [116] **Yigit Kazancoglu**, Ugur Esme, Melih Bayramoglu, Onur Guven, Sueda Ozgun, (2011). Multi-objective optimization of the cutting forces in turning operations using the grey-based taguchi method. *Materiali in Tehnologije* 45(2):105-110.
- [117] **Yan, J.**, Li, L., (2013). Multi-objective optimization of milling parameters and the trade-offs between energy, production rate and cutting quality. *J. Clean. Prod.* 52, 462–471.
- [118] **Xi J**, Liao G., (2009). Cutting parameter optimization based on particle swarm optimization. Paper presented at the 2009 2<sup>nd</sup> International Conference on Intelligent Computing Technology and Automation. *ICICTA* 1:255–258.
- [119] **Bharathi RS**, Baskar N., (2011). Particle swarm optimization technique for determining optimal machining parameters of different work piece materials in turning operation. *Int J Adv Manuf Technol* 54(5–8):445–463.
- [120] **Kalyanmoy Deb**, Rituparna Datta, (2015). *Evolutionary Constrained Optimization*. Infosys Science Foundation Series. Springer, New Delhi.
- [121] **Amir Aryanfar**, Maghsud Solimanpur, (2012). Optimization of Multi-Pass Turning Operations Using Genetic Algorithms. *Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Istanbul, Turkey*.

- [122] **Datta R**, Deb K (2009) A classical-cum-evolutionary multiobjective optimization for optimal machining parameters. City.
- [123] **Yusoff Y**, Ngadiman MS, Zain AM (2011) Overview of NSGA-II for optimizing machining process parameters. *Procedia Eng* 15: 3978–3983.
- [124] **Yang SH**, Natarajan U (2010) Multi-objective optimization of cutting parameters in turning process using differential evolution and non-dominated sorting genetic algorithm-II approaches. *Int J Adv Manuf Technol* 49(5–8):773–784.
- [125] **Sandrine Karam**, (2004). Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt, thèse de doctorat, Limoges , en partenariat avec Université de Limoges. Faculté des sciences et techniques.
- [126] **Maurice PILLET** (2011). Les plans d'expériences par la méthode TAGUCHI. Maurice Pilet – Edition 2011 ISBN - 978-2-9539428-0-4
- [127] **Fnides B**, Yallese MA, Mabrouki T, Rigal JF Application of response surface methodology for determining cutting force model in turning hardened AISI H11 hot work tool steel Sadhana, Vol. 36(1), pp. 109–123 (2011)
- [128] **J.P. Davim**, L. Figueira, Comparative evaluation of conventional and wiper ceramic tools on cutting forces, surface roughness and tool wear in hard turning AISI D2 steel, *J. Eng. Manuf.* Vol. 221 (4), pp. 625–633 (2007).
- [129] **Aouici H**, Bouchelaghem H, YalleseMA, ElbahMand Fnides B 2014 Machinability investigation in hard turning of AISI D3 cold work steel with ceramic tool using response surface methodology. *J. Adv. Manuf. Technol.* 73: 1775–1788.
- [130] **S. Brinkmann**, Development of a robust Gaussian regression filter for three dimensional surface analysis, In X. International colloquium on surfaces Chemnitz, 122 (2000).
- [131] **Hamza Bensouilah**, Hamdi Aouici, Ikhlas Meddour, Mohamed Athmane Yallese, Tarek Mabrouki, François Girardin. Performance of coated and uncoated mixed ceramic tools in hard turning process. *Measurement* 82 (2016) 1–18.
- [132] **Arsecularatne J A**, Zhang L C and Montross C 2006 Wear and tool life of tungsten carbide, PCBN, PCD cutting tools. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 46: 482–491
- [133] **Lahiff C**, Gordon S and Phelan P 2007 PCBN tool wear modes and mechanisms in finish hard turning. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 23: 638–644.
- [134] **Gaitonde V N**, Karnik S R, Figueira L and Davim J P 2009 Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 27: 754–763

- [135] **J.P. Davim** and L.Figueira, Comparative evaluation of conventional and wiper ceramic tools on cutting forces, surface roughness and tool wear in hard turning AISI D2 steel, *J. Eng. Manuf.* 221 (4) 625-633 (2007).
- [136] **W. Grzesik** T. Wanat, Surface finish generated in hard turning of quenched alloy steel parts using conventional and wiper ceramic inserts, *International Journal of Machine Tools & Manufacture.* 46, 1988–1995, (2006).
- [137] **Denis Boinga**, Rolf Bertrand Schroeter, Adilson José de Oliveira Three-dimensional wear parameters and wear mechanisms in turning hardened steels with PCBN tools. *Wear* 398–399 (2018) 69–78.
- [138] **ISO** - International Organization for Standardization, ISO 8785:1998: Geometrical Product Specification (GPS) - Surface imperfections - Terms, definitions and parameters, (1998) 20.
- [139] **Holland, J.H.**, 1975. *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence.* U Michigan Press.
- [140] **Goldberg, D.E.**, 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, NN Schraudolph and J. Addison-Wesley, MA.
- [141] A. Attia, N. Kouidri, F. Bouzit and H. Belhadj, "Cutting temperature and tool wear during dry machining of hardened AISI H11 steel using coated ceramic inserts," *Procedia Engineering*, vol. 132, pp. 930-936, 2015.
- [142] B. Lauwers, G. Poulachon, and J. Rech, "Turning of hard materials: Study of the mechanisms governing the flank wear evolution," *Wear*, vol. 265, no. 5-6, pp. 861-871, 2008.
- [143] R.H. Myers and D.C. Montgomery, *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*, 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc.: New York, (2002).

## Intégrité de Surface

---

*« Les annexes permettent de fournir des informations supplémentaires à l'appui de la thèse, sans encombrer le texte principal. Elles peuvent également aider à clarifier des points techniques ou fournir des exemples concrets qui illustrent les concepts abstraits »*

---

Jane Smith

### I. Paramètres de profil (2D) d'état de surface

Pour définir un profil, il faut déterminer ses composantes de rugosité, d'ondulation et de forme. Expérimentalement, on relève un profil total que l'on redresse car la surface analysée est rarement horizontale. Ce redressement peut être obtenu par soustraction de la droite des moindres carrés ou par filtrage passe-haut. On obtient alors le profil total à partir duquel on sépare rugosité et ondulation par filtrage. Les paramètres d'état de surface utilisés en profilomètre sont séparés en trois groupes selon le type de profil : les paramètres (de préfixe) P qui sont calculés sur le profil primaire ; les paramètres R qui sont calculés sur le profil de rugosité ; et les paramètres W qui sont calculés sur le profil d'ondulation [15].

Les premiers rugosimètres enregistraient les variations de hauteur à l'aide d'un point en diamant en contact avec la surface et déplacée à l'aide d'une unité d'avance linéaire. Le profil mesuré était tracé sur un papier carboné et la valeur du paramètre Ra était affichée sur le cadran d'un galvanomètre. Pendant longtemps, un seul paramètre était connu et utilisé, sous le nom de Ra (*Roughness average*). D'autres paramètres comme le RMS ou le Rq, le Rz ou le Rmax ont ensuite été utilisés. Aujourd'hui, les paramètres d'état de surface sont définis dans une poignée de normes internationales définissent la manière d'analyser les états de surface à l'aide de filtrage et de paramètres [15]:

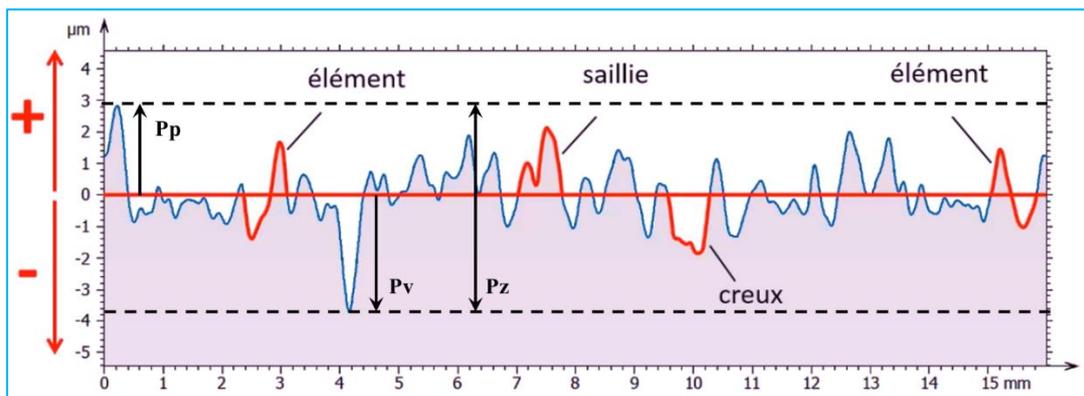
- **La norme NF EN ISO 4287**- Méthode du profil - Termes, définitions et paramètres d'état de surface, Norme décrivant les paramètres les plus utilisés sur les profils définit les paramètres communs, dit de rugosité, d'ondulation ou sur profil primaire tels que le Ra, le Rz ou le RSm.
- **La norme NF EN ISO 1302** définit la façon d'exprimer les spécifications d'état de surface sur les plans.

- **La norme NF EN ISO 13565** - Méthode du profil - Surfaces ayant des propriétés différentes selon la hauteur définit des méthodes d'analyse de surfaces dites stratifiées obtenues par usinage multi-passe. Célèbres paramètres fonctionnels, utilisés dans l'automobile, les  $R_k$ , caractérisant différentes parties de la courbe d'Abbott.
- **La norme NF EN ISO 12085** - Méthode du profil - Paramètres de motifs, issue d'une norme française 3CNOMO, le consortium regroupant PSA Peugeot Citroën et Renault, durant les années 1980 et 1990. La méthode est basée sur une construction graphique permettant de segmenter le profil en *motifs* qui sont ensuite quantifiés en hauteur et largeur. La méthode R&W de l'ISO 12085 permet de caractériser les structures périodiques sur un profil. Cette méthode est maintenant étendue grâce à une segmentation plus robuste issue de l'analyse surfacique.

Les paramètres désignant la rugosité de surface présentés dans ces normes et sont nombreux, on se limite à présenter les paramètres de surface fréquemment utilisées dans le domaine de la fabrication mécanique, définis selon les normes **ISO 4287** et **ISO 12085** :

### I. 1. « ISO 4287 » Termes, définitions et paramètres d'état de surface

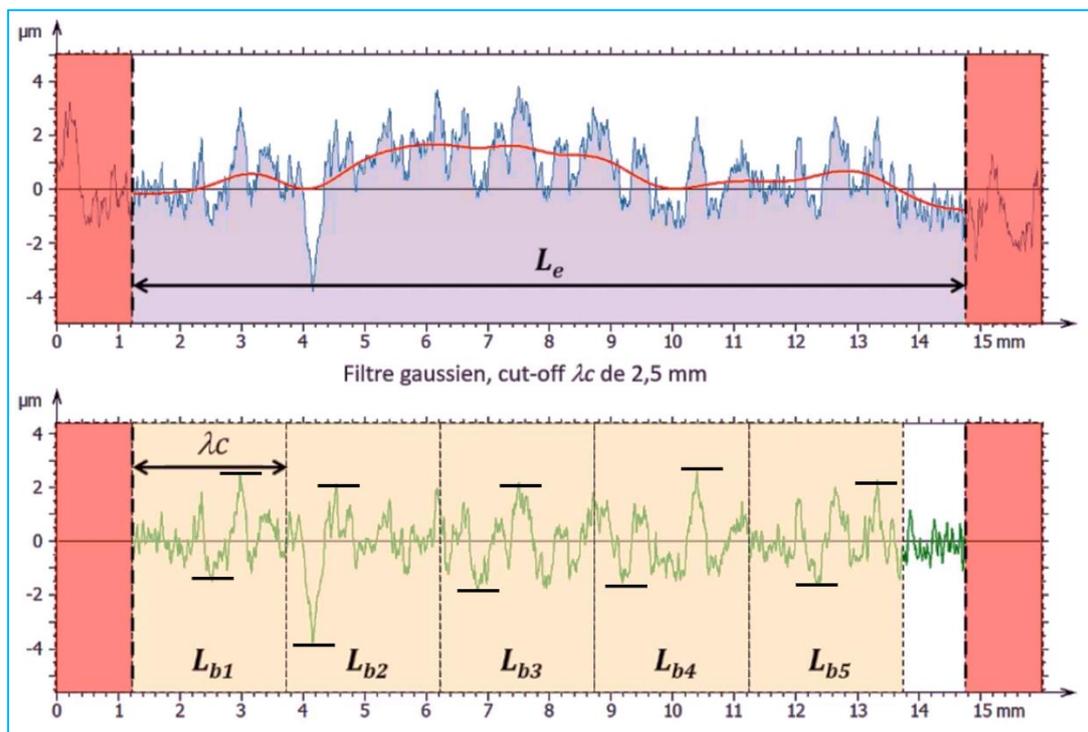
Il s'agit de la norme principale pour les paramètres de profil dans le système GPS. Elle définit les termes et les équations des paramètres généraux. Ci-dessous, les définitions sont données pour les paramètres R mais elles s'appliquent également aux paramètres P et W.



Une fois le profil mesuré, il est représenté par une courbe des hauteurs  $Z$  en fonction de la position  $X$  (figure I.1). On représente parfois le côté de la matière avec un remplissage de couleurs, ici sous le profil. Les hauteurs sont référencées, par convention, par rapport à la ligne moyenne, qui est calculée comme la moyenne de toutes les hauteurs du profil. On met cette moyenne à zéro, les hauteurs sont comptées positivement pour les points situés au-dessus de la ligne moyenne et négativement pour les points situés dessous. Une portion du profil située au-dessus de la ligne moyenne et entre deux passages à zéro est appelée une saillie du profil. Le point le plus haut d'une saillie est un pic. Une portion du profil située en dessous de la ligne moyenne et entre deux passages à zéro est appelée un creux du profil. Le point le plus bas d'un

creux est une vallée. La succession d'un creux et d'une saillie ou d'une saillie et d'un creux est appelée un élément du profil [15].

Sur le profil, on peut repérer l'excursion maximale en hauteur au-dessus du profil. Cette hauteur permet de définir le paramètre « Pp » appelé « hauteur maximale de saillie du profil », elle est comptée depuis la ligne moyenne. Le nom du paramètre commence par la lettre « P » car on est ici sur le profil primaire. Le suffixe minuscule « p » désigne les pics du profil. De la même manière, on peut déterminer la plus grande profondeur du profil par rapport à la ligne moyenne et définir le paramètre « Pv » appelé « profondeur maximale de creux du profil », le suffixe « v » référence aux vallées du profil. Il faut noter que la valeur de « Pv » est positive car on compte une profondeur vers le bas à partir de la ligne moyenne. Enfin on peut définir la hauteur entre la vallée la plus profonde et le pic le plus haut, ici appelé « hauteur maximale du profil », et désignée par le paramètre « Pz », ce paramètre est une première approche de l'amplitude de la texture de surface. Néanmoins ; il est très sensible à la présence de points aberrants ou pics et creux extrêmes non représentatifs. De tels points extrêmes peuvent survenir à l'occasion d'un choc durant la mesure et faire sauter la pointe du profilomètre ou si la pointe ou le capteur optique est passé sur une poussière ou sur un élément posé sur la surface mais non représentatif de la texture véritable [15].



**Figure I.2 :** Principaux défauts macro et micro- géométriques de surface [15].

En pratique, on calcule le plus souvent les paramètres sur un profil filtré. Le filtrage consiste à calculer un profil qui ne comporte que les longueurs d'onde les plus longues, il e, résulte une courbe de tendance qui suit les grandes variations de hauteur sans entrer dans chaque aspérité, c'est le profil d'ondulation (figure I.2). Le filtre gaussien, ici avec un « cut-off » de 2.5 millimètres, étant affecté d'effets indésirables sur les bords, le profil filtré est amputé de chaque côté, d'une longueur égale à un  $\frac{1}{2}$  « cut-off ». La longueur résultante est appelée la « longueur

d'évaluation ». Le profil de rugosité est calculé en soustrayant la courbe d'ondulation au profil primaire. Il est donc lui aussi amputé » d'un  $\frac{1}{2}$  « cut-off » de chaque côté. Les recommandations des normes "ISO 4287 et 4288 précisent que le profil de rugosité est ensuite décomposé en secteurs appelés « longueur de base » (figure I.2) ayant une largeur égale au « cut-off » choisi pour le filtre. Ces longueurs de base permettent de calculer les paramètres sur plusieurs sous-parties du profil, pour fournir une valeur moyenne qui est en principe moins affectées par les points extrêmes sur le profil. Cela permet de stabiliser les résultats issus d'un profilomètre à contact utilisé dans un environnement bruyant, comme en bord de ligne de production [15].

Par défaut, la norme indique qu'on utilise cinq longueurs (figure I.2) de base mais cette valeur peut être modifiée selon les applications. On calcule donc les paramètres d'amplitude sur chaque longueur de base et on obtient autant d'estimateurs par paramètre que de longueurs de base. Le paramètre final est calculé par la moyenne de ces estimateurs. Il est à noter que certaines normes nationales, comme la norme américaine « ASME B46.1 » n'utilisent pas la notion de longueur de base et propose de calculer dans tous les cas le paramètre sur la longueur d'évaluation [15].

### I. 1. 1. Paramètres d'amplitude

➤ **Hauteur totale du profil « Rt » :**

Hauteur entre la vallée la plus profonde et le pic le plus haut sur la longueur d'évaluation.

➤ **Hauteur maximale des pics « Rp » :**

Hauteur du pic le plus haut par rapport à la ligne moyenne, sur une longueur de base.

➤ **Profondeur maximale des vallées « Rv » :**

Profondeur de la vallée la plus profonde par rapport à la ligne moyenne, sur une longueur de base.

➤ **Hauteur maximale du profil « Rz » :**

Définie sur une longueur de base, ce paramètre est utilisé fréquemment pour vérifier la présence de pics extrêmes pouvant affecter les contacts statiques ou glissants sur une pièce.

➤ **Rugosité moyenne arithmétique du profil « Ra » :**

Définie sur une longueur de base. « Ra » est utilisé comme une évaluation globale de l'amplitude de la rugosité du profil mais ne donne aucune information sur la répartition spatiale des irrégularités du profils ni de la forme du profil. « Ra » est utile pour des surfaces rugueuses aléatoires (stochastiques) usinées avec des outils ne laissant pas trop de marques sur la surface, telles que les surfaces sablées, fraisées ou polies [15].

➤ **Rugosité moyenne quadratique du profil « Rq » :**

Correspond à l'écart-type de la distribution des hauteurs, sur la longueur d'évaluation. Rq fournit une information totalement corrélée avec « Ra » [15].

➤ **Asymétrie du profil « Rsk » :**

Asymétrie de la distribution des hauteurs, définie sur la longueur d'évaluation. Ce paramètre est important car il renseigne sur la morphologie de l'état de surface. Une valeur positive de « Rsk » correspond à une surface présentant des pics et protubérances dépassant au-dessus de la surface, et donc une distribution décalée vers les points les plus bas, alors qu'une valeur négative correspond à une surface en plateau avec des rayures ou des pores profonds, et une distribution décalée vers les points les plus hauts. C'est donc un paramètre important pour caractériser des fonctions de contact ou de lubrification. Ce paramètre ne dit rien en revanche de l'amplitude de la rugosité contrairement au Ra [15].

➤ **Aplatissement du profil « Rku » :**

Caractérise la largeur de la distribution des hauteurs. Défini sur la longueur d'évaluation.

➤ **Hauteur moyenne des éléments du profil « Rc » :**

Définie sur la longueur d'évaluation. Ce paramètre peut être calculé sur des surfaces présentant des motifs (texture périodique). Il est proche du paramètre R de la norme ISO 12085 et devrait en ce sens être considéré comme un paramètre de motifs (voir ISO 25178).

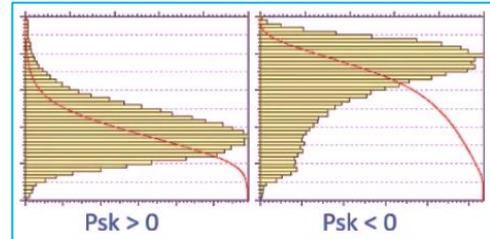
D'ailleurs, il est à prévoir que les prochaines révisions des normes de profilomètre supprimeront également ces longueurs de base pour la plupart des paramètres sauf pour les paramètres d'amplitude « Rp, Rv et Rz ». Pour compléter ces paramètres ; on peut aussi introduire la hauteur totale « Rt », calculée comme la somme du plus grand estimateur de « Rp » et du plus estimateur de « Rv ». On note que « Rz » est toujours inférieur « Rv » égale à « Rt » et que dans le cas du profil primaire, « Pt » égale « Pz » puisqu'il n'y a pas de longueur de base dans ce cas. On obtient donc quatre paramètres que l'on peut décliner sur les trois profils, soit douze au total. Dans le cas du profil ondulation, la norme indique que la longueur de base à utiliser est le « cut-off lambda f », mais en pratique ce « cut-off » n'est pas utilisé et donc les logiciels des fabricants utilisent soit la même longueur de base, que pour la rugosité soit et probablement préférable, calculent les paramètres d'ondulation sur la longueur d'évaluation.

ISO 4287		
Amplitude parameters - Roughness profile		
<b>Rp</b>	16.3074 $\mu\text{m}$	Maximum Peak Height of the roughness profile.
<b>Rv</b>	15.6237 $\mu\text{m}$	Maximum Valley Depth of the roughness profile.
<b>Rz</b>	31.9311 $\mu\text{m}$	Maximum Height of roughness profile.
<b>Rc</b>	22.9632 $\mu\text{m}$	Mean height of the roughness profile elements.
<b>Rt</b>	50.2100 $\mu\text{m}$	Total Height of roughness profile.
<b>Ra</b>	7.34703 $\mu\text{m}$	Arithmetic Mean Deviation of the roughness profile.
<b>Rq</b>	8.78387 $\mu\text{m}$	Root-Mean-Square (RMS) Deviation of the roughness profile.
<b>Rsk</b>	0.0298315	Skewness of the roughness profile.
<b>Rku</b>	2.23955	Kurtosis of the roughness profile.

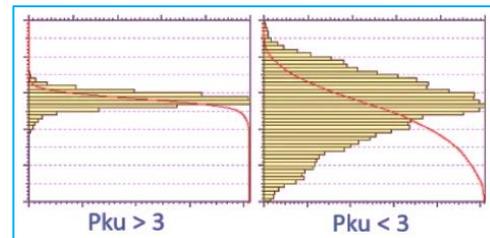
Aux quatre paramètres d'amplitude, nous pouvons en ajouter quatre autres, classés également dans ma catégorie des paramètres d'amplitude avec « Ra, Rq, Rsk et Rku ». Les paramètres « Pa et Pq » sont tous les deux des évaluations moyennes de l'amplitude du profil primaire. Dans le cas de « Ra et Rq », ils sont calculés sur chaque longueur de base et moyennés. Ce sont donc des moyennes de moyennes. « Pa », utilise une moyenne arithmétique des valeurs absolues des hauteurs. « Pq », utilise une moyenne quadratique, c'est donc l'écart-type de la distribution des hauteurs. « Ra » est probablement le paramètre le plus utilisé et le plus spécifié

sur les plans, cela ne veut pas dire qu'il est le plus utile ou le plus pertinent loin de là, mais c'est souvent le seul paramètre que les concepteurs connaissent car c'est souvent le seul enseigné. Il serait préférable d'utiliser le « Rq » à la place du « Ra » car au moins c'est un paramètre qui a une signification physique puisqu'il s'agit de l'écart-type et que l'on retrouve cette valeur ou parfois la variance dans des équations de tribologie [15].

Le « Psk », et de même que « Rsk et Wsk », est un paramètre permettant de qualifier la symétrie de la distribution des hauteurs du profil, il donne des renseignements intéressants et importants sur la morphologie de la texture. Si sa valeur est significativement négative, cela veut dire que l'on est en présence d'une surface ayant des stries ou des pores profonds sous base en plateau. A l'opposé, si la valeur est positive, on a une surface sur laquelle se trouvent des particules ou des dépôts superposés à la base globalement plane. S'il est proche de zéro, alors la distribution est parfaitement symétrique



Le « Pku » permet d'évaluer l'aplatissement de la distribution des hauteurs du profil, c'est-à-dire de savoir comment se répartissent les hauteurs entre les hauteurs minimale et maximale. Si sa valeur est significativement supérieure à 3 alors on a affaire à une distribution étroite avec la plupart des points à proximité de la moyenne et quelques points extrêmes plus éloignés. Si sa valeur est faible alors les hauteurs sont réparties plus régulièrement entre les extrémités. Là aussi, cela permet d'avoir une information utile sur la morphologie de la surface. Néanmoins, autant la symétrie que l'aplatissement sont sensibles à la présence de points extrêmes ou aberrants [15].



### I. 1. 2. Paramètres spatiaux

#### ➤ Largeur moyenne des éléments du profil « RSm » :

Définie sur la longueur d'évaluation. Ce paramètre permet de caractériser la largeur des motifs des textures périodiques ou pseudopériodiques, telles que les surfaces tournées ou structurées. RSm n'a aucun sens sur une surface à rugosité aléatoire.

### I. 1. 3. Paramètres hybrides

#### ➤ Pente moyenne quadratique du profil « Rdq » :

Définie sur la longueur de base. Rdq est une première approche de la complexité de surface. Une valeur faible correspond à une surface plutôt lisse alors qu'une forte valeur correspond à une surface rugueuse et complexe [15].

➤ **Densité de pics « RPc » :**

A été ajouté par l'amendement 1 de l'ISO 4287. Donne la densité de pics par centimètre de longueur du profil.

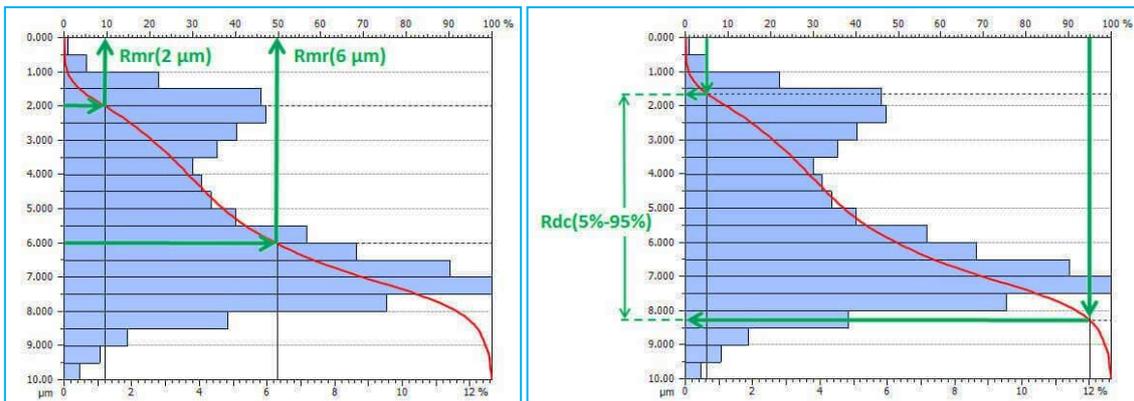
**I. 1. 4. Paramètres fonctionnels**

➤ **Taux de portance à une profondeur donnée « Rmr » :**

Ce paramètre donne le pourcentage de matière coupée à une profondeur donnée depuis le haut du profil. La référence du seuil peut également être prise sur la ligne moyenne ou une autre valeur (c0) [15].

➤ **Différence de hauteur portante « Rdc » :**

Fournit une valeur robuste de l'amplitude de la rugosité avec Rdc (2%-98%) qui permet d'éliminer les points extrêmes du profil. Le calcul élimine les pics les plus hauts qui sont éliminés par rodage et les vallées les plus profondes qui sont comblées par les débris. Dans l'industrie automobile, la hauteur de la matière usée lors du rodage peut être évaluée avec Rdc (1%-33%) et le volume de vide servant de réserve de lubrifiant peut être évalué avec Rdc (25%-99%) [15].



**Figure I.3 :** (a) Taux de portance évalué sur la courbe d'Abbott-Firestone. Le Rmr à 2 μm sous le pic le plus haut vaut 10%, (b) La hauteur de taux de portance entre 5% et 95% vaut 6,5 μm [15].

**I. 2. « ISO 13565 -2 et 3- » Surface ayant des propriétés différentes selon la hauteur**

Cette série de normes est spécialement conçue pour les surfaces stratifiées produites avec un procédé en deux étapes comme par exemple un pierrage suivi d'un polissage. La première partie de la norme, l'ISO 13565-1, définit un filtre spécial en deux passes apportant une certaine robustesse contre les vallées profondes qui sont caractéristiques des surfaces stratifiées. Ce filtre est désormais remplacé avantageusement par le filtre gaussien robuste défini dans l'ISO 16610-31. La partie 2 de la norme ISO 13565 définit un jeu de *paramètres Rk* qui sont dérivés d'une construction graphique sur la **courbe d'Abbott-Firestone**. Les paramètres Rk ne devraient être

calculés que lorsque la courbe d'Abbott présente une forme en S, autrement la construction graphique peut échouer et les paramètres deviennent inopérants [15].

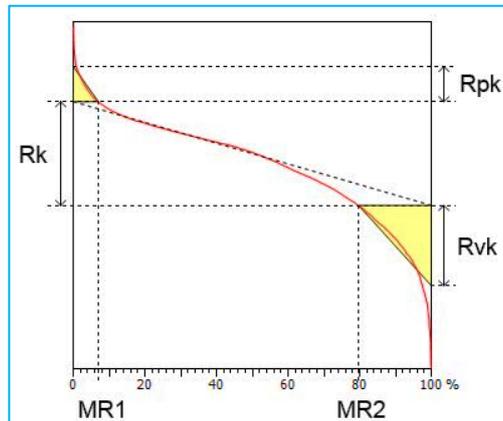


Figure I.4 : Construction graphique des paramètres Rk [15].

### I. 2. 1. Paramètres de l'ISO 13565-2

- **Profondeur de rugosité du cœur « Rk »**
- **Profondeur réduite des pics « Rpk » :**  
Ce paramètre est utilisé pour caractériser les pics saillants qui risquent d'être éliminés durant la phase de rodage.
- **Profondeur réduite des vallées « Rvk » :**  
Ce paramètre est utilisé pour caractériser les vallées qui agissent comme réserve de lubrifiant ou qui seront comblées par les débris issus du rodage.
- **MR1 et MR2 :** taux de portance délimitant la zone du cœur.

### I. 2. 2. Paramètres de l'ISO 13565-3

Cette partie est spécialisée dans la caractérisation de composants aléatoires superposés verticalement, tels que des vallées texturées superposées à des plateaux texturés. Là aussi les paramètres ne devraient être calculés que si la surface est conforme à l'application [15].

- **Rugosité moyenne quadratique des plateaux du profil « Rpq »**
- **Rugosité moyenne quadratique des vallées du profil « Rvq »**
- **Taux de portance de la transition plateaux-vallées « Rmx »**

## II. Paramètres surfaciques 3D d'état de surface

Les paramètres numériques de la texture de la surface utilisés dans les dessins techniques sont les moyens de communication entre la conception, la fabrication et les performances fonctionnelles, et les moyens de communication entre un fournisseur et un client. Ces paramètres ne sont pas seulement utilisés comme référence pour la spécification de la tolérance de fabrication et de surface, mais aussi surtout dans le cas des paramètres 3D pour prédire les propriétés fonctionnelles [15].

Le jeu de paramètres numériques initial pour la texture de la surface surfacique a été élaboré au début des années 1990. Les paramètres d'amplitude  $S_q$ ,  $S_z$ ,  $S_{sk}$  et  $S_{ku}$  ainsi que le paramètre spatial  $S_{ds}$  sont des extensions de ceux précédemment employés dans les méthodes de caractérisation 2D. Les autres paramètres spatiaux  $S_{tr}$ ,  $S_{al}$  sont extraits de la fonction d'autocorrélation surfacique et  $S_{td}$  est déterminé par la densité spectrale de puissance surfacique. Les paramètres fonctionnels sont associés à la courbe du rapport de la surface d'appui, normalisée par  $S_q$ . L'ensemble de paramètres, bien que largement accepté comme un succès, a été considéré comme quelque peu théorique et manquait de preuves pratiques suffisantes de l'applicabilité [15].

### II. 1. Conventions de nommage

Dans la norme ISO 25178, tous les paramètres surfaciques commencent par la lettre capitale S ou la lettre capitale V. Contrairement aux paramètres 2D, il n'y a pas de préfixe reflétant la nature de la surface filtrée permettant de savoir si on a affaire à un paramètre de rugosité, d'ondulation ou de profil primaire. Sur un profil, on a  $P_a$ ,  $R_a$  et  $W_a$ , mais sur une surface on a seulement  $S_a$ , qui peut donc être tantôt un paramètre de rugosité ou d'ondulation, selon les opérations de filtrage appliquées en amont. Ce choix s'explique par la multiplicité des méthodes de filtrage à la disposition des métrologues, définies dans [ISO 16610]. Ces filtres ne servent pas toujours à séparer l'ondulation de la rugosité mais altèrent parfois la surface de façon plus subtile [15].

### II. 2. Les paramètres d'amplitude

La plupart des paramètres de l'ISO 4287 peuvent facilement être étendus pour le cas 3D. Les paramètres d'amplitude dépendent de l'écart de hauteur, pour la description des propriétés liées à l'amplitude d'une surface. Six paramètres sont conçus pour caractériser la propriété d'amplitude des surfaces. Ils sont classés en deux catégories, la moyenne des ordonnées et les paramètres extrêmes des pics et des vallées [15].

ISO 25178			
Height Parameters			
$S_q$	22.263	$\mu\text{m}$	Root mean square height
$S_{sk}$	0.0098607		Skewness
$S_{ku}$	1.6195		Kurtosis
$S_p$	37.759	$\mu\text{m}$	Maximum peak height
$S_v$	40.338	$\mu\text{m}$	Maximum pit height
$S_z$	78.097	$\mu\text{m}$	Maximum height
$S_a$	19.863	$\mu\text{m}$	Arithmetic mean height

➤ **Hauteur efficace de la surface «  $S_q$  » :**

Moyenne quadratique des valeurs des ordonnées à l'intérieur d'une zone de définition (A)

➤ **Facteur d'asymétrie de la surface «  $S_{sk}$  » :**

Quotient de la moyenne des cubes des valeurs des ordonnées par le cube du paramètre  $S_q$  à l'intérieur d'une zone de définition (A)

➤ **Facteur d'aplatissement de la surface «  $S_{ku}$  » :**

Quotient de la moyenne des valeurs à la puissance quatre des ordonnées par la valeur à la puissance quatre du paramètre  $S_q$  à l'intérieur d'une zone de définition (A).

➤ **Hauteur maximale de pic de la surface «  $S_p$  » :**

Plus grande valeur de hauteur de pic à l'intérieur d'une zone de définition.

➤ **Hauteur maximale de fosse de la surface «  $S_v$  » :**

Moins la plus petite valeur de hauteur de fosse à l'intérieur d'une zone de définition

➤ **Hauteur maximale de la surface «  $S_z$  » :**

Somme de la valeur de la hauteur maximale de pic et de la valeur de la hauteur maximale de fosse à l'intérieur d'une zone de définition

➤ **Hauteur moyenne arithmétique de la surface «  $S_a$  » :**

Moyenne arithmétique de la valeur absolue de l'ordonnée à l'intérieur d'une zone de définition (A)

## II. 3. Les Paramètres d'espacement

Les paramètres d'espacement se réfèrent aux propriétés spatiales des surfaces et dépendent principalement des informations dans les directions de balayage et de traçage. Ces paramètres sont conçus pour évaluer la densité du pic et la résistance de la texture. Ces paramètres sont particulièrement utiles pour distinguer les structures de surface hautement texturées et aléatoires. Trois paramètres sont utilisés pour caractériser les propriétés spatiales, la densité des sommets, la longueur d'autocorrélation de décroissance la plus rapide et le rapport hauteur / largeur de la texture [15].

➤ **Longueur d'autocorrélation «  $S_{al}$  » :**

Distance horizontale de l'élément  $f_{ACF}(t_x, t_y)$  ayant la décroissance la plus rapide à une valeur spécifiée  $s$ , avec  $0 \leq s < 1$ .

➤ **Facteur de forme d'état «  $S_{tr}$  » :**

Rapport de la distance horizontale de  $f_{ACF}(t_x, t_y)$  ayant la décroissance la plus rapide à une valeur spécifiée  $s$  sur la distance horizontale de  $f_{ACF}(t_x, t_y)$  ayant la décroissance la plus lente à la valeur  $s$ , avec  $0 \leq s < 1$ .

## II. 4. Paramètres hybrides

Les paramètres hybrides sont des paramètres basés à la fois sur l'amplitude et les informations spatiales. Ils définissent des propriétés topographiques numériquement hybrides telles que la pente de la surface, la courbure des points hauts et la zone interfaciale. Tout changement qui se produit en amplitude ou en espacement peut avoir un effet sur la propriété hybride. Les paramètres ont une importance particulière pour la réflectance électrique, thermique, d'étanchéité, d'usure et optique d'une surface [15].

### ➤ Gradient efficace de la surface « $S_{dq}$ » :

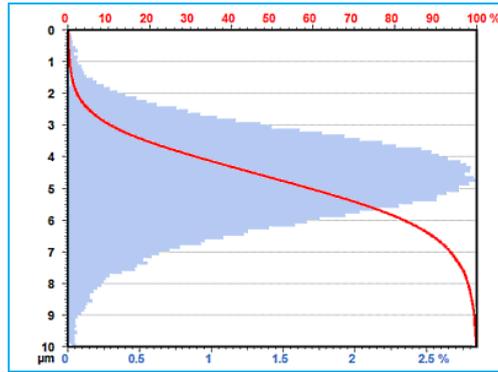
Valeur efficace du gradient de surface à l'intérieur de la zone de définition (A) d'une surface à échelle limitée.

### ➤ Rapport de surface interfaciale développée de la surface « $S_{dr}$ » :

Rapport de l'incrément de la surface interfaciale de la surface à échelle limitée à l'intérieur de la zone de définition (A), sur ladite zone de définition

## III. Paramètres fonctionnels d'état de surface

Les paramètres fonctionnels sont calculés à partir de la distribution des hauteurs et ont pour application de caractériser l'aspect fonctionnel de la surface (usure, lubrification, contact). Ce sont des paramètres globaux (paramètres de champ) qui peuvent être vus comme une exploration statistique de la surface. La distribution de hauteur peut être représentée sous la forme d'un histogramme des hauteurs de surface (figure I.3) qui quantifie le nombre de points sur la surface qui se trouvent à une hauteur donnée. La courbe de rapport de matière est la courbe cumulative de la distribution. La courbe de rapport de matériau est comptée du point le plus élevé de la surface (où la courbe est égale à 0%) à son point le plus bas (où la courbe atteint 100%) (figure I.5). Dans le cas des profilés, le rapport matière est calculé en utilisant une profondeur de coupe  $c$  qui est comptée à partir du pic le plus élevé (ISO 4287 2000). Ce n'est pas la solution la plus robuste car elle peut être affectée par des valeurs aberrantes. Dans l'analyse de surface, la valeur  $c$  est comptée sur une surface à partir du plan moyen, et cette référence fournit une définition plus robuste des paramètres de rapport de matériau [15].

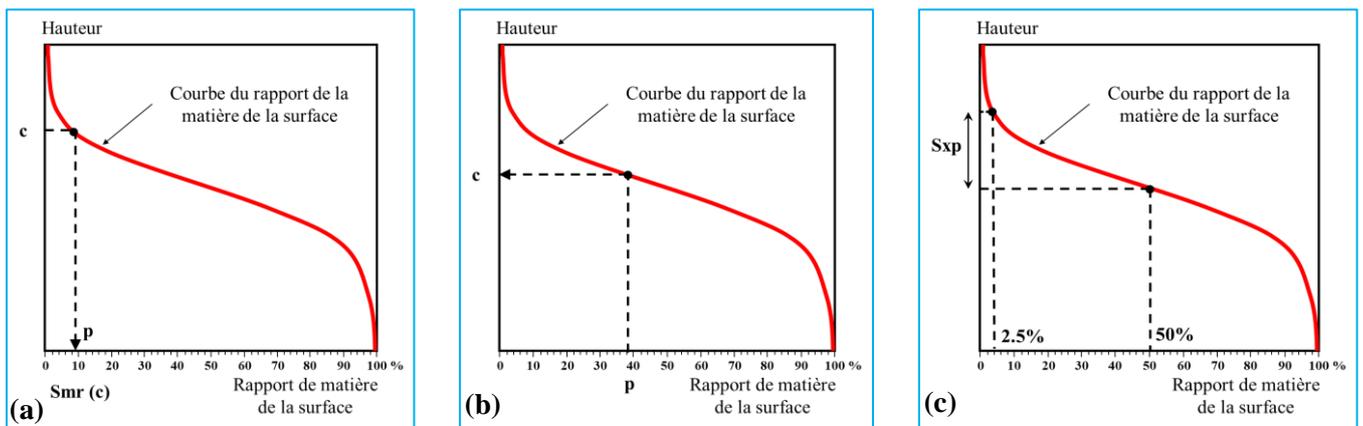


**Figure I. 5 :** La distribution de la hauteur (en bleu) et la courbe de rapport de matériau (en rouge) [15].

### III. 1. Paramètres de taux de portance

La courbe d'Abbott décrit l'augmentation du taux de longueur portante en fonction de l'augmentation de la profondeur du profil. Autrement dit, elle donne pour chaque niveau d'altitude le pourcentage de matière traversée par une ligne parallèle à la ligne de référence du profil et située à cette altitude.

Puisque les paramètres de taux de portance sont calculés à partir de la courbe d'Abbott, ils peuvent aisément être étendus aux surfaces :



**Figure I.6 :** (a),  $S_{mr}$  est le taux de portance surfacique,  $p$  correspondant à une hauteur de section  $c$  ; (b),  $S_{mc}$  est taux de portance inverse,  $c$  correspondant à un rapport de matière  $p$  ; (c),  $S_{xp}$  défini comme la différence de hauteur entre deux  $S_{mc}$  à 2,5 et 50% [15].

#### ➤ Taux de portance surfacique « $S_{mr}$ » :

La courbe du taux de longueur portante surfacique d'une surface représente les hauteurs auxquelles le taux de longueur portante surfacique varie de 0% à 100%. Le taux de longueur portante surfacique indique la surface à une hauteur spécifique  $c$  ou supérieure. Les hauteurs sont prises à partir du plan de référence. La fonction  $S_{mr}(c)$  donne le rapport matière  $S_{mr}$  correspondant à une hauteur de coupe  $c$  donnée en paramètre (Figure I.6 (a)).

➤ **Taux de portance inverse «  $S_{mc}$  » :**

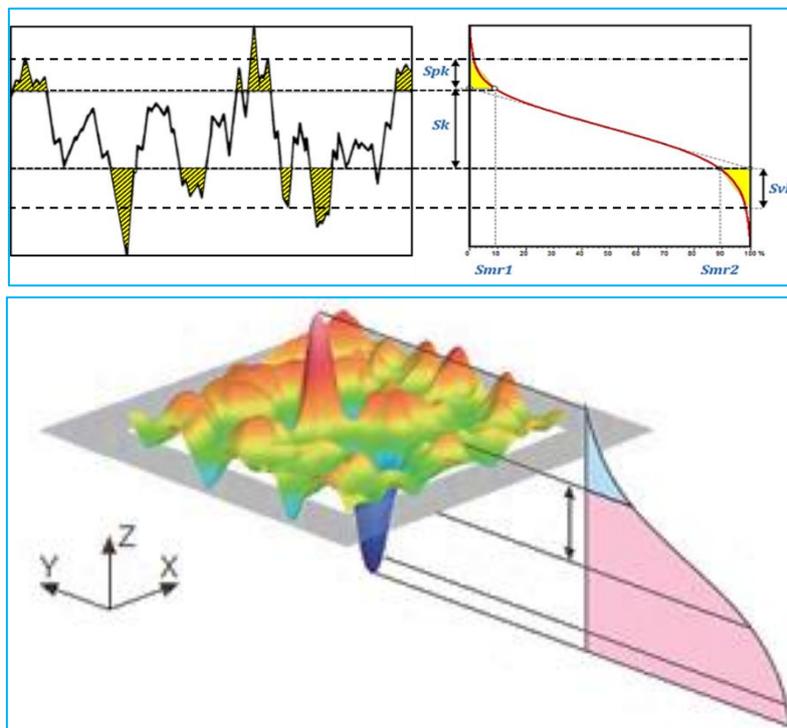
La fonction  $S_{mc}$  évalue la valeur de hauteur  $c$  correspondant à un rapport de matériau  $p$  donné en paramètre (Figure I.6 (b)).

➤ **Hauteur extrême de crête «  $S_{xp}$  » :**

Ce paramètre indique la différence de hauteur entre les taux de longueur portante surfacique  $p\%$  et  $q\%$ . La courbe du taux de longueur portante surfacique est utilisée pour le calcul du paramètre  $S_{xp}$ .  $S_{xp}$  représente la différence de hauteur entre le plan moyen et les pics de la surface après élimination des pics particulièrement saillants.  $S_{xp} = S_{mc}(2.5\%) - S_{mc}(50\%)$ . Par défaut, il s'agit de la différence de hauteur entre les taux de longueur portante surfacique 2,5% et 50%. (Figure I.6 (c)).

### III. 2. Les paramètres SK

Les paramètres de la courbe de rapport de matériau surfacique linéaire, appelés paramètres de la famille  $Sk$ , sont une extension de 2D à 3D selon ISO 13565-2 qui définit les paramètres  $Rk$ ,  $Rpk$  et  $Rvk$  qui avaient été créés par l'industrie automobile allemande, ces paramètres sont spécialement conçus pour les textures de surface fortement sollicitées, par exemple les alésages de cylindre rodés. Ces paramètres sont une approche simple où la courbe de rapport de matière surfacique en forme de genou est approximée par un ensemble de lignes droites.



**Figure I. 7 :** Construction graphique des paramètres  $Sk$  selon la norme ISO 13565-2 [15].

La construction de la famille  $Sk$  ( $Sk$ ,  $Spk$ ,  $Svk$ ,  $Smr1$  et  $Smr2$  qui sont calculés de la même façon sur la courbe d'Abbott, elle-même calculée sur la surface entière) est dérivée de trois

sections de la courbe de rapport de matière surfacique : les pics au-dessus des plateaux principaux, les plateaux eux-mêmes et les vallées profondes entre les plateaux. Dans ce cas, la courbe de rapport de matière surfacique est obtenue en utilisant un filtre de régression gaussien robuste [15].

➤ **Profondeur de rugosité centrale « Sk » :**

Le paramètre SK est calculé comme la différence des hauteurs verticale aux valeurs de rapport de matière de surface de 0% et 100% sur la ligne équivalente, correspond à la profondeur de la partie de travail de la surface, la partie plate de la courbe de la surface d'appui; en particulier, c'est une valeur obtenue en soustrayant la hauteur minimale (période initiale de rodage) de la hauteur maximale de la surface centrale.

Le paramètre Sk représente la hauteur de la surface écrêtée, le paramètre Smr1 représente le taux de longueur portante surfacique qui sépare les pics éliminés de la surface écrêtée et le paramètre Smr2 représente le taux de longueur portante surfacique qui sépare les vallées éliminées de la surface écrêtée [15].

➤ **Hauteur de crête réduite « Spk » :**

Spk, est une estimation des petits pics (hauteur moyenne des crêtes) au-dessus du plateau principal de la surface. Ces pics seront généralement usés (ou diminués) pendant la période de rodage d'une pièce. En général, il serait souhaitable d'avoir un Spk assez petit pour réduire les débris entraînés.

➤ **Hauteur de vallée éliminée « Svk » :**

Ce paramètre donne la moyenne arithmétique de la profondeur de vallée éliminée de la courbe du rapport de la matière de la surface. Il s'agit en fait de la mesure de la profondeur des vallées sous la surface centrale. Ce paramètre indique la profondeur de la zone dans laquelle le fluide appliqué sur la surface s'est accumulé, une information pouvant être utilisée pour améliorer les propriétés lubrifiantes de la surface [15].

### **III. 3. Paramètres de volume**

Ces paramètres sont l'ultime évolution des indices fonctionnels et des paramètres fonctionnels Sk qui sont calculés sur la courbe d'Abbott, ils sont dérivés des informations de volume des courbes de rapport de matériau surfacique de la surface topographique. Les hypothèses par défaut pour cet ensemble de paramètres sont que le matériau de pointe englobe 0 ~ 10% du rapport de matériau tandis que les plages matériau de noyau / vide couvrent 10-80% et la vallée vide varie de 80 à 100% du rapport de matériau

Deux paramètres de volume de matière et deux paramètres de volume de vide sont définis. Les paramètres  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vc}$ , et  $V_{vv}$  représentent respectivement les volumes de matière des pics éliminés, de matière de la surface écrêtée, de vide de la surface écrêtée et de vide des vallées. Ces paramètres fonctionnels peuvent caractériser non seulement les propriétés fonctionnelles communes des surfaces, par exemple les propriétés géométriques de surface et de volume, mais aussi interpréter les propriétés d'usure et tribologiques dans une procédure de rodage. La famille de volumes à une importance pratique énorme et peut être utilisée pour évaluer numériquement le rapport de matériaux des surfaces et a des valeurs unitaires absolues de volume par unité de surface. Afin d'utiliser les paramètres de volume, il est nécessaire de spécifier les taux de longueur portante surfacique séparant les pics éliminés et vallées éliminées de la surface écrêtée. Ces paramètres sont exprimés en unité de volume par unité de surface ( $\text{ml}/\text{m}^2$  ou  $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ ).

ISO 25178			
Functional Parameters (Volume)			
$V_m$	0.0072433	$\text{mm}^3/\text{mm}^2$	$p = 25\%$
$V_v$	0.052237	$\text{mm}^3/\text{mm}^2$	$p = 25\%$
$V_{mp}$	0.002144	$\text{mm}^3/\text{mm}^2$	$p = 10\%$
$V_{mc}$	0.058961	$\text{mm}^3/\text{mm}^2$	$p = 10\%, q = 80\%$
$V_{vc}$	0.071198	$\text{mm}^3/\text{mm}^2$	$p = 10\%, q = 80\%$
$V_{vv}$	0.0062604	$\text{mm}^3/\text{mm}^2$	$p = 80\%$

➤ **Volume de matière des pics «  $V_{mp}$  » :**

Ce paramètre représente le volume de matière par unité de surface à un taux de longueur portante donné, calculé à partir de la courbe du taux de longueur portante surfacique

➤ **Volume de matière du coeur «  $V_{mc}$  » :**

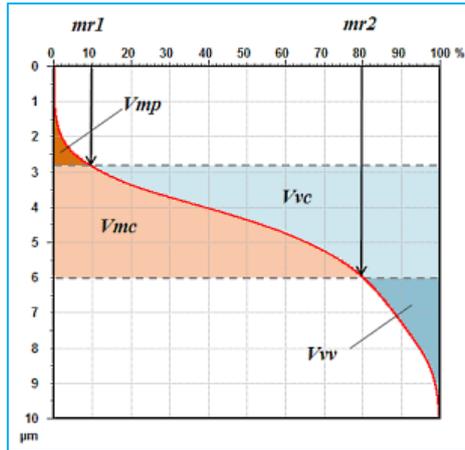
Ce paramètre représente la différence entre le volume de matière au rapport de matière de surface  $q\%$  et le volume de matière au rapport de matière de surface  $p\%$ .

➤ **Volume de vide du coeur «  $V_{vc}$  » :**

Ce paramètre représente la différence entre le volume de vide à la valeur  $p\%$  du rapport de matière de surface et le volume de vide au rapport de matière de surface  $q\%$ .

➤ **Volume de vide des vallées «  $V_{vv}$  » :**

Ce paramètre représente le volume de vide des vallées par unité de surface à un taux de longueur portante donné, calculé à partir de la courbe du taux de longueur portante surfacique



**Figure I.8:** Construction graphique des paramètres fonctionnels de volume selon la norme ISO 25178 [15].

#### IV. Bibliographie Annexe I

- [15] **François Blateyron**, (2006). Guide de métrologie des surfaces. Digital Surf, <https://guide.digitalsurf.com/fr/guide.html>.