

République Algérienne Démocratique & populaire

Ministère de L'enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique

## Mémoire de Magister



Département de : **Génie Mécanique**  
Spécialité : **Productique Mécanique**

Présenté par :

TEBASSI Hamid

### **Etude de l'usinabilité de l'Inconel 718**

Sous la direction de: **Dr. YALLESE Med Athmane**

Devant le jury

<b>Dr. K. Chaoui</b>	Pr. Président	Université Badji Mokhtar	Annaba
<b>Dr. M.A. Yaltese</b>	MC. Rapporteur	Université 8 Mai 1945	Guelma
<b>Dr. L.Boulanouar</b>	Pr. Examineur	Université Badji Mokhtar	Annaba
<b>Dr. M.C.Djamaa</b>	MC. Examineur	Université 8 Mai 1945	Guelma
<b>Mr. S.Belhadi</b>	Enseignant. Invité	Université 8 Mai 1945	Guelma

2009

# REMERCIEMENTS

**Je saisis cette occasion pour remercier mon encadreur le Docteur M.A. YALLESE pour ses conseils.**

**Je remercie aussi Monsieur le Professeur K. CHAOUI pour avoir présidé le jury.**

**Mes remerciements vont également à Monsieur le Professeur L.BOULANOUAR, à Monsieur le Docteur M.C.DJAMAA et à Monsieur S.BELHADI pour leur participation au jury.**

**Que toutes les personnes qui ont participé à la réalisation de ce travail trouvent aussi ma reconnaissance la plus sincère**

## Résumé

Les super alliages réfractaires (Inconel) jouent un rôle extrêmement important dans l'industrie moderne. Ils sont divisés en trois catégories, les alliages à base de Nickel, à base de Fer-Nickel et à base de Cobalt. L'Inconel 718 présente des propriétés physico-mécaniques très spécifiques, tels que une ductilité élevée, une haute résistance à chaud, une faible conductivité thermique ainsi un coefficient de frottement très important. Ces caractéristiques rendent l'usinage de ce matériau très difficile ce qui conduit généralement à des durées de vie des outils de coupe plus courtes. De là, il est très intéressant de trouver des plaquettes de coupe qui ont des meilleures performances et de sélectionner une plage des paramètres du régime de coupe où ces plaquettes peuvent productivement et efficacement usiner ces matériaux.

Cette étude permet l'évaluation de quatre matériaux de coupe. Ces matériaux sont des carbures revêtus et non revêtus et des céramiques mixtes et composites. L'objectif de cette recherche est d'une part d'examiner les différents phénomènes intervenant lors de l'usinage à sec de l'Inconel 718 tels que, les efforts de coupe, la rugosité, l'usure et la température dans la zone de coupe, avec la variation de différents paramètres du régime de coupe (vitesse de coupe, avance par tour, temps d'usinage et profondeur de passe). D'autre part, nous avons fait une analyse statistique des résultats basée sur l'analyse de variance (ANOVA) et la méthodologie de surface de réponse (RSM) et cela dans le but de proposer des modèles mathématiques de la rugosité et des efforts de coupe afin de faire des prédictions.

## ملخص

إن الخلائط العالية المقاومة للحرارة تلعب دورا هاما في الصناعات الحديثة. تنقسم هذه المواد إلى ثلاثة أقسام: خلائط النيكل، خلائط الحديد - نيكل، خلائط الكوبالت.

إن الخليط العالي (Inconel 718) يتميز بخصائص فيزيائية و كيميائية خاصة جدا من بينها اللدانة العالية، المقاومة العالية للحرارة، له ناقلية ضعيفة

جدا للحرارة و معامل احتكاك عالي جدا . هذه الخصائص تجعل تشغيل هذا الخليط صعبا جدا مما يؤدي إلى قصر مدة حياة أداة القطع، فكان من المهم البحث عن أدوات قادرة على قطع هذه الخلائط. هذه الدراسة تسمح بتقييم أربعة مواد قطع مختلفة، كربيدات مكسوة و غير مكسوة و خزف مختلط و آخر مركب. إن الهدف من هذا البحث من جهة دراسة مختلف الظواهر التي تتدخل أثناء تشغيل هذا الخليط خاصة قوى القطع، خشونة السطح، تآكل أداة القطع و الحرارة في منطقة القطع مع تغيير مختلف شروط القطع سرعة القطع، سرعة التغذية، عمق التمريرة و زمن التشغيل من جهة أخرى، قمنا بدراسة إحصائية معتمدين في ذلك على (ANOVA) و (RSM) لاقتراح نماذج رياضية.

## **Abstract**

Inconel alloy are generally known for their resistance to oxidation and their ability to maintain their structural integrity in high temperature atmospheres. There are several Inconel alloys that are used in applications that require a material does not easily succumb to caustic corrosion, corrosion caused by high purity water, and stress-corrosion cracking.

Inconel alloy are divided into three categories: Nickel based super alloy, Iron – Nickel based super alloy, Cobalt based super alloy.

The Inconel 718 super alloy ones present very severe physico-mechanical properties, such as a high ductility, high hot strength and a high work hardening also a very important friction ratio. For these reason, machining of Inconel 718 super alloy becomes very difficult that generally leads to very limited tool lives. Hence, it is very interesting to find the cutting inserts with bests performances and the ranges of machining parameters where these inserts can productively and efficiently machine these alloy.

This study is focused on the evaluation of four cutting materials. These materials are coated and uncoated carbides, mixed and composite ceramics. The purpose of this research is on the one hand to examine the various intervening phenomena during the dry machining of Inconel 718 super alloy such as, cutting forces, surface roughness and tool wear, with the variation of various cutting parameters (cutting speed, feed rate, depth of cut and the machining time). Moreover, we mad a statistical analysis of the results based on the analysis of variance (ANOVA) and the response surface methodology (RMS) and that in the aim to propose mathematical models of the surface roughness and cutting forces.

# Sommaire

## CHAPITRE I

### *Etude bibliographique sur les phénomènes régissant le processus de coupe*

<b>I.1: Usinabilité des matériaux.....</b>	<b>14</b>
<b>I.1.1 : Introduction.....</b>	<b>14</b>
<b>I.1.2: Critères d'évaluation de l'usinabilité.....</b>	<b>16</b>
<b>I.2 : Matériaux de coupe.....</b>	<b>17</b>
<b>I.3 : Description des contacts copeau-outil et pièce-outil.....</b>	<b>19</b>
<b>I.3.1: Géométrie des outils.....</b>	<b>19</b>
<b>I.3.2 : Description de la racine du copeau.....</b>	<b>21</b>
<b>I.3.3 : Amplitude des déformations.....</b>	<b>22</b>
<b>I.4 : Températures de coupe.....</b>	<b>23</b>
<b>I.5: Usure des outils de coupe.....</b>	<b>24</b>
<b>I.5.1: Formes d'usure.....</b>	<b>25</b>
<b>I.5.2: Mécanismes d'usure.....</b>	<b>26</b>
<b>I.5.3: Critères d'usure.....</b>	<b>28</b>
<b>I.5.3.1: Critère principal.....</b>	<b>28</b>
<b>I.5.3.2: Critère complémentaire.....</b>	<b>28</b>
<b>I.6: lois d'usure des outils de coupe.....</b>	<b>29</b>
<b>I.6.1: Définitions.....</b>	<b>29</b>
<b>I.6.2: Modèle de TAYLOR.....</b>	<b>29</b>
<b>I.6.3: Modèle de Gilbert.....</b>	<b>29</b>
<b>I.6.4: Modèle de Koning – DEPIEREUX .....</b>	<b>30</b>
<b>I.6.5: Modèle de Colding.....</b>	<b>30</b>
<b>I.6.6: Modèle de Cronenberg.....</b>	<b>30</b>
<b>I.7: Fluides de coupe (Rôle en usinage et classification).....</b>	<b>31</b>
<b>I.7.1: Influence de la température.....</b>	<b>32</b>

I.7.2: Rôle des fluides de coupe.....	32
I.8: Rugosité des surfaces usinées.....	32
I.8.1: Les principaux défauts des surfaces .....	33
I.8.2: Les principaux critères de rugosité .....	33
I.9 : Les super alliages réfractaires (Inconel) .....	35
I.9.1: Définition.....	35
I.9.2: La famille d'Inconel.....	36
I.9.2.1: Inconel - alliage 600 .....	36
I.9.2.2: Inconel - alliage 601.....	36
I.9.2.3: Inconel - alliage 625.....	36
I.9.2.4: Inconel - alliage 718.....	37
I.9.2.5: Inconel - alliage X-750.....	38
I.10: Travaux de Recherche réalisés sur l'usinage des Super alliages Réfractaires.....	38
I.11: Conclusion .....	54
I.12: Position du problème.....	54

**CHAPITRE II.**  
*Équipements utilisés et programme des expériences*

II.1: Introduction.....	57
II.2: Equipements utilisés.....	57
II.2.1: Machine outil.....	57
II.2.2: Outils de coupe utilisés.....	57
II.3: Matériau à usiner.....	58
II.4: Appareillages de mesure utilisés.....	59
II.5: Conditions de coupe.....	62
II.6: Planification des expériences.....	63
II.6.1: Introduction.....	63
II.6.2: Méthodologie de recherche.....	63
II.6.3: Méthode unifactorielle.....	64
II.6.4: Méthode multifactorielle.....	64
II.6.5: Conclusion .....	66

**CHAPITRE III**  
***Evaluation de l'usinabilité de l'Inconel 718***

III.1: Introduction.....	68
III.2: Evolution de la rugosité en fonction des paramètres de coupe.....	68
III.3: Evolution de la rugosité en fonction du temps.....	72
III.4: Evolution de la rugosité en fonction de l'usure de la céramique composite C670.....	76
III.5: Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres de coupe.....	78
III.6: Evolution des efforts spécifiques en fonction des paramètres de coupe.....	81
III.7: Evolution de des efforts de coupe en fonction du temps.....	84
III.7.1: Effet de l'usure.....	87
III.7.2: Etude du changement de sens d'influence de l'effort résultant.....	89
a/ Cas de la céramique CC670.....	93
b/Cas de la céramique CC650.....	93
C/Cas du carbure GC1025.....	93
d/ Cas du carbure H13A.....	94
III.7.3: Effet de la direction d'influence de la résultante des efforts de coupe sur la rugosité.....	94
III.8: Evolution des efforts de coupe en fonction de l'usure.....	95
III.8.1: Evolution de la direction de l'effort résultant en fonction de l'usure.....	97
III.9: Evolution de la température de coupe.....	99
III.9.1: Evolution de la température de coupe en fonction des paramètres de coupe.....	99
III.9.2: Evolution de la température de coupe en fonction du temps pour différents conditions de coupe.....	101
III.9.3: Conclusion partielle.....	103

**CHAPITRE IV**  
***Détermination des modèles de la rugosité et des efforts de coupe***

IV.1: Introduction.....	105
IV.2: Résultats de l'évolution de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des paramètres d'usinage.....	105
IV.2.1: Cas de la céramique composite CC670/Inconel 718.....	105

<b>IV.2.1.1: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Ra.....</b>	<b>106</b>
A/ Evolution de la rugosité Ra en fonction des paramètres du régime de coupe.....	107
B/ Graphique des effets principaux pour Ra.....	108
C/Matrice de diagrammes d'interactions pour Ra.....	109
D/Graphique de contour de Ra.....	109
E/ Modèle généralisé.....	110
F/ Modèle réduit.....	110
<b>IV.2.1.2: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Rt.....</b>	<b>110</b>
A/ Evolution de la rugosité Rt en fonction des paramètres du régime de coupe.....	111
B/ Graphique des effets principaux pour Rt.....	111
C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Rt.....	112
D/Graphique de contour de Rt.....	112
E/ Modèle généralisé.....	113
F/ Modèle réduit.....	113
<b>IV.2.1.3: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Rz .....</b>	<b>113</b>
A/ Evolution de la rugosité Rz en fonction des paramètres du régime de coupe.....	114
B/ Graphique des effets principaux pour Rz.....	115
C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Rz.....	115
D/Graphique de contour de Rt.....	116
E/ Modèle généralisé.....	116
F/ Modèle réduit.....	116
<b>IV.2.1.4: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Fa.....</b>	<b>116</b>
A/ Evolution de Fa en fonction des paramètres du régime de coupe.....	117
B/ Graphique des effets principaux pour Fa.....	117
C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Fa .....	118
D/Graphique de contour de Fa.....	119
E/ Modèle généralisé.....	119
F/ Modèle réduit.....	119
<b>IV.2.1.5: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Fr.....</b>	<b>119</b>
A/ Evolution de la rugosité Fr en fonction des	

paramètres du régime de coupe.....	120
B/ Graphique des effets principaux pour Fr.....	120
C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Fr .....	121
D/Graphique de contour de Fr.....	122
E/ Modèle généralisé.....	122
F/ Modèle réduit.....	122
<b>IV.2.1.6: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Fv .....</b>	<b>122</b>
A/ Evolution de la rugosité Fv en fonction des paramètres du régime de coupe.....	123
B/ Graphique des effets principaux pour Fv.....	123
C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Fv .....	124
D/Graphique de contour de Fv.....	125
E/ Modèle généralisé.....	125
F/ Modèle réduit.....	125
<b>IV.2.2: Cas de la céramique mixte CC650/Inconel 718.....</b>	<b>126</b>
<b>IV.2.2.1: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Ra.....</b>	<b>126</b>
A/ Evolution de la rugosité Ra en fonction des paramètres du régime de coupe.....	127
B/ Graphique des effets principaux pour Ra.....	128
C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Ra .....	128
D/Graphique de contour de Ra.....	129
E/ Modèle généralisé.....	129
F/ Modèle réduit.....	129
<b>IV.2.2.2: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Rt .....</b>	<b>129</b>
A/ Evolution de la rugosité Rt en fonction des paramètres du régime de coupe.....	130
B/ Graphique des effets principaux pour Rt.....	131
C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Rt .....	131
D/ Graphique de contour pour Rt.....	132
E/ Modèle généralisé.....	133
F/ Modèle réduit.....	133
<b>IV.2.2.3: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Rz .....</b>	<b>133</b>
A/ Evolution de la rugosité Rz en fonction des paramètres du régime de coupe.....	133

B/ Graphique des effets principaux pour Rt.....	134
C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Rt .....	135
D/ Graphique de contour pour Rz.....	135
E/ Modèle généralisé.....	136
F/ Modèle réduit.....	136
<b>IV.2.2.4: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Fa .....</b>	<b>136</b>
A/ Evolution de Fa en fonction des paramètres du régime de coupe.....	136
B/ Graphique des effets principaux pour Fa.....	137
C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Fa .....	138
D/Graphique de contour de Fa.....	138
E/ Modèle généralisé.....	139
F/ Modèle réduit.....	139
<b>IV.2.2.5: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Fr .....</b>	<b>139</b>
A/ Evolution de la rugosité Fa en fonction des paramètres du régime de coupe.....	140
B/ Graphique des effets principaux pour Fr.....	140
C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Fr .....	141
D/Graphique de contour de Fr.....	142
E/ Modèle généralisé.....	142
F/ Modèle réduit.....	142
<b>IV.2.2.6: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Fv .....</b>	<b>142</b>
A/ Evolution de la rugosité Fv en fonction des paramètres du régime de coupe.....	143
B/ Graphique des effets principaux pour Fv.....	144
C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Fv .....	144
D/Graphique de contour de Fv.....	145
E/ Modèle généralisé.....	145
F/ Modèle réduit.....	145
<b>IV.3: Conclusions .....</b>	<b>142</b>
<b>IV.4: Conclusion générale.....</b>	<b>147</b>
<b>IV.5: Perspectives.....</b>	<b>150</b>
<b>IV.6: Références bibliographiques.....</b>	<b>151</b>

## Introduction générale

Le super alliage réfractaire (Inconel 718) est largement utilisé dans les différents domaines à cause de sa résistance à chaud et à la corrosion. Les applications de l'Inconel 718 sont : les organes de moteurs à réaction, pièces de pompes, moteurs de fusées et inverseur et faisceaux spatiaux. Ce dernier présente des difficultés lors de l'usinage à cause de ses caractéristiques distinguées telles que la haute ductilité, le taux d'érouissage élevé, le coefficient de frottement élevé et la faible conductivité thermique.

L'objectif de ce travail est l'étude de l'usinabilité de l'Inconel 718 par les quatre matériaux de coupe suivants : carbure non revêtu (H13A), carbure revêtu (GC1025), céramique mixte C650 et céramique composite CC670.

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique sur la coupe des métaux et sur un état d'art concernant l'usinage de l'Inconel 718 en s'appuyant sur les divers articles, revues et thèses. Dans ce chapitre nous avons présenté une introduction sur l'usinabilité et la coupe des métaux, suivie par les matériaux à outil et les différents phénomènes intervenant lors de la coupe. En dernier lieu nous avons cité quelques travaux de recherche sur l'usinage de l'Inconel 718.

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

Le troisième chapitre est consacré aux résultats obtenus lors des essais de la rugosité, des efforts de coupe et de la température de coupe en utilisant quatre matériaux à outil de coupe. Ceci dans le but de déterminer les capacités de coupe des matériaux de coupe testés. Le suivi d'évolution de la rugosité, les efforts de coupe et de la température a permis de cerner l'usinabilité de l'Inconel 718.

Le quatrième chapitre est réservé à l'étude de l'impact des conditions de coupe ( $V_c$ ,  $a_p$ , et  $f$ ) sur la rugosité et les efforts de coupe en utilisant la méthodologie de

surface de réponse pour deux matériaux coupe (la céramique mixte CC650 et la céramique composite CC670). Cette étude a conduit à la détermination de modèles mathématiques exprimant la relation entre les paramètres de sortie (efforts de coupe et rugosité) et les paramètres d'entrée ( $V_c$ ,  $a_p$  et  $f$ ). En dernier lieu, nous avons présenté une conclusion générale, suivi par une liste des références bibliographiques.

## ***CHAPITRE I***

*Etude bibliographique sur les  
phénomènes régissant le  
processus de coupe*

## I.1: Usinabilité des matériaux

### I.1.1: Introduction

La coupe des métaux a pour but d'étudier l'influence de différentes méthodes d'usinage (tournage, fraisage,...etc.) sur le comportement d'un même matériau, dans des conditions de coupe différentes (profondeur de passe, avance, ... etc.) en utilisant des outils de compositions et géométries différentes. L'usinabilité, en tant que propriété très complexe du matériau usiné, représente une fonction de plusieurs variables, sur laquelle il influe un grand nombre de paramètres. La figure I-1 nous montre une présentation générale de cette notion.

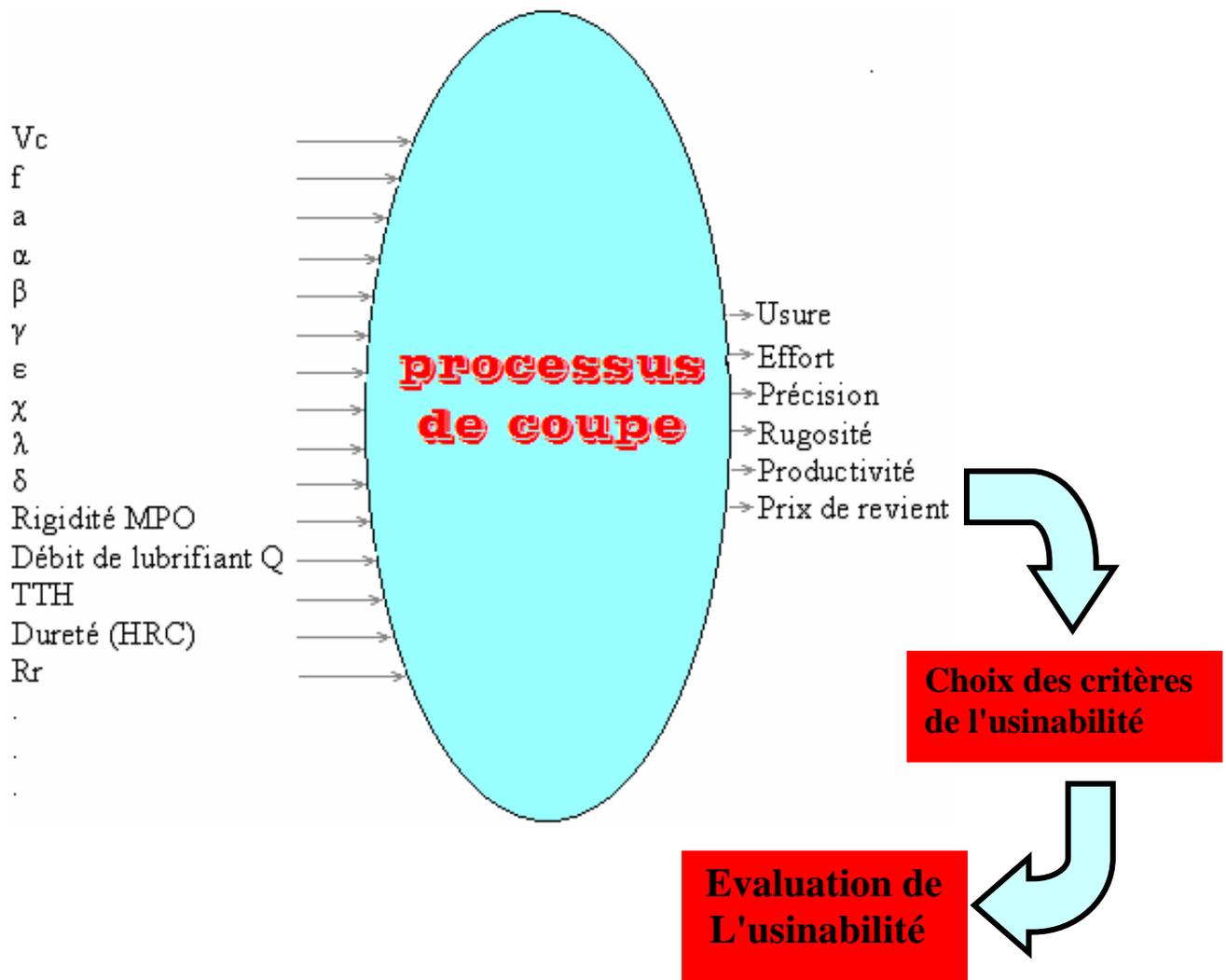


Fig. I-1: Processus de coupe et critères d'usinabilité

L'étude de l'usinabilité a pour but de comparer le comportement de différentes matières, celles-ci étant usinées selon une même méthode d'usinage (tournage, par exemple), dans des conditions de coupe toujours identiques à elles mêmes, à l'aide d'outils toujours identiques tant au point de vue de la composition chimique et du traitement thermique qu'au point de vue de leur forme et de leur affûtage [CZA 62]. Aussi, on peut définir l'usinabilité comme étant la propriété grâce à laquelle un matériau donné peut subir plus ou moins facilement une opération d'usinage déterminée. Il s'agit donc, en principe, d'une propriété inhérente à la matière envisagée.

Mais, de cette définition même, on peut comprendre immédiatement que le terme « usinabilité » est beaucoup trop général puisque les matériaux peuvent subir des opérations de mise en forme très variées, avec ou sans enlèvement de copeau. Il en résulte qu'un matériau peut avoir une bonne usinabilité pour certaines opérations de mise en forme et en même temps, une mauvaise usinabilité pour d'autres opérations. Il s'agit, de plus, d'une propriété particulièrement difficile à étudier, car elle relève de deux domaines scientifiques et techniques différents. D'une part, l'aspect métallurgique du problème qui comprend les conditions d'élaboration et les processus de fabrication dont l'effet combiné conduit aux propriétés particulières du métal à mettre en œuvre.

D'autre part, l'aspect mécanique du problème qui comprend les conditions de la mise en forme du métal en vue de l'application envisagée. De plus, même dans le cas des seules opérations procédant par enlèvement de copeau, le critère d'usinabilité n'est pas bien défini. C'est, selon le point de vue envisagé :

1. la tenue de l'outil permettant la production maximale.
2. les efforts de coupe donnant une indication sur la puissance nécessaire à la coupe.
3. le fini des surfaces usinées permettant de choisir les conditions de coupe en fonction de la destination finale de la pièce usinée [CZA 62].

Ceci montre bien la difficulté de définir et de mesurer l'usinabilité. Nous verrons, dans la suite, que les soins extrêmes apportés à la recherche (identification des

matières et réalisation des essais) expliquent que nous pouvons en tirer malgré tout des conclusions valables.

Depuis la publication en 1907 de l'ouvrage de F.W.Taylor, d'innombrables publications traitent ce problème d'usinabilité qui est très voisin à celui de la coupe des métaux.

Malheureusement, parmi celles-ci, trop nombreuses sont celles qui sont inutilisables pour faire progresser nos connaissances : soit dans le domaine de l'usinabilité, parce que traitant de la coupe des métaux, elles négligent l'aspect métallurgique, soit dans le domaine de la coupe des métaux, parce que, relatives à l'usinabilité, elles ne se préoccupent pas suffisamment des conditions de coupe. Avant d'entamer le vif du sujet, il est important d'indiquer brièvement le domaine auquel nous nous sommes intéressés. Le problème entier de l'usinabilité comporte l'étude de tous les métaux ferreux et non ferreux, pour toutes les opérations de mise en forme, avec ou sans enlèvement de copeau. C'est un problème extrêmement vaste. Ainsi, nous sommes limités à l'usinage par enlèvement de copeaux (en particulier le tournage) appliqué à un super alliage réfractaire (Inconel 718), pour les raisons suivantes :

1. l'usinage par enlèvement de copeaux semble intéresser un plus grand nombre de chercheurs et constructeurs mécaniciens.
2. les métaux (et particulièrement les super alliages réfractaires) sont les plus utilisés en construction mécanique et précisément en aéronautique.

Dans la suite de ce mémoire, nous passerons brièvement en revue les diverses méthodes qui permettent d'aborder le problème de l'usinabilité des métaux. Nous décrirons ensuite la méthode que nous avons utilisée au cours des essais, en insistant sur toutes les précautions qu'il importe de prendre pour obtenir des résultats valables.

### **I.1.2: Critères d'évaluation de l'usinabilité**

Avec les différences entre les diverses définitions de l'usinabilité, les critères d'évaluation, diffèrent aussi d'un chercheur à un autre. D'après [MAT 70], les principaux critères sont classés selon l'ordre suivant :

1. la rugosité de la surface usinée, définissant l'aptitude au fini de surface.
2. l'effort de coupe, définissant la résistance à la coupe.

3. la durée de vie de l'outil ou la vitesse de coupe permettant d'obtenir une durée d'outil donnée ou l'usure pour un temps donné.

Par contre d'autres chercheurs prennent l'usure comme l'effet le plus observable.

[ROB 73], les classe de la manière suivante :

1. l'usure de l'outil.
2. l'effort de coupe.
3. la température de coupe.

Aussi, d'après [ROB 73], les critères de l'usinabilité sont :

1. la durée de vie de l'outil.
2. les efforts de coupe.
3. le bon fini de surface.

Les américains aussi évaluent l'usinabilité d'un matériau en % [MAT 70], c'est le pourcentage USA % qui est défini comme étant la vitesse de coupe relative pour usiner un alliage dans des conditions de coupe déterminées.

$$\text{USA \%} = (V_C / 55) \cdot 100 \% \dots \dots \dots (1)$$

Tel que  $V_C$  représente la vitesse de coupe correspondant à l'usinage du matériau envisagé, dans la condition donnant une vitesse de coupe égale à 55 m/min pour l'acier étalon AISI B112.

Finalement pour résumer les critères d'évaluation de l'usinabilité, il faut imposer ceux qui sont en liaison directe avec l'objectif techno économique dans ce domaine, soit la tenue de l'outil, la facilité d'usinage et la précision des cotes. La majorité des chercheurs évaluent l'usinabilité par les critères ordonnés comme suit :

1. la tenue de l'outil ou des critères dépendant ( $VB, K_t, \dots$  etc.).
2. les efforts de coupe.
3. le bon fini de surface.

## **I.2: Matériaux de coupe**

Les principales matières utilisées pour les outils de tournage modernes sont les suivantes:

- carbures revêtus (GC).
- carbures non revêtus (C).
- cermets (CT).

- céramiques (CC).
- nitrures de bore cubiques (CB).
- diamants polycristallins (CD).

Les **carbures non revêtus (C)** sont obtenus par frittage (métallurgie des poudres) de substance dure (carbures de tungstène, de titane...) et de substance liante (cobalt...) qui confère sa ténacité à la plaquette. Ces carbures non revêtus sont aujourd'hui utilisés dans des opérations spéciales, hors du domaine standard.

Les **carbures revêtus** sont recouverts d'une couche de quelques micromètres de nitrure ou de carbure de titane, ou encore d'oxyde d'aluminium. Ces revêtements, en réduisant les frottements copeau/outil et pièce/outil, améliorent très nettement les possibilités des outils. Ils sont les plus utilisés dans un très grand nombre d'opérations de tournage, pour tous types d'usinage et pour une grande diversité de matières de pièces. C'est donc le choix à envisager en priorité pour la plupart des opérations d'usinage.

Les **cermets** sont des carbures à base de titane, liés au nickel et/ou au cobalt. Ils conviennent pour l'ébauche légère et la finition dans des conditions favorables, en ce qui concerne la pièce et la machine-outil. La finition est leur spécialité, avec pour caractéristique un état de surface de haute qualité.

Les **céramiques (CC)** constituent un éventail de nuances adaptées à une gamme étendue d'opérations. Cela va de la fonte et de l'acier à l'usinage hautement spécialisé de matières réfractaires et d'aciers trempés. Le besoin de rectification, par exemple, peut être éliminé lorsqu'on recourt aux plaquettes céramiques pour le tournage extrêmement productives quand elles sont utilisées à bon escient, elles exigent toutefois un contexte d'usinage précis en matière de stabilité, de conditions de coupe, d'arête de coupe et de type de coupe. Les plaquettes céramiques sont conçues pour un taux élevé d'enlèvement de matière dans les situations où la précision de cotes et la qualité du fini de surface doivent demeurer inchangées tout au long de la durée de vie de l'outil. Cependant, elles ne conviennent pas pour certaines matières.

Le **nitrure de bore cubique (CB)** est une matière très dure, adaptée au tournage d'aciers trempés, de fontes en coquille et d'alliages à base de nickel ou de cobalt. Les impératifs sont ici très rigoureux au niveau des conditions de coupe et de l'arête de

coupe. La productivité et la longévité sont nettement supérieures à celles des plaquettes en céramiques et carbures, lorsqu'elles sont utilisées correctement. Les plaquettes en nitrure de bore cubique sont destinées en premier lieu à la finition.

**Les diamants polycristallins** ont un domaine d'utilisation complètement différent, étant donné qu'ils sont totalement inappropriés pour les métaux contenant du carbone. Ils sont utilisés en finition et demi-finition pour les métaux non ferreux et les matières non métalliques. La figure I-2 donne l'affectation principale de ces matières suivant le type de matériau usiné. On peut aussi récapituler les domaines d'emploi des différents matériaux d'outils (en incluant l'acier rapide) [AIA 82].

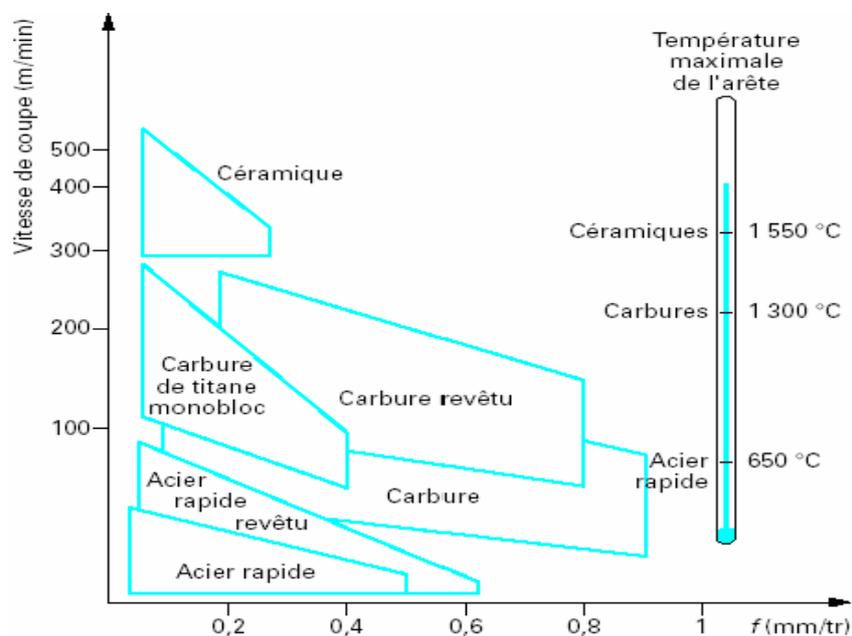


Fig.I-2: Domaine d'emploi des divers matériaux à outil coupant [AIA 82]

### I.3: Description des contacts copeau-outil et pièce-outil

#### I.3.1: Géométrie des outils

Quelle que soit la technique d'usinage employée, un outil comprend:

- **une ou plusieurs zones tranchantes** que l'on peut décrire comme des dièdres élémentaires (figure I-3) définis par des faces  $A\alpha$  et  $A\gamma$  et une arête d'intersection. La face  $A\alpha$  est appelée face de dépouille et la face  $A\gamma$  face de coupe. Le nombre de dièdres élémentaires dépend de la technologie de la machine-outil, si un outil de tournage a généralement la géométrie la plus simple (une seule zone tranchante active), un foret de perçage classique en

possède deux qui sont simultanément actives et un tourteau de fraisage peut avoir plusieurs dizaines de dents, dont plusieurs sont en prise en même temps. La géométrie des zones tranchantes est souvent plus complexe que celle d'un dièdre simple : les techniques de frittage des matériaux des outils modernes permettent d'obtenir des faces de coupe ayant des courbures complexes étudiées pour contrôler la géométrie des copeaux. Les performances des machines d'affûtage permettent de réaliser des faces  $A\alpha$  et  $A\gamma$  non planes ainsi que des arêtes non rectilignes. Notons, enfin, qu'en règle générale l'outil est en contact avec la pièce sur la face de dépouille principale  $A\alpha$ , sur la face de dépouille secondaire et sur la partie  $A\alpha'$  et sur la partie arrondie intermédiaire appelée bec [LOR 82].

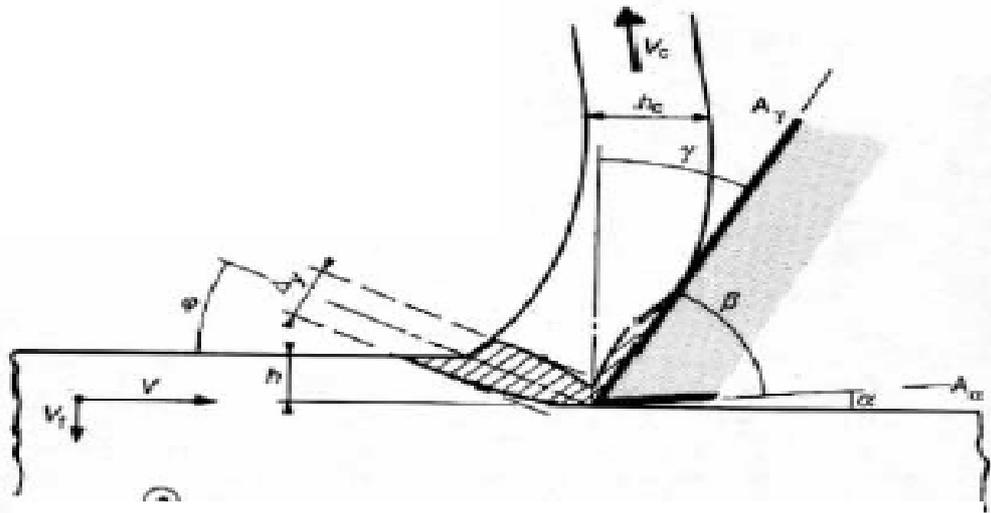


Fig.I-3: Description des contacts copeau-outil et pièce-outil [LOR 82]

- **Des zones de guidage du copeau** soit pour faciliter son évacuation, soit pour le stocker provisoirement. Ainsi, les goujures hélicoïdales d'un foret sont des chemins de passage obligés pour le copeau tant que l'outil n'est pas sorti hors du trou en cours de perçage, les espaces inter dents d'une broche sont des logements conçus pour contenir le copeau, etc.
- **Des zones assurant la résistance mécanique de l'outil.** Si l'on ne considère que le dièdre élémentaire de chaque zone tranchante, la fonction de coupe est assurée essentiellement par l'arête, la surface de la face de coupe et une très faible partie de la face de dépouille en contact avec la pièce. L'angle  $\alpha$  est toujours choisi le plus faible possible (quelques degrés) ; son choix dépend du

matériau usiné. L'angle  $\beta$  entre les faces  $A\alpha$  et  $A\gamma$  est déterminé par des critères de résistance. Il est très souvent voisin de  $90^\circ$ . On appelle  $\gamma$  angle de coupe tel que :  $\gamma = 90^\circ - \alpha - \beta$ .

Si  $\gamma$  est positif, on parle de *coupe positive* ; dans le cas contraire, l'outil a une coupe négative. Un angle de coupe positif assure l'action tranchante la plus efficace. Il est généralement compris entre  $0$  et  $10^\circ$  pour les matériaux ferreux. On peut travailler avec un angle  $\gamma$  allant jusqu'à  $20^\circ$  si le matériau usiné est mou, collant (aluminium par exemple) et si le matériau usinant résiste bien aux chocs. Le principal avantage d'une géométrie d'outil avec angle de coupe négatif est la robustesse de l'arête. Au-delà des zones tranchantes, certains paramètres de la géométrie de l'outil sont choisis de telle manière que ce dernier ait une grande rigidité.

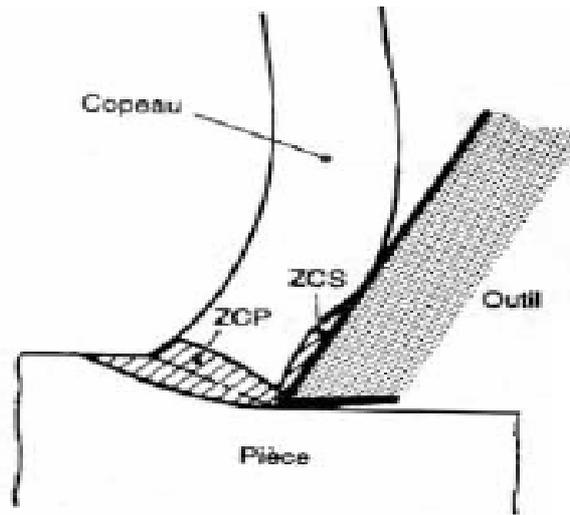
Pour pénétrer dans la matière, l'outil est soumis soit à un effort extérieur s'il travaille par translation (plaquette de tournage, broche, etc.), soit à un couple extérieur et à un effort de pénétration axial s'il est en rotation autour d'un axe  $Z$  et en translation suivant  $Z$  (foret de perçage, alésoir, etc.), soit à un couple et à un effort extérieur si sa cinématique est plus complexe (fraise, etc.). Le travail fourni sert :

1. à créer le copeau : on observera que le travail fourni est utilisé pour déformer le matériau usiné et pour vaincre les frottements à haute température au voisinage de l'arête de coupe. À géométrie constante de l'outil, ce travail dépend beaucoup des matériaux usinés et usinants. Il est peu modifié par le lubrifiant de coupe utilisé. Là où se crée le copeau, le confinement est tel que le frottement est sec, même si un arrosage important de la zone de coupe est réalisé.
2. à faire cheminer le copeau. Une part du travail fourni, plus ou moins importante selon la géométrie de l'usinage et le matériau usiné, est utilisée pour vaincre les frottements à basse température hors de la zone de coupe, ce travail dépend en partie du choix du fluide de coupe et de son débit. Pour une opération telle que le perçage vertical, l'emploi de forets avec circulation interne d'huile de coupe permet d'utiliser le fluide pour pousser le copeau et lubrifier les contacts [LOR 82].

### **I.3.2 : Description de la racine du copeau**

On considérera seulement dans la suite de ce paragraphe, ce qui se passe au voisinage d'un seul tranchant de l'outil. Ce dernier est soumis à un effort et animé

d'un mouvement relatif par rapport au matériau usiné. Il enlève un copeau en créant deux surfaces vierges : la face interne du copeau et la surface usinée. La formation du copeau s'effectue par un cisaillement du métal dans une zone en amont de l'arête de l'outil, située de part et d'autre d'un plan faisant un angle avec la surface usinée. On trouvera une description de la géométrie de cette zone appelée **zone de cisaillement primaire ZCP** (Fig I-4).



**Fig.I-4: Description des contacts copeau-outil et pièce-outil [LOR 82].**

Le mouvement relatif de l'outil par rapport à la pièce peut être décomposé en un mouvement primaire sans avance (le copeau serait arraché à la pièce pendant seulement une révolution) et un mouvement d'avance, qui permet de maintenir l'outil engagé dans la pièce. La vitesse de coupe  $V_c$  est la vitesse d'un point de la matière usinée qui arrive sur l'arête de l'outil dans la direction du mouvement primaire. Soit  $h$  l'épaisseur du copeau non déformé. L'avance par tour  $f$  est le déplacement relatif de la pièce par rapport à l'outil pour une rotation d'un tour de la pièce ou de l'outil. L'épaisseur  $h$  peut être reliée à  $f$  par une relation trigonométrique simple, comme on peut le voir sur la (Figure I-5) qui illustre le cas d'une opération de tournage. L'épaisseur du copeau déformé est  $hc$ . Plusieurs remarques doivent être faites pour situer la spécificité de l'usinage en tant que technique de mise en forme [LOR 82].

### **I.3.3: Amplitude des déformations**

Dans une représentation simplifiée : le cisaillement  $\Gamma$  est égal à :

$$\Gamma = \cos \gamma / \sin \phi \cdot \cos (\phi - \gamma) \dots \dots \dots (2)$$

Lorsque l'on utilise un outil tel que  $\gamma$  soit égal à  $+ 10^\circ$  et si, par hypothèse, le matériau usiné se cisaille sous un angle de  $25^\circ$ , on atteint dans la ZCP un cisaillement de 2.4 mm d'amplitude de déformation nettement supérieure à celles imposées au cours des principales opérations de mise en forme sans copeaux. La vitesse du copeau  $V_c$  se déduit directement de la vitesse de coupe  $V$  et du rapport entre les épaisseurs de copeau non déformé et déformé (Figure I-5) [LOR 82].

$$V_c = V h / hc \dots \dots \dots (3)$$

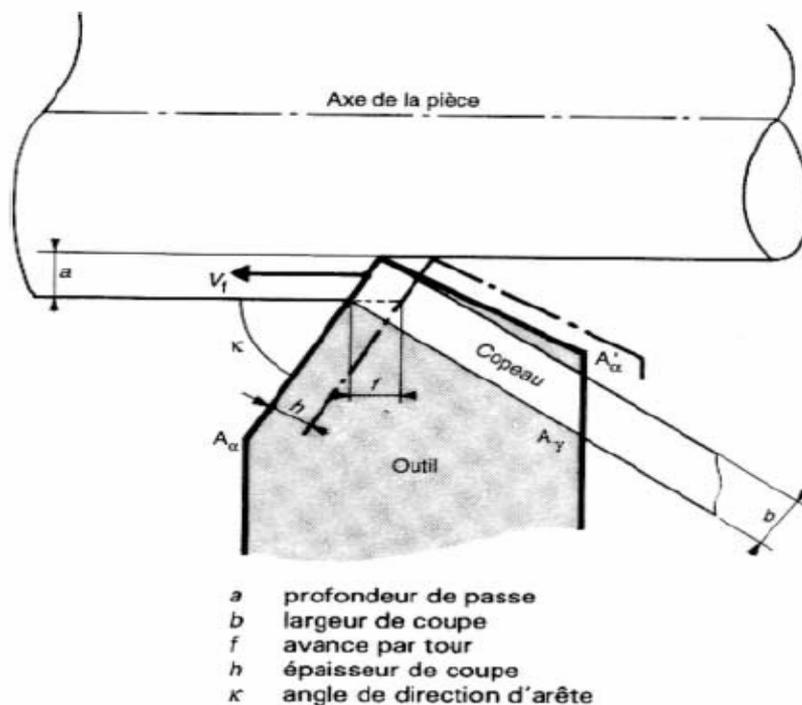


Fig.I-5: Description de la racine du copeau [LOR 82]

#### I.4: Températures de coupe

Le travail fourni pour créer un copeau est presque intégralement transformé en chaleur. Celle-ci est évacuée :

1. par le copeau.
2. par la pièce, ce qui a des conséquences éventuelles sur la stabilité dimensionnelle, la précision des cotes, l'intégrité structurale du matériau usiné.
3. par l'outil et le porte-outil, ce qui peut modifier la précision des cotes, les cinétiques des endommagements.

Il est difficile de déterminer avec précision la carte des températures à la racine d'un copeau. On mesure facilement les températures d'une pièce et de la face externe d'un copeau. Il est plus difficile de mesurer les températures à l'interface copeau-outil. Malgré ce handicap, les modélisations thermomécaniques de l'écoulement de la matière usinée sur un outil ont fait suffisamment de progrès pour permettre le tracé de réseaux vraisemblables d'isothermes (figure I-6), obtenue en utilisant le code *Sysweld*, correspond au cas de l'usinage à 100 m/min d'un acier mi-dur avec outil en carbure de tungstène. On observe que le cisaillement primaire est globalement responsable d'une température de 350°C à la racine du copeau. Le cisaillement secondaire provoque sur la face interne du copeau un échauffement jusqu'à 1100 °C. L'outil est soumis à un fort gradient de température. La surface superficielle de la pièce, quant à elle, atteint 200°C pendant un court instant [FRA 82].

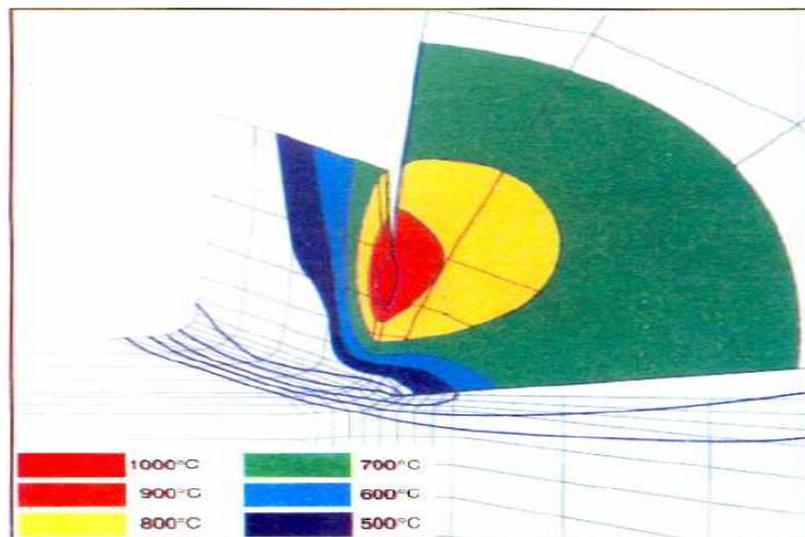


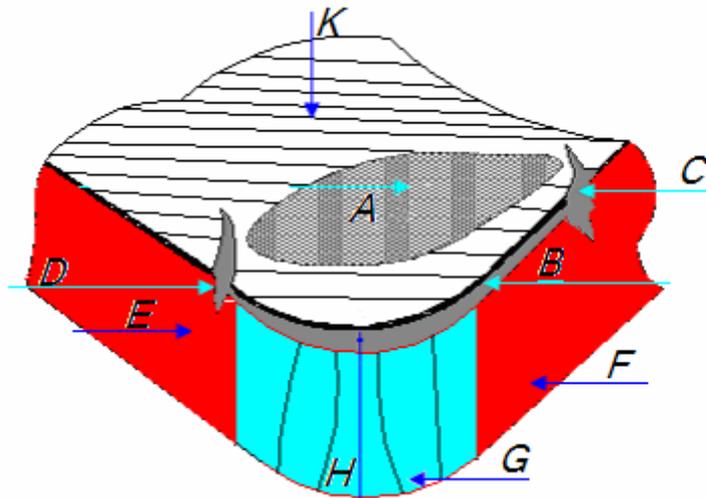
Fig.I-6: Zones de distribution des températures de coupe [FRA 82]

### I.5: Usure des outils de coupe

Dans la concurrence du marché, la production industrielle doit perfectionner les méthodes d'usinage en travaillant soit avec une production maximale ou avec un coût minimal. Il arrive parfois que ce dernier passe au second plan et que seule la production maximale importe. On choisira alors une vitesse de coupe supérieure. Plus celle-ci croît ; plus les sollicitations mécaniques et thermiques sur l'arête de coupe augmentent. Par conséquent, les frottements et les pressions élevées qui s'exercent à l'interface copeau / outil, provoquent une usure intense de l'outil [YAL 05].

### I.5.1: Formes d'usure

Les formes d'usure des outils de coupe dépendent des paramètres essentiels déjà évoqués (couple outil - matière, conditions d'usinage), on répertorie également quatre zones principales d'usure, d'une façon générale l'outil est soumis aux 6 modes d'usures définis ci-après (Fig.I-7).



- A: usure en cratère.
- B: usure en dépouille.
- C: usure en entaille.
- D: usure en entaille dans le rayon.
- E: dépouille secondaire.
- F: dépouille principale.
- G: nez de l'outil.
- H: arête de coupe chanfreinée.
- K: surface d'attaque.

Fig.I-7: Différentes formes d'usure.

- **Usure en cratère**

Elle se caractérise par la formation d'une cuvette sur la face de coupe de l'outil par frottement du copeau (Fig.I-8). Les dimensions, la profondeur  $K_t$  et la position d'un cratère évoluent et influent en particulier sur le rayon d'enroulement du copeau; le flan arrière du cratère pouvant jouer le rôle d'un brise copeau naturel. Cette forme d'usure est due aux températures élevées au niveau de contact outil - copeau provoquant une réaction chimique ou une diffusion importante. Elle représente également une caractéristique essentielle des outils carbure et aciers rapides, la forme du cratère est définie par sa profondeur maximale  $K_t$ , le rapport de cratérisation.  $\gamma = K_t / K_m$ .

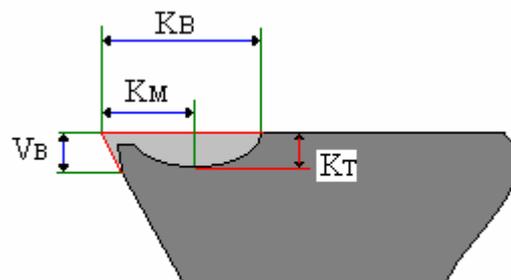


Fig.I-8: Usure en cratère

- **Usure en dépouille**

Elle résulte du frottement de la pièce contre la face en dépouille de l'outil et se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête. La face en dépouille étant la dernière surface de l'outil en contact avec la surface usinée, l'usure en dépouille détermine l'état de surface de la pièce usinée et sa précision dimensionnelle.

- **Usure en entaille**

C'est une forme d'usure de la face en dépouille qui se produit sur l'arête tranchante à la hauteur du diamètre périphérique de la pièce (donc à la limite de la largeur de coupe). Elle résulte des forts taux d'écaillage de la pièce dans cette zone. Au niveau de cette entaille, les conditions de coupe devenant mauvaises provoquent une auto - accélération du phénomène. Ceci entraîne un affaiblissement considérable du nez de l'outil qui est alors susceptible de s'effondrer sous l'effet des pressions locales exercées.

- **Usure par déformation plastique**

La pointe de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des températures élevées et des hautes pressions régnant dans la zone de coupe. Cette déformation se traduit par un affaiblissement plastique de la pointe de l'outil, une déformation permanente et un refoulement sur les faces de dépouille.

- **Usure par écaillage et fissuration d'arête**

Dans le cas d'usinage avec des efforts cycliques ou des chocs thermiques provoqués par une coupe discontinue ou par des vibrations, on observe l'apparition de fissures ou d'ébréchures sur l'arête ou sur la face de coupe; celles-ci diminuent considérablement la durée de vie de l'outil.

- **Usure par rupture brutale de la pointe de l'outil**

Ce type de défaillance d'outil est rencontré dans le cas d'usinage de matériaux très durs et hétérogènes avec outil en matériau fragile; les outils céramiques y sont très sensibles lors de conditions de coupe mal définies dans des matériaux comportant des inclusions.

## **I.5.2: Mécanismes d'usure**

Les différentes formes d'usure mentionnées précédemment, font intervenir à des degrés plus ou moins importants, les mécanismes d'usure qui sont :

- **Usure par adhésion:** Les surfaces de l'outil et du copeau ont une micro géométrie comportant des aspérités, l'aire réelle de contact est une faible partie de l'aire apparente, compte tenu des efforts de coupe mis en jeu, des jonctions métalliques, véritables micro soudures, se forment, et sont rompues en continu par suite du mouvement relatif du copeau et de l'outil.
  1. si les jonctions sont plus résistantes que le métal voisin du copeau, les ruptures se produisent dans la masse du copeau, et des fragments de celui-ci viennent adhérer sur l'outil; ils constituent des transferts métalliques sur l'outil qui forment dans certains cas une arête rapportée.
  2. si les jonctions sont moins résistantes que les matériaux de l'outil et du copeau, les ruptures s'effectuent là où le contact se crée; l'usure de l'outil est négligeable.
  3. si les jonctions sont à la fois plus résistantes que le métal voisin du copeau et que la surface du matériau de l'outil, les ruptures se produisent en majorité dans la masse du copeau et pour quelques unes à la surface de l'outil. Cette dernière éventualité est d'autant plus fréquente qu'il y a altération chimique de la surface de l'outil.

Ce mécanisme d'usure dépend principalement des pressions de contact et des caractéristiques du matériau usiné, mais aussi de la vitesse de coupe, un accroissement de vitesse provoque une moindre résistance à l'écrasement des aspérités du copeau, mais aussi une moindre résistance au cisaillement des jonctions établies par effet thermique, on observe que l'usure par adhésion croît avec la vitesse de coupe, passe par un maximum, puis décroît.

- **Usure par abrasion:** L'usure abrasive résulte d'arrachements en surface de l'outil causés par des particules souvent anguleuses et de grande dureté, contenues dans le matériau usiné (précipités ou inclusions). Ces particules sont toujours renouvelées au cours de l'usinage, les produits d'abrasion sont évacués en continu avec les copeaux. La vitesse d'usure abrasive croît avec la quantité de particules abrasives qui entre en contact avec l'outil par unité de temps, elle dépend donc de la composition chimique et du procédé d'élaboration du matériau usiné, et croît avec la vitesse de coupe.

- **Usure par diffusion:** Aux grandes vitesses de coupe, le gradient de température à l'interface outil – copeau est particulièrement important. La vitesse de diffusion éventuelle d'un élément d'alliage de l'outil dans le copeau est très grande en raison des températures atteintes, surtout si cet élément est absent du matériau usiné. Comme il y a renouvellement continu du copeau, la demande en élément diffusant reste constante au cours de l'opération. On peut également assister à la diffusion inverse des constituants de la matière usinée dans l'outil, autre l'enlèvement de la matière sur l'outil, les réactions provoquées par la diffusion affaiblissent la résistance mécanique de l'outil en surface. L'usure par diffusion croît avec la vitesse de coupe.
- **Ecaillage:** L'écaillage des faces de l'outil peut résulter d'un des trois modes de rupture cités ci – après :
- **Rupture ductile:** Un tel phénomène apparaît généralement dans les premiers instants de la coupe et il est dû à un excès d'efforts de coupe.
- **Rupture par fatigue mécanique:** Sous l'effet d'une variation des sollicitations (coupe interrompue ou existence d'hétérogénéité dans le matériau usiné), des fissures peuvent apparaître sur les diverses faces de l'outil ; ces fissures sont généralement parallèles aux arêtes de coupe.
- **Rupture par fatigue thermique:** Les chocs thermiques supportés par les outils sont très sévères. Pendant que l'outil s'échauffe, sa surface est mise en compression. À la suite d'un refroidissement non contrôlé dû à un arrosage non rigoureuse, la température des outils décroît très vite en surface et plus lentement dans le cœur. De ce fait la surface de l'outil est mise en traction provoquant une rupture.

### I.5.3: Critères d'usure

#### I.5.3.1: Critère principal

- Largeur de la bande d'usure frontale  $V_B=0.3$  mm, si elle est uniforme dans la zone.
- Sinon, la largeur maximale de cette bande est  $V_B=0.6$  mm.

#### I.5.3.2: Critère complémentaire

- Profondeur maximale du cratère,  $K_t = 0.06 + 0.3f$ .

Ces valeurs limites de VB correspondent sensiblement à celles relevées à la frontière (Fig I-7 et I-8) on minimise ainsi le risque de rupture accidentelle de l'outil pendant la production.

## **I.6: lois d'usure des outils de coupe**

### **I.6.1: Définitions**

La loi d'usure définit la variation de la durée effective de coupe T des outils en fonction des conditions géométriques (pour le copeau et l'outil) et cinématiques de l'usinage. La durée effective de vie T est définie comme étant le temps d'usinage qui conduit à l'usure limite définie par les critères précédents. De nombreux modèles mathématiques ont été proposés pour représenter la loi d'usure des outils de coupe, parmi les quels on cite :

### **I.6.2: Modèle de TAYLOR**

C'est le modèle établi par TAYLOR en 1906 qui est caractérisé par la formule généralisée suivante.

$$T = K \cdot a_p^1 \cdot f^m \cdot V_c^n \dots\dots\dots(6)$$

Pour une géométrie de coupe donnée ou (f, ap sont des constantes) il vient alors :

$$T = C_v \cdot V_c^n \dots\dots\dots(7)$$

Et

$$C_v = k \cdot a_p^1 \cdot f^m = \text{constante} \dots\dots\dots(8)$$

Ou encore :

$$V_c \cdot T^{(-1/n)} = C_T \dots\dots\dots(9)$$

$C_T$  : représente également la constante de TAYLOR, autrement dit, la valeur de la vitesse de coupe qui correspond à  $T=1$  min.

**NB** : le modèle de TAYLOR peut s'écarter rapidement de la réalité en dehors de son domaine de validité.

### **I.6.3: Modèle de Gilbert**

En 1950 ce modèle est la généralisation du modèle de Taylor, pour lequel la constante  $C_v$  est remplacée par une équation qui tient compte de la géométrie du copeau comme ce qui est montré au dessus.

$$C_v = k \cdot a_p^1 \cdot f^m \dots\dots\dots(10)$$

donc :

$$T = k \cdot a_p^l \cdot f^m \cdot V_c^n \dots\dots\dots(11)$$

En prenant le logarithme des deux membres de l'équation précédente on trouve :  
 $\text{Log}(T) = \text{Log}(K) + l \cdot \text{Log}(a_p) + m \cdot \text{Log}(f) + n \cdot \text{Log}(V_c)$ . Un simple changement de variables nous donne l'équation suivante :

$$\alpha = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 \dots\dots\dots(12)$$

La résolution du modèle est :

$$\alpha = b_1 \cdot x_1 + b_0 \dots\dots\dots \text{si } V_c \text{ et } f \text{ sont des constantes}$$

$$\alpha = b_2 \cdot x_2 + b_0 \dots\dots\dots \text{si } V_c \text{ et } a_p \text{ sont des constantes}$$

$$\alpha = b_3 \cdot x_3 + b_0 \dots\dots\dots \text{si } a_p \text{ et } f \text{ sont des constantes}$$

#### **I.6.4: Modèle de Koning – DEPIEREUX**

Ce modèle ne fait intervenir que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe étant supposées constantes.

$$T = \exp. (-\alpha \cdot V^\gamma + \beta) \quad \text{avec : } \beta = -(\gamma \cdot S^u + \delta \cdot t^\gamma) ; (\beta = \text{constante}) \dots\dots\dots(13)$$

Alors :  $\log(T) = -\alpha \cdot V^\gamma + \beta$

Soit :  $x = V^\gamma$  et  $y = \log(T)$

On obtient :

$$y = -\alpha \cdot x + \beta \dots\dots\dots(14)$$

Où  $\alpha$  et  $\beta$  sont les coefficients qui caractérisent le modèle.

#### **I.6.5: Modèle de Colding**

Ce modèle se présente sous la forme suivante :

$$K + a \cdot x + c \cdot y - z = 0 \dots\dots\dots(15)$$

Ce modèle peut être présenté sous la forme d'un polynôme du premier degré en x, y et z, ce dernier se résout comme le modèle de Gilbert, par contre le polynôme de deuxième degré en x, y et z, se résout de la façon suivante :

$$K + a \cdot x + b \cdot x^2 + c \cdot y + d \cdot y^2 - z + e \cdot z^2 + f \cdot x \cdot y + g \cdot y \cdot z + h \cdot x \cdot z = 0 \dots\dots\dots(16)$$

Cette équation comporte un grand nombre de coefficients dont la détermination ne peut se faire que par des méthodes numériques programmées.

#### **I.6.6: Modèle de Cronenberg**

Ce modèle ne prend jamais en compte l'influence de l'avance et de la profondeur de passe, tout comme la loi de Taylor, il est caractérisé par l'équation :

$$T + K = C.V^n \dots\dots\dots(17)$$

Ou : K, est une constante

**N.B :** la constante C et le coefficient n dans ce modèle ne sont pas égaux à ceux dans le modèle de Taylor.

A partir de l'équation précédente on a :

$$\text{Log}(T + K) = \text{log}(C) + n.\text{log}(V) \Rightarrow \text{Log}(T + K) - n.\text{log}(V) = \text{log}(C)$$

Si on fait un simple changement de variables :

$$X = \text{log}(V), y = \text{Log}(T + K)$$

Alors :

$$y - n.x = \text{log}(C) \dots\dots\dots (18)$$

Le calcul des coefficients n et C se fait comme dans le cas du modèle de Taylor.

### **I.7: Fluides de coupe (Rôle en usinage et classification)**

Les études de Taylor, vers 1883 sur l'organisation du travail et la coupe des métaux font les premières état de l'utilisation de l'eau de savon pour l'arrosage des pièces en cours d'usinage. Les vitesses de coupe augmentaient, de ce fait, de 30 à 40 % et l'on pouvait espacer l'affûtage des outils.

L'eau de savon remplissait bien les deux fonctions essentielles exigées d'un liquide de coupe aujourd'hui :

1. **refroidissement** de l'outil et de la pièce grâce à la capacité thermique massique élevée de l'eau;
2. **lubrification** de la coupe, grâce à la teneur en corps gras du savon. En outre, l'eau de savon était plus « mouillante » que l'eau pure, mais elle ne permettait pas d'éviter la corrosion et tachait les pièces et les machines. L'eau de savon fut remplacée par des huiles végétales ou animales, puis par des émulsions d'huiles minérales et enfin, par des mélanges d'huiles minérales et de matières grasses dans lesquelles on ajouta des additifs pour leur conférer des qualités supplémentaires. La technique de distribution des huiles de coupe se modifia. Un bac central dans chaque atelier permit de distribuer le liquide aux diverses machines.

### I.7.1: Influence de la température

La température a une influence sur la dureté des matériaux utilisés pour la fabrication des outils de coupe, ce qui peut avoir une grande importance lors de l'usinage (Fig I-9) [BRO 82].

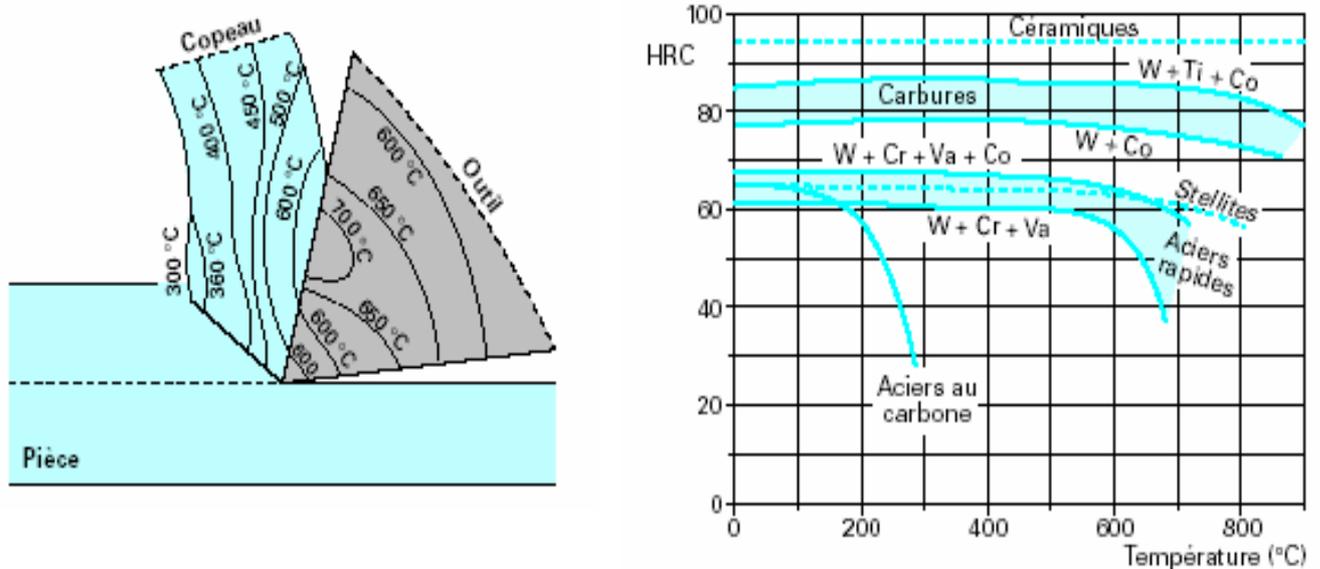


Fig.I-9: Distributions et influences de la température sur l'outil de coupe [BRO 82]

### I.7.2: Rôle des fluides de coupe

Les trois fonctions principales d'un fluide de coupe sont :

1. de réduire le coefficient de frottement pièce/outil.
2. d'éviter la formation de l'arête rapportée.
3. d'évacuer la chaleur dégagée.

D'autres fonctions auxiliaires sont à rattacher aux trois premières [BRO 82].

- le pouvoir anticorrosif pour les machines et les pièces pendant le stockage.
- l'évacuation des copeaux et la réduction du coefficient de frottement.

### I.8: Rugosité des surfaces usinées

La surface de la pièce usinée n'est pas parfaite, car elle présente des irrégularités de forme (Macro-géométriques) et des irrégularités de surface (Micro-géométriques), le tout dépend généralement :

1. des procédés de fabrication.
2. de la matière utilisée comme outil de coupe.
3. des vibrations résultantes lors du travail.

4. des propriétés de la matière usinée.

Ces deux types d'irrégularités influent directement sur la destination de la pièce usinée. Il s'agit également de l'étanchéité, glissement, résistance à la corrosion et la résistance à la fatigue...etc. Aussi, plus le bureau d'étude exige un bon état de surface « en fonction de la destination de la pièce », la réalisation sera alors difficile et le coût augmente.

### I.8.1: Les principaux défauts des surfaces

En général les défauts de surface jouent un rôle important dans l'aptitude d'une pièce à remplir une fonction donnée. Ces défauts sont de nature géométrique ou physico- chimique, nous ne nous intéressons ici qu'aux défauts géométriques, qui sont classés conventionnellement sous quatre numéros d'ordre (Fig I-10).

1. défauts du premier ordre : écarts de forme.
2. défauts du deuxième ordre : ondulations.
3. défauts du troisième ordre : sillons.
4. défauts du quatrième ordre : arrachements.

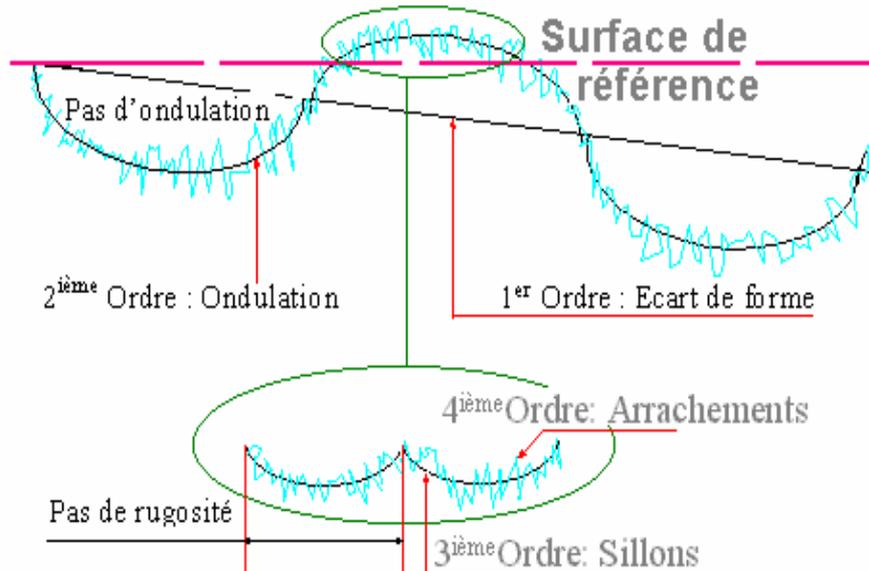


Fig.I-10: Les différents défauts géométriques de la surface usinée

### I.8.2: Les principaux critères de rugosité

Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage. Soit OX la ligne moyenne qui divise le profilographe en deux parties. Les

principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne (Fig.I-11):

1. **la rugosité moyenne arithmétique  $R_a$**  : elle représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à OX.
2. **la rugosité moyenne quadratique RMS** : ce critère représente l'écart moyen quadratique par rapport à OX.
3. **la rugosité totale  $R_{max}$**  : elle représente la hauteur maximale des irrégularités du profil de la rugosité.
4. **rugosité totale  $R_t$**  : elle représente l'écart totale entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil, relevé sur toute la longueur ( $L$ ).
5. **Rugosité  $R_z$**  : elle représente la rugosité totale moyenne.
6. **Hauteur de saillie de rugosité  $R_p$**  : elle représente la moyenne des  $R_{pj}$ , ce critère permet de différencier des profils qui ne sont pas différenciés par les critères  $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_{max}$ , le tout en ( $\mu\text{m}$ ).

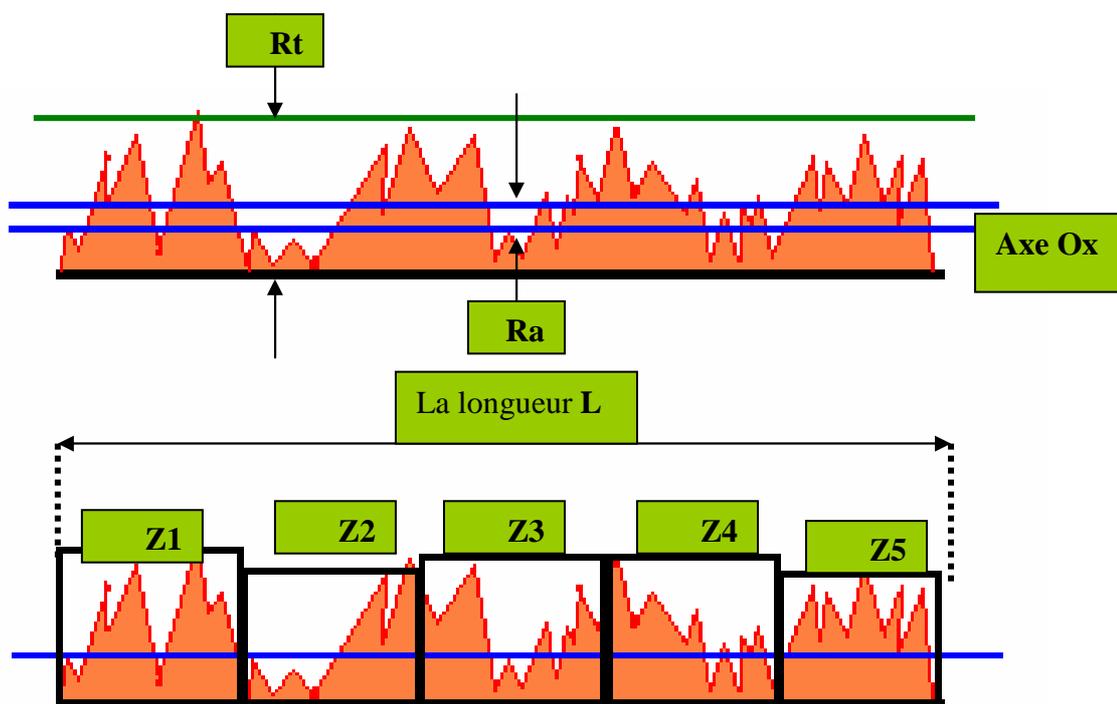


Fig.I-11: Les différents critères de la rugosité.

## **I.9: Les super alliages réfractaires (Inconel)**

### **I.9.1: Définition**

Cette partie concerne les alliages à base de nickel, les alliages à base fer-nickel et à base cobalt résistant à des sollicitations sévères. Mis à part le cas du nickel peu allié et des alliages nickel-cuivre, on emploie en général pour ces alliages le terme de superalliages. Les deux types de sollicitations suivantes sont à considérer.

- 1. La corrosion humide.** On parle alors, d'une part du nickel et des alliages nickel, et d'autre part du prolongement de la famille des aciers inoxydables vers des nuances plus riches en nickel, et donc moins riches en fer, mais aussi plus riches en d'autres éléments comme le molybdène, qui augmentent la résistance à la corrosion de ces alliages. Un premier exemple de nuance peut représenter cette famille d'alliages telle que la nuance 625, dont la composition nominale est la suivante : **Ni :62% – Cr :21% – Fe :5% – Mo :9% – Nb + Ta :3%**.
- 2. L'action conjuguée d'une haute température (plus de 550°C),** et de contraintes mécaniques suffisamment élevées pour poser des problèmes de résistance au fluage. Ces conditions d'emploi, dans l'air ou dans d'autres atmosphères comme, par exemple, les gaz de combustion des hydrocarbures, s'accompagnent en général d'une agression chimique de la surface des produits, c'est-à-dire de corrosion sèche dont l'oxydation est l'exemple le plus fréquent. Dans le cas de produits résistant à ce dernier type de sollicitation, on emploie indifféremment les termes de superalliages ou d'alliages super réfractaires. Il s'agit le plus souvent d'alliages à base de nickel-chrome mais aussi à base fer-nickel-chrome et plus rarement, à base cobalt-chrome. Les nuances à base fer-nickel-chrome constituent un prolongement de la famille des aciers réfractaires. Par ailleurs, en plus de la résistance aux sollicitations que nous venons d'envisager, on demande à certains produits des caractéristiques physiques particulières comme l'amagnétisme. Mais c'est surtout les deux grands groupes de sollicitations que nous venons de mentionner, qui caractérisent l'emploi des superalliages. Comme on le verra plus loin, les méthodes d'élaboration et de transformation des superalliages sont non seulement variées mais dépendent aussi de leur domaine d'application. Il est donc nécessaire de les classer en

tenant compte d'une part de leur composition et d'autre part de leur méthode de fabrication [PAU 02].

## **I.9.2: La famille d'Inconel**

### **I.9.2.1: Inconel - alliage 600 (72% Nickel – 15% Chrome)**

Pour les températures aussi élevées que 2150°F. L'Inconel 600 possède une très bonne résistance à hautes températures et garde une résistance utilisable même à 2150°F. L'Inconel 600 résiste très bien à l'oxydation jusqu'à 2150°F. Grâce à son contenu élevé en nickel, cet alliage a une bonne résistance en milieu de réduction, cémentation ou nitruration. L'Inconel est un alliage stable, pour ces raisons, l'Inconel 600 connaît une longue durée dans les applications de fours et traitements thermiques. La pellicule mince adhérent fermement à l'Inconel 600 lui donne sa protection contre l'oxydation, et peut résister à un choc thermique sans s'effriter. Ceci, de même qu'un faible coefficient de dilatation thermique permet à l'alliage de subir un refroidissement subit sans qu'il se fendille ni s'effrite. La facilité de fabrication de cet alliage corroyé permet la conception de pièces fonctionnelles et efficaces. L'Inconel 600 peut être façonné chaud ou froid, est usinable à l'échelle commerciale et se prête bien aux méthodes de soudage en usage courant [NID 01].

### **I.9.2.2: Inconel - alliage 601 (60% Nickel – 23% Chrome – 14% Fer)**

Cet alliage est une modification de l'Inconel 600, il est conçu afin de permettre une meilleure performance dans les applications à températures élevées. Le coût est environ 10% de moins et le poids de l'Inconel 601 est de 4% plus léger que l'Inconel 600. Généralement, l'Inconel 601 peut remplacer avantageusement l'Inconel 600 dans les applications de résistance à la chaleur. La substitution dans des environnements corrosifs devrait être considérée [NID 01].

### **I.9.2.3: Inconel - alliage 625 (61% Nickel – 22% Chrome – 9% Moly)**

L'Inconel 625 possède une grande solidité et une excellente résistance à la corrosion et l'oxydation. Il est résistant à une grande variété d'agents corrosifs dont l'acide phosphorique, acides organiques, eau de mer et environnements de contrôle de la pollution. L'Inconel 625 résiste au fendillement causé par la corrosion sous tension et à l'attaque intergranulaire. Les applications typiques de cet alliage sont: équipement

marin, renversement des hélices (avions), conduits de transition (turbine à gaz), échangeurs thermiques, garnitures et agitateurs.

L'Inconel 625 est fabriqué selon les procédés industriels courants et possède d'excellentes qualités de soudabilité ne demandant aucun traitement thermique après soudure pour l'entretien de sa résistance à la corrosion [NID 01].

#### I.9.2.4: Inconel - alliage 718

L'Inconel 718 est un alliage qui doit être durci par vieillissement. Il est très résistant et convenable pour usages à des températures variant de  $-423^{\circ}$  à  $1300^{\circ}\text{F}$ . La résistance à la fatigue de l'alliage 718 est élevée. En plus, l'Inconel 718 possède des propriétés excellentes contre la rupture sous tension jusqu'à  $1300^{\circ}\text{F}$ , de même qu'une résistance à l'oxydation jusqu'à  $1800^{\circ}\text{F}$ . Cet alliage offre une bonne résistance à la corrosion dans une grande variété d'environnements.

La meilleure caractéristique de l'alliage 718 est sa réaction lente au durcissement par vieillissement. La réaction lente permet au matériau d'être soudé et recuit sans durcir spontanément à moins d'être refroidi lentement. L'Inconel 718 peut également être réparé par soudure même après durcissement par vieillissement. Les applications typiques sont: moteurs à réaction; pièces de pompe et pompes; moteurs de fusée et inverseur de poussée; vaisseaux spatiaux (Fig I.12) [NID 01].

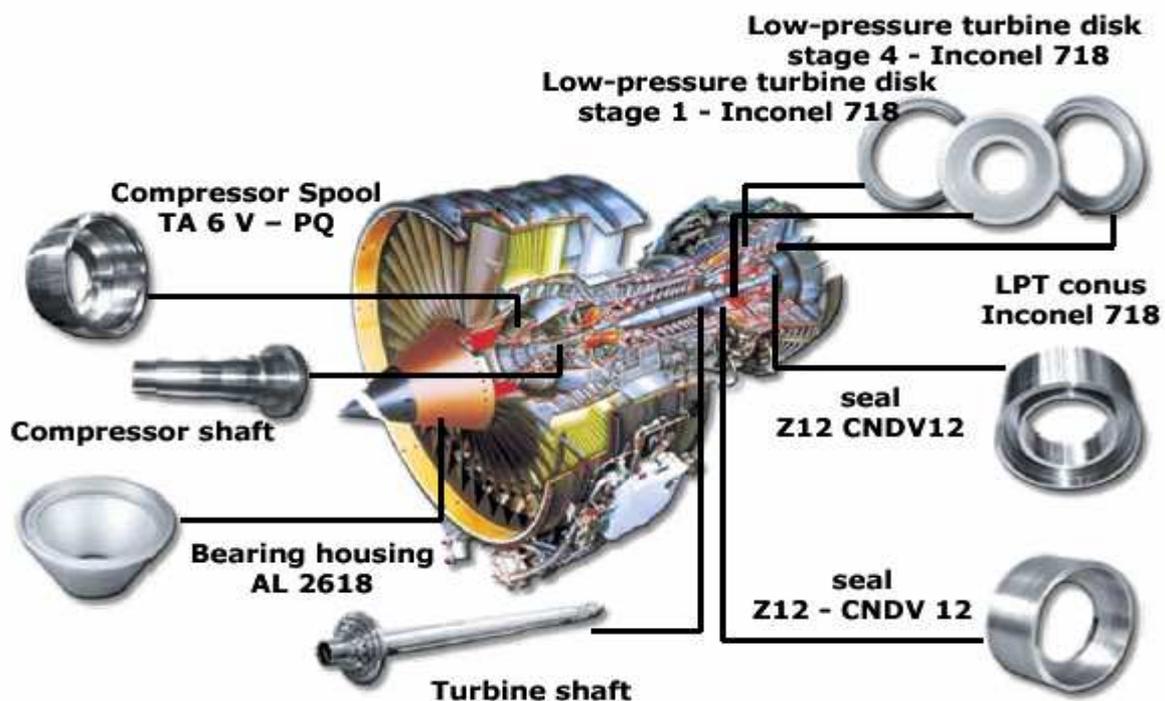


Fig.I-12: Domaine d'utilisation de l'Inconel 718 [NID 01]

### **I.9.2.5: Inconel - alliage X-750**

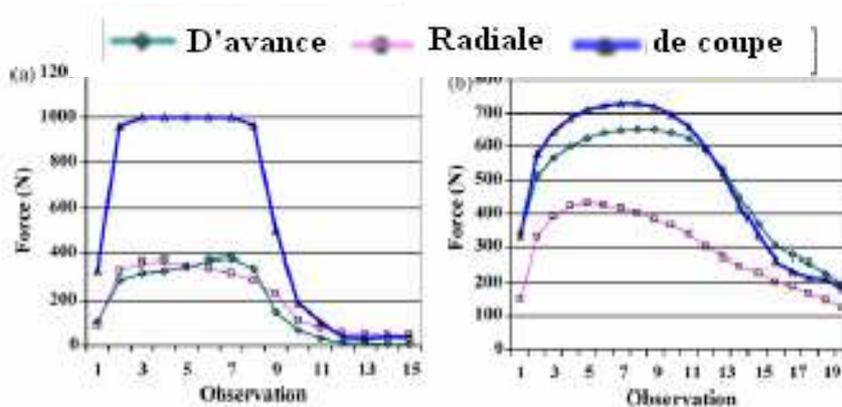
L'Inconel X-750 est un alliage de nickel/chrome non-magnétique qui peut être durci par vieillissement est utilisé pour sa résistance à la corrosion et à l'oxydation de même que sa résistance à la rupture par fluage jusqu'à 1500°F. L'alliage peut être durci par vieillissement grâce à l'addition de l'aluminium et du titane, qui combiné avec le nickel et après un traitement thermique approprié, forme une composition chimique N3(Al, Ti). L'alliage X-750, d'abord conçu pour turbines à gaz et moteurs à réaction est maintenant adopté pour une grande variété d'usage à cause de la combinaison favorable de propriétés. Une excellente résistance à la relaxation rend l'alliage convenable pour opérations de ressorts à des températures jusqu'à environ 1200°F. Le matériau démontre également une bonne résistance de même qu'une bonne malléabilité à des températures aussi basses que -423°F. Il démontre également une bonne résistance au fendillement dû à la corrosion chlorhydrique sous tension même dans une condition de durcissement par vieillissement.

Les applications typiques sont: pièces pour turbines d'avions et industrielles à gaz, ressorts – service à vapeur, réacteurs nucléaires; écrous, enveloppes d'évacuation pour traitement thermique, matrices pour l'extrusion, tôles d'avion, soufflets, outils de façonnage [NID 01].

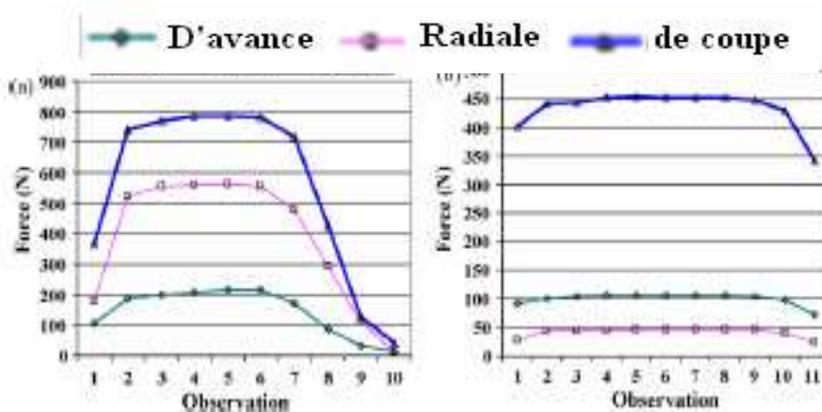
### **I.10: Travaux de Recherche réalisés sur l'usinage des Super alliages Réfractaires**

Sur ce type de super alliages (l'inconel 718), plusieurs travaux sont réalisés afin de connaître ses meilleures conditions de coupe et ses caractéristiques d'usinabilité. [PAW 07] et autres ont fait une investigation sur les efforts de coupe et l'endommagement de surface en tournage à grande vitesse de l'Inconel 718. Sachant les conditions de fonctionnement rigoureuses auxquelles des superalliages sont soumis dans les industries d'automobile, d'espace et des turbines à gaz, leur efficacité d'usinage et la génération des surfaces usinées avec l'intégrité élevée prend beaucoup d'importance. Par conséquent, cette étude présente une recherche expérimentale sur l'effet des différents paramètres de coupe sur les efforts de coupe et l'intégrité des surfaces usinées. Une analyse microstructurale de l'endommagement des surfaces usinées a été faite aussi. L'usinage a été réalisé par un outil PCBN aux conditions de

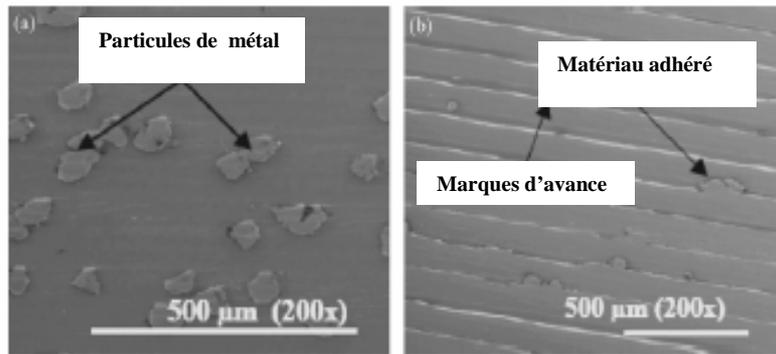
coupe suivantes:  $V = 125\text{--}475$  m/min,  $f = 0,05\text{--}0,15$  mm/tr,  $a_p = 0,50\text{--}1,0$  mm et pour les géométries suivantes: chanfrein de  $30^\circ$ , chanfrein de  $20^\circ$  et un chanfrein rectifié de  $30^\circ$ . Les résultats trouvés dans cette étude prouvent que les composantes de l'effort radial et axial sont presque égales et l'effort de coupe moyen égale deux à trois fois l'effort axial et radial. L'arête de coupe chanfreinée et rectifiée a une influence significative sur la réduction des efforts de coupe. L'étude a montré aussi que les échantillons montrant des grands efforts de coupe ont produit un mauvais état de surface (Fig I-13, I-14 et I-15).



**Fig.I-13: Composantes de l'effort de coupe en fonction du temps en usinage à sec de l'Inconel 718 à :  $V_c=125$ m/min avec outil PCBN: (a) chanfrein de  $20^\circ$ ,  $f=0,15$ mm/tr et  $a_p=1,00$  mm ;(b) chanfrein de  $30^\circ$ ,  $f=0,10$ mm/tr et  $a_p=1,00$  mm [PAW 07]**



**Fig.I-14: Composantes de l'effort de coupe en fonction du temps en usinage à sec de l'Inconel 718 à :  $V_c=475$ m/min avec outil PCBN: (a) chanfrein de  $20^\circ$ ,  $f=0,15$ mm/tr et  $a_p=0,50$  mm ;(b) chanfrein de  $30^\circ$ ,  $f=0,10$ mm/tr et  $a_p=0,50$  mm [PAW 07]**



**Fig.I-15: Image du SEM à :  $V_c=125\text{m/min}$  aux conditions :(a)  $f=0,05\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.50\text{mm}$  et un chanfrein de  $30^\circ$  ;(b)  $f=0.1\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.75\text{mm}$  et une plaquette chanfreinée de  $30^\circ$  et rectifiée [PAW 07]**

Les résultats trouvés montrent aussi que la vitesse de coupe est un facteur très influent sur l'usure et la durée de vie des outils en carbure et céramique lors de l'usinage des alliages à base de nickel, il est important de l'optimiser lors du tournage de l'Inconel 718 [LLI 02] et autres ont étudié l'usinage à grande vitesse de l'Inconel 718 avec des plaquettes carbures revêtues et céramiques.

Les résultats montrent qu'aux faibles vitesses de coupe ( $120\text{ m/min}$ ), les outils sont enclins à l'entaillage au niveau de la profondeur de passe, avec des endommagements minimaux au nez d'outil. La transition est observée autour de  $240\text{ m/min}$ , une augmentation de la vitesse à  $300\text{ m/min}$  conduit à une réduction de l'usure en entaille et à une augmentation d'usure en dépouille et du nez. Les résultats des expériences prouvent que les carbures revêtus par PVD (KC7310) sont plus appropriés à l'usinage de l'inconel 718 que les carbures revêtus par CVD (KC935), et les plaquettes en céramique KY2000 avec un angle d'attaque négatif et KY2100 de type rond sont le choix le plus approprié pour le tournage à grande vitesse de l'inconel 718. Sur la base de l'équation de Taylor et le temps de production minimum, la vitesse optimale de coupe a été optimisée en tournage de l'inconel 718 pour chaque plaquette examinée (Fig I-16 et I-17).

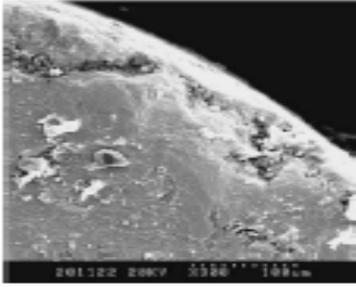


Fig.I-16: Rupture de la nuance KC732, d'après [LLI 02]

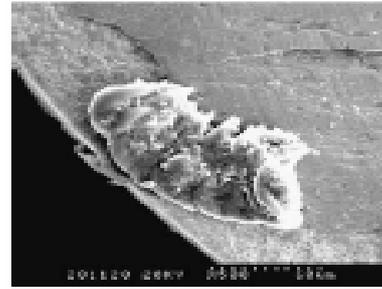


Fig.I-17: Ecaillage du revêtement et adhésion, de la nuance 7310 d'après [LLI 02]

[ALT 06] et autres ont étudié les effets de la vitesse de coupe sur l'usure et la tenue des plaquettes céramiques lors de l'usinage de l'Inconel 718. Une série d'expériences a été effectuée avec des outils en céramique à base de nitrure de silicium et en céramique renforcée aux fibres, qui ont deux géométries différentes, l'usinage a été réalisé avec un fluide de coupe de 10% d'eau. Les résultats d'expériences prouvent que l'usure en cratère et en dépouille sont les types dominant dans la plaquette en céramique carrée (SNGN) tandis que l'usure en dépouille et en entaille sont dominant dans le type rond (RNGN). L'usure en dépouille minimale est observée avec des outils SNGN à des basses vitesses de coupe tandis qu'on le voit avec des outils RNGN aux vitesses de coupe élevées (Fig I-18, I-19 et I-20).

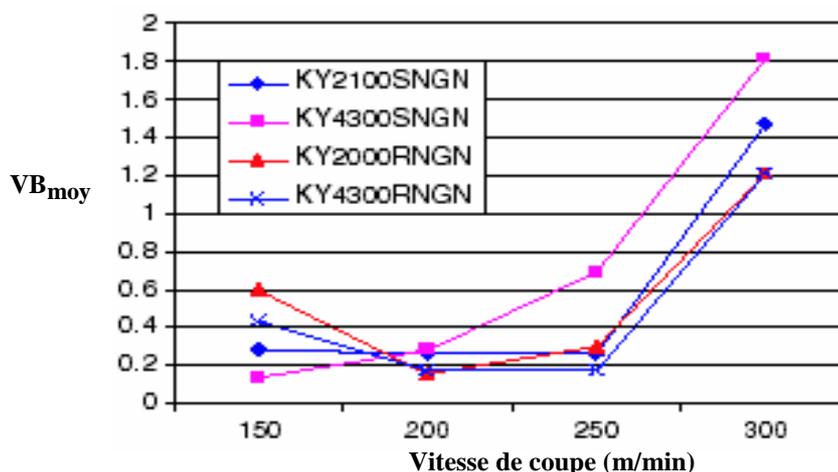


Fig.I-18: Evolution d'usure en dépouille moyenne en fonction de la vitesse de coupe à :  $f = 0.2$  (mm/tr) et  $a_p = 2$  (mm) d'après [ALT 06]

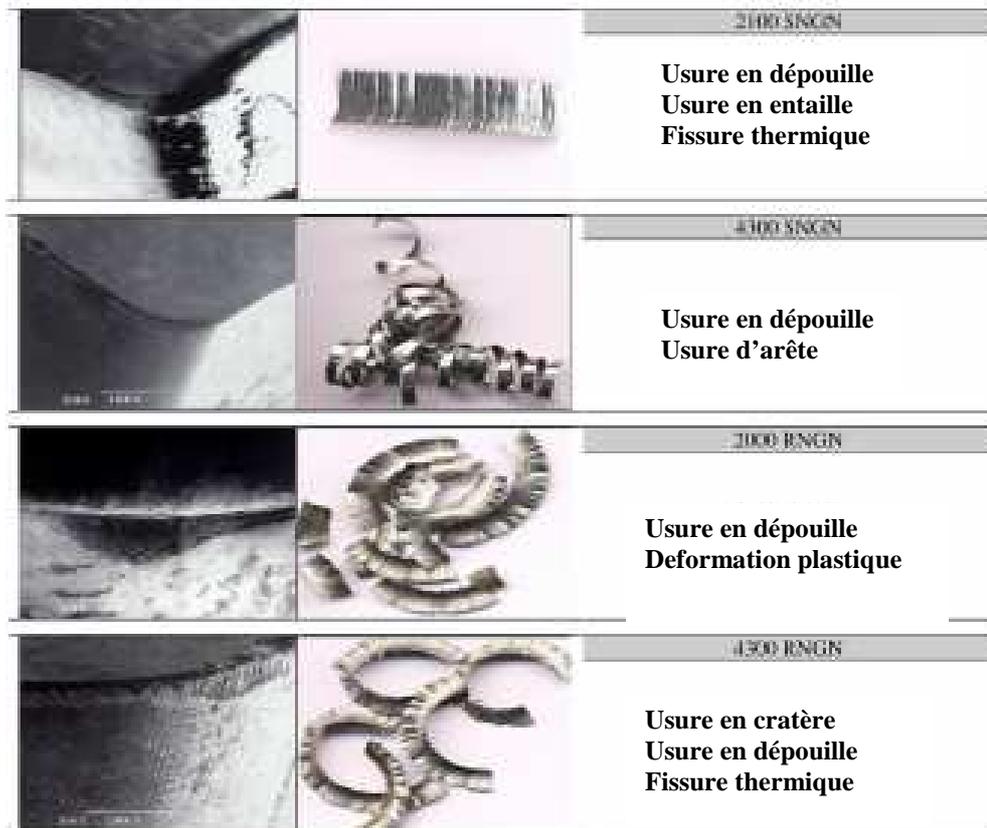


Fig.I-19: Types d'usure et formation de copeaux à :  $V_c = 150$  m/min d'après [ALT 06]

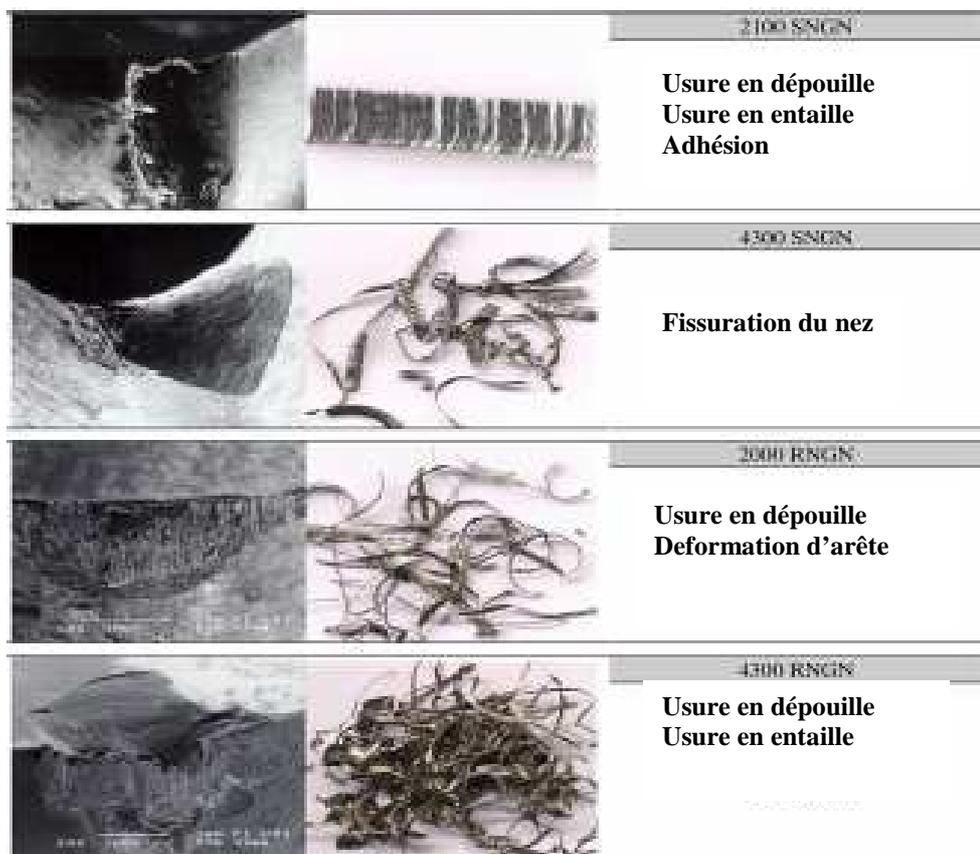


Fig.I-20: Types d'usure et formation de copeaux à :  $V_c = 300$  m/min d'après [ALT 06]

[COS 07] et autres ont fait une étude sur la tenue et les mécanismes d'usure d'un outil CBN lors de l'usinage de l'Inconel 718.

Les outils en CBN sont la plupart du temps employés par l'industrie automobile en tournage dur, l'usure de ces outils n'est pas suffisamment connue lors de l'usinage des matériaux aérospatiaux. Cette recherche a donc pour but de connaître les mécanismes d'usure pendant les opérations de finition de l'Inconel 718 en utilisant des outils CBN. Il est montré qu'une faible teneur de CBN avec un liant en céramique et de petits grains donnent les meilleurs résultats. Les mécanismes d'usure sur la surface d'attaque et de d'épouille de l'outil ont été étudiés aussi. L'observation au SEM et l'analyse chimique des plaquettes, montrent que les mécanismes dominants d'usure sont par adhérence et par diffusion dus à l'affinité chimique entre la pièce et la plaquette (Fig I-21).

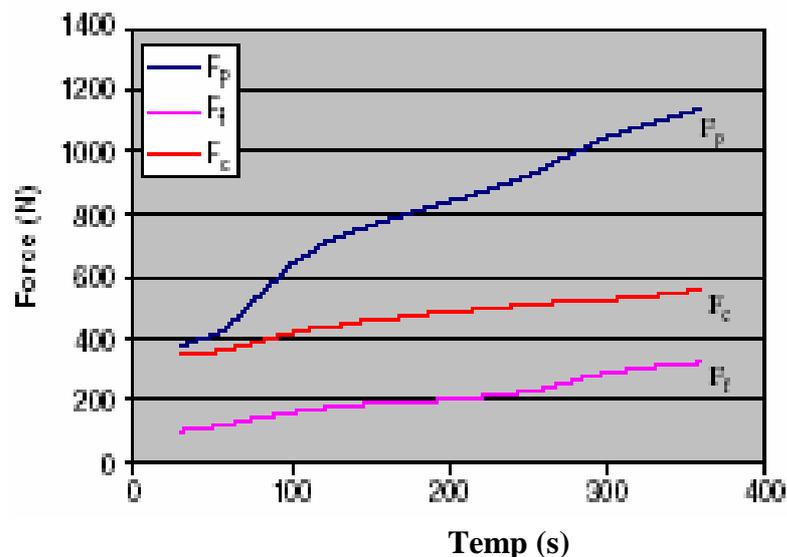
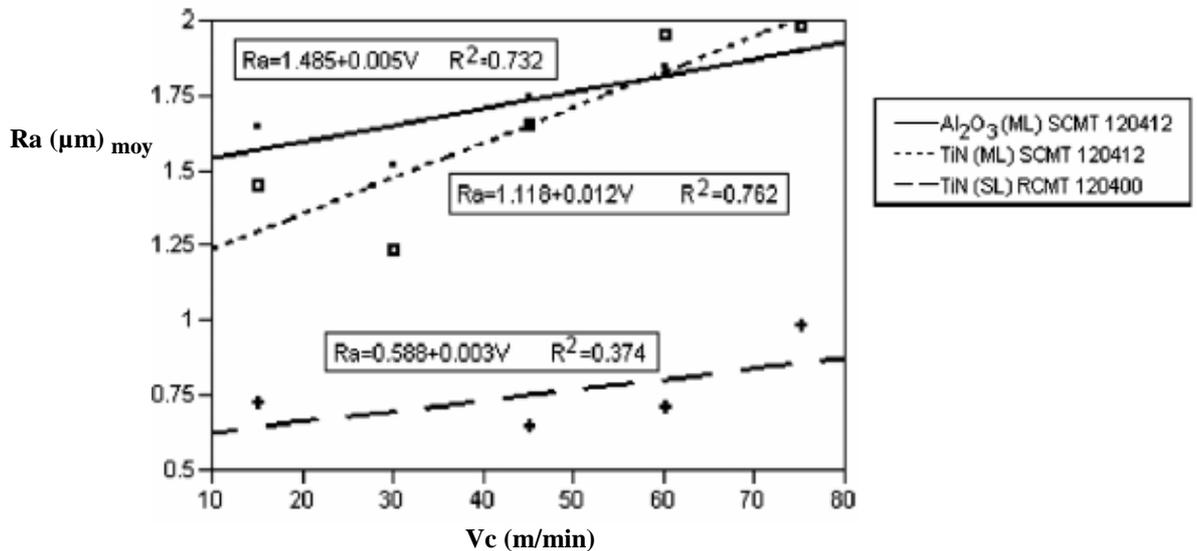


Fig.I-21: Évolution des trois composantes de l'effort ( $V_c = 350\text{m/min}$ ,  $0,5\text{mm}$  de  $a_p$ ,  $0,2\text{ mm/tr}$  de  $f$ ) pour la plaquette de 45% CBN, taille de grain de 1 millimètre, revêtement en TiN [COS 07]

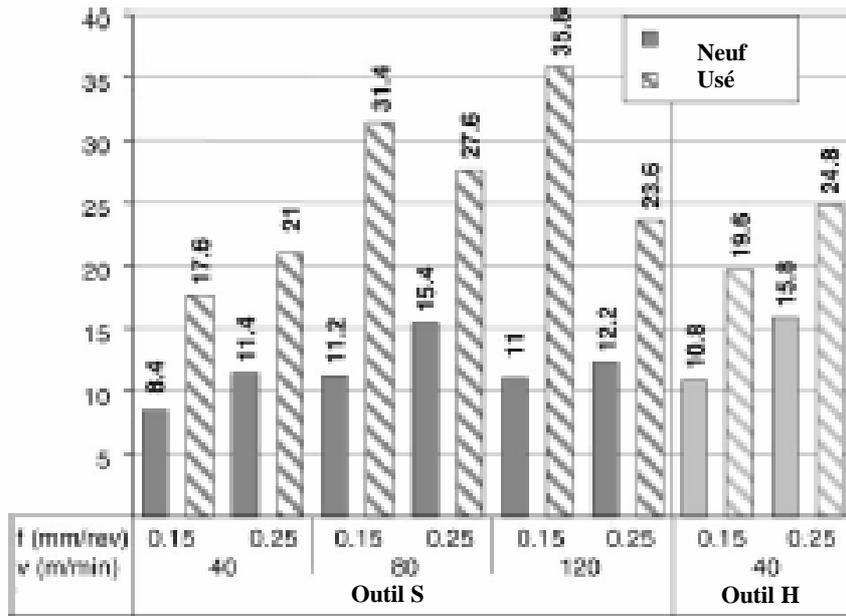
[MUA 07] et autres ont investigué l'effet des revêtements, des géométries d'outils de coupe et de la vitesse de coupe sur les propriétés d'usinabilité de l'Inconel 718. L'usinage à sec du superalliage à base de nickel Inconel 718 a été réalisé avec trois outils en carbure sur un tour à commande numérique. Le processus d'enlèvement de copeau est réalisé suivant les conditions de coupe : vitesses de coupe (15, 30, 45, 60, 75 m/min.), 2 millimètres de profondeur de passe et une avance de 0.20 mm/tr. Les résultats trouvés montrent que le plus faible effort de coupe principal enregistré est

506 N à 75 m/min avec une plaquette en carbure à revêtement multiple, dont la couche supérieure est en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . La plus faible rugosité ( $R_a = 0.806 \mu\text{m}$ ) est obtenue à la vitesse de coupe de 15 m/min avec une plaquette carbure cimentée à revêtement simple (TiN) (Fig I-22).



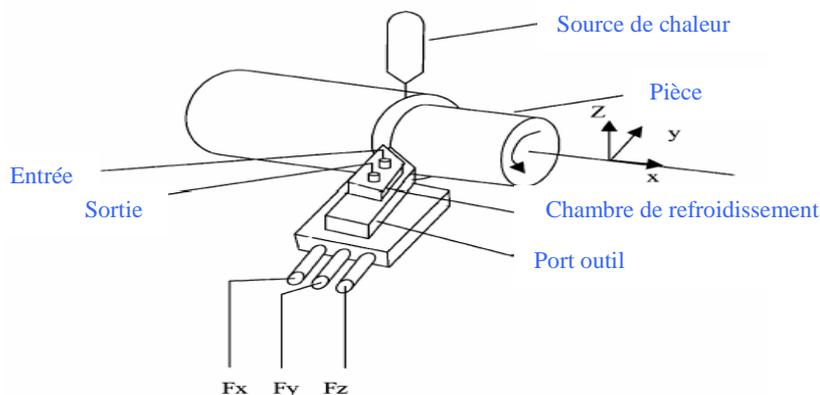
**Fig.I-22: Evolution de rugosité moyenne en fonction de la vitesse de coupe pour :  $a_p = 2 \text{ mm}$ ,  $f = 0.2 \text{ mm/tr}$  pour chacune des plaquettes carbure [MUA 06]**

Aussi, [SHA 06] et autres ont exécuté une analyse des contraintes résiduelles générées lors du tournage de l'Inconel 718. Ce matériau est un super alliage à base de nickel qui est utilisé intensivement dans l'industrie aérospatiale dans les sections chaudes des turbines à gaz. Dans ce travail, les auteurs ont montré l'intégrité de surface atteinte à la suite d'une série d'expériences évaluant les effets de changement du matériau de coupe, sa géométrie, le niveau d'usure et les paramètres de coupe. Les résultats prouvent que le facteur le plus influent sur l'intégrité de surface est l'usure de l'outil. La coupe par un outil usé a comme conséquence une plus grande déformation microstructurale, des changements de micro duretés et des contraintes de traction des surfaces élevées. Les contraintes de traction élevées ont été également formées dans la couche extérieure en coupant avec un outil en carbure revêtu, alors que la coupe avec une plaquette en carbure non revêtu aux mêmes paramètres d'usinage produisait des contraintes de compression profondes sous une couche de traction réduite (Fig I-23).

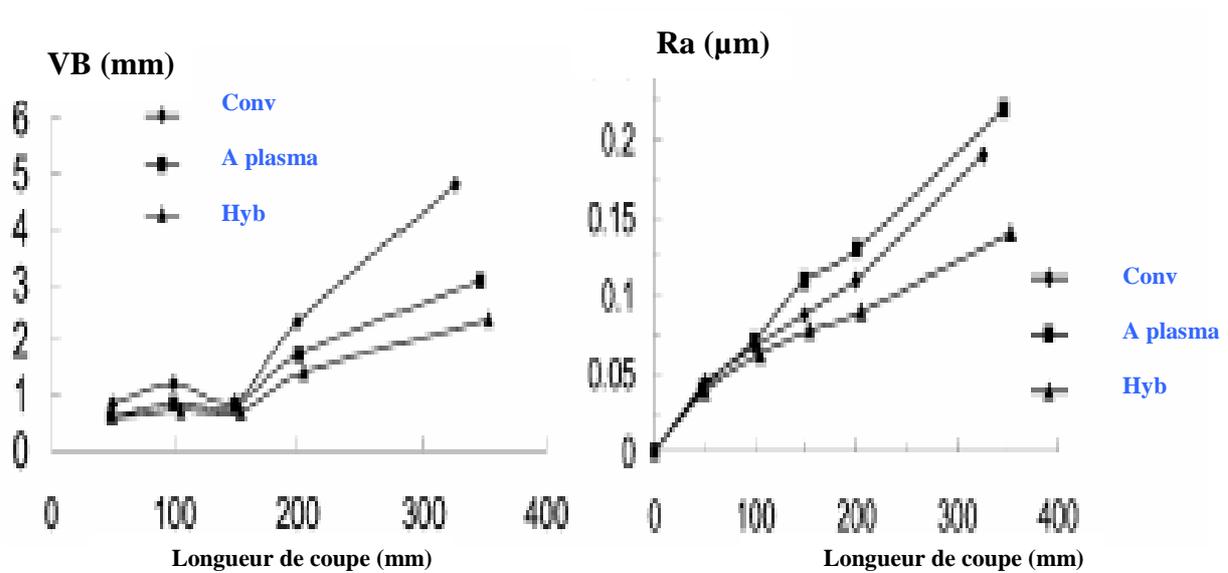


**Fig.I-23 : Profondeur des déformations microstructurales en fonction des paramètres d'usinage. [SHA 06].**

[WAN 03] et autres ont réalisé l'usinage hybride de l'Inconel 718 en combinant le tournage traditionnel avec l'usinage cryogénique et l'usinage par plasma. L'usinage cryogénique est employé pour réduire les températures dans l'outil de coupe, et réduit ainsi l'usure d'outil dépendant de la température pour prolonger la tenue de l'outil, tandis que l'usinage par plasma est employé pour augmenter les températures dans la pièce pour l'adoucir. En joignant ces deux techniques non traditionnelles avec des effets opposés sur l'outil de coupe et la pièce, les chercheurs ont constaté que la rugosité extérieure a été réduite de 250% ; les efforts de coupe ont été diminués d'approximativement 30 à 50% et la tenue de l'outil a été étendue par rapport à l'usinage conventionnel de 170% (Fig I-24, I-25 et I-26).



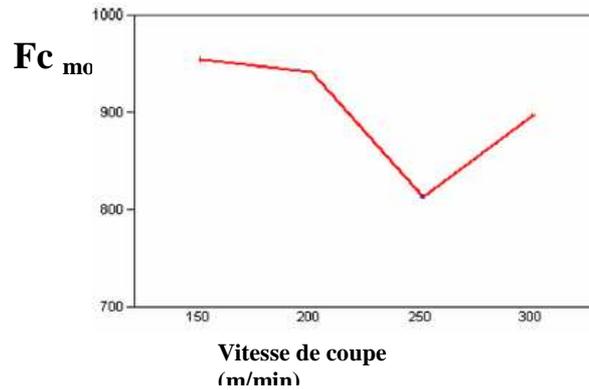
**Fig.I-24 : Schéma d'un dispositif pour usinage hybride [WAN 03]**



**Fig.I-25 : Usure en dépouille en fonction de la longueur de coupe. [WAN 03]**

**Fig.I-26 : Rugosité en fonction de la longueur de coupe. [WAN 03]**

[MUA 07] et autres ont étudié l'effet de la vitesse de coupe et la géométrie d'outil sur les propriétés d'usinabilité de l'Inconel 718. À ce but, le super l'alliage à base de nickel (Inconel 718) est usiné à sec en utilisant le tour numérique avec outils de coupe en céramique de deux géométries différentes et de trois qualités différentes. Le processus d'enlèvement de métal est réalisé pour quatre vitesses de coupe différentes (150 m/min, 200 m/min, 250 m/min, et 300 m/min), tandis que la profondeur de passe et l'avance sont maintenues constantes ( $a_p=2\text{mm}$ ,  $f=0.20\text{ mm/tr}$ ). A partir des expériences, le plus faible effort de coupe est égal à 672 N avec l'outil en céramique de **KYON 2100 SNGN 120712** et l'effort de coupe maximal est égal à 1346N avec l'outil de coupe en céramique ayant la géométrie de **KYON 4300 RNGN 120700**. Selon la vitesse de coupe, le plus faible effort est égal à 812 N à 250 m/min tandis que l'effort le plus élevé est égal à 955 N à 150 m/min. La déformation plastique, l'usure en dépouille, entaillage et l'arête rapportée sont remarquées dans des vitesses de coupe élevées (Fig I-27).



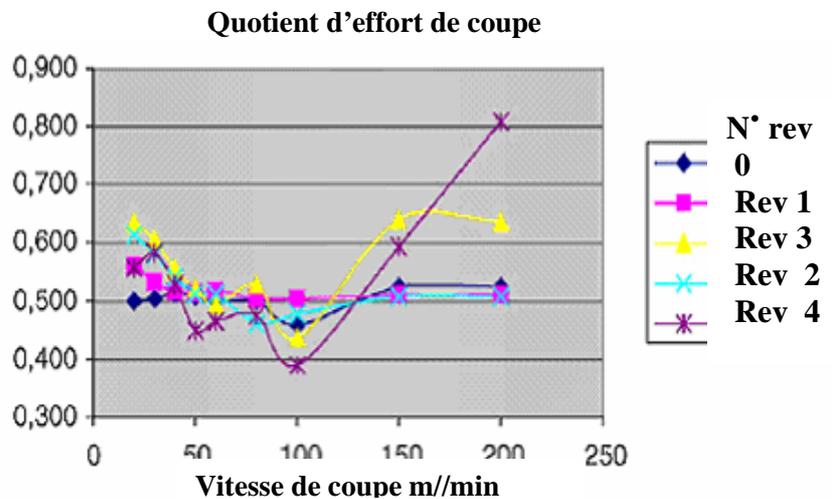
**Fig.I-27: Effort de coupe principal (N) de l’Inconel 718 en utilisant un outil céramique ayant deux différentes géométries et trois types de matériaux. [MUA 07]**

[DEV 07] et autres ont suivi l'évolution d'effort de coupe et de l'usure en usinage à sec de l’Inconel 718 avec un outil carbure revêtu. Dans l'usinage des super alliages de haute résistance utilisés dans des applications aéronautiques et classifiés comme matériaux difficiles à usiner, la consommation du lubrifiant de coupe pendant les opérations d'usinage est très importante. Les coûts associés d'acquisition de lubrifiant, d'utilisation, de disposition et de lavage des pièces usinées sont significatifs, jusqu'à quatre fois le coût d'outillage consommable employé dans les opérations de coupe.

Pour réduire les coûts de production et pour rendre les processus environnementaux sécurisés, le but des fabricants aéronautiques est de s'orienter vers la coupe à sec par élimination ou réduction au minimum les fluides de coupe. Ce but peut être réalisé en utilisant les outils carbure revêtus aux vitesses de coupe élevées. Pour réaliser ce but, différents outils revêtus et différentes conditions de coupe ont été examinés en usinage à sec. Le processus orthogonal élémentaire de coupe a été choisi, les composantes de l'effort axial et tangentiel ont été mesurées et le rapport est calculé. Ce rapport est montré pour être comme indicateur intéressant de l'usure d'outil. Les mécanismes d'usure d'outil ont été analysés en utilisant l'interféromètre et le MEB couplé à un système d'énergie dispersif EDS de spectroscopie par rayon X. L'EDS était très utile pour analyser les éléments déposés sur les faces d'outil de coupe. La capacité des différents revêtements d'augmenter la performance des outils en carbure est analysée, les modes principaux de l'usure ont été aussi présentés dans cette étude.

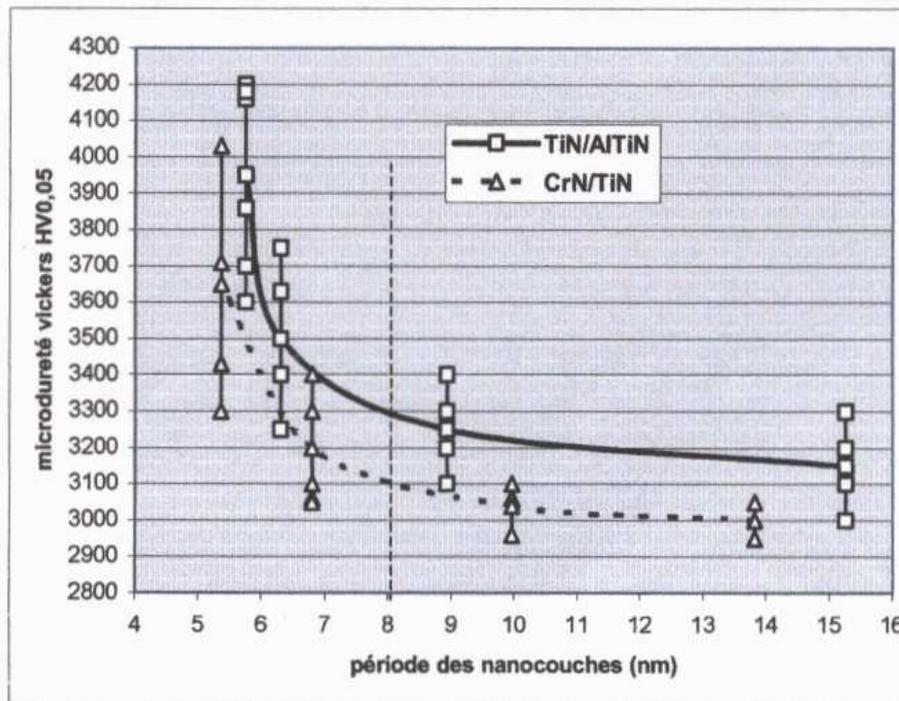
Les chercheurs ont proposé finalement une optimisation des conditions de coupe. Les résultats venant des outils non revêtus ont été comparés à ceux obtenus avec les

outils revêtus dans les mêmes conditions d'usinage. En fin, ils ont proposé un choix des revêtements, et une prolongation de cette étude à une opération d'usinage industrielle est présentée pour les développements de futur (Fig I-28).



**Fig.I-28: Ratio d'effort de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour :**  
 (a)  $f = 0,1$  mm/tr ; (b)  $f = 0,2$  mm/tr. [DEV 07]

[CÉD 01] et autres, ont fait une étude sur l'usinage de l'Inconel 718 par des outils en carbure cémenté (K20) à revêtement multicouche réalisé par le procédé PVD de type CrN/TiN et TiN/ALTiN avec différents épaisseurs de périodes déposés par arc cathodique. La réalisation de dépôt nano couche CrN/TiN et TiN/ALTiN a permis d'étudier, l'influence de la période du dépôt sur ses propriétés mécaniques. Ces revêtements ont fait l'objet d'essais d'usinage sous lubrification standard afin d'évaluer leurs performances pour le tournage du superalliage à base de nickel (Inconel 718). Les dépôts ont engendré une réduction des efforts de coupe et de l'usure en dépouille des outils. La durée de vie des outils, pour des conditions de coupe relativement sévères, est améliorée par l'application de certains revêtements, en corrélation avec la diminution de l'usure en dépouille. Les zones endommagées des outils analysées au MEB, mettent en évidence l'influence du revêtement sur la zone de coupe de l'outil et ont permis de révéler les bonnes performances des outils revêtus nano couche TiN/ALTiN (Fig I-29).



**Fig.I-29: Evolution de la micro dureté des dépôt nano couches en fonction de l'épaisseur de la période [CÉD 01]**

[CHO 99] et autres ont fait une évaluation d'usinabilité de l'inconel 718 par la conception factorielle de l'expérience couplée à la méthodologie de surface de réponse. L'évaluation d'usinabilité du super alliage base nickel (Inconel 718) dans des opérations de tournage a été effectuée en utilisant les plaquettes revêtues et non revêtues de carbure en usinage à sec.

L'Inconel 718 est l'un des matériaux difficiles à usiner en raison de sa faible conductivité thermique, sa haute dureté, et sa haute résistance à température élevée. Cette recherche décrit le développement de la réponse de modèles (la tenue de l'outil, la rugosité et les efforts de coupe). Des modèles prédictifs de premier ordre dans la gamme de vitesse de 10 - 33 m/min et modèles de second ordre dans la marge de vitesse de 7 à 45 m/min ont été développés à l'intervalle de confiance de 95%. L'adéquation des différents modèles de réponse a été critiquée en analysant la variance. En se basant sur les modèles de réponse, les contours ont été tracés dans des plans vitesses – avances.

Dans certains cas de contours double réponse (réponse et taux d'enlèvement de métal) ont été également présentés. Du tracé double réponse (la rugosité et le taux d'enlèvement de métal), on peut choisir des paramètres de coupe pour des taux

importants d'enlèvement de métal sans sacrifier l'état de surface. Des tracés doubles de réponse de la tenue de l'outil et de la rugosité de surface ont été également présentés. Pour une finition extérieure donnée, ces tracés aident à prévoir les conditions de coupe pendant la durée maximale d'outil.

[DUD 04] et autres ont proposés plusieurs solutions pour réduire l'utilisation des liquides de coupe, et les différentes techniques qui permettent un mouvement vers l'usinage à sec sont examinées lors de l'usinage des matériaux aéronautiques, classifiés comme matériaux difficiles à usiner (Fig I-30 et I-31).

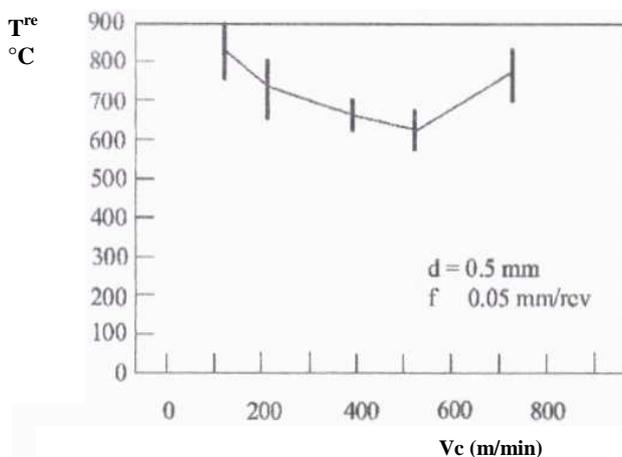


Fig.I-30: Evolution de la température d'arête de coupe en fonction de Vc [DUD 04]

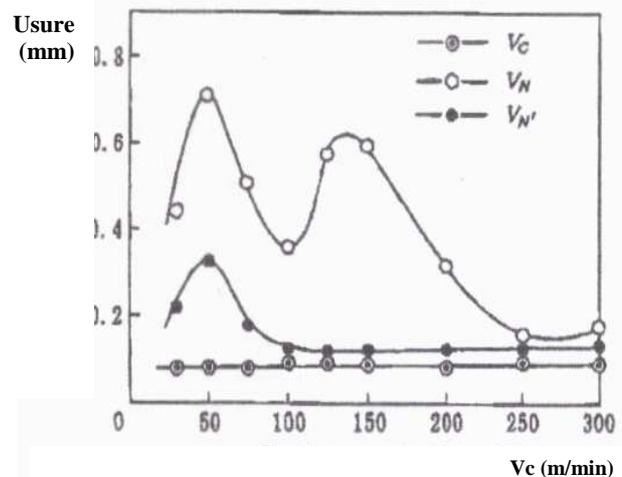


Fig.I-31: Evolution d'usure en dépouille, d'entaille en fonction de Vc pour une distance d'usinage de 50m. f=0.19mm/tr.ap=0.5mm pour un outil céramique Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN [DUD 04]

[ADR 01] et autres ont fait dans cet article une recherche lors du fraisage de l'inconel 718 en utilisant des outils en carbure de tungstène revêtus par TiAlN et CrN, pour un plan factoriel complet à deux niveaux avec une inclinaison de la pièce de 45° et 60°.

La plus longue durée de vie est obtenue avec la vitesse de coupe de 90 m/min avec l'outil revêtu au TiAlN. Le choix du matériau de revêtement est le facteur principal influençant la durée de vie de l'outil. Le premier mécanisme d'usure est par adhésion, qui affecte le revêtement en CrN, ce phénomène est accompagné par des arrachements du matériau de revêtement. Aussi, les chercheurs ont remarqué des entailles développées dans l'arête de coupe. Lorsque la pièce est orientée suivant 60°, une

grande déflexion se produit ce qui est le phénomène d'usure en entaille et l'écaillage de l'arête (Fig I-32).

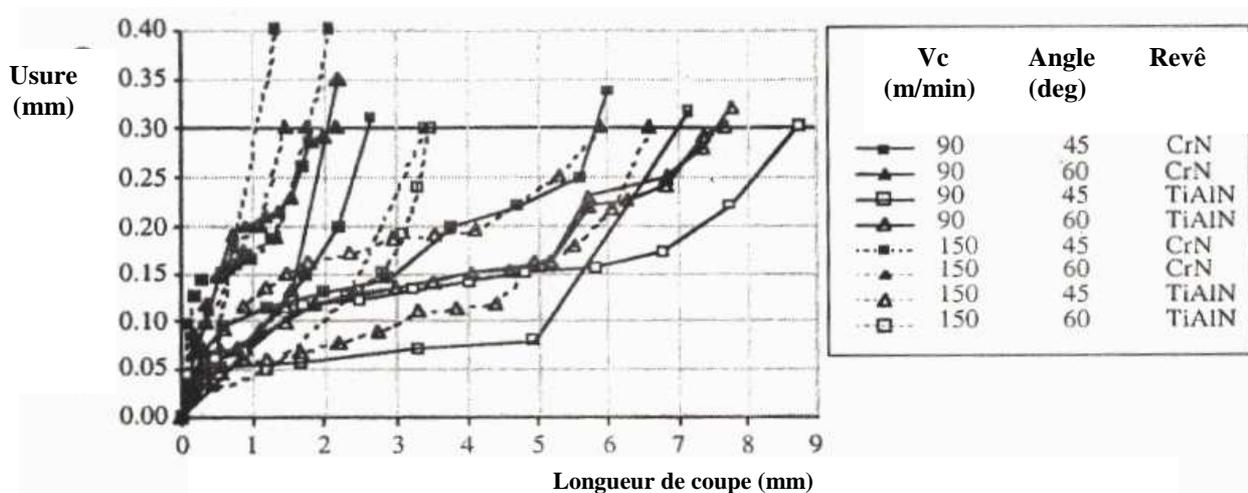


Fig.I-32: Usure d'outil en fonction de la longueur de coupe [ADR 01]

[JAW 01] et autres ont investigué dans cette étude les performances de coupe et les caractéristiques d'endommagement de deux outils en carbure de tungstène revêtu et non revêtu avec les mêmes géométries. Les essais de fraisage de face du super alliage à base de nickel (Inconel 718) sont exécutés afin de connaître l'effet de la vitesse de coupe et d'avance. Les outils étaient complètement examinés par SEM en deux étapes afin d'indiquer les modes de défaillance et les mécanismes d'usure.

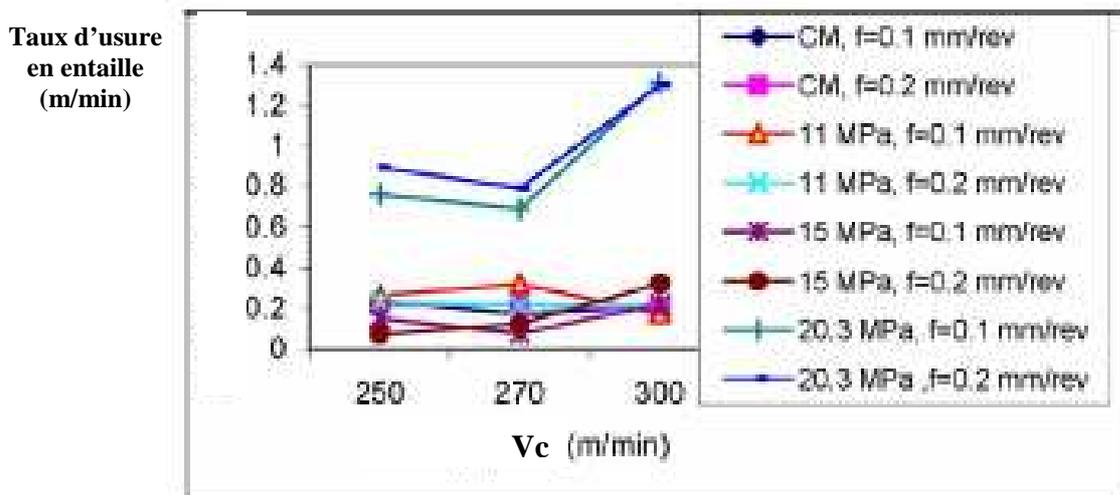
La combinaison d'un écaillage progressif et d'une usure en dépouille est généralement le mode d'endommagement de l'outil, qui est le premier mécanisme dominant aux vitesses élevées et le dernier mécanisme aux faibles vitesses. Les résultats montrent que la performance des outils revêtus est meilleure que celle des outils non revêtus à des vitesses de coupe faibles, quelque fois elle est légèrement meilleure lorsque la vitesse augmente.

[EZU 05] et autres ont examiné l'usinabilité de l'Inconel 718 avec des outils en céramiques sous différentes pressions du liquide d'arrosage. L'usinage de l'Inconel 718 avec outil en céramique renforcée par fibres a donné une meilleure performance en termes de la durée de vie de l'outil sous arrosage à haute pression jusqu'à 15MPa comparé aux approvisionnements conventionnels de liquide.

L'utilisation de la pression 15MPa tend à supprimer l'usure en entaille pendant l'usinage, améliorant de ce fait la tenue de l'outil, alors que l'utilisation d'une pression plus élevée de 20.3MPa ne montrait pas une amélioration dans la tenue de l'outil, cela est due à l'usure en entaille accéléré provoquée par érosion du jet d'eau. Les efforts de coupe sont diminués avec

l'augmentation de la pression due au refroidissement et à la lubrification à l'interface de coupe aussi bien que la segmentation du copeau.

La rugosité produite était bien au-dessous des critères. Ceci peut être attribué à la forme ronde de la plaquette. L'analyse de microstructure des surfaces usinées met en évidence la déformation plastique et le durcissement de la couche supérieure jusqu'à 0,15mm sous la surface usinée en raison de l'augmentation de la densité (Fig I-33).



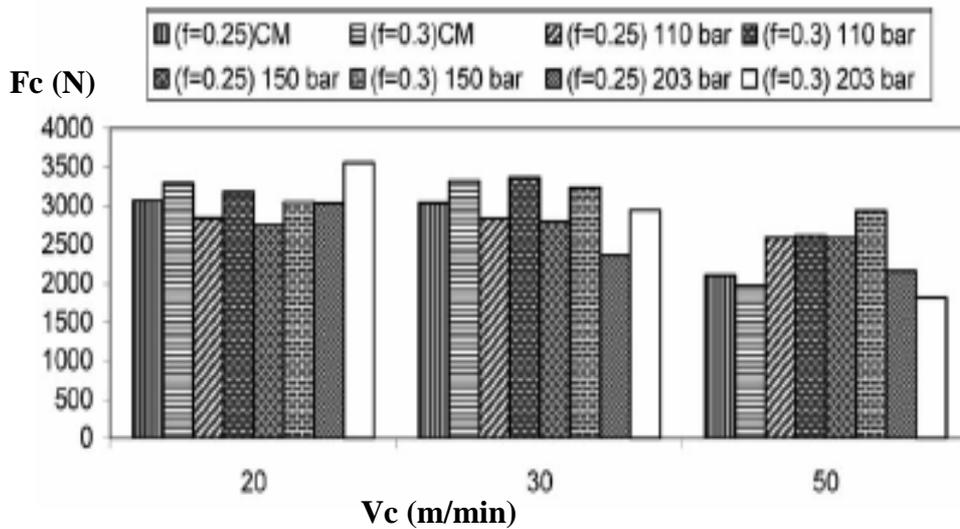
**Fig.I-33: Usure en entaille à différentes vitesses lors de la finition de l'Inconel 718 avec outil céramique renforcé [EZU 05]**

[EZU 04] et autres ont investigué l'effet de la haute pression du liquide d'arrosage lors de l'usinage de l'Inconel 718 avec un outil en carbure à triple revêtement (TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / TiN) par PVD avec une vitesse de 50m/min et en utilisant des lubrifications à diverses pressions élevées, jusqu'à 203 bar.

La tenue de l'outil, la rugosité (Ra), l'usure d'outil et les efforts de coupe ont été enregistrés. Les résultats prouvent que les pressions élevées améliorent la rugosité et augmentent la durée de vie de l'outil à cause de la capacité de la haute pression du liquide à soulever le copeau et l'empêcher d'accéder plus près de l'interface de coupe. Cette action mène à une réduction de la région de contact, abaissant de ce fait le coefficient de frottement qui a comme conséquence la réduction des efforts et de la température de coupe.

La fragmentation du copeau pendant l'usinage dépend de la profondeur de passe, de l'avance, de la vitesse de coupe et de la pression du liquide utilisé. L'usinage de l'Inconel 718 avec des faibles pressions de liquide n'a pas produit la segmentation de copeau. L'usure de l'outil augmente graduellement avec la progression de l'usinage à des pressions de liquide

élevées. L'usure du bec était probablement le mode de défaillance dominant de l'outil dû à une réduction de la longueur / section de contact outil / copeau et outil / pièce (Fig I-34 et I-35).

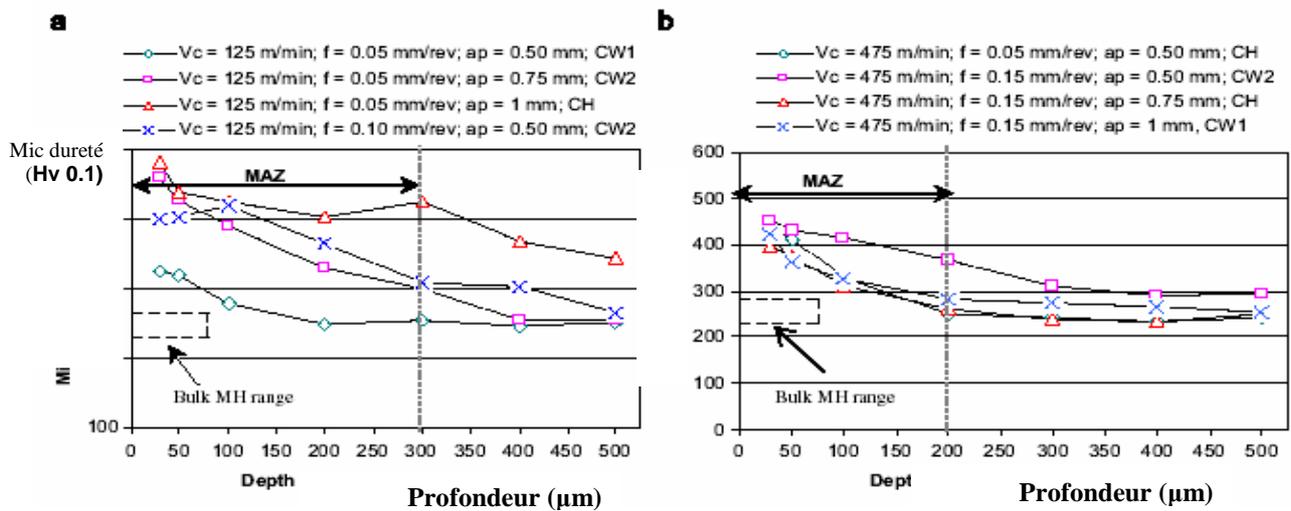


**Fig.I-34: Effort de coupe produit lors de l'usinage de l'Inconel 718 sous différentes pressions de liquide d'arrosage et conditions de coupe ;(CM) : usinage conventionnel [EZU 04]**



**Fig.I-35: (a) Génération de copeau lors de l'usinage sous pression de 150 bar. (b)Copeau fragmente lors de l'usinage avec pression de 203 bars [EZU 04].**

[PAW 08] et autres ont fait une recherche sur l'analyse de l'intégrité de surface de l'Inconel 718. L'analyse des contraintes, les mesures de la micro dureté et le degré de durcissement dans les sous-surfaces usinées ont été employés comme critères pour obtenir les conditions d'usinage favorables qui donnent les surfaces usinées avec une intégrité élevée. On observe que l'utilisation de la vitesse de coupe la plus élevée, les plus faibles avances et profondeurs de passe pour une arête rectifiée peut assurer l'induction des contraintes résiduelles compressives dans les surfaces usinées (Fig I-36).



**Fig.I-36: Profil de la micro dureté dans la surface usinée [PAW 08].**

### I.11: Conclusion

Dans cette étude bibliographique, nous avons résumé les différents phénomènes régissant le processus de coupe. La définition de l'usinabilité et ses critères d'évaluation, présentés au point I.1, montrent l'intérêt de connaître et comprendre l'aptitude des différents matériaux à l'usinage avec les différents outils de coupe. Nous avons présenté dans le point I.3 l'évolution des matériaux de coupe. Cette évolution montre que la recherche continue vers le matériau idéal à la fois le plus dur et le plus tenace. L'usure des matériaux de coupe représente l'un des points principaux investigués dans cette étude. En effet, dans le cas de l'usinage des matériaux difficilement usinables, l'usure des outils arrive en premier plan, car elle influe directement sur l'intégrité de surface (micro structure, rugosité et les contraintes résiduelles) et la précision dimensionnelle. Nous avons souligné en suite l'impact des efforts de coupe, le rôle des effets thermiques et de la lubrification, sur le processus de coupe. Le prochain chapitre présente l'ensemble des équipements utilisés pour la réalisation des expériences ainsi que la démarche à poursuivre pour la planification des essais.

### I.12: Position du problème

En se basant sur l'étude bibliographique, il ressort que les céramiques de coupe sont des matériaux en pleine évolution par rapport aux carbures métalliques. Les céramiques de coupe permettent des performances irréalisables avec les autres matériaux à outil du point de vue :

- Productivité, parce qu'elles sont utilisées en usinage à grande vitesse.
- Elles offrent la possibilité d'usiner des matériaux difficilement usinables.
- Elles permettent d'obtenir des qualités de surface, avec toute satisfaction, lors des opérations de finition.

Par conséquent, l'objectif de notre étude est d'essayer de contribuer à évaluer l'usinabilité de l'inconel 718 qui est très peu utilisé dans l'industrie algérienne, avec quatre matériaux de coupe. En effet, il s'agit de définir l'impact des conditions de coupe et de l'usure sur la rugosité des surfaces et aussi sur les efforts de coupe et les températures générées lors de l'usinage. Les matériaux de coupe utilisés sont: la céramique composite CC670, la céramique mixte CC650, le carbure revêtu GC1025 et en dernier le carbure non revêtu H13A. Des modèles mathématiques, exprimant les relations entre les paramètres de coupe et les efforts de coupe, la rugosité des surfaces usinées seront proposés.

**CHAPITRE II**

*Equipements utilisés et  
programme des expériences*

## II.1: Introduction

Nous présentons dans ce chapitre, l'ensemble des outils et équipements mis en œuvre pour la réalisation des expériences et cela dans le souci d'étudier l'usinabilité du super alliage réfractaire (Inconel 718). Cela va consister en une présentation des différents équipements utilisés qui servent au suivi de l'évolution de la rugosité des surfaces obtenues, des efforts de coupe générés, de l'usure et de la température de coupe. Nous présentons également la démarche utilisée pour la planification et les conditions de réalisation des expériences. Les expériences nécessaires à notre étude ont été effectuées au laboratoire de *Mécanique et Structures* (LMS), département de génie mécanique (Université 08 Mai 1945 de Guelma).

## II.2: Equipements utilisés

### II.2.1: Machine outil

C'est un tour à charioter et à fileter, modèle SN40C (figure II-1). Il est équipé d'un moteur électrique de puissance 6,6KW, les fréquences disponibles sur la machine sont (45, 63; 90, 125, 180, 250, 355, 500,710; 1000; 1400, 2000) tr/min et les avances sont: (0.08; 0.10, 0.11; 0.12; 0.14; 0.16, 0.18, 0.20; 0.22, 0.24 ...0.8) mm/tr.



Fig.II-1: Tour à charioter et à fileter modèle SN40C

### II.2.2: Outils de coupe utilisés

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé deux porte outils sur lesquels on fixe les plaquettes mécaniquement par bride ou par trou central. La géométrie des deux

portes outils est donnée dans le tableau II-1. La plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un fort élément de serrage dans le porte outil. Une calle support en carbure métallique vissé et rectifiée, protège le porte outil et garantit un contact parfait de la plaquette.

<i>Porte outil</i>	<i>Section (mm<sup>2</sup>)</i>	$\chi_r^\circ$	$\alpha^\circ$	$\gamma^\circ$	$\lambda^\circ$
<i>PSBNR2525K12</i>	25*25	75	6	-6	-6
<i>CSBNR2525M12</i>	25*25	75	6	-6	-6

Tab.II-1: Caractéristiques géométriques des porte outils



Fig.II-2: Porte outil utilisé

Les plaquettes utilisées sont amovibles de forme carrée à fixation par bride et trou centrale. Toutes les informations relatives à ces plaquettes de coupe sont regroupées dans le tableau II-2.

<i>Matériau de coupe</i>	<i>Désignation firme</i>	<i>Désignation ISO</i>	<i>Firme</i>	<i>Composition</i>
<i>Céramique composite</i>	CC670	SNGN 120408	Sandvik	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiC
<i>Céramique mixte</i>	CC650	SNGA 120408	Sandvik	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiC
<i>Carbure revêtu</i>	GC1025	SNGN 120408	Sandvik	WC+ triples revêtements
<i>Carbure non revêtu</i>	H13A	SNMG 120408	Sandvik	WC(sans revêtement)

Tab.II-2: Informations relatives aux plaquettes de coupe

### II.3: Matériau à usiner

L'Inconel 718 est un alliage qui doit être durci par vieillissement. Il est très résistant et convenable à des températures variant de -423° à 1300°F. La résistance à la fatigue de l'alliage 718 est élevée. En plus, l'Inconel 718 possède des propriétés excellentes contre la rupture sous tension jusqu'à 1300°F, de même qu'une résistance

à l'oxydation jusqu'à 1800°F. Cet alliage offre une bonne résistance à la corrosion dans une grande variété d'environnements.

La meilleure caractéristique de l'Inconel 718 est sa réaction lente au durcissement par vieillissement. La réaction lente permet au matériau d'être soudé et recuit sans durcir spontanément à moins d'être refroidi lentement. L'Inconel 718 peut également être réparé par soudure même après durcissement par vieillissement. Les applications typiques sont: moteurs à réaction; pièces de pompe et pompes; moteurs de fusée et inverseurs de poussée; vaisseaux spatiaux. Les caractéristiques physiques et chimiques de l'Inconel 718 sont données au tableau II-3.

<i>Els</i>	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Sn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Co</i>	<i>Fe</i>	<i>Mo</i>	<i>Ti</i>	<i>Cu</i>	<i>Al</i>	<i>Cb+Ta</i>
<b>% Max</b>	0.08	0.35	0.35	0.015	0.015	55	21	1	20	3.3	1.15	0.15	0.8	5.5
<b>% Min</b>	-	-	-	-	-	50	17		18.5	2.8	0.65	-	0.35	4.75
<b>Dureté</b>	36 HRC													

Tab.II-3: Composition chimique et caractéristiques physiques de l'Inconel 718

## II.4: Appareillages de mesure utilisés

### a) Microscope pour la mesure de l'usure

On a fait intervenir un microscope optique type **Hind (WAD)** (Fig.II-3), Qui nous donne la possibilité de mesurer les grandeurs d'usure sur la surface en dépouille principale et la surface en dépouille auxiliaire et la largeur du cratère. Pour cela la plaquette doit être placée sous l'objectif du microscope sur une table à mouvement plane, on la translate suivant deux axes, ce qui nous permet de positionner cette dernière par rapport au repère de mesure du microscope. Le microscope est équipé de deux tambours ayant une précision de 0.001 mm.

La manœuvre de la vis ainsi que celle des jauges micro magnétiques à lecture directe sur le tambour du microscope, permet une localisation préalable de la surface de la plaquette à contrôler, dans les champs de vision de l'oculaire. Sa source lumineuse émet un faisceau de lumière à l'égard de la surface concernée. Les rayons réfléchis passant à travers l'objectif, empruntent en suite le système optique puis, sortent de l'oculaire pour donner ainsi une image claire en ajustant la distance focale du microscope à l'aide de la vis. C'est ainsi que la mesure des différents paramètres d'usure s'effectue.

Pour ce fait, on coïncide l'arête tranchante principale de la plaquette avec la ligne horizontale du repère puis, on fait une première lecture, soit ( $L_0$ ), et après on déplace la plaquette à l'aide du tambour jusqu'au moment où la coïncidence de la limite supérieure de la bande d'usure avec la ligne horizontale du repère est faite, à cette position là, on fait une deuxième lecture, soit ( $L_1$ ). L'écart entre ( $L_0$ ) et ( $L_1$ ) nous donne également l'usure à relever.



**Fig.II-3 : Microscope pour la mesure de l'usure**

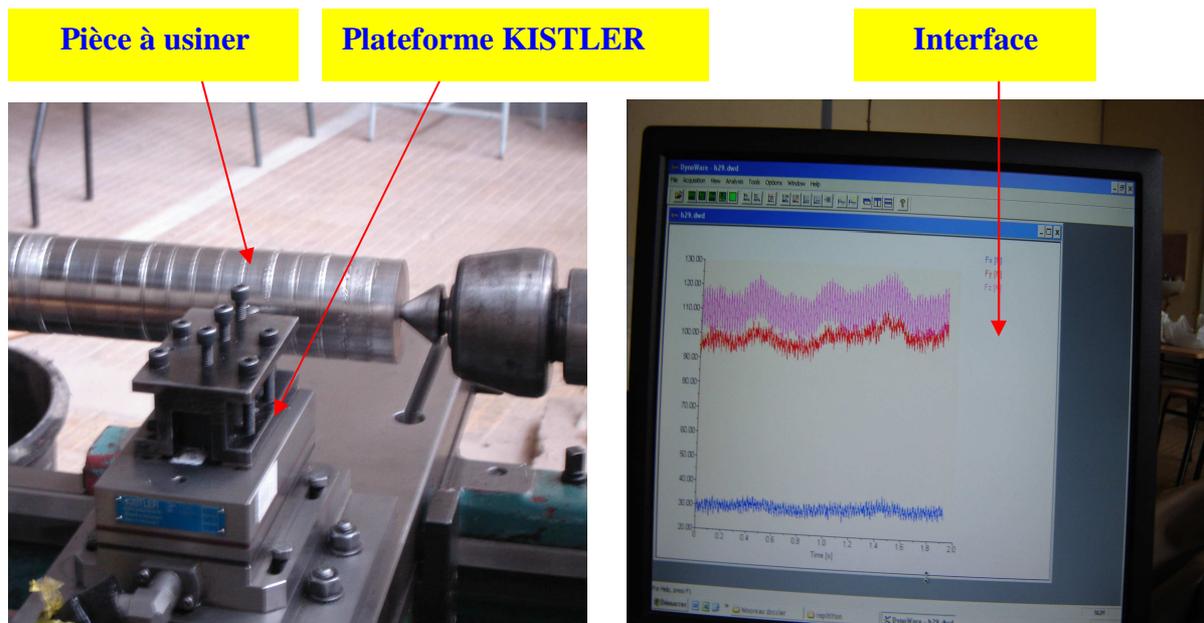
### **b) Mesure des efforts de coupe**

Pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dispositif moderne (Plateforme KISTLER, fig.II-4), qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des efforts de coupe. Ce dispositif comporte plusieurs éléments qui sont :

3. La plateforme.
4. L'amplificateur de signaux.
5. Le PC avec logiciel, et enfin un traceur ou une imprimante pour tracer les courbes.

Le principe de mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce où l'outil reste fixé. Ce dernier est montré sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle même est fixée sur le chariot transversal de la machine outil. La plateforme représente l'élément

le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz à trois éléments, qui sont assemblés sous hautes précontraintes, formant un dynamomètre qui peut mesurer trois composantes en même temps. Les efforts agissants sur cette plaque lors de la coupe sont convertis en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux.



**Fig.II-4: Plateforme Kistler avec interface pour la mesure des efforts de coupe**

### **c) Pyromètre à infra rouge pour Mesurer les températures de coupe**

Durant l'usinage, pour mesurer la température dans la zone de coupe, nous avons utilisé un pyromètre à infra rouge modèle Raynger3.1. Le pyromètre mesure la température de surface à distance. Il concentre l'énergie infra rouge rayonnant de la cible et calcule sa température de surface. Il calcule également les températures (moyenne, minimale et maximale) qui seront affichées sur l'écran digital en degré Celsius ou fahrenheit. Une sortie analogique/digitale permet le transfert des données enregistrées. Le pyromètre à infra rouge Raynger31, présente les caractéristiques suivantes :

1. Etendue de mesure ; -30 à 1200°C.
2. Etendue spectrale ; 8 à 14 $\mu$ .
3. Résolution optique ; 75 :1.
4. Emissivité ; 0.1 à 1 par pas de 0.01 (0.95 par défaut).

5. Visée laser double.
6. Temps de réponse 700 m sec.

**d) Autres équipements**

- Un chronomètre: pour l'enregistrement du temps de coupe.
- Un appareil d'essais de dureté: pour mesurer la dureté de la pièce.
- Le pied à coulisse: pour mesurer les différentes dimensions de la pièce concernée.
- Un appareil photo numérique.

**II.5: Conditions de coupe**

Les essais d'usinage sont effectués sur le super alliage base nickel inconel 718, ils sont portés sur 4 matériaux à outil de coupe différents.

A la fin de chaque opération d'usinage, on mesure: **VB, VB<sub>max</sub>, Ra, Rt, Rz**, sauf les températures de coupe **t°C** qui sont mesurées au cours des opérations de coupe. Les essais sont effectués en tournage (opération de chariotage). La pièce est maintenue en montage mixte. L'usinage est réalisé sans lubrification sous les conditions de coupe indiquées au tableau II-4.

<i>Conditions de coupe</i>	<i>Matériau à outil</i>	<i>Essais de rugosité</i>	<i>de</i>	<i>Essais d'effort de coupe</i>	<i>Essais de la température de coupe</i>
<b>V<sub>c</sub></b> <i>(m/min)</i>	CC670	110 156 220		110 156 220	110 156 220 310 440
	CC650	110 156 220		110 156 220	/
	GC1025	20 60 110		20 60 110	/
	H13A	110		110	/
<b>a<sub>p</sub></b> <i>(mm)</i>	CC670	0.15 0.3 0.45		0.15 0.3 0.45	/
	CC650	0.15 0.3 0.45		0.15 0.3 0.45	/
	GC1025	0.15 0.3 0.45		0.15 0.3 0.45	/
	H13A	0.15		0.15	/
<b>f</b> <i>(mm/tr)</i>	CC670	0.08 0.12 0.16		0.08 0.12 0.16	0.08 0.12 0.16 0.2
	CC650	0.08 0.12 0.16		0.08 0.12 0.16	/
	GC1025	0.08 0.12 0.16		0.08 0.12 0.16	/
	H13A	0.08		0.08	/

**Tab.II-4: Conditions de coupe utilisées pour différentes nuances des matériaux de coupe**

## II.6: Planification des expériences

### II.6.1: Introduction

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer, les éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $a_p$ ,  $f$ ), la géométrie de la partie active de l'outil ( $r$ ,  $\lambda$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\varepsilon$  ...etc), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine, lubrification ...etc). Tous ces facteurs jouent le rôle de paramètres d'entrée du système d'usinage. La tenue, les efforts, la rugosité et la température de coupe, représentent les paramètres de sortie. Dans notre étude, de nombreux points apparaissent importants à traiter. Toutefois, nous nous sommes limités au suivi de l'évolution des paramètres suivant :

1. Evolution de la rugosité en fonction des paramètres du régime de coupe ( $V_c$ ,  $a_p$ ,  $f$ ).
2. Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe ( $V_c$ ,  $a_p$ ,  $f$ ).
3. Evolution de la rugosité en fonction du temps et de l'usure.
4. Evolution des efforts de coupe en fonction du temps et de l'usure.
5. Evolution de la température de coupe en fonction du temps.
6. Evolution de l'usure en fonction du temps

### II.6.2: Méthodologie de recherche

Un très grand nombre de facteurs agit sur l'usinabilité d'un matériau, tels que les paramètres du régime de coupe ( $V_c$ ,  $a_p$ ,  $f$ ), la géométrie de l'outil ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\chi$ ,..., etc.), les caractéristiques du matériau usiné (dureté,  $R_r$ , %C, % des éléments d'addition, etc.), les conditions de travail, etc. Ces facteurs représentent les paramètres d'entrée du système d'usinage. La tenue, la précision, les efforts, etc., représentent les paramètres de sortie.

Soient  $X_1, X_2, \dots, X_n$  les paramètres d'entrée,  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  ceux de sortie. Lorsque nous voulons savoir l'action d'un ou plusieurs facteurs ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ) sur un paramètre  $Y$  nous nous servons des deux méthodes suivantes:

- Méthode uni factorielle
- Méthode multifactorielle.

### II.6.3: Méthode unifactorielle

Ces méthodes permettent de déterminer l'action d'un seul facteur  $x$  sur un paramètre  $Y$ . Il s'agit de déterminer une relation de type  $Y=g(X)$ , pour cela nous varions seulement le facteur  $X$ , tous les autres  $X_i$  sont maintenus constants Tab II-4.

<i>N° d'essai</i>	<i>Facteur</i>	<i>Paramètre</i>			
	$X$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_{moy}$
1	$X_1$	$Y_{11}$	$Y_{21}$	$Y_{31}$	$Y_{moy1}$
2	$X_2$	$Y_{12}$	$Y_{22}$	$Y_{32}$	$Y_{moy2}$
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
i	$X_i$	$Y_{1i}$	$Y_{2i}$	$Y_{3i}$	$Y_{moyi}$
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
n	$X_n$	$Y_{1n}$	$Y_{2n}$	$Y_{3n}$	$Y_{moy n}$

Tab.II-4: Réalisation des essais par la méthode uni factorielle

### II.6.4: Méthode multifactorielle

Cette méthode est utilisée lorsqu'on veut déterminer l'action simultanée de plusieurs facteurs sur le paramètre  $Y$  (Tab II-5). Il s'agit dans ce cas de déterminer une relation du type :

$$Y=f(X_1, X_2, \dots, X_n) \dots \dots \dots (16)$$

Chaque facteur  $X_j$  ne peut se varier que dans un intervalle bien déterminé, soit:  $[X_{min}, X_{max}]$ . On se sert des valeurs  $X_{min}$ ,  $X_{moy}$  et  $X_{max}$  dans une expérience à trois niveaux, et des valeurs  $X_{min}$ ,  $X_{max}$  pour une expérience à deux niveaux. Le nombre d'expérience  $n$  est une fonction du nombre de facteurs  $m$  et du nombre de niveaux  $p$  adopté pour chaque variable;  $n = p^m$ .

La matrice des expériences planifiées prend sa forme que en codifiant les  $X_{ij}$  selon les conventions suivantes:

1. la valeur minimale  $X_{min}$  sera codifiée par (-1);
2. la valeur moyenne  $X_{moy}$  sera codifiée par (0);
3. la valeur maximale  $X_{max}$  sera codifiée par (+1);

Dans notre cas, les facteurs sont au nombre de 3, d'ou  $m = 3$ , le nombre de niveaux adopté est  $p = 3$ , donc le nombre d'expériences nécessaires est  $n = 27$  au plan complet,

et 9 expériences au plan fractionné. Dans la coupe des métaux, les lois liant la sortie Y d'un système d'usinage aux paramètres d'entrée ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ) sont en général de la forme:

$$Y = C + A_1X_1 + A_2X_2 + \dots + A_nX_n + K_1X_1^2 + K_2X_2^2 + \dots + K_nX_n^2 + B_1X_1 * X_2 + B_2X_1 * X_3 + B_3X_2 * X_3 + \dots + B_nX_i * X_j \dots \dots \dots (17)$$

Où: C est une constante tenant compte l'influence des facteurs ne figurant pas dans la relation.

$A_1, A_2, \dots, A_n$  sont les coefficients de ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ) respectivement.

$K_1, K_2, \dots, K_n$  sont les coefficients de ( $X_1^2, X_2^2, \dots, X_n^2$ ) respectivement.

$B_1, B_2, \dots, B_n$  sont les interactions entre les différents paramètres du modèle.

OrdreStd	Parameters d'entrée			Parameters de sortie			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_{moy}$
3	-1	-1	+1	$Y_{1\ 3}$	$Y_{2\ 3}$	$Y_{3\ 3}$	$Y_{3\ moy}$
24	+1	0	+1	$Y_{1\ 24}$	$Y_{2\ 24}$	$Y_{3\ 24}$	$Y_{24\ moy}$
5	-1	0	0	.	.	.	.
4	-1	0	-1	.	.	.	.
1	-1	-1	-1	.	.	.	.
26	+1	-1	0	.	.	.	.
20	+1	-1	0	.	.	.	.
11	0	-1	0	.	.	.	.
9	-1	+1	+1	.	.	.	.
12	0	+1	+1	.	.	.	.
7	-1	+1	-1	.	.	.	.
17	0	+1	0	.	.	.	.
21	+1	-1	+1	.	.	.	.
19	+1	-1	-1	.	.	.	.
25	+1	+1	-1	.	.	.	.
22	+1	0	-1	.	.	.	.
6	-1	0	+1	.	.	.	.
14	0	0	0	.	.	.	.
10	0	-1	-1	.	.	.	.
23	+1	0	0	.	.	.	.
27	+1	+1	+1	.	.	.	.
15	0	0	+1	.	.	.	.
16	0	+1	-1	.	.	.	.
2	-1	-1	0	.	.	.	.
13	0	0	-1	.	.	.	.
18	0	+1	+1	.	.	.	.
8	-1	+1	0	$Y_{8\ 1}$	$Y_{8\ 2}$	$Y_{8\ 3}$	$Y_{8\ moy}$

Tab.II-5: Plan complet de 27 essais par la méthode multifactorielle

### II.6.5: Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements indispensables aux essais. La composition chimique des éprouvettes et les caractéristiques des matériaux de coupe ont été définies. Les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désignées.

***CHAPITRE III***  
***Evaluation de l'usinabilité de***  
***l'Inconel 718***

### III.1: Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats relatifs à l'impact des conditions de coupe sur les paramètres technologiques de l'usinage lors du tournage de l'Inconel 718. Dans un premier temps, nous présentons les résultats de l'impact des conditions de coupe, de l'usure et du temps sur la rugosité des surfaces usinées. En suite nous présentons les résultats de l'impact des conditions de coupe, de l'usure et du temps sur l'évolution des l'efforts de coupe, suivi des résultats de l'évolution de la température générée dans la zone de coupe en fonction des conditions de coupe.

### III.2: Evolution de la rugosité en fonction des paramètres de coupe

Les figures III-1, III-2 et III-3 présentent les résultats de l'évolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe, de la profondeur de passe et de l'avance lors du tournage de l'Inconel 718 par la céramique composite CC670.

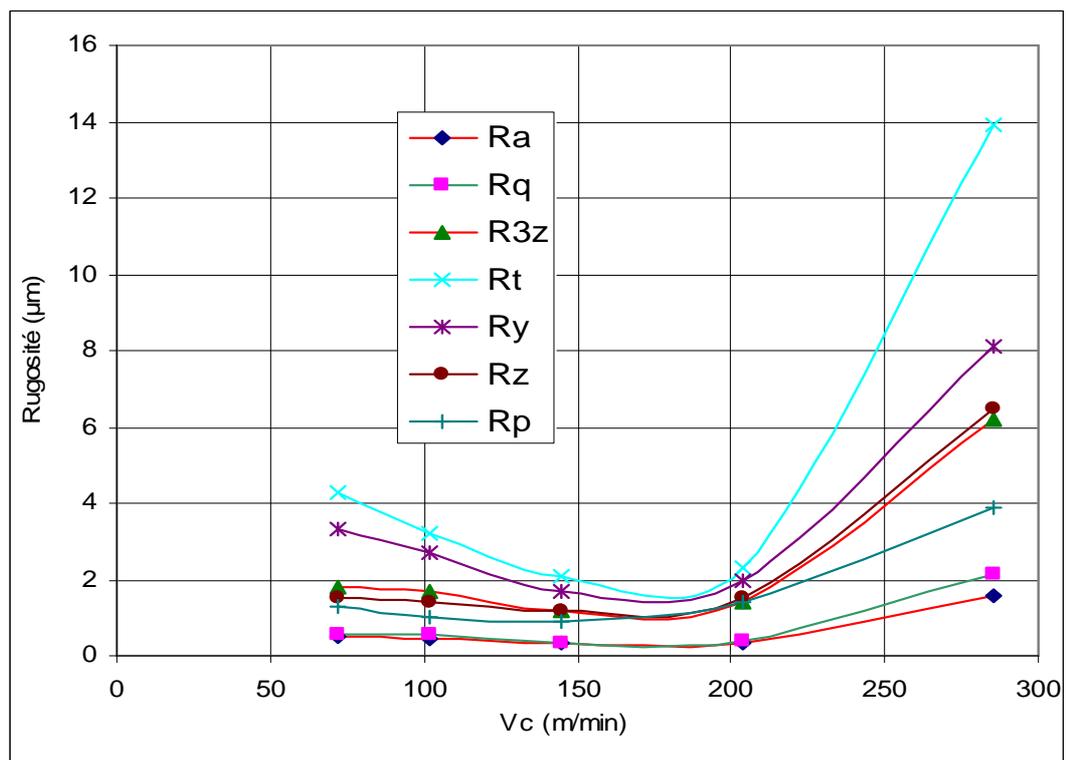
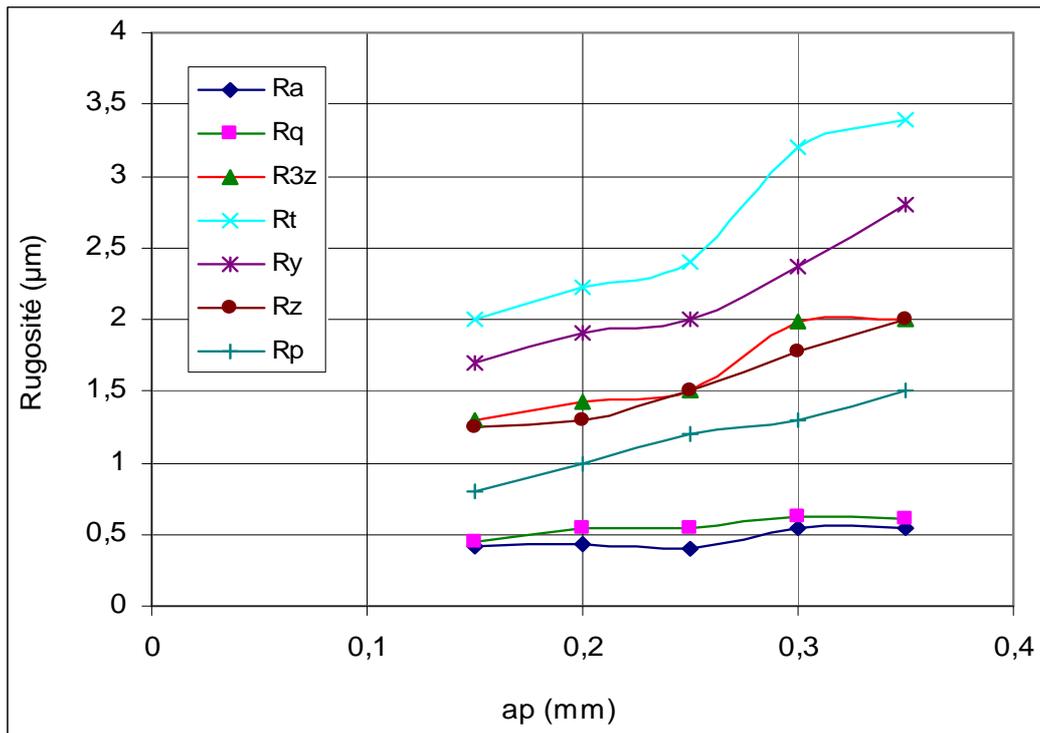
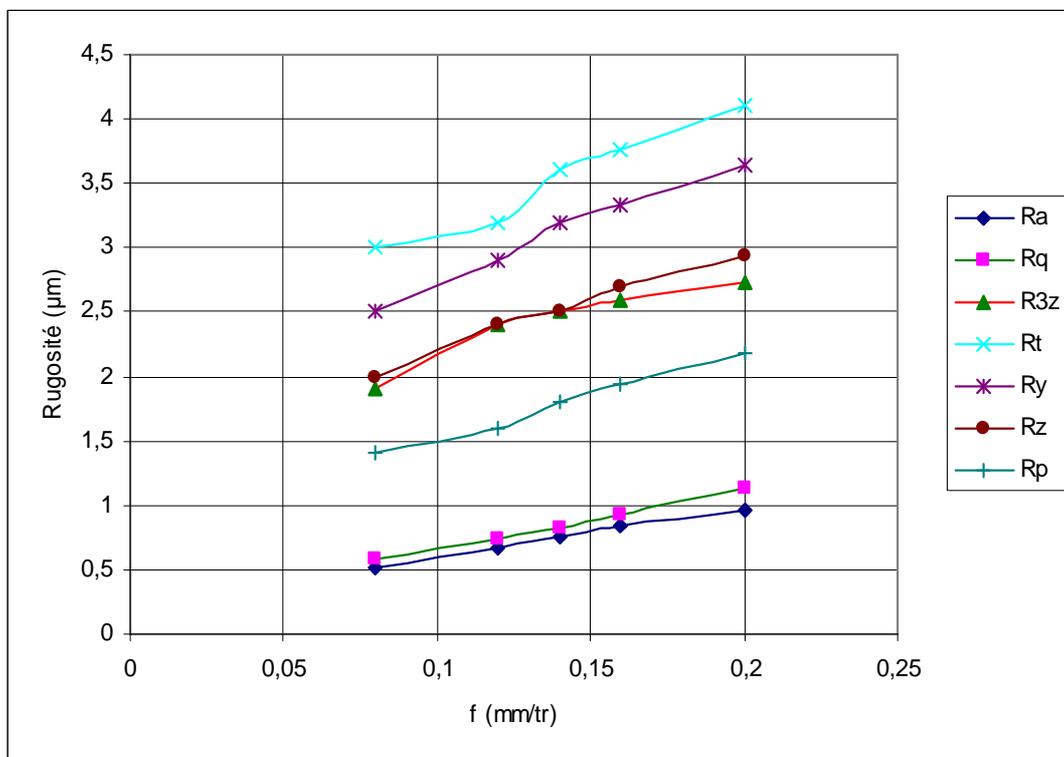


Fig. III-1: Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe pour la céramique composite CC670 ( $a_p = 0.15$  mm,  $f = 0.08$  mm/tr et  $L = 15$  mm)



**Fig. III-2: Evolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe pour la céramique composite CC670 ( $V_c = 110$  m/min,  $f = 0.08$  mm/tr et  $L = 15$  mm)**



**Fig. III-3: Evolution de la rugosité en fonction de l'avance pour la céramique composite CC670 ( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$  mm et  $L = 15$  mm)**

L'analyse des courbes montre que les paramètres de coupe ont une influence sur la rugosité des surfaces usinées. En effet, la figure III-1 montre que l'augmentation de la vitesse de coupe améliore l'état de surface Ra de 0.48  $\mu\text{m}$  à  $V_c=72$  m/min jusqu'à 0.32  $\mu\text{m}$  à  $V_c=144$  m/min qui est la plus basse valeur de rugosité enregistrée. A partir de la vitesse  $V_c = 144$  m/min, l'état de surface commence à se dégrader, on enregistre une valeur de Ra = 1.58  $\mu\text{m}$  à la vitesse de 285 m/min.

L'augmentation de la rugosité aux vitesses de coupe élevées peut être causée par l'apparition du phénomène de soudage des micros copeaux sur la surface de la pièce et l'accélération des mécanismes d'usure de l'outil céramique CC670.

La profondeur de passe a une influence moins considérable sur la rugosité. Comme le montre la figure III-2, on peut observer une légère augmentation de la rugosité Ra qui passe de la valeur de 0.41 $\mu\text{m}$  pour  $a_p = 0.15$  mm, à la valeur 0.55  $\mu\text{m}$  pour  $a_p = 0.35$  mm.

En réalité, la profondeur de passe peut influencer indirectement la rugosité des surfaces usinée en augmentant les efforts de coupe et par conséquent les vibrations. Ces vibrations peuvent à leur tour influencer la stabilité d'usinage.

L'influence de l'avance sur la rugosité est importante. Comme la montre la figure III-3, l'augmentation de ce paramètre entraîne une augmentation des différents critères de la rugosité. En effet, l'augmentation de l'avance de 0.08 à 0.12 mm/tr augmente la rugosité Ra de 0.51 à 0.77  $\mu\text{m}$ . La valeur maximale de la rugosité Ra est de 0.98  $\mu\text{m}$  pour une avance de 0.2 mm/tr. Aux grandes avances, l'augmentation de la rugosité est traduite par l'équation III.1.

$$\mathbf{Ra = f^2 / 32r} \dots\dots\dots\mathbf{(III.1)}$$

Les figures III-4, III-5 et III-6, montrent l'influence de la vitesse de coupe, de la profondeur de passe et de l'avance sur la rugosité Ra. On remarque que l'avance a une influence plus significative par rapport aux autres paramètres de coupe. En effet, on remarque qu'une augmentation de 200% de l'avance, provoque une augmentation de Ra  $\mu\text{m}$  de 161%, d'un autre côté, l'augmentation de la profondeur de passe de 200%, provoque une augmentation de Ra de 134.15%, la même augmentation de la vitesse de coupe a provoqué des variation plus faibles de rugosité 66.6 %. Donc l'avance reste le facteur le plus influent sur la rugosité des surfaces usinées de l'Inconel 718.

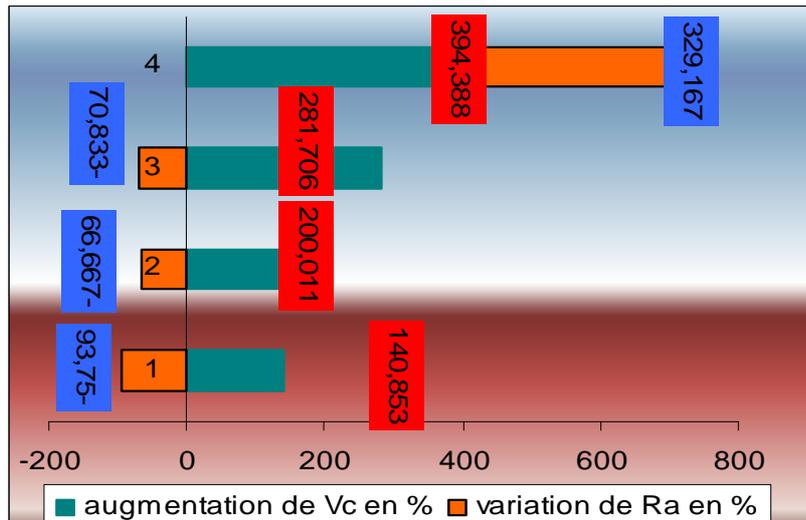


Fig.III-4: Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité Ra( $\mu\text{m}$ ).

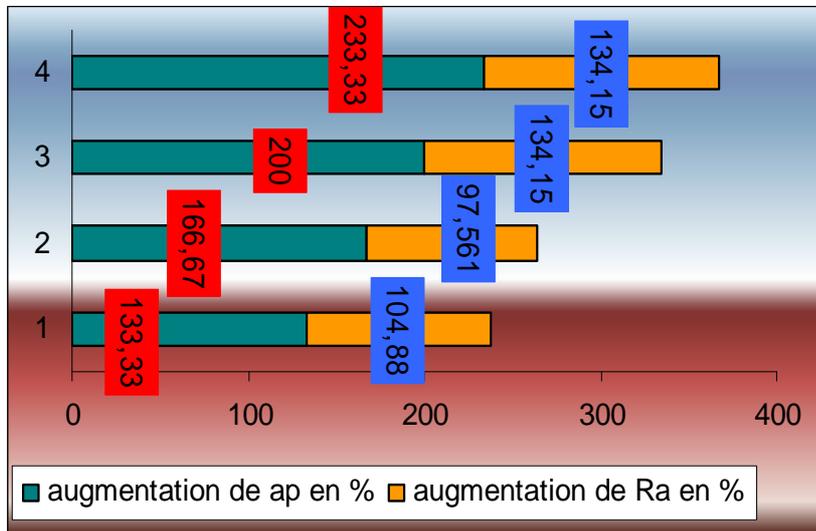


Fig. III-5: Influence de la profondeur de passe sur la rugosité Ra( $\mu\text{m}$ ).

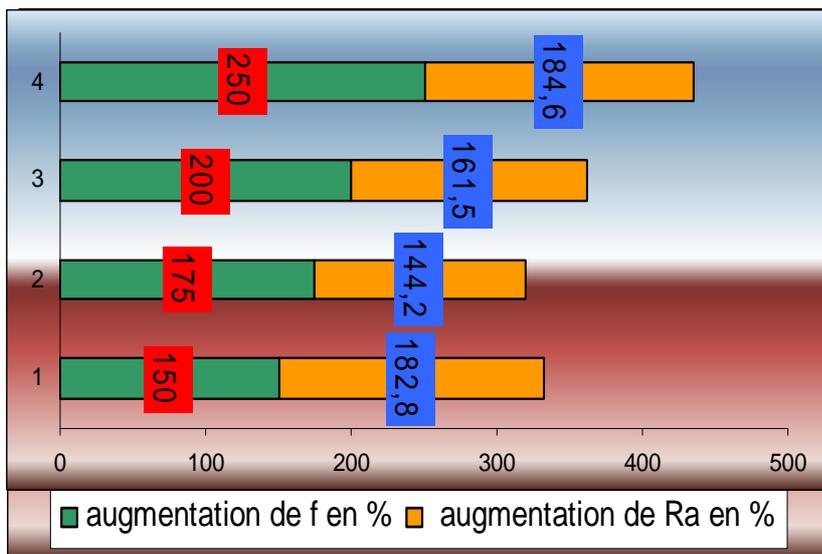
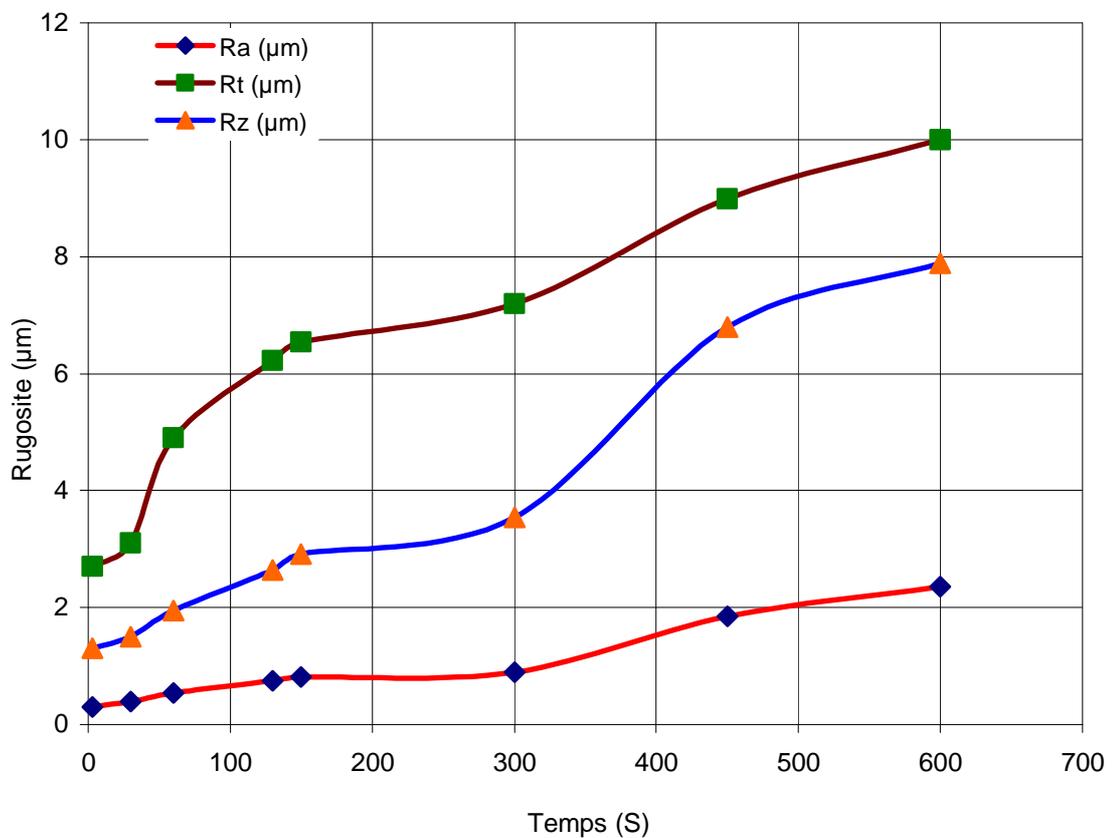


Fig. III-6: Influence de l'avance sur la rugosité Ra( $\mu\text{m}$ )

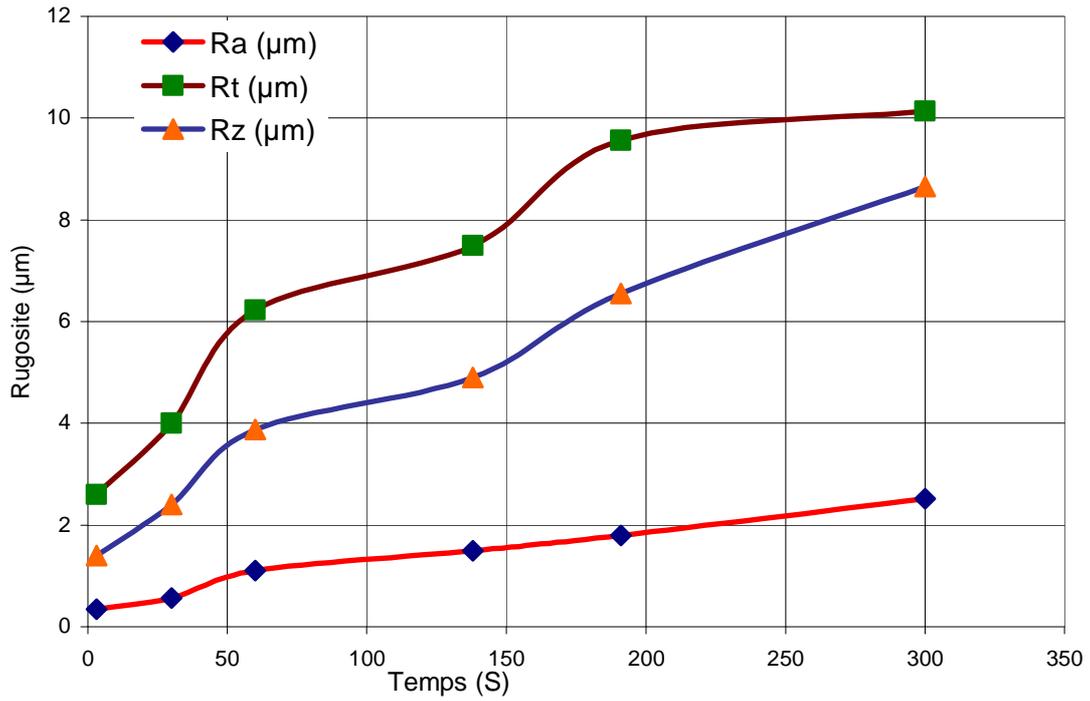
### III.3: Evolution de la rugosité en fonction du temps

Les figures III-7, III-8, III-9 et III-10 présentent les résultats de l'évolution de la rugosité en fonction du temps et cela pour différents matériaux de coupe qui sont : la céramique composite CC670, la céramique mixte CC650, le carbure revêtu GC1025 et le carbure non revêtu H13A. Les conditions adoptées pour cette série d'essais sont :

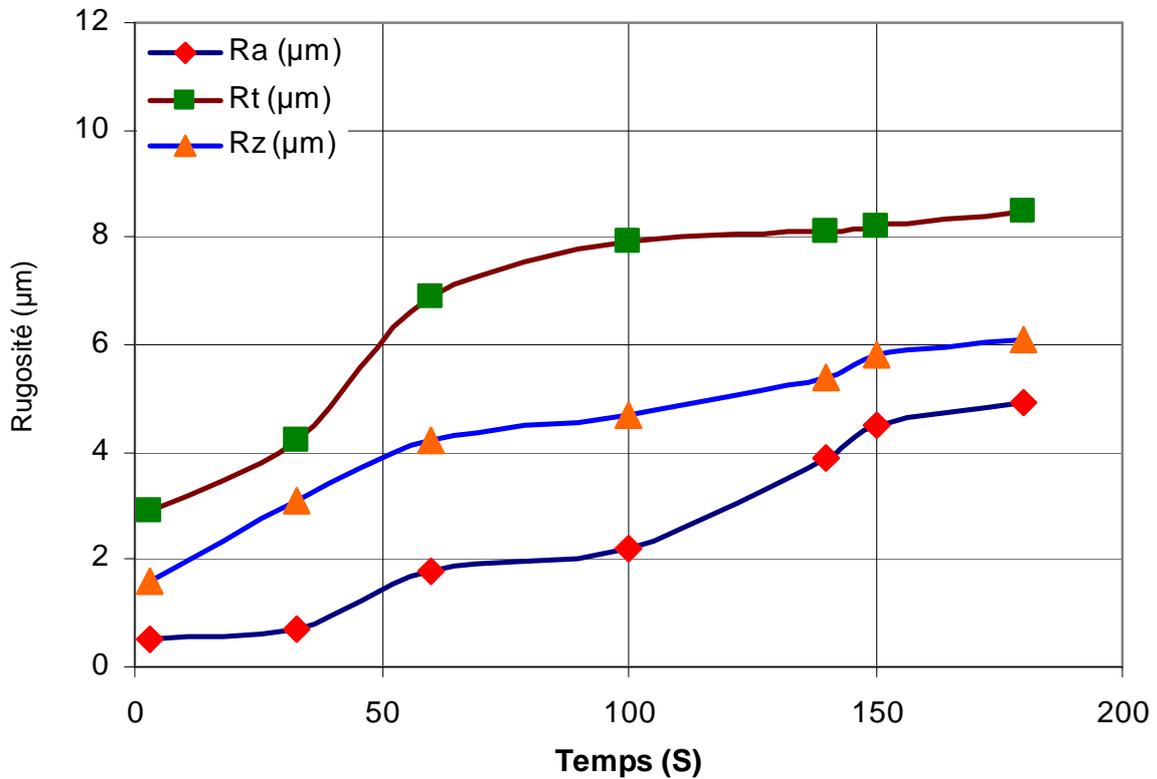
- La vitesse de coupe  $V_c = 110$  m/min.
- La profondeur de passe  $a_p = 0,15$  mm.
- L'avance  $f = 0,08$  mm/tr.



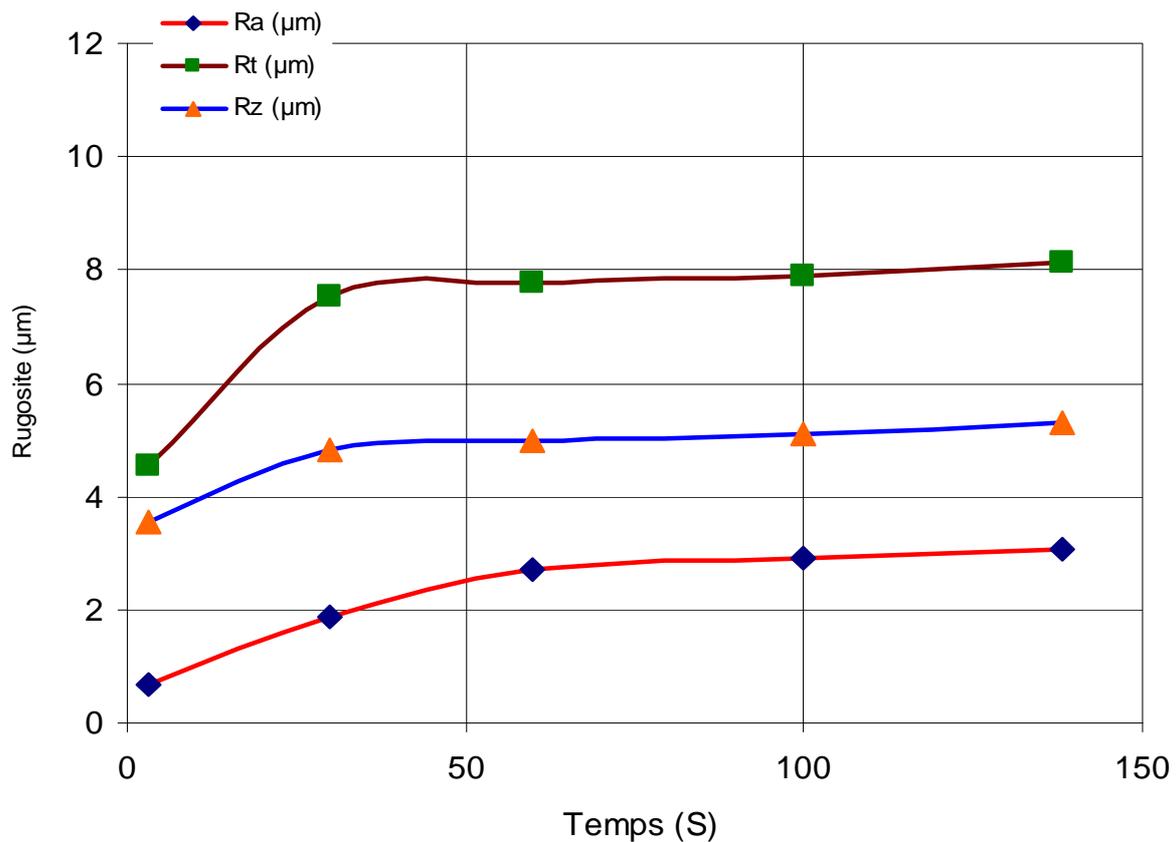
**Fig. III-7: Evolution de la rugosité en fonction du temps pour la céramique composite CC670**  
( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$  mm et  $f = 0.08$  mm/tr)



**Fig. III-8: Evolution de la rugosité en fonction du temps pour la céramique mixte CC650**  
 ( $V_c = 110 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0.15 \text{ mm}$  et  $f = 0.08 \text{ mm/tr}$ )



**Fig. III-9: Evolution de la rugosité en fonction du temps pour le carbure revêtu GC1025**  
 ( $V_c = 110 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0.15 \text{ mm}$  et  $f = 0.08 \text{ mm/tr}$ )



**Fig. III-10: Evolution de la rugosité en fonction du temps pour H13A**  
 ( $V_c = 110 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0.15 \text{ mm}$  et  $f = 0.08 \text{ mm/tr}$ )

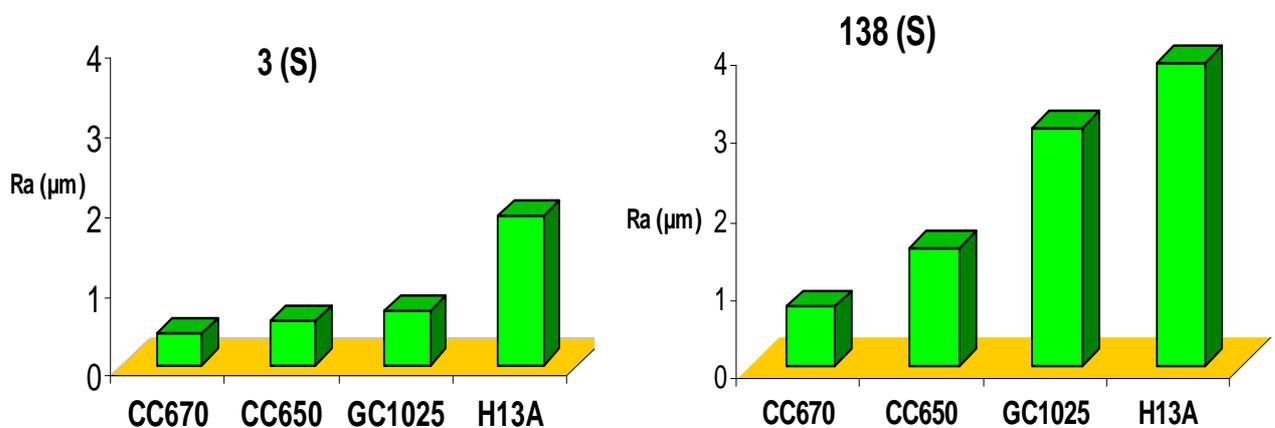
Comme le montre les figures III-7, III-8, III-9 et III-10, les rugosités de surface Ra enregistrées sont : 0.75, 1.5, 3.05 et 3.88  $\mu\text{m}$ , pour le cas de la céramique composite CC670, la céramique mixte CC650, le carbure revêtu GC1025 et le carbure non revêtu H13A respectivement pour un temps de coupe de 138 s.

La figure III-7 montre que la surface usinée par la céramique CC670, a la plus basse rugosité, tandis que, le carbure non revêtu H13A (Fig III-10) a la plus grande rugosité. L'analyse des courbes montre que les quatre matériaux de coupe ont des rugosités très proches au début de l'usinage.

La figure III-11, illustre la rugosité enregistrée en deux temps différents, 3 et 138 s, pour les différents matériaux de coupe : céramique composite CC670, céramique mixte CC650, le carbure revêtu GC1025 et le carbure non revêtu H13A. Cette figure montre que la céramique composite CC670 a toujours les plus faibles valeurs de rugosité Ra. En effet, pour les 3 premières secondes, les

valeurs de rugosité sont :  $Ra = 0,39 \mu\text{m}$  pour le cas de la céramique composite CC670,  $Ra = 0.56 \mu\text{m}$  pour la céramique mixte CC650,  $Ra = 0.68 \mu\text{m}$  pour le cas du carbure revêtu GC1025 et  $Ra = 1.88 \mu\text{m}$  pour le cas du carbure H13A.

Aussi, pour un temps de coupe de 138 s, l'état de surface obtenu avec la céramique composite CC670 reste meilleure que ceux observés avec les autres matériaux de coupe. En effet, les valeurs de la rugosité sont :  $Ra = 0.75 \mu\text{m}$  pour le cas de la céramique composite CC670,  $Ra = 1.5 \mu\text{m}$  pour la céramique mixte CC650,  $Ra = 3.05 \mu\text{m}$  pour le cas du carbure revêtu GC1025 et  $Ra = 3.88 \mu\text{m}$  pour le cas du carbure H13A.



**Fig. III-11: Evolution de la rugosité en fonction du temps pour 4 matériaux à outil de coupe, mesurée en 2 temps. a) 3 (S), b) 138 (S) ( $V_c = 110 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0.15 \text{ mm}$  et  $f = 0.08 \text{ mm/tr}$ )**

Généralement, L'Inconel 718 contient les grains durs tels que WC et WN, et les phases  $\gamma$  et  $\gamma''$ . Ces grains accélèrent les mécanismes d'usure aux temps de coupe élevés. Aussi, La couche écrouée dans la surface superficielle de l'Inconel 718 et l'écoulement du copeau, agissent sur l'arête de coupe et la surface d'attaque de l'outil. En conséquence, ce phénomène conduit à une augmentation de la rugosité surtout aux temps de coupe élevés.

Les résultats montrent clairement que la meilleure qualité de surface est obtenue lors de l'usinage de l'Inconel 718 avec la céramique composite CC670. Cette amélioration est produite par :

1. La diminution de la dureté de la pièce provoquée par les températures générées au cours de l'usinage a pour effet de

diminuer les efforts de coupe et par conséquent l'usinage devient stable.

2. L'aptitude des céramiques de conserver leurs caractéristiques mécaniques et chimiques par rapport aux carbures, aux températures élevées ce qui a pour effet de retarder l'usure.

### III.4: Evolution de la rugosité en fonction de l'usure de la céramique composite C670

La figure III-12 présente l'évolution des différents critères de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille VB lors de l'usinage de l'Inconel 718 par la céramique composite CC670.

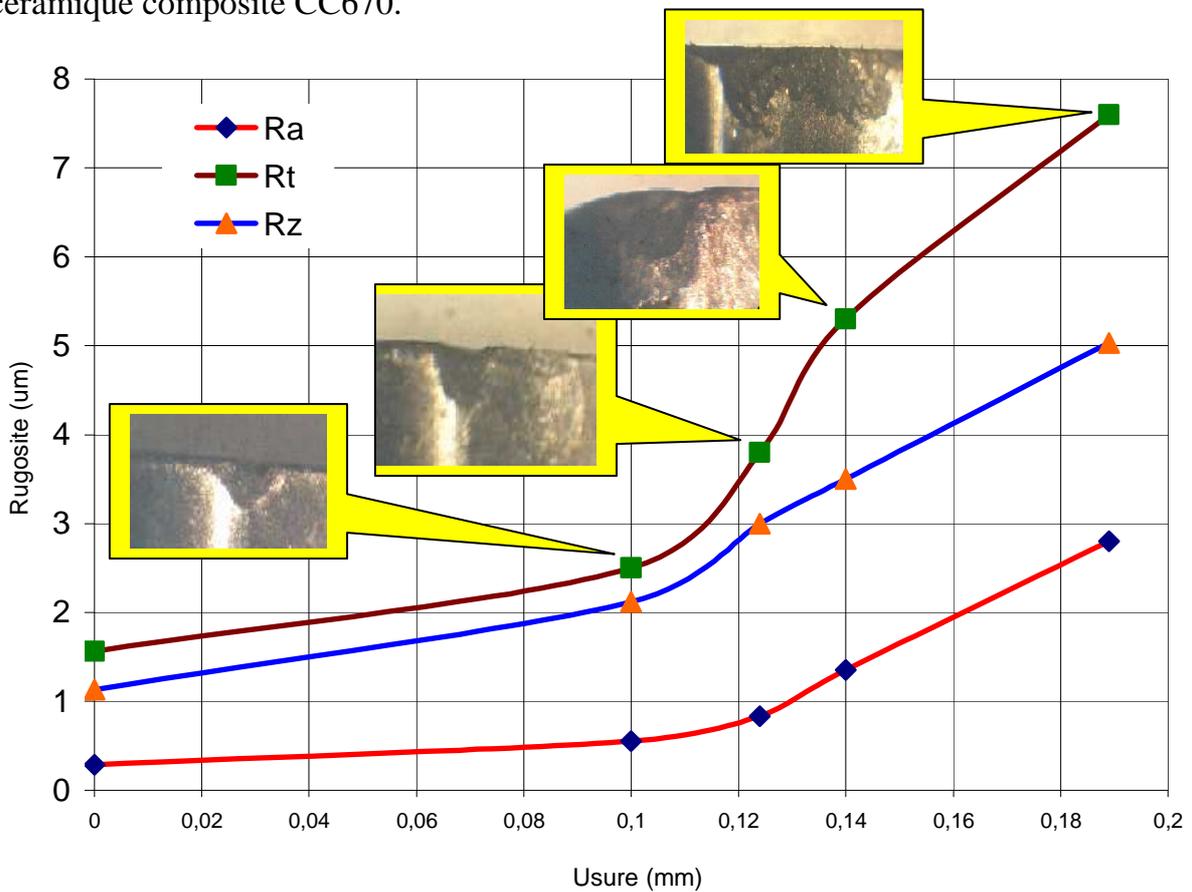


Fig. III-12: Evolution de la rugosité en fonction de l'usure pour la céramique composite CC670  
( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$  mm et  $f = 0.08$  mm/tr)

On remarque une pente d'évolution croissante de Ra, Rt, Rz. En effet, une augmentation de VB en 100 % dans l'intervalle d'usure [0.1 à 0.198] mm, mène à une augmentation de 965 % de Ra, 487 % de Rt, 442 % de Rz. Cette augmentation devient plus rapide dans l'intervalle d'usure [0.14 à 0.198] mm.

Dans cet intervalle, les valeurs de la rugosité deviennent plus grandes que celles enregistrées pour le premier intervalle [0.1 à 0.14] mm. Ce phénomène peut être causé par l'augmentation de la surface de frottement et de la température de coupe, qui conduit au phénomène de copeau adhérent sur la pièce et l'arête rapportée sur le bec de l'outil.

L'augmentation de l'usure dans l'intervalle [0.14 à 0.198] mm mène à une augmentation accélérée des différents critères de la rugosité. On enregistre des valeurs de 2.8  $\mu\text{m}$  pour  $R_a$ , 7.6  $\mu\text{m}$  pour  $R_t$  et 5.03  $\mu\text{m}$  pour  $R_z$ . Cela peut être expliqué par l'accélération de l'usure de l'outil qui conduit à une augmentation de la température de coupe à cause des frottements internes. Ajoutés à cela la faible conductivité thermique de l'inconel 718 et la concentration de la chaleur dans une zone très localisée ainsi que le phénomène de refoulement de matière qui devient plus probable avec l'augmentation de la surface de contact et l'usure de l'arête de coupe. Tout cela favorise la dégradation de l'état de surface.

En conclusion, on peut dire que l'état de surface est affecté aussi par les caractéristiques mécaniques du couple outil- matière :

- D'une part : la pièce présente une certaine ductilité qui augmente avec l'augmentation de la température.
- D'autre part : la résistance à l'usure de l'outil de coupe aux inclusions dures dans la pièce, qui ont pour effet de dégrader et émousser l'outil de coupe sous forme de micros arrachements.

L'équation (III-1) représente la formule générale pour le calcul de la rugosité théorique, on remarque que l'augmentation du rayon du bec de l'outil et la diminution de l'avance améliorent l'état de surface, mais cette équation présente plusieurs inconvénients :

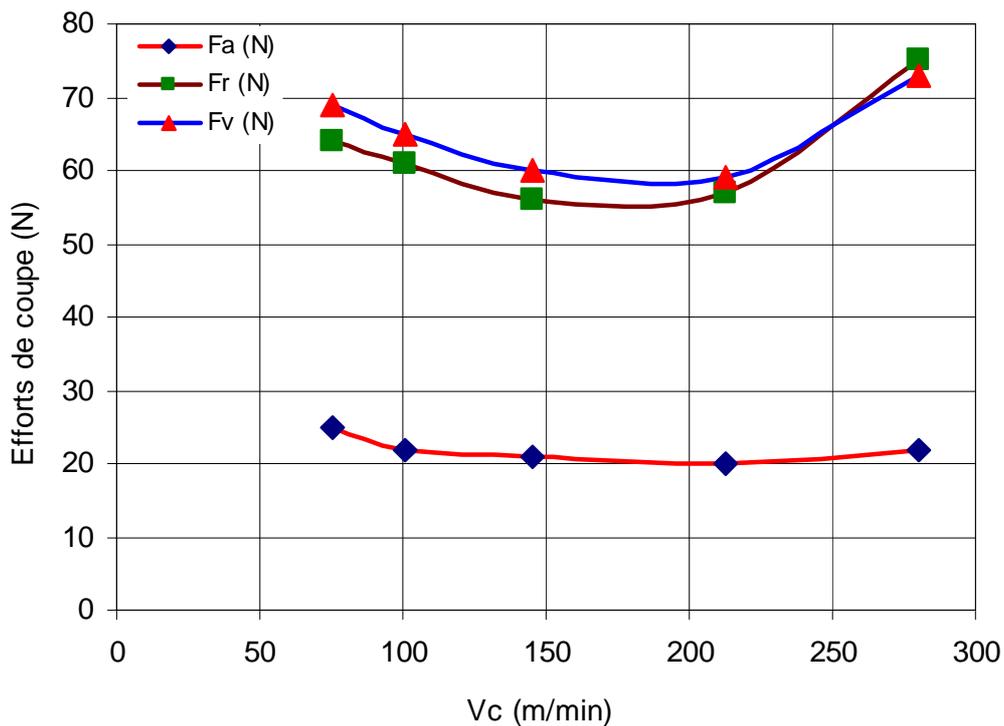
1. manque de termes représentatifs des caractéristiques du matériau usiné.
2. manque de termes représentatifs des caractéristiques du matériau de l'outil.

Dans notre cas, une augmentation du rayon du bec ( $r$ ) mène à une augmentation de la surface attaquée par les inclusions abrasives de l'Inconel 718.

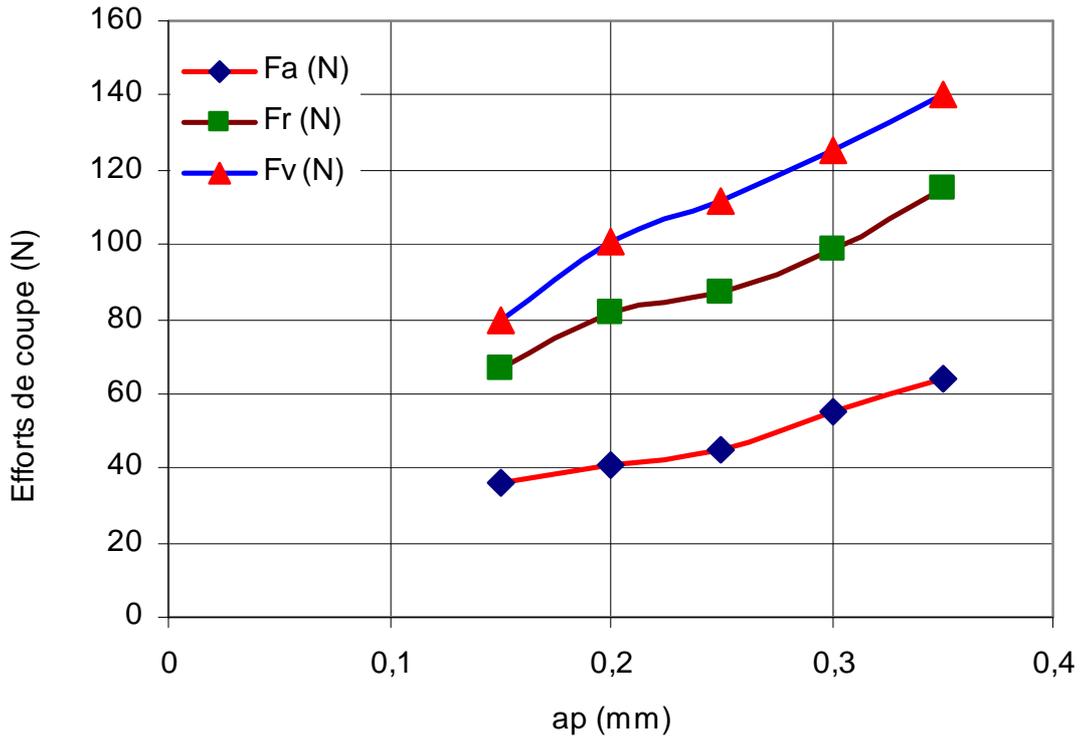
Cela a pour effet l'augmentation de la surface de frottement entre l'outil et la pièce, ce qui a pour conséquence une augmentation importante des efforts de coupe et la rupture catastrophique de l'outil qui va influencer l'état de surface.

### III.5: Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres de coupe

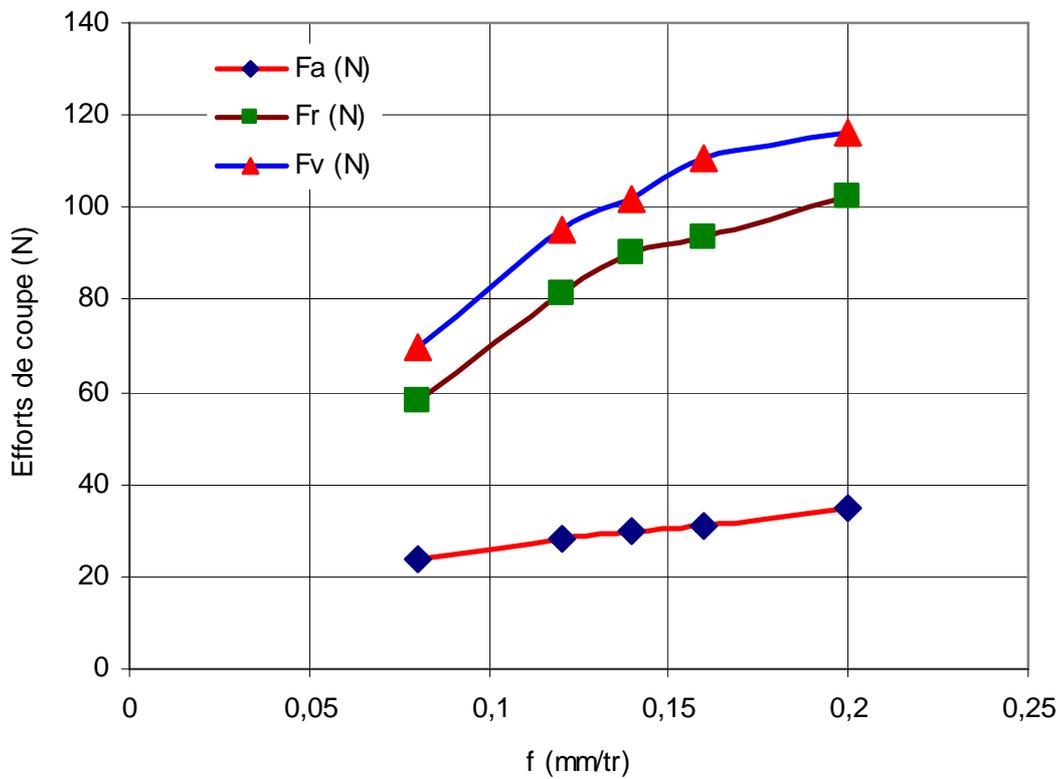
Les figures III-13, III-14 et III-15 expriment l'influence des éléments du régime de coupe sur les efforts de coupe générés lors de l'usinage de l'Inconel 718 par la céramique CC670.



**Fig. III-13: Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour la céramique CC670 ( $a_p = 0.15$  mm,  $f = 0.08$  mm/tr et  $L = 15$  mm)**



**Fig. III-14: Evolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe pour la céramique CC670 ( $V_c = 110$  m/min,  $f = 0.08$  mm/tr et  $L = 15$  mm)**



**Fig. III-15: Evolution de la rugosité en fonction de l'avance pour la céramique CC670 ( $a_p = 0.15$  mm,  $V_c = 110$  m/min et  $L = 15$  mm)**

- ***Influence de la vitesse de coupe.***

Comme le montre la figure III-13, la vitesse de coupe a une influence sur les efforts de coupe. En effet, l'augmentation de la vitesse de coupe entraîne une diminution des trois composantes  $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_v$ . Cette augmentation de la vitesse de coupe, conduit à une augmentation de la température générée dans la zone de coupe ce qui réduit considérablement la dureté de la pièce et facilite ainsi l'opération d'enlèvement de matière.

Cette tendance devient plus lente lorsque la vitesse de coupe devient plus proche de 200m/min. A partir de la vitesse de coupe  $V_c = 200$  (m/min), la variation des trois composantes devient positive.

Pour les vitesses de coupe les plus élevées, l'usure devient plus rapide, causant ainsi l'augmentation des efforts de coupe.

Les conséquences pratiques de l'augmentation de la vitesse de coupe de 60 à 200 m/min, conduisent à une diminution des trois composantes de l'effort de coupe ( $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_v$ ) successivement de (20, 18 et 14.7) %

- ***Influence de la profondeur de passe.***

L'évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe prend un seul sens de variation. Comme le montre la figure III-14, l'accroissement des trois composantes des efforts reste continu jusqu'à une valeur maximale de  $F_v = 140$  N pour une profondeur de passe de 0.35 mm. Donc, l'augmentation de la profondeur de passe conduit à l'augmentation de la section du copeau et la puissance nécessaire pour l'enlèvement de matière ce qui implique des efforts de coupe plus élevés.

Les conséquences pratiques de l'augmentation de la profondeur de passe de 100 à 300 (%), conduisent à une augmentation des trois composantes de l'effort de coupe  $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_v$  successivement de (148, 112 et 115) %

- ***Influence de l'avance.***

Comme le montre la figure III-15, l'effet de l'avance reste moins important que celui de la profondeur de passe. En effet, une augmentation de l'avance de 0.08 à 0.2 mm/tr entraîne une augmentation jusqu'à 120 N pour  $F_v$ , 105 N pour  $F_r$  et 34 N pour  $F_a$ . Cette augmentation des efforts de coupe est expliquée par l'augmentation de la section du copeau.

En conclusion, la profondeur de passe représente le paramètre principal qui influe sur les efforts de coupe.

### **III.6: Evolution des efforts spécifiques en fonction des paramètres de coupe**

#### ***a) Influence de la vitesse de coupe***

La pression de coupe, aussi appelée effort spécifique, est une grandeur définie comme étant l'effort de coupe par unité de surface,  $K_c = F_v/(f \cdot a_p)$ . La figure III-16 illustre les courbes de l'évolution des pressions de coupe en fonction de la vitesse de coupe  $V_c$  lors du tournage de l'Inconel 718 par la céramique composite CC670. Il ressort que l'augmentation de la vitesse de coupe, conduit à une diminution des pressions de coupe. A cet effet, on distingue trois périodes d'évolution différentes:

- La première période est caractérisée par une diminution importante de l'effort spécifique qui correspond à un chargement important de l'arête de coupe. Les pressions enregistrées sont élevées dans cette zone, à titre d'exemple, à  $V_c = 60$  m/min, on enregistre des pressions  $K_{ca}$ ,  $K_{cr}$  et  $K_{cv}$  de l'ordre de (2083, 5333 et 5750) N/mm<sup>2</sup>, la fin de cette période conduit à la détermination de la vitesse minimale du domaine d'utilisation du couple outil-matière.
- La deuxième période est caractérisée par une plage où les pressions de coupe se stabilisent, le décrochage se fait à partir de 220 m/min. en pratique cette zone constitue la plage optimale d'utilisation de l'arête de coupe, elle se termine par la vitesse de coupe maximale. A  $V_c = 213$  m/min, les pressions spécifiques sont à leurs bas niveaux, ce qui est préférable à l'outil. On enregistre des pressions de coupe  $K_{ca}$ ,  $K_{cr}$  et  $K_{cv}$  de l'ordre de (1666, 4750 et 4916) N/mm<sup>2</sup>.
- La troisième période est caractérisée par une augmentation importante de l'effort spécifique qui correspond à un chargement très important de l'arête de coupe. Les pressions de coupe sont les plus élevées dans cette zone on enregistre des pressions de coupe  $K_{ca}$ ,  $K_{cr}$  et  $K_{cv}$  de l'ordre de (1833, 6250 et 6083) N/mm<sup>2</sup> à  $V_c = 280$  m/min.

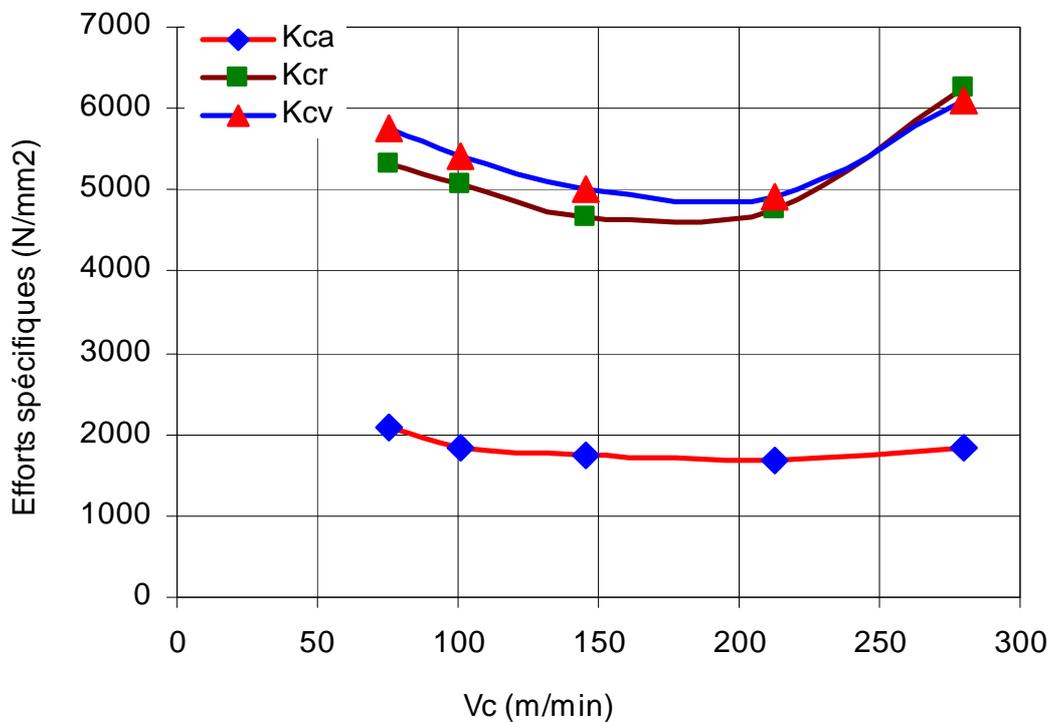
#### ***b) Influence de l'avance***

La figure III-17 présente l'évolution des pressions de coupe en fonction de l'avance  $f$ . On remarque qu'avec l'augmentation de l'avance, les pressions de coupe

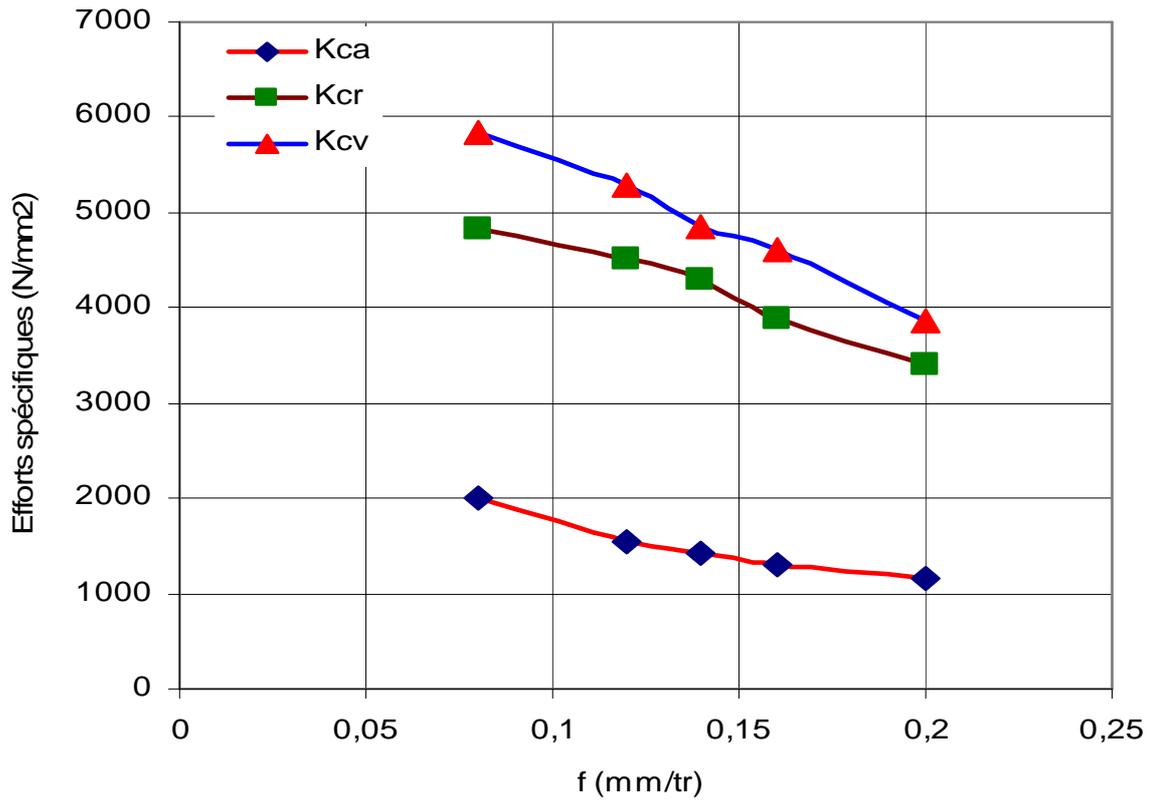
ont un comportement décroissant similaire à celui de la vitesse de coupe dans sa première période. Pour les faibles avances, on enregistre des pressions extrêmement élevées. Avec une avance de 0.08 mm/tr, les pressions de coupe  $K_{ca}$ ,  $K_{cr}$  et  $K_{cv}$  sont de l'ordre de (2000, 4833 et 5833) N/mm<sup>2</sup>. Avec l'augmentation de l'avance jusqu'à 0.2 mm/tr, les pressions chutent successivement de 45 %, 28 % et 32 %. Ici, un compromis reste à faire entre la diminution des pressions de coupe et la dégradation de l'état de surface due à l'élévation de l'avance.

**b) Influence de la profondeur de passe**

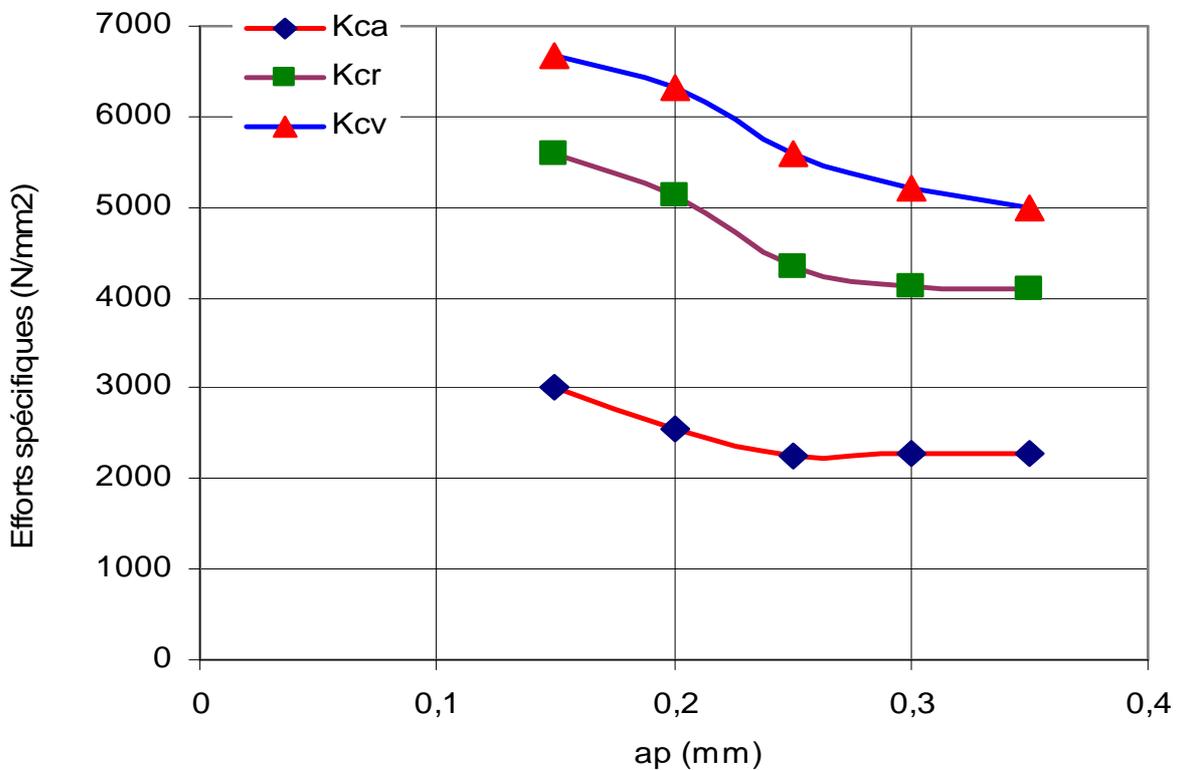
La figure III-18 présente l'évolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe  $a_p$ . Avec l'augmentation de cette dernière, on remarque une diminution des pressions de coupe jusqu'à  $a_p = 0.3$  mm. Au delà de cette valeur, on remarque une stabilité accompagnée avec une légère diminution de la pression  $K_{cv}$ . L'analyse des résultats montre qu'aux faibles valeurs de la profondeur de passe on enregistre des pressions élevées ( $a_p = 0.15$  mm ;  $K_{cv} = 6666$  N/mm<sup>2</sup>). A cet effet, il est déconseillé de travailler aux faibles valeurs de la profondeur de passe, parce que l'arête de coupe subie des pressions énormes qui peuvent l'endommager.



**Fig. III-16: Evolution des efforts spécifiques en fonction de la vitesse de coupe pour la céramique composite CC670 ( $a_p = 0.15$  mm,  $f = 0.08$  mm/tr et  $L = 15$  mm)**



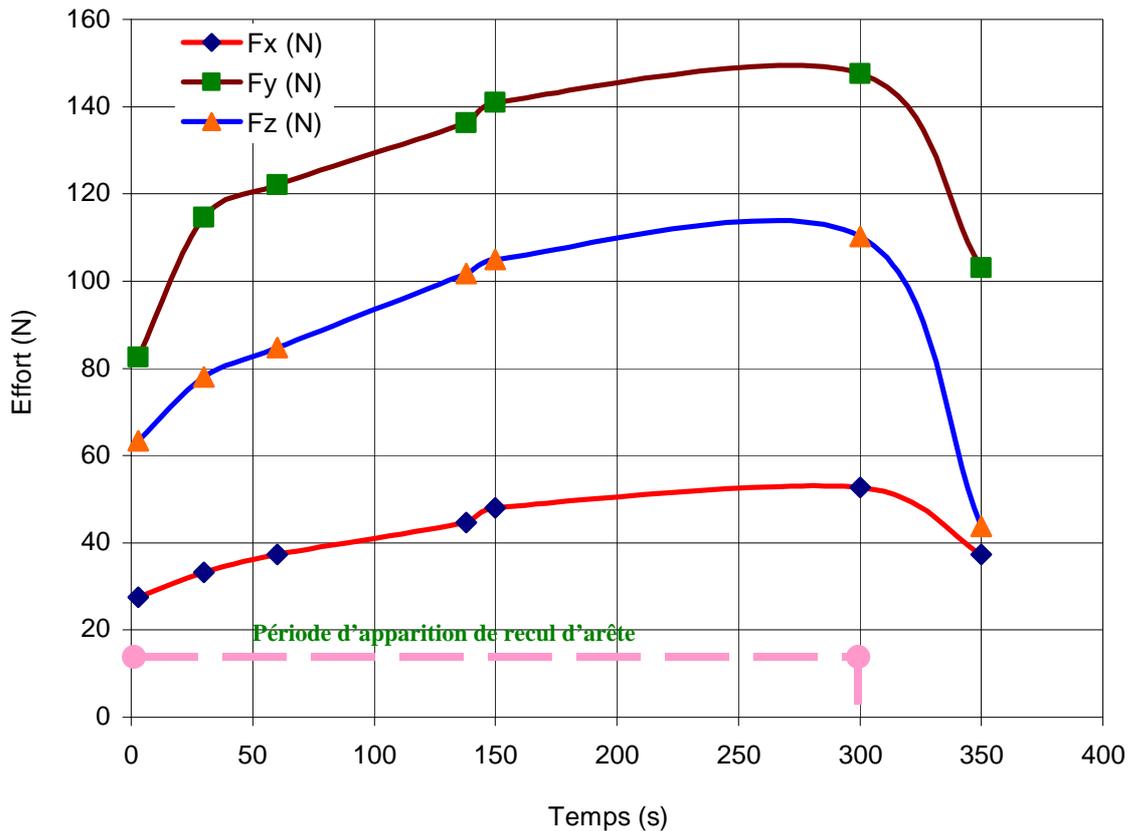
**Fig. III-17: Evolution des efforts spécifiques en fonction de l'avance pour la céramique composite CC670 ( $V_c = 110$  m/min ,  $a_p = 0.15$  mm et  $L = 15$  mm)**



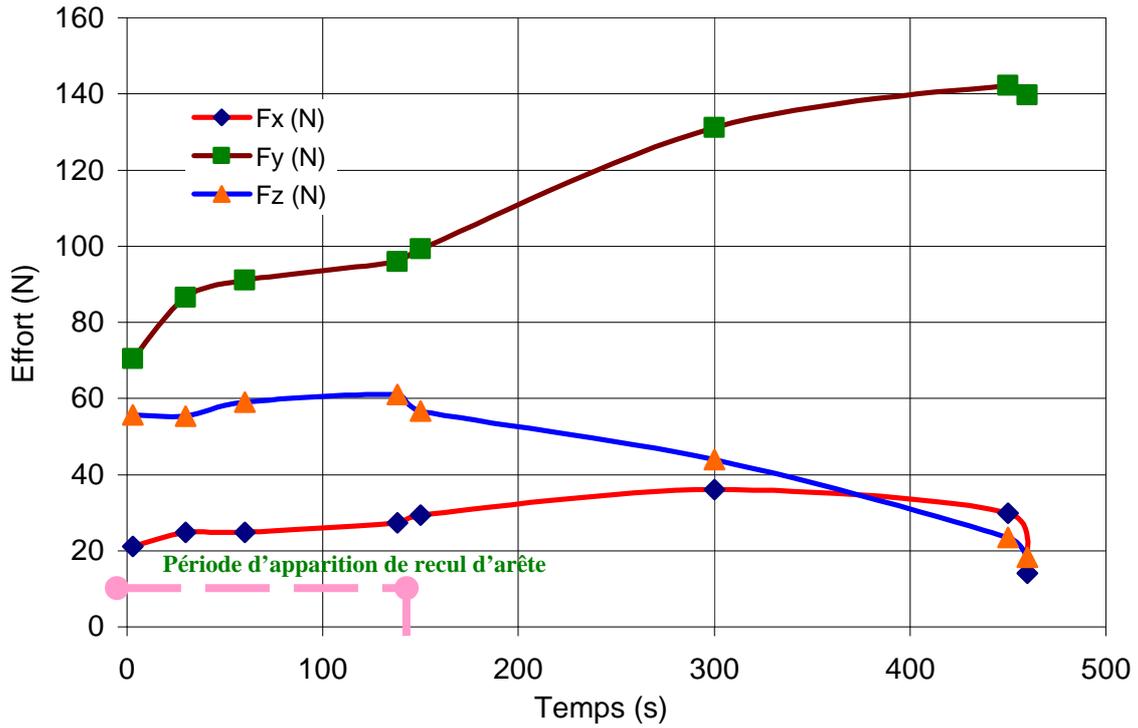
**Fig. III-18: Evolution des efforts spécifiques en fonction de la profondeur de passe pour la céramique composite CC670 ( $V_c = 110$  m/min,  $f = 0.08$  mm/tr et  $L = 15$  mm)**

### III.7: Evolution de des efforts de coupe en fonction du temps

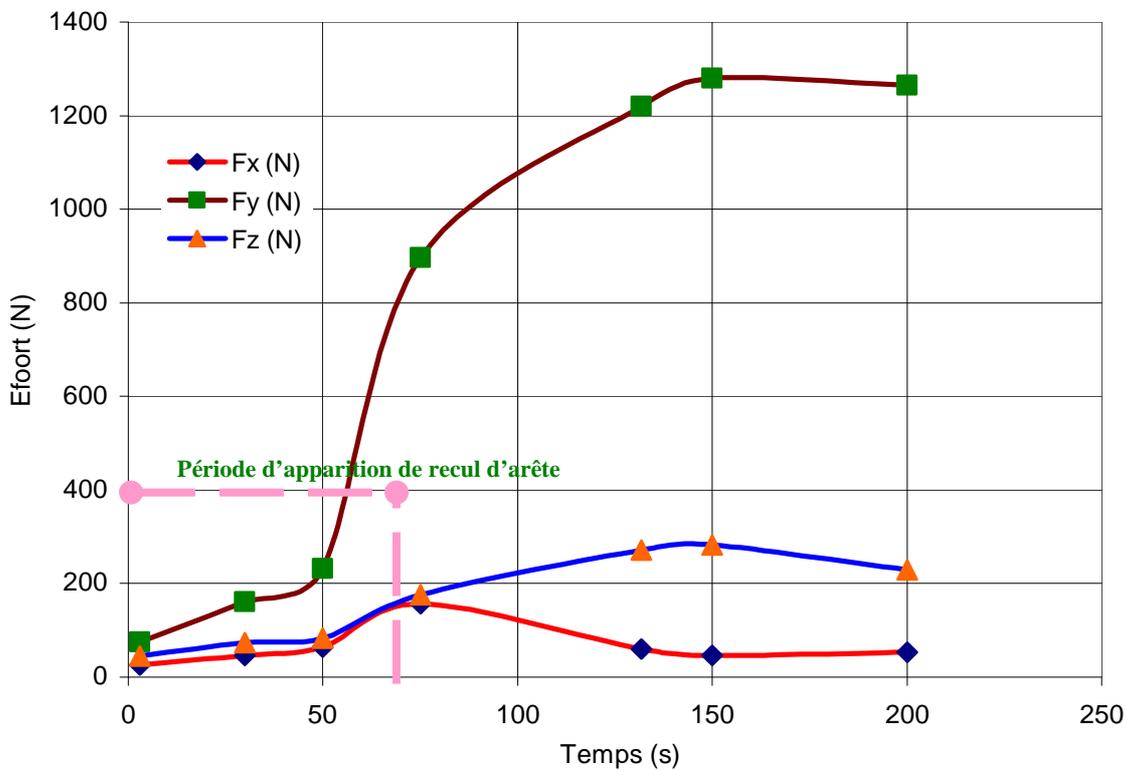
Les figures III-19 III-20, III-21, III-22 présentent l'influence du temps sur les composantes des efforts de coupe obtenues lors de l'usinage de l'Inconel 718 par la céramique composite CC670, la céramique mixte CC650, le carbure revêtu GC1025 et le carbure non revêtu H13A.



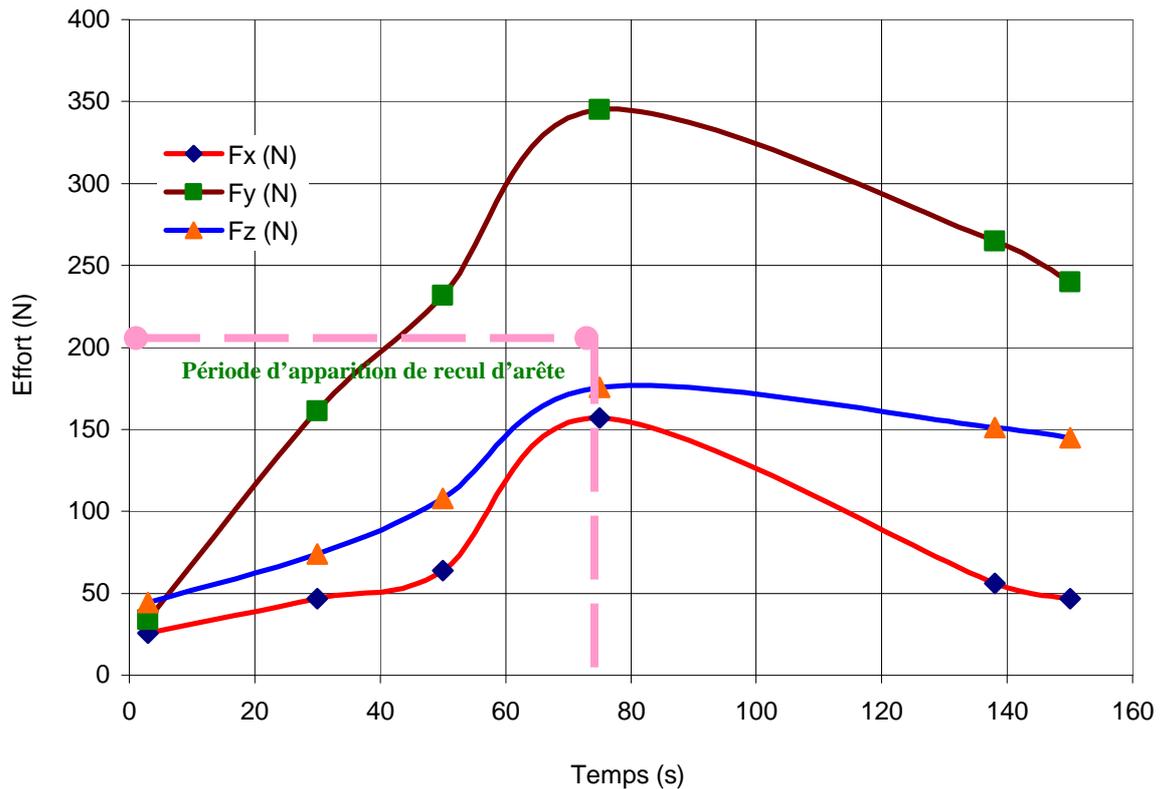
**Fig. III-19: Evolution de l'effort de coupe en fonction du temps pour la céramique CC670**  
( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$  mm et  $f = 0.08$  mm/tr)



**Fig. III-20: Evolution de l'effort de coupe en fonction du temps pour la céramique CC650**  
 ( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$  mm et  $f = 0.08$ . mm/tr)



**Fig. III- 21: Evolution de l'effort en fonction du temps pour le carbure revêtu GC1025 ( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$  mm et  $f = 0.08$ . mm/tr)**



**Fig. III-22: Evolution de l'effort en fonction du temps pour H13A**  
 ( $V_c = 110 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0.15 \text{ mm}$  et  $f = 0.08 \text{ mm/tr}$ )

Comme le montre ces figures, Les composantes principales des efforts de coupe sont dans les directions Y et Z, alors que la composante dans la direction X reste moins importante que les deux autres composantes. À l'étape initiale quand l'outil est entièrement engagé dans la coupe, les trois composantes ont des valeurs plus proches par rapport aux valeurs enregistrées à la fin de l'opération d'usinage.

Avec la progression de l'opération d'usinage, il y a une augmentation de l'effort de coupe dans la direction radiale, qui varie de 80 à 146 N pour le cas de la céramique CC670, de 70 à 150 N pour le cas de la céramique CC650, de 75 à 1280 N pour le cas du carbure revêtu GC1025 et de 35 à 348 N pour le cas du carbure non revêtu H13A. D'autre part, la composante maximale de l'effort de coupe dans la direction Z a subi une augmentation moins importante.

Ces augmentations sont causées par la présence de quelques propriétés mécaniques sévères comme la résistance à la pénétration de l'Inconel 718, dont le rôle est d'empêcher l'outil de pénétrer dans la pièce, causant ainsi un effort important suivant la direction radiale. C'est le phénomène le plus probable pour les premières dizaines

secondes, mais avec l'évolution du temps, ce phénomène devient plus significatif et plus dangereux surtout dans le cas du carbure GC1025 (Fig. III-21) où la surface de contact entre l'outil et la pièce augmente sous l'effet de l'usure de l'outil de coupe.

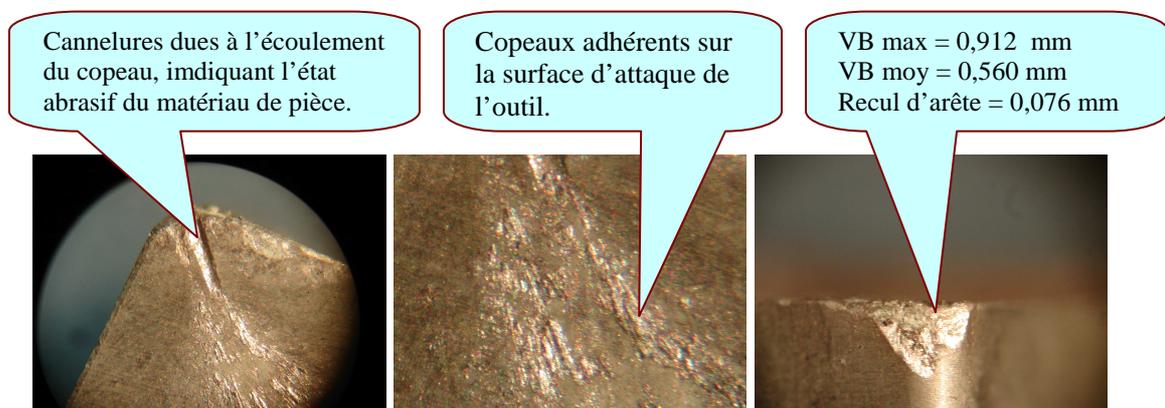
La plaquette en carbure revêtu GC1025 montre des valeurs des efforts de coupe 3,7 à 8,7 fois plus hautes que les autres plaquettes. Ces valeurs sont expliquées par la haute ténacité du carbure revêtu GC1025 par rapport aux autres plaquettes.

En comparant les composantes des efforts de coupe, il est évident que les outils en céramiques donnent des valeurs des efforts de coupe inférieures que celles des carbures. En effet, il est également évident que la coupe pour le cas des céramiques est plus stable que celle avec le carbure revêtu GC1025. Cette réduction des efforts de coupe peut être attribuée à deux facteurs :

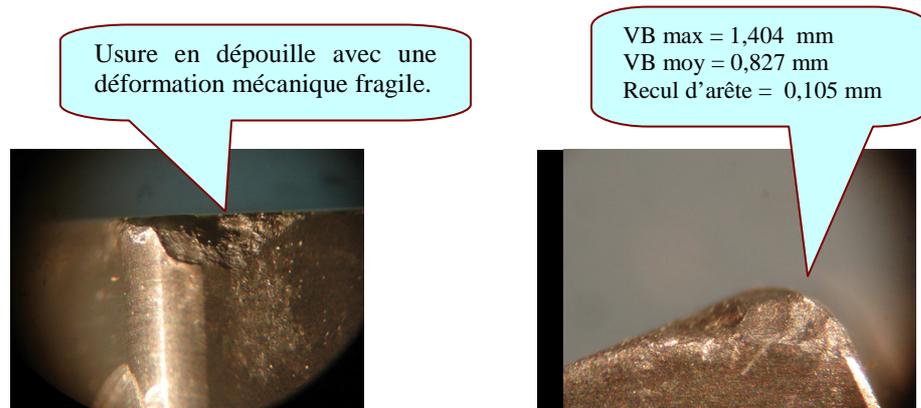
1. les caractéristiques mécaniques (dureté et résistance) et chimiques des céramiques élevées, qui contribuent à la réduction du taux d'usure et par conséquent les efforts de coupe.
2. la concentration de chaleur causée par les hautes températures, qui a comme conséquence la diminution de la dureté de la pièce ce qui réduit ainsi les efforts de coupe.

### III.7.1: Effet de l'usure

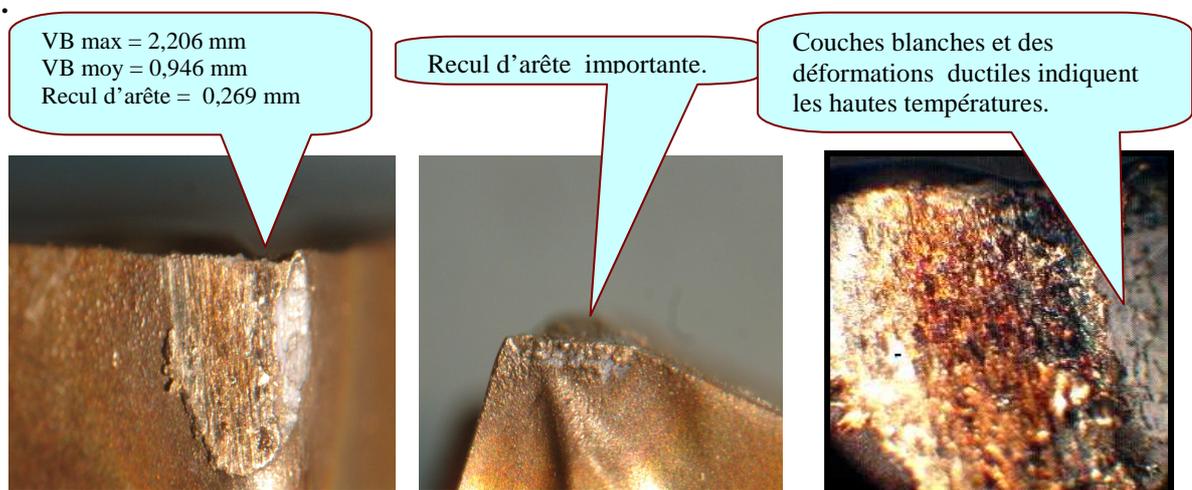
Les figures III-23, III-24, III-25 et III-26, montrent respectivement la morphologie de l'usure des plaquettes en céramique composite CC670, céramique mixte CC650, carbure revêtu GC1025 et le carbure non revêtu H13A, après des temps de coupe de (350, 460, 200 et 153) s respectivement.



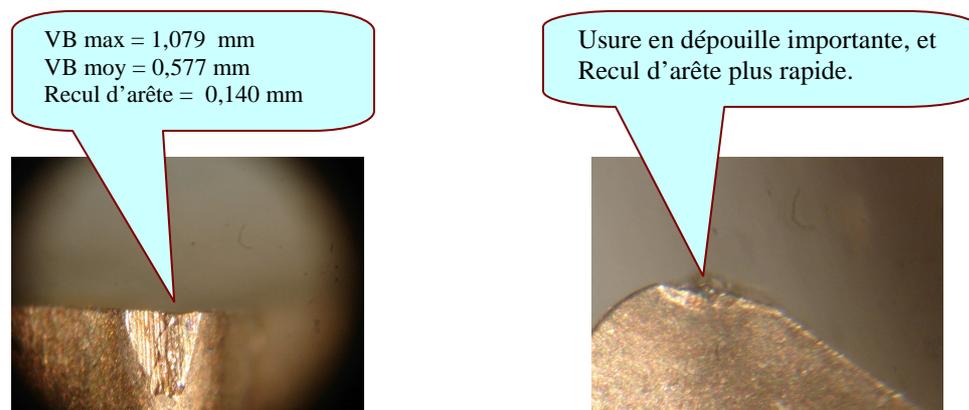
**Fig. III-23: Plaquette CC670 usée après 350 (S) d'usinage**  
( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$  mm et  $f = 0.08$ . mm/tr)



**Fig. III-24: Plaquette CC650 usée après 460 (S) d'usinage**  
 ( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$  mm et  $f = 0.08$ . mm/tr)



**Fig. III-25: Plaquette GC1025 usée après 200 (S) d'usinage**  
 ( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$  mm et  $f = 0.08$ . mm/tr)



**Fig. III-26: Plaquette H13A usée après 153 (S) d'usinage**  
 ( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$  mm et  $f = 0.08$ . mm/tr)

La figure III-25 montre que la plaquette en carbure revêtu GC1025 donne des résultats très mauvais en termes d'usure de l'outil ( $VB_{max} = 2,206$  mm) par rapport aux trois autres plaquettes.

La plaquette la plus adaptée à l'usinage de l'Inconel 718 est celle en céramique composite CC670 à cause de la progression lente du recul de l'arête de coupe qui se manifeste après 300 s alors que ce phénomène se manifeste après 140, 75 et 76 pour la céramique mixte CC650, le carbure revêtu GC1025 et le carbure non revêtu H13A respectivement. Aussi, seule la plaquette CC670 a gardé une évolution stable des efforts de coupe jusqu'à une période de 325 s. Par contre, pour la plaquette CC650, l'usure se manifeste à partir de 200 s, 75 s pour le carbure revêtu GC1025 et 75 s pour le carbure non revêtu H13A.

### **III.7.2: Etude du changement de sens d'influence de l'effort résultant**

Le sens d'influence de l'effort de coupe résultant a une grande importance dans l'étude des manifestations des opérations d'usinage comme l'usure des outils de coupe en tant que paramètre de sortie influençant le processus de coupe complet.

La figure III-27 illustre les relations géométriques entre les différentes composantes de l'effort de coupe. A partir de cette figure, on peut extraire les différentes relations citées aux équations III-2, III-3 et III-4.

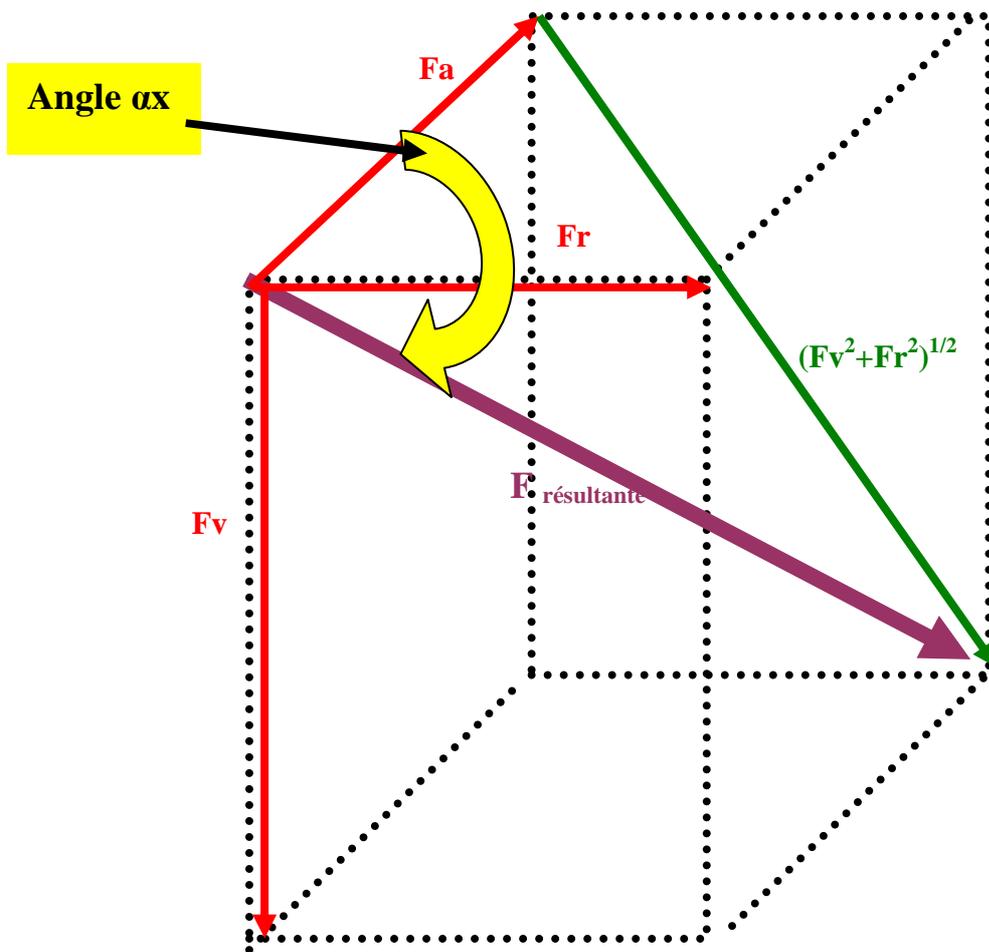


Fig. III-27: Relations entre les différentes composantes de l'effort de coupe

• Conclusions géométriques.

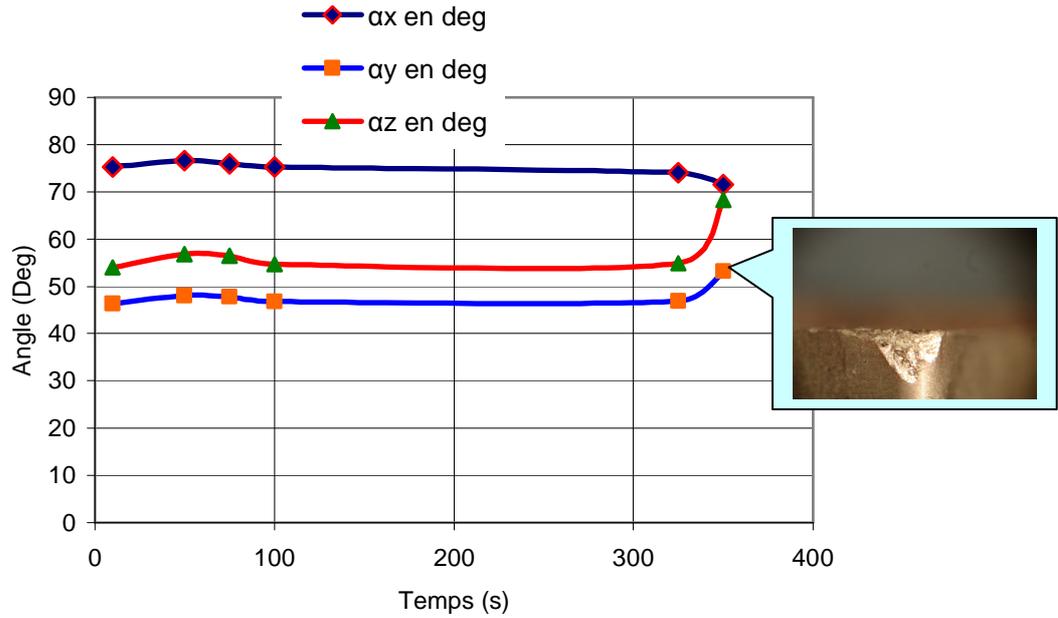
$$\text{Sin}\alpha_a = (\text{Fr}^2 + \text{Fv}^2)^{0.5} / \text{F}_{\text{résultante}} \dots\dots\dots(\text{III.2})$$

$$\text{Sin}\alpha_r = (\text{Fv}^2 + \text{Fa}^2)^{0.5} / \text{F}_{\text{résultante}} \dots\dots\dots(\text{III.3})$$

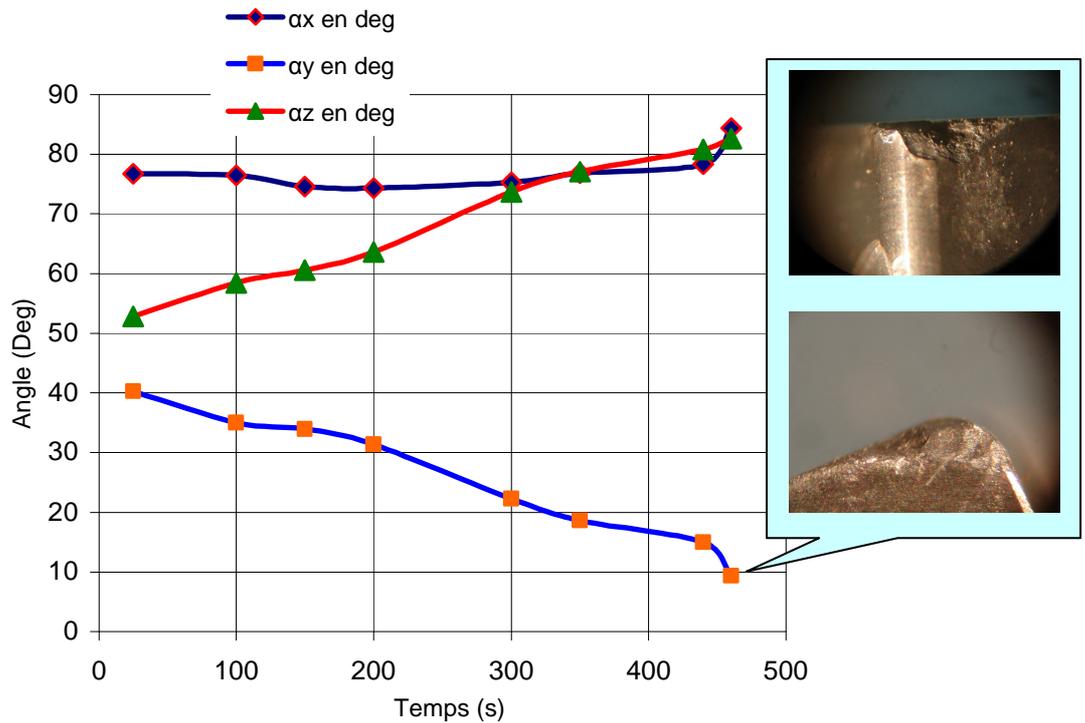
$$\text{Sin}\alpha_v = (\text{Fa}^2 + \text{Fr}^2)^{0.5} / \text{F}_{\text{résultante}} \dots\dots\dots(\text{III.4})$$

A partir du calcul des angles ( $\alpha_a, \alpha_r, \alpha_v$ ) indiqués aux équations III-2, III-3, III-4, nous avons tracé les courbes de l'évolution des trois angles calculés en fonction du temps de coupe.

Les figures III-28, III-29, III-30 et III-31, montrent l'évolution du sens de la résultante des efforts de coupe en fonction du temps lors du tournage de l'Inconel 718 usiné par les quatre matériaux de coupe utilisés.



**Fig. III-28: Evolution des angles ( $\alpha_a$ ,  $\alpha_r$  et  $\alpha_v$ ), en fonction du temps pour la plaquette céramique CC670 ( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$  mm et  $f = 0.08$  mm/tr)**



**Fig. III- 29: Evolution des angles ( $\alpha_a$ ,  $\alpha_r$  et  $\alpha_v$ ), en fonction du temps pour la plaquette céramique CC650 ( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$  mm et  $f = 0.08$  mm/tr)**

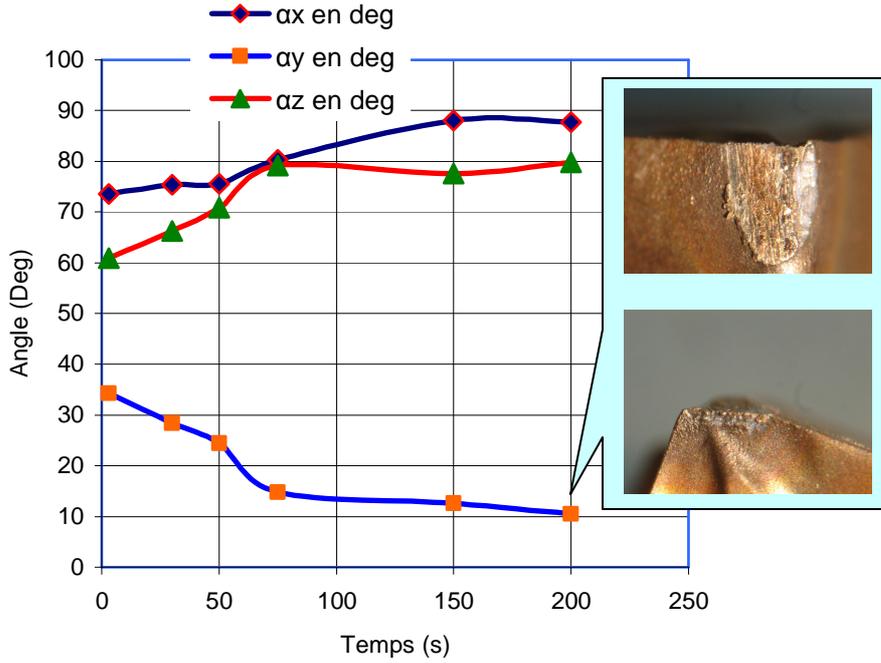


Fig. III-30: Evolution des angles ( $\alpha_a$ ,  $\alpha_r$  et  $\alpha_v$ ), en fonction du temps pour la plaquette en carbure revêtu GC1025 ( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$  mm et  $f = 0.08$  mm/tr)

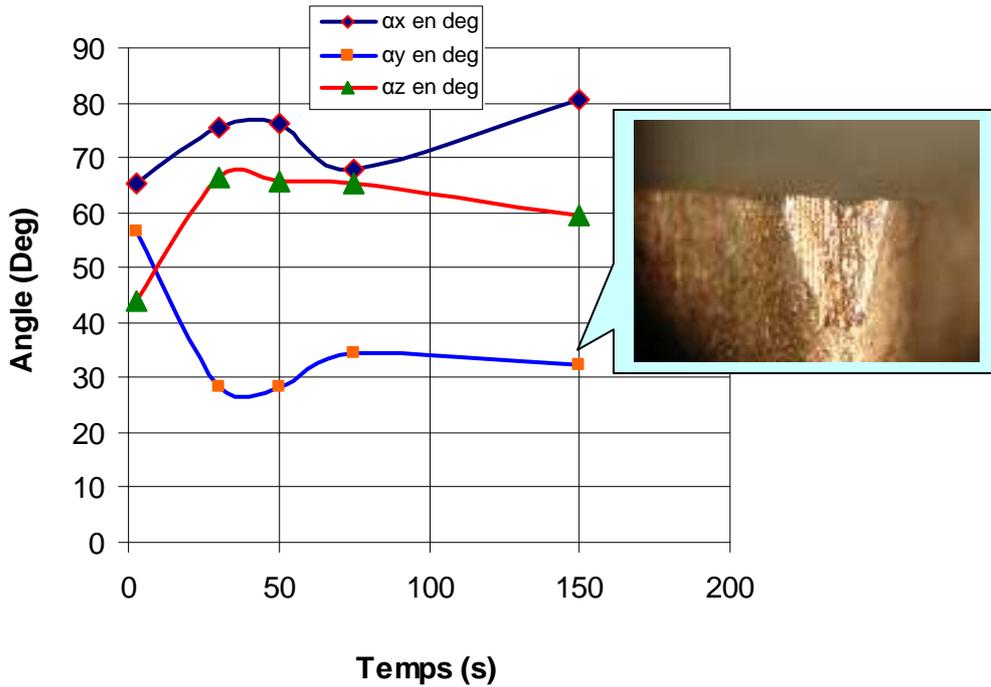


Fig. III-31: Evolution des angles ( $\alpha_a$ ,  $\alpha_r$  et  $\alpha_v$ ), en fonction du temps pour la plaquette en carbure non revêtu H13A ( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$  mm et  $f = 0.08$  mm/tr)

#### **a/ Cas de la céramique CC670.**

La figure III-28 montre l'angle fait entre la résultante des efforts de coupe et les axes (X, Y et Z) pour le cas de la céramique CC670. On remarque que le vecteur effort résultant garde ses angles presque constants au cours de l'opération d'usinage à l'exception d'une légère augmentation de l'angle fait avec l'axe X. Généralement, on remarque que l'effort résultant reste plus proche de l'axe des Y.

La stabilité de l'évolution nous permet de conclure que la céramique CC670 présente une meilleure résistance mécanique et à l'usure. Après un temps de 325 secondes, l'angle fait entre la résultante et les axes Y et Z augmente légèrement, par contre il diminue dans le sens X, cette évolution montre qu'il y a une usure relativement importante dans l'arête de coupe.

#### **b/Cas de la céramique CC650.**

La figure III-29 montre l'angle fait entre la résultante des efforts de coupe et les axes (X, Y et Z) pour le cas de la céramique CC650. Cette céramique montre une mauvaise stabilité lors de l'usinage. Comme le montre la figure III-29, on remarque qu'après les 25 premières secondes, l'angle fait entre la résultante et l'axe Y diminue rapidement jusqu'à une valeur de  $10^\circ$ , par contre l'angle fait entre elle et les axes X et Z augmente. Donc l'outil de coupe a subi une concentration très importante des efforts de coupe sur le bec et son voisinage. Cette concentration des efforts de coupe peut endommager l'outil de coupe à partir du bec qui se prolonge vers l'arête de coupe.

#### **C/Cas du carbure GC1025.**

La figure III-30 montre l'angle fait entre la résultante des efforts de coupe et les axes (X, Y et Z) pour le cas du carbure revêtu GC1025. On remarque que l'évolution de la direction d'influence de la résultante a un comportement plus mauvais que la céramique mixte CC650. En effet, la diminution de l'angle entre la résultante et l'axe Y devient plus rapide que dans le cas de la céramique CC650, où l'angle obtenu après 75 secondes est de  $15^\circ$ . Par contre pour le cas de GC1025, l'angle obtenu est de  $36^\circ$  pour le même temps d'usinage. La valeur de l'angle après 200 secondes est de  $10^\circ$  qui est très inférieure que la valeur obtenue par la céramique mixte CC650 après le même temps d'usinage ( $30^\circ$ ). Cependant on peut avoir aussi dans ce cas une concentration catastrophique de l'effort de coupe sur le bec de l'outil de coupe.

$(R_{\text{résultante (GC1025)}} = 1285.94 \text{ N}) > (R_{\text{résultante (CC650)}} = 141.54 \text{ N}) > (R_{\text{résultante (CC670)}} = 117.97 \text{ N})$ .

Donc, le carbure revêtu GC1025 comparé avec les deux céramiques, reste le meilleur en prenant comme critère la résistance aux concentrations des contraintes.

Cette meilleure résistance est également causée par la haute ténacité de ce matériau comparé avec les deux céramiques qui sont plus dures et plus fragiles et plus résistantes à l'abrasion.

#### **d/ Cas du carbure H13A.**

La figure III-31 montre l'angle fait entre la résultante des efforts de coupe et les axes (X, Y et Z) pour le cas du carbure non revêtu H13A.

L'évolution de la direction d'influence de la résultante dans le cas du carbure H13A est très perturbée. En effet, on remarque que pendant les 30 premières secondes, l'angle fait avec l'axe Y diminue rapidement jus qu'une valeur inférieure à  $30^\circ$ , ce qui provoque une concentration de contraintes sur le bec de l'outil. En suite, cet angle augmente de  $7^\circ$  accompagné d'une diminution de  $11^\circ$  de  $\alpha_z$ . A partir de ce phénomène, on peut conclure que la diminution est également causée par l'apparition de l'usure en cratère. Ce phénomène permet de basculer légèrement la direction d'influence de la résultante vers le plan YZ.

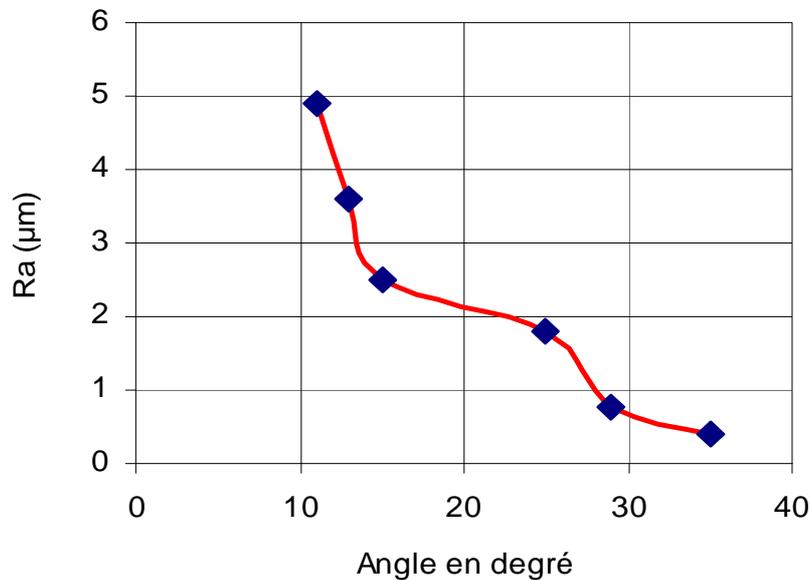
#### **III.7.3: Effet de la direction d'influence de la résultante des efforts de coupe sur la rugosité**

La figure III-32 montre l'évolution de la rugosité  $R_a \mu\text{m}$  en fonction de la direction de l'effort de coupe résultant par rapport à l'axe Y pour le cas du carbure revêtu GC1025.

A partir de cette figure, on remarque que la rugosité s'améliore lorsque l'angle entre la résultante et l'axe Y augmente. Donc il est important de garder la direction de l'effort résultant stable comme dans le cas de la céramique CC670 (Fig III-28), et dans ce cas l'utilisation des carbures sera un mauvais choix à cause du sens critique de l'effort résultant.

Le carbure GC1025 présente une meilleure ténacité par rapport aux autres matériaux de coupe (CC670, CC650 et H13A), et une faible résistance à l'usure par rapport aux deux céramiques à cause de la grande résistance à la pénétration de

l'Inconel 718 qui se manifeste par la diminution de l'angle fait entre l'effort de coupe résultant et l'axe Y.



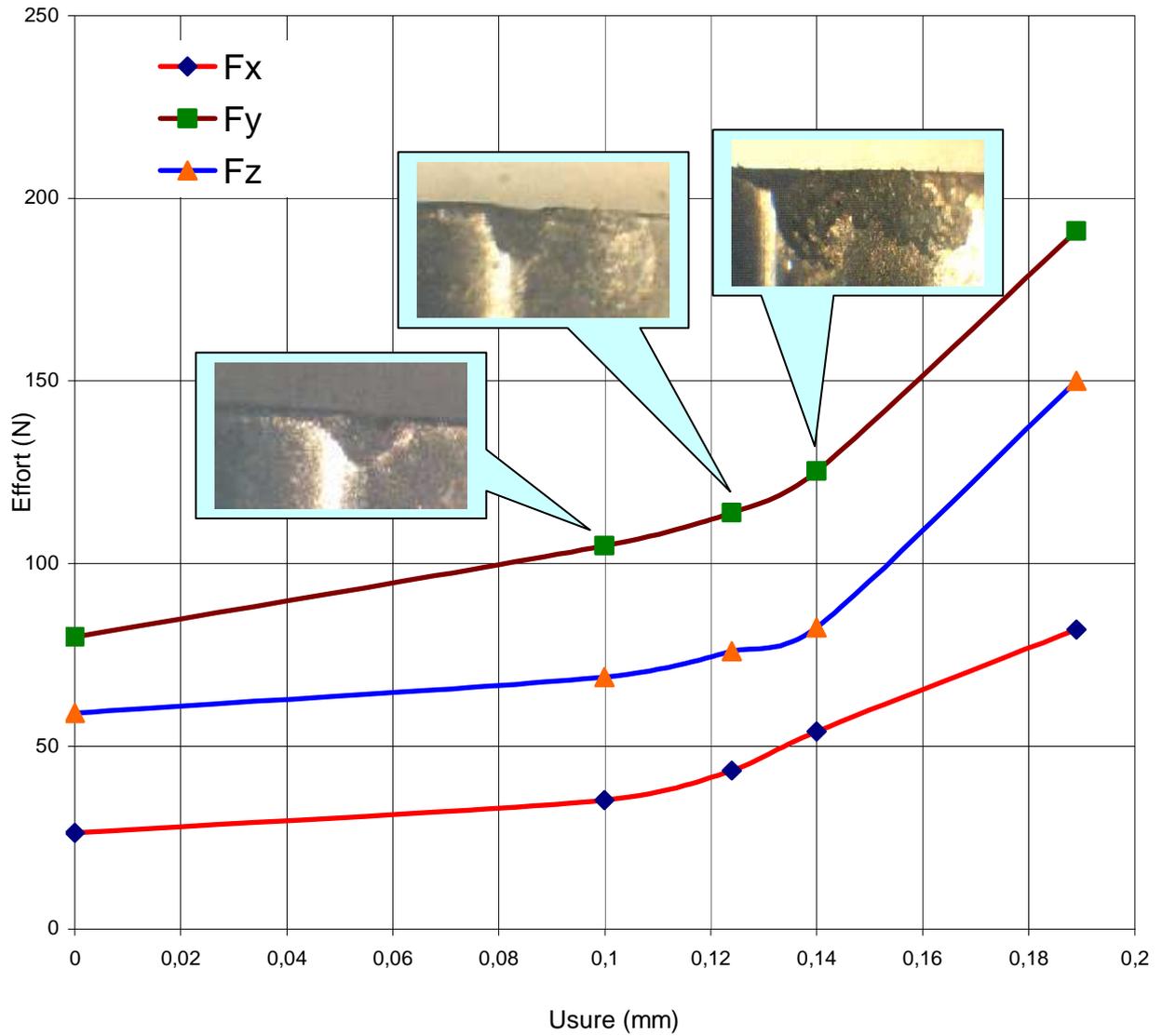
**Fig. III-32: Evolution de la rugosité Ra ( $\mu\text{m}$ ) en fonction de la direction de l'effort résultant par rapport à l'axe Y ( $\alpha_r$ ) pour le cas du carbure revêtu GC1025**  
( $V_c = 110 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0.15 \text{ mm}$  et  $f = 0.08 \text{ mm/tr}$ )

### III.8: Evolution des efforts de coupe en fonction de l'usure

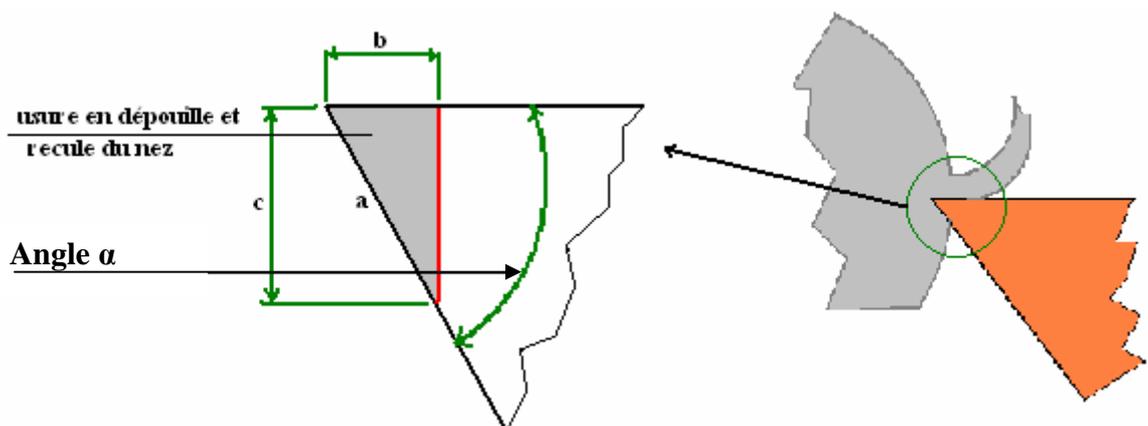
La figure III-33 présente l'influence de l'usure sur les composantes de l'effort de coupe obtenues lors de l'usinage de l'Inconel 718 par la céramique composite CC670.

L'usure de l'outil représente un facteur influençant les efforts de coupe. En effet, dans l'intervalle de l'usure  $[0 \text{ à } 0.1] \text{ mm}$ , on remarque que les composantes  $F_r$ ,  $F_v$  et  $F_a$  augmentent jusqu'à (106, 67 et 37) N respectivement. La pente de l'évolution devient plus importante dans l'intervalle de l'usure  $[0.14 \text{ à } 0.198] \text{ mm}$ , menant à des valeurs de (188, 150 et 82) N pour  $F_r$ ,  $F_v$  et  $F_a$  respectivement. Cependant, la cause principale qui influe sur les efforts de coupe est la surface de contact outil-pièce qui est la manifestation mécanique de l'usure, surtout sur les composantes  $F_r$  et  $F_v$ .

La figure III-34 présente la dépendance entre la surface de contact  $c$  et l'usure frontale  $VB$ .



**Fig. III-33: Evolution de l'effort de coupe en fonction de l'usure pour le cas de la céramique CC670 ( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$  mm et  $f = 0.08$ . mm/tr et  $L = 15$  mm)**



**Fig. III-34: Dépendance de la surface de contact de l'usure frontale**

On remarque que l'usure frontale a une influence importante sur la surface de contact. En effet, on peut conclure les relations géométriques suivantes :

$$a^2 = b^2 + c^2 \dots\dots\dots(III. 5)$$

$$c^2 = a^2 - b^2 \dots\dots\dots(III. 6)$$

$\text{tga} = c/b$  donc  $b = (1/c) * \text{tga}$  et la différentielle totale de  $b$  devient:

$$(db/dc) = (-1/c^2) * \text{tga} \dots\dots\dots(III. 7)$$

$$db = - (dc * \text{tga}) / c^2. \dots\dots\dots(III. 8)$$

Donc une augmentation de  $c$  en  $dc$ , mène à une augmentation plus importante de  $b$  par :

$$|db| = (dc * \text{tga}) / (dc)^2. \dots\dots\dots(III. 9)$$

### III.8.1: Evolution de la direction de l'effort résultant en fonction de l'usure

La figure III-35 montre l'impact de l'usure de l'outil en céramique CC670 sur le changement de sens d'influence de la résultante des efforts de coupe. On remarque que les trois courbes peuvent se diviser en trois parties : **I**, **II** et **III**.

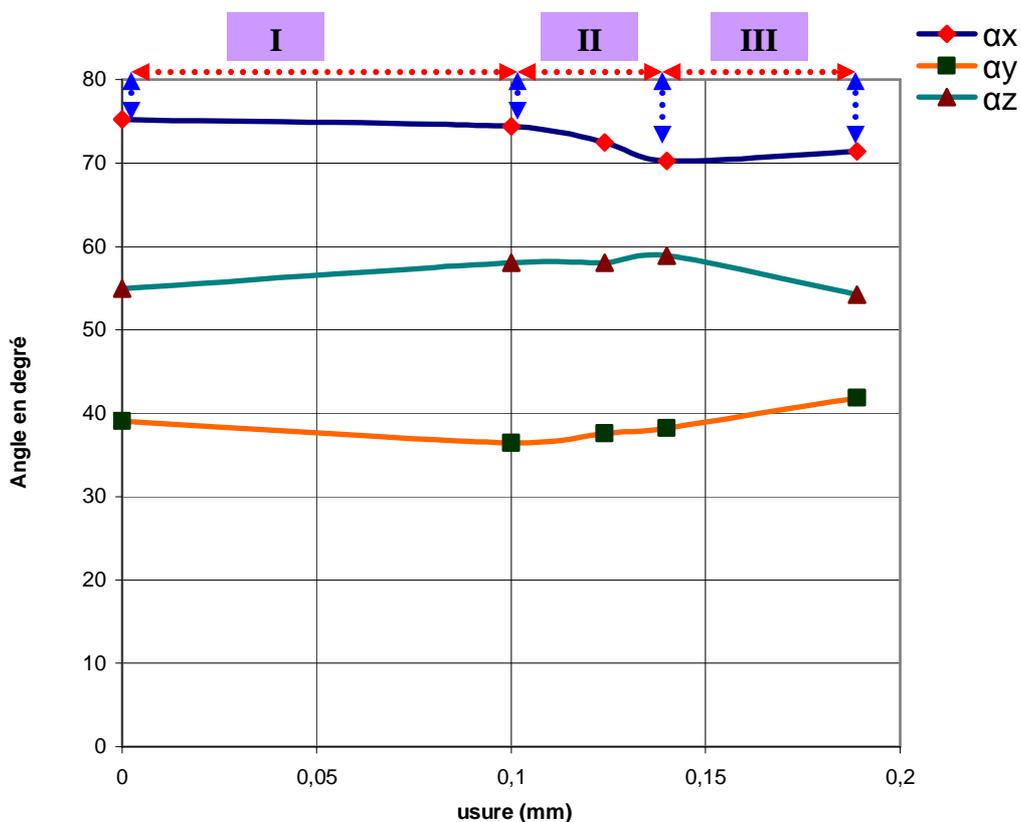
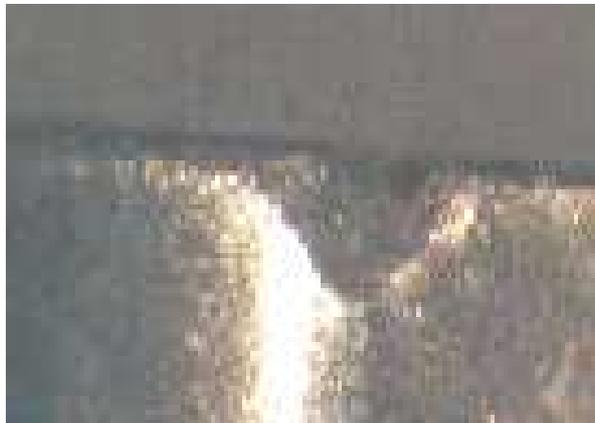


Fig. III-35. Orientation de l'effort de coupe résultant en fonction de l'usure  
( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$  mm et  $f = 0.08$ . mm/tr et  $L = 15$  mm)

Concernant la partie **I**, la résultante des efforts de coupe se rapproche lentement de l'axe Y de  $4^\circ$ , et s'éloigne en même temps de l'axe Z de  $3.5^\circ$ , alors que l'angle fait avec l'axe X reste relativement stable. Cette partie peut se manifester par une usure en dépouille sans aucun cratère ni écaillage (Figure III-36).



**Fig. III-36 : Morphologie de l'usure de la plaquette CC670**  
( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$  mm et  $f = 0.08$  mm/tr)

Dans la partie **II**, la résultante des efforts de coupe s'éloigne de l'axe Y de  $3^\circ$ , et se rapproche en même temps de l'axe X de  $5^\circ$ , tant que l'angle fait avec l'axe Z reste relativement stable. Cette partie peut se manifester par le prolongement de l'usure enregistrée dans la partie **I** vers l'arête de coupe. (Figure III-37).



**Fig. III-37 : Morphologie de l'usure de la plaquette CC670**  
( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$  mm et  $f = 0.08$  mm/tr)

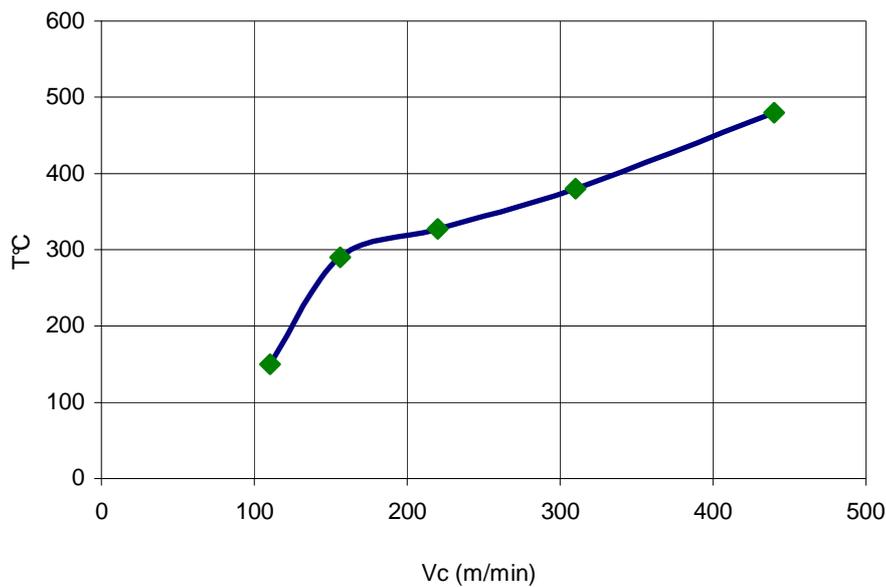
La dernière zone d'évolution (**III**) présente une tendance différente de la résultante des efforts de coupe. En effet, dans cette zone on remarque que la résultante se rapproche de l'axe Z de plus de  $5^\circ$  et s'éloigne de l'axe Y de  $3.5^\circ$ , alors que l'angle

fait avec l'axe X présente une faible variation. Cette zone peut se manifester par la présence d'une usure en cratère très proche du bec.

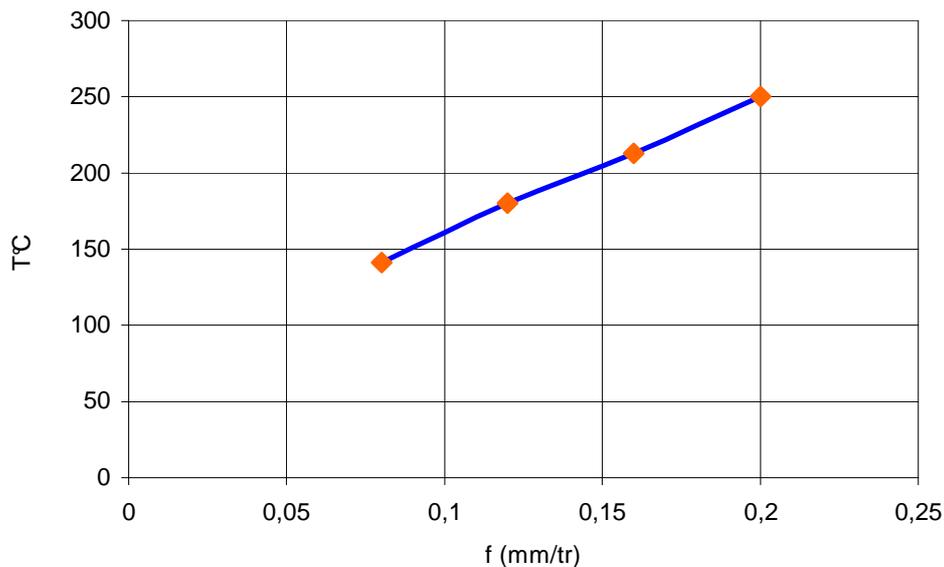
### III.9: Evolution de la température de coupe

#### III.9.1: Evolution de la température de coupe en fonction des paramètres de coupe

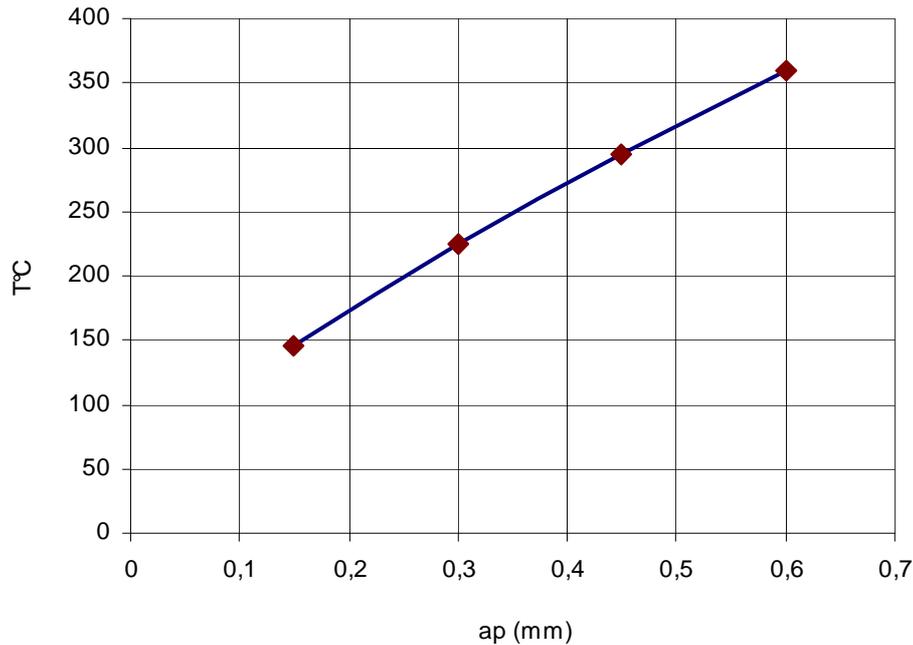
Les figures III-38, III-39 et III-40 montrent respectivement l'impact de la vitesse de coupe, de l'avance et la profondeur de passe sur la température générée dans la zone de coupe lors du tournage de l'inconel 718 par la céramique composite CC670.



**Fig. III-38: Evolution de la température de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour la céramique composite CC670 ( $a_p = 0.15$  mm et  $f = 0.08$  mm/tr et  $L = 15$  mm)**



**Fig. III-39: Evolution de la température de coupe en fonction de l'avance pour la céramique composite CC670 ( $V_c = 110$  m/min,  $a_p = 0.15$  mm et  $L = 15$  mm)**



**Fig. III-40: Evolution de la température de coupe en fonction de la profondeur de passe pour la céramique composite CC670 ( $V_c = 110$  m/min,  $f = 0.08$  mm/tr et  $L = 15$  mm)**

- ***Effet de la vitesse de coupe***

La figure III-38 montre que la température maximale atteinte est de  $480^{\circ}\text{C}$  pour une vitesse de coupe de  $440$  m/min. Cette valeur diminue de  $48\%$  en utilisant une vitesse de coupe de  $V_c=110$  m/min. Donc, aux vitesses de coupe élevées, les déformations internes du copeau augmentent ainsi que les frottements entre l'outil et la pièce ce qui engendre des températures plus élevées.

- ***Effet de l'avance***

Comme le montre la figure III-39, l'avance a un effet moins significatif que la profondeur de passe et la vitesse de coupe. En effet, la température maximale enregistrée est de  $250^{\circ}\text{C}$  pour la plus grande valeur de l'avance  $0,2$  mm/tr, et de  $141^{\circ}\text{C}$  pour une avance de  $0,08$  mm/tr.

L'augmentation de l'avance augmente les déformations internes du copeau, et en même temps diminue le temps de contact outil pièce, ce qui permet la distribution de la chaleur dans une zone plus large en comparaison avec les faibles avances, qui augmentent le temps de contact et en même temps permettent de concentrer la chaleur dans une zone moins large. Le facteur principal qui permet d'avoir une température supérieure à celle des faibles avances, est la diminution de la section du copeau. Cette

diminution, permet la minimisation de la quantité de chaleur générée par déformation à l'intérieur du copeau.

- ***Effet de la profondeur de passe***

Concernant la profondeur de passe (fig. III-40), la température maximale enregistrée est de 360°C pour une profondeur de passe de 0,6 mm, alors que la température minimale atteinte est de 147°C pour une profondeur de passe de 0,15 mm.

Cependant, l'augmentation de la section du copeau augmente la quantité de chaleur générée pendant l'usinage par les sévères déformations du copeau. Ces déformations représentent la source principale de chaleur, sans oublier l'effet dissipatif qui est faible à cause des caractéristiques de l'Inconel 718, à l'égard de sa faible conductibilité thermique. Cette caractéristique permet la concentration de chaleur dans la zone de coupe.

En conclusion, on peut dire que la vitesse de coupe représente le facteur le plus influent sur la génération de chaleur dans la zone de coupe.

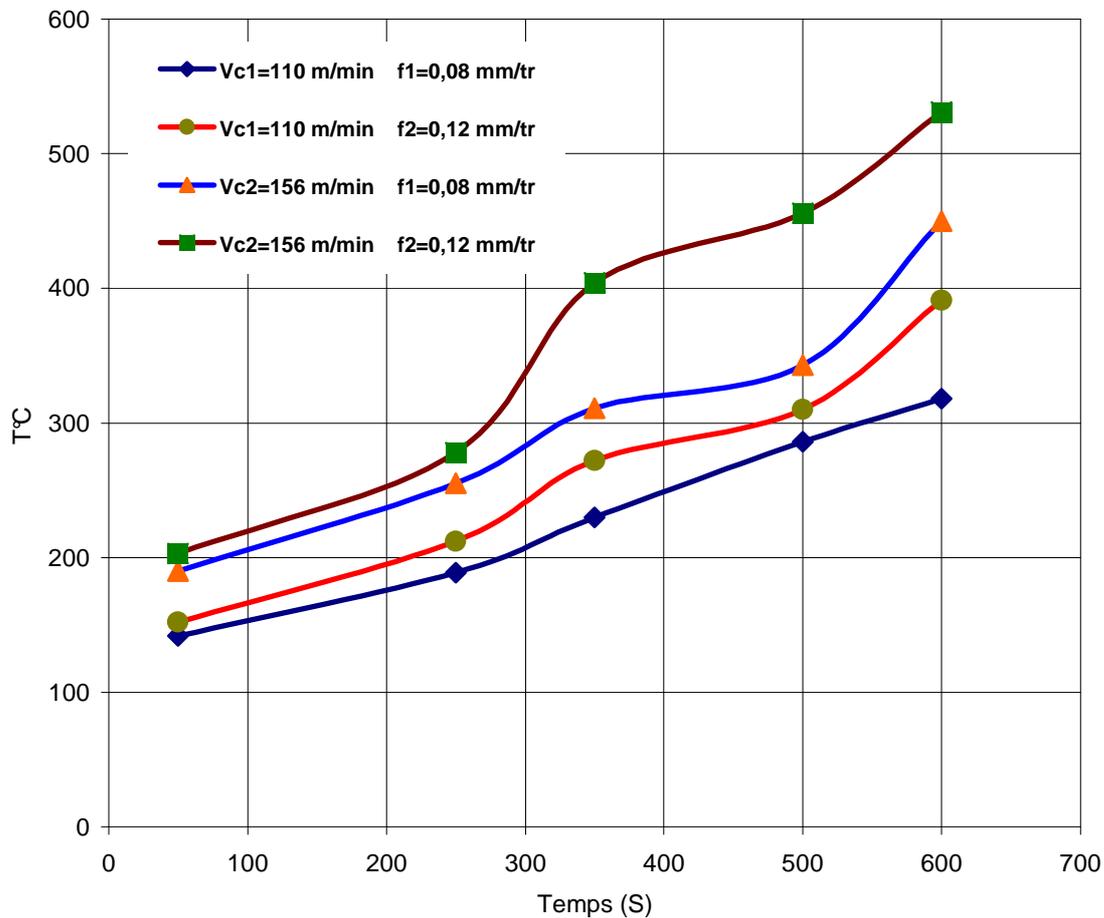
### **III.9.2: Evolution de la température de coupe en fonction du temps pour différents conditions de coupe**

La figure III-36, montre les résultats de l'évolution de la température de coupe en fonction du temps pour différents conditions de coupe lors du tournage de l'Inconel 718 par la céramique composite CC670.

La combinaison de plusieurs avances et vitesses de coupe, permet de conclure que la plus haute température est enregistrée pour les combinaisons des avances et vitesses de coupe élevées. Ces combinaisons permettent d'additionner les effets des deux facteurs en même temps. En effet, pour une vitesse de coupe égale à 156 m/min et une avance de 0.12 mm/tr la température enregistrée est 536°C. Par contre, pour les plus faibles vitesses et avances  $V_c = 110$  m/min,  $f = 0.08$  mm/tr, la température enregistrée est de 145°C, qui est la plus faible température enregistrée. Par conséquent, l'usinage avec des vitesses de coupe et des avances élevés permet d'une part, l'augmentation des déformations internes du copeau qui sont responsables de la génération d'une grande quantité de chaleur à l'intérieur du copeaux (à cause de la libération de son énergie interne) et d'autre part, l'augmentation des frottement entre l'outil et la pièce, ce qui augmente la température dans la zone de coupe.

Principalement, c'est pour le même principe que la température enregistrée aux faibles vitesses et avances est moins importante que celle enregistré aux grandes vitesses et avances.

En conclusion, la combinaison des vitesses de coupe et des avances les plus élevés génère la plus haute température dans la zone de coupe.



**Fig. III-41: Evolution de la température de coupe en fonction du temps pour différents conditions de coupe pour la céramique composite CC670 (ap = 0.15 mm, L = 15 mm)**

### III.9.3: Conclusion partielle

Cette étude sur l'usinabilité de l'Inconel 718 réalisée dans ce chapitre a permis de dégager les conclusions suivantes:

- ✚ Les résultats montrent clairement que la meilleure qualité de surface est obtenue lors de l'usinage de l'Inconel 718 par la céramique composite CC670 et que la surface est affecté aussi par les caractéristiques physico-chimiques du couple outil- matière.
- ✚ La rugosité s'améliore lorsque l'angle de direction entre la résultante et l'axe  $Y$  augmente.
- ✚ La profondeur de passe représente le paramètre principal influençant les efforts de coupe, les outils en céramique composite CC670 donnent des efforts de coupe plus faibles avec une stabilisation du sens de l'effort de coupe résultant par rapport aux autres matériaux de coupe testés.
- ✚ Les efforts spécifiques diminuent avec l'augmentation de la section du copeau et de la vitesse de coupe, ce qui minimise les contraintes qui provoquent la sollicitation et la rupture de la plaquette.
- ✚ L'usure frontale a une influence importante sur l'évolution des efforts de coupe ainsi que sur l'évolution de la rugosité de l'Inconel 718.
- ✚ La vitesse de coupe représente le facteur le plus influent sur la génération de chaleur dans la zone de coupe.
- ✚ La combinaison des vitesses de coupe et des avances les plus élevées, génère la plus haute température dans la zone de coupe.

## ***CHAPITRE IV***

### ***Détermination des modèles de la rugosité et des efforts de coupe***

## **IV.1: Introduction**

Dans l'industrie moderne, le produit fini impose plusieurs critères résumés dans le terme (intégrité des surfaces) et d'autres critères concernent l'outil de coupe utilisé, représentés par la productivité maximale, l'usure minimale et les efforts de coupe faibles. Dans ce chapitre nous présentons les résultats relatifs à l'étude de l'impact des conditions de coupe (la vitesse de coupe, la profondeur de passe et l'avance) sur les paramètres technologiques d'usinage lors du tournage de l'Inconel 718. Dans un premier temps nous présentons les résultats de l'évolution de la rugosité et des efforts de coupe, suivie d'une étude statistique faite par Minitab, qui contient les tests de signification des différents paramètres et les différents modèles obtenus.

## **IV.2: Résultats de l'évolution de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des paramètres d'usinage**

Dans le but d'élaborer des modèles statistiques de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe, nous avons réalisé deux séries d'expériences composées chacune de 27 essais. Les essais sont réalisés par deux nuances de matériaux de coupe :

1. La céramique composite CC670.
2. La céramique mixte CC650.

### **IV.2.1: Cas de la céramique composite CC670/Inconel 718**

Les résultats de l'évolution de la rugosité et des efforts de coupe pour le cas de la céramique composite CC670 sont mentionnés dans le tableau IV-1.

Ordre Essai	Ordre Std	Vc(m/min)	ap mm)	f(mm/tr)	Ra (µm)	Rt (µm)	Rz (µm)	Fa(N)	Fr(N)	Fv(N)
1	3	110	0,15	0,16	1,01	3,3	3,5	44,89	111,8	102
2	24	220	0,3	0,16	1,25	4,17	3,8	80,6	138,8	151,8
3	5	110	0,3	0,12	0,8	3	2,4	74,1	151,8	158
4	4	110	0,3	0,08	0,45	1,49	1,2	57,2	132,9	138,8
5	1	110	0,15	0,08	0,3	1,21	1	30,71	82,9	74
6	26	220	0,45	0,12	1,05	4,07	2,72	96,9	203,8	202
7	20	220	0,15	0,12	0,75	2,17	2,3	27,91	78,8	59,9
8	11	156	0,15	0,12	0,55	1,87	2,1	29,91	93,8	69,9
9	9	110	0,45	0,16	1,3	5	3,92	111,1	232,8	239,6
10	12	156	0,15	0,16	0,91	3,27	2,2	39,89	103,8	92
11	7	110	0,45	0,08	0,6	1,64	1,42	94,6	203,9	193,4
12	17	156	0,45	0,12	0,85	3,77	2,52	98,9	218,8	214
13	21	220	0,15	0,16	1,11	3,57	2,4	38	89	84
14	19	220	0,15	0,08	0,4	1,48	1,1	24,71	59,9	54
15	25	220	0,45	0,08	0,7	1,91	1,52	87,6	182	173,4
16	22	220	0,3	0,08	0,55	1,76	1,3	50,2	109,9	118,8
17	6	110	0,3	0,16	1,15	3,9	3,7	87,6	161,8	171,8
18	14	156	0,3	0,12	0,7	2,97	2,3	69,1	143,8	148
19	10	156	0,15	0,08	0,2	1,18	0,9	26,71	74,9	64
20	23	220	0,3	0,12	0,9	3,27	2,5	67,1	128,8	138
21	27	220	0,45	0,16	1,4	5,27	4,02	103	205	215
22	15	156	0,3	0,16	1,05	3,87	3,6	82,6	153,8	161,8
23	16	156	0,45	0,08	0,5	1,61	1,32	89,6	195,9	183,4
24	2	110	0,15	0,12	0,65	1,9	2,2	34,91	101,8	79,9
25	13	156	0,3	0,08	0,35	1,46	1,1	52,2	124,9	128,8
26	18	156	0,45	0,16	1,2	4,97	3,82	106,1	224,8	229,6
27	8	110	0,45	0,12	0,95	3,8	2,62	103,9	226,8	223,26

**Tab. IV-1: Plan d'expérience de 27 essais pour l'élaboration des modèles de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des paramètres d'usinage pour la céramique composite CC670**

#### IV.2.1.1: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Ra

Le tableau IV-2 montre les coefficients de régression estimés pour Ra et les valeurs de la probabilité P qui indique la signification des facteurs et des interactions.

Terme	Coeff	Er-T	Coef	T	P
Constante	0,5196	0,011678		44,499	0,000
Vc (m/mi)	-0,0150	0,000093		-161,074	0,000
ap (mm)	0,9944	0,025275		39,345	0,000
f (mm/tr)	8,6667	0,123444		70,207	0,000
Vc (m/mi)*Vc (m/mi)	0,0009	0,000000		186,700	0,000
ap (mm)*ap (mm)	0,0741	0,033611		2,204	0,042
f (mm/tr)*f (mm/tr)	1,0417	0,472649		2,204	0,042
Vc (m/mi)*ap (mm)	-0,0012	0,000065		-0,000	1,000
Vc (m/mi)*f (mm/tr)	-0,0008	0,000242		-0,000	1,000
ap (mm)*f (mm/tr)	-0,4167	0,089123		-4,675	0,000

S = 0,001852      R-carré = 98,0% R-carré (ajus) = 96.12%

Tab. IV-2 : Analyse de régression de Ra

### A/ Evolution de la rugosité Ra en fonction des paramètres du régime de coupe

La surface de réponse du critère de rugosité Ra en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la figure IV-1. Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur le critère de rugosité Ra.

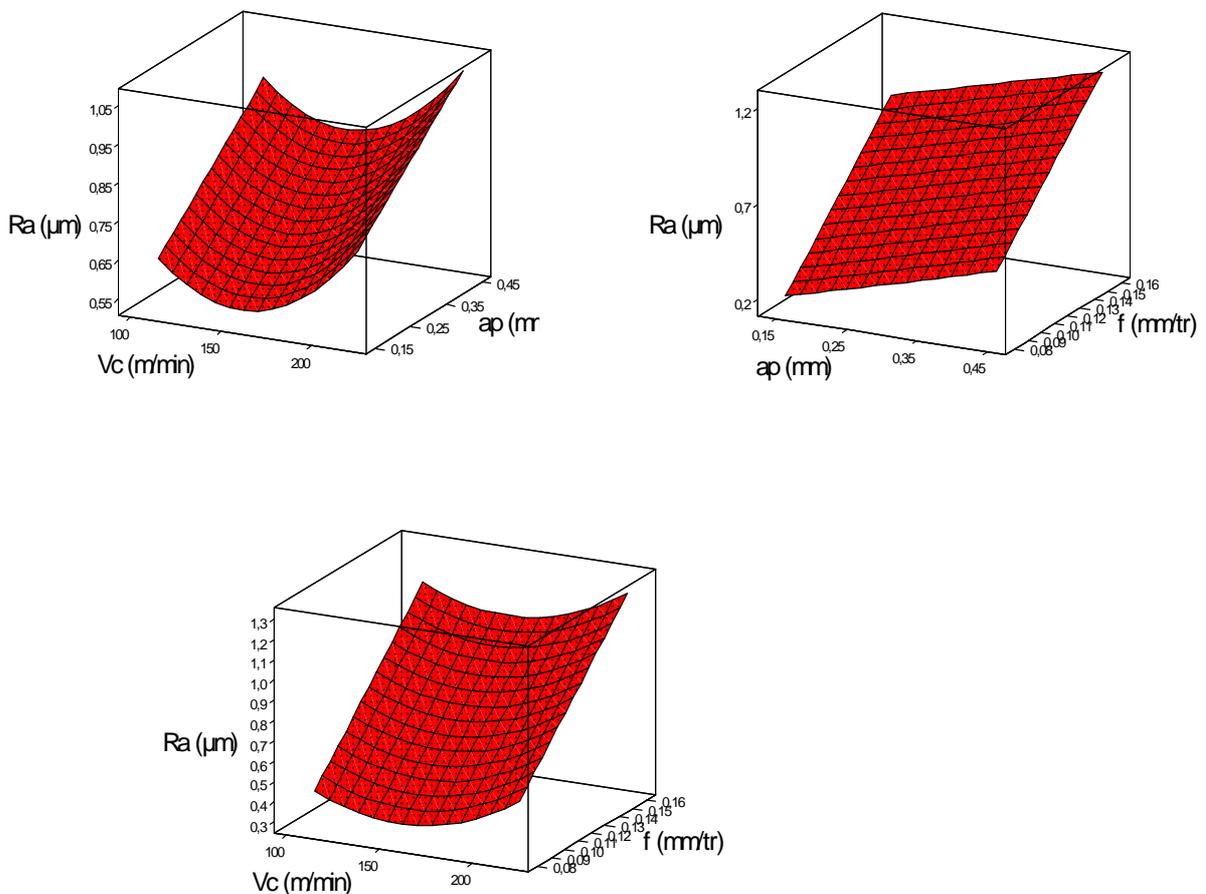


Figure. IV-1: Diagramme de surface pour Ra en fonction de  $V_c$ ,  $a_p$  et  $f$ .

En considérant un intervalle de confiance de 95%, on constate que la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe ont un impact significatif sur le critère de rugosité Ra puisque ses valeurs de la probabilité P sont inférieures à 0,05 (Tab. IV-2). Aussi, les interactions ayant un impact significatif sur ce critère sont :

$V_c * V_c$ ,  $a_p * a_p$ ,  $f * f$  et  $a_p * f$  puisque ses valeurs de probabilité P sont inférieures à 0,05.

### B/ Graphique des effets principaux pour Ra

La figure IV-2 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur le critère de rugosité Ra.

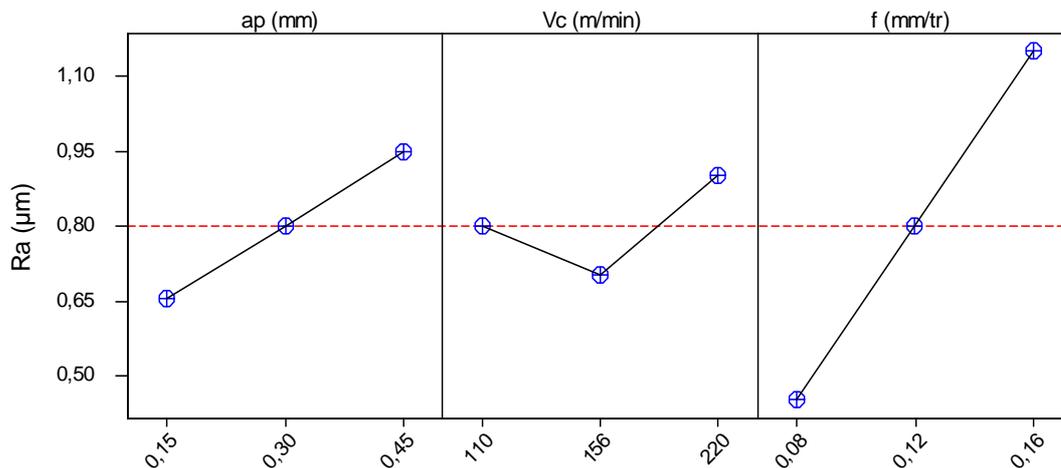


Figure. IV-2 : Graphique des effets principaux pour Ra

#### ❖ Effet de la profondeur de passe

L'augmentation de la profondeur de passe implique une section du copeau plus élevée et des efforts de coupe plus importants ce qui conduit à l'apparition des vibrations au niveau de la machine-outil et de la pièce. Ces vibrations peuvent influencer l'état de surface de l'Inconel 718.

#### ❖ Effet de la vitesse de coupe

L'augmentation de la vitesse de coupe conduit à une amélioration de l'état de surface. A partir de la vitesse de coupe 156 m/min, l'état de surface commence à se dégrader. Ce phénomène est expliqué principalement par l'augmentation de la température dans la zone de coupe et l'apparition de l'arête rapportée sur l'outil et les copeaux adhérents sur la pièce.

#### ❖ Effet de l'avance

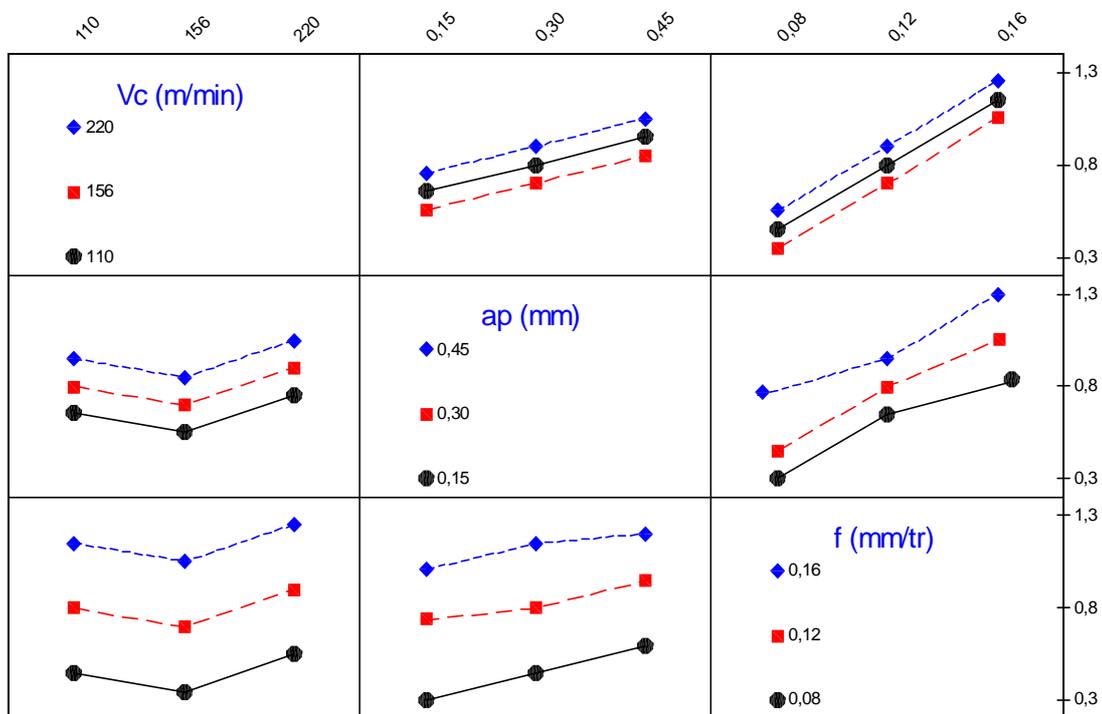
Les résultats montrent clairement que l'avance a une influence considérable sur la rugosité des surfaces usinée, cette influence peut être traduite par l'équation IV.1 qui

implique que l'augmentation de l'avance conduit à une augmentation de la rugosité des surfaces usinées de l'Inconel 718.

$$Ra = f^2 / 32r \dots\dots\dots(IV.1)$$

**C/Matrice de diagrammes d'interactions pour Ra**

On utilise la matrice de diagrammes d'interactions pour visualiser l'effet des interactions sur la réponse. La figure IV-3 montre la matrice de diagrammes d'interactions pour Ra en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe.



**Figure. IV-3 : Matrice de diagrammes d'interactions pour Ra**

On remarque que pour le cas de l'interaction ap \*f, les lignes ne sont pas parallèles ce qui confirme l'existence d'une interaction entre la profondeur de passe et l'avance

**D/Graphique de contour de Ra**

La figure IV-4 montre le graphique de contour de Ra en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance.

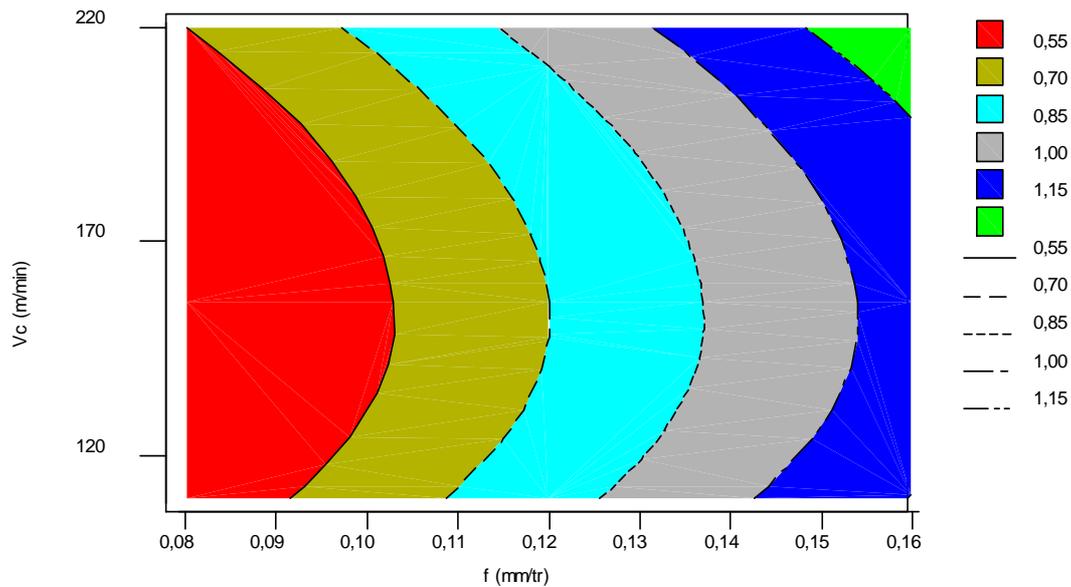


Figure. IV-4 : Graphique de contour de Ra

On remarque dans cette figure que la zone rouge indique les valeurs les plus faibles de  $Ra < 0,55 \mu\text{m}$ , tan disque la zone verte au coin supérieur indique les valeurs les plus élevées de  $Ra > 1,15 \mu\text{m}$ .

#### E/ Modèle généralisé

Le modèle qui décrit la variation de **Ra** en fonction des tous les facteurs et les interactions est défini de la façon suivante :

$$Ra = 0,5196 - 0,0150 Vc + 0,9944 ap + 8,6667 f + 0,0006 Vc^2 + 0,0741 ap^2 + 1,0417 f^2 - 0,0012 Vc*ap - 0,0008 Vc*f - 0,4167 ap*f.$$

$$R^2 = 98,0\%$$

#### F/ Modèle réduit

Le modèle qui décrit la variation de Ra en fonction des facteurs et des interactions significatifs peut être défini de la façon suivante :

$$Ra = 0,5119 - 0,015 Vc + 0,9944 ap + 8,6667 f + 0,001 Vc^2 + 0,0741 ap^2$$

$$R^2 = 94,7\%$$

#### IV.2.1.2: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Rt

Le tableau IV-3 montre les coefficients de régression estimés pour Rt et les valeurs de la probabilité P qui indiquent la signification des facteurs et des interactions.

Terme	Coef	Er-T	Coef	T	P
Constante	-0,81	1,4301	-0,570	0,576	
$V_c$ (m/mi	-0,01	0,0114	-1,190	0,250	
$ap$ (mm)	-2,18	3,0953	-0,705	0,490	
$f$ (mm/tr	38,38	15,1175	2,538	0,021	
$V_c$ (m/mi * $V_c$ (m/mi	0,001	0,0000	1,536	0,143	

$a_p$ (mm)* $a_p$ (mm)	0,52	4,1161	0,126	0,901
$f$ (mm/tr)* $f$ (mm/tr)	-89,58	57,8827	-1,548	0,140
$V_c$ (m/mi)* $a_p$ (mm)	0,0015	0,0079	0,000	1,000
$V_c$ (m/mi)* $f$ (mm/tr)	0,0021	0,0296	0,000	1,000
$a_p$ (mm)* $f$ (mm/tr)	52,92	10,9145	4,848	0,000

$$S = 0,2269$$

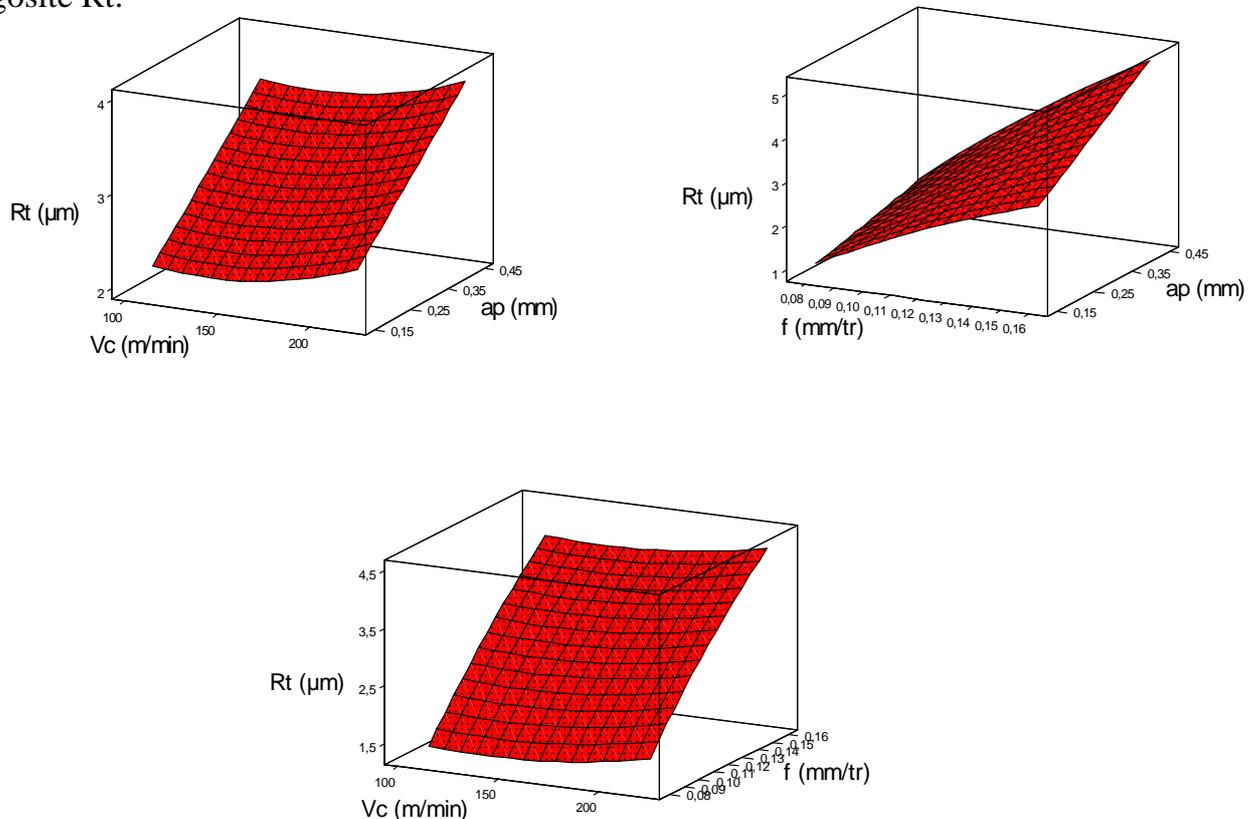
$$R\text{-carré} = 97,9\%$$

$$R\text{-carré (ajus)} = 96,8\%$$

**Tab. IV-3 : Analyse de régression de  $R_t$**

### A/ Evolution de la rugosité $R_t$ en fonction des paramètres du régime de coupe

La surface de réponse du critère de rugosité  $R_t$  en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur figure IV-5. Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur le critère de rugosité  $R_t$ .

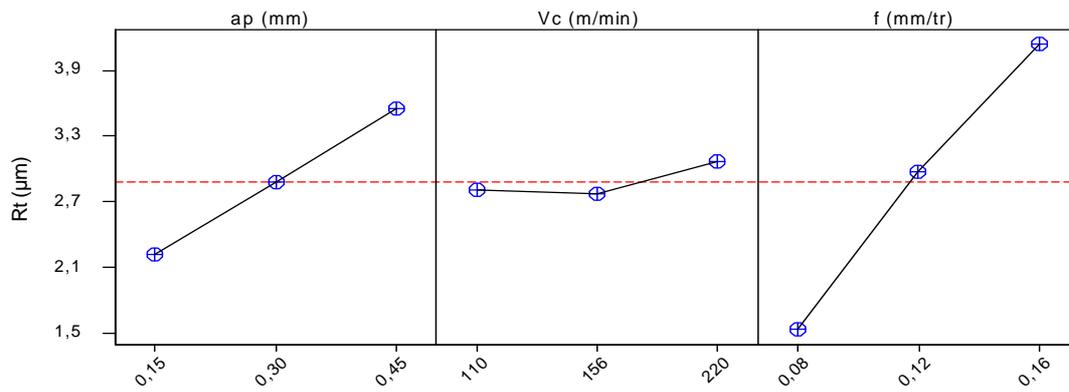


**Figure. IV-5 : Diagramme de surface pour  $R_t$  en fonction de  $V_c$ ,  $a_p$  et  $f$**

En considérant un intervalle de confiance de 95%, on constate que seules la vitesse d'avance et l'interaction  $a_p * f$  ont un impact significatif sur le critère de rugosité  $R_t$  puisque leurs valeurs de probabilité  $P$  sont inférieures à 0,05.

### B/ Graphique des effets principaux pour $R_t$

La figure IV-6 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur le critère de rugosité  $R_t$ .

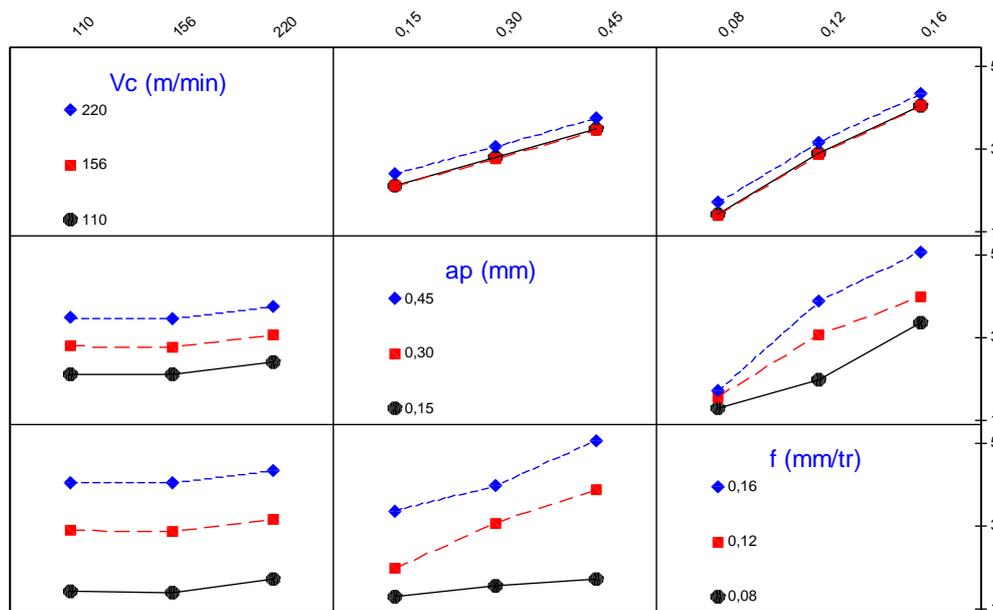


**Figure. IV-6: Graphique des effets principaux pour Rt**

La figure IV-6 montre que seule la vitesse d'avance a un effet significatif sur le critère de rugosité Rt. En effet, on remarque que la pente du paramètre f est plus grande par rapport à la pente de la vitesse de coupe et celle de la profondeur de passe.

### C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Rt

La figure IV-7 montre la matrice de diagrammes d'interactions pour Rt en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe.

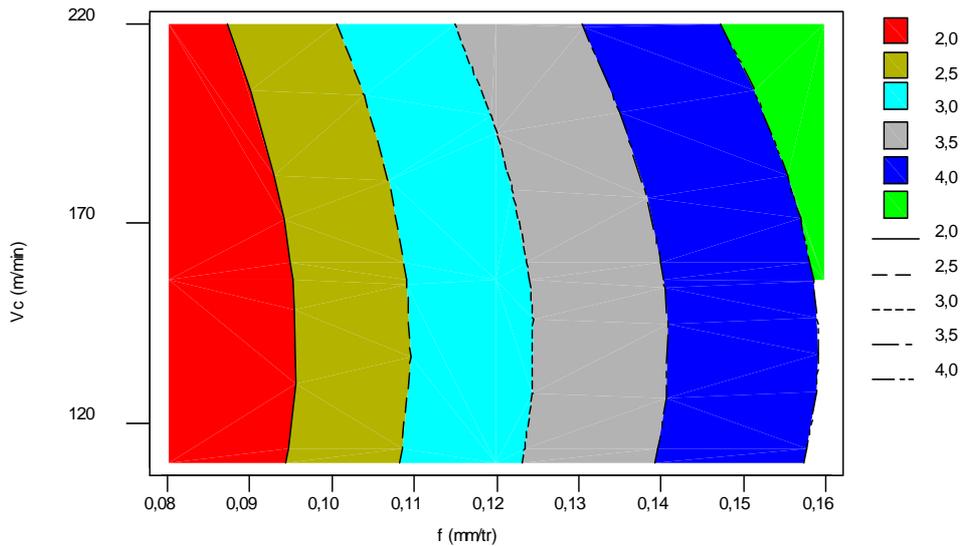


**Fig. IV-7: Matrice de diagrammes d'interactions pour Rt**

On remarque que pour le cas de l'interaction  $ap * f$ , les lignes ne sont pas parallèles ce qui confirme l'existence d'une interaction entre la profondeur de passe et l'avance

### D/Graphique de contour de Rt

La figure IV-8 montre le graphique de contour pour Rt en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance.



**Figure. IV-8: Graphique de contour de Rt**

On remarque dans cette figure que la zone rouge indique les valeurs les plus faibles de  $R_t < 2 \mu\text{m}$ , tan disque la zone verte au coin supérieur indique les valeurs les plus élevées de  $R_t > 4 \mu\text{m}$ .

#### **E/ Modèle généralisé**

Le modèle qui décrit la variation de  $R_t$  en fonction des tous les facteurs et les interactions est défini de la façon suivante :

$$R_t = -0,81 - 0,01 V_c - 2,18 a_p + 38,38 f + 0,0001 V_c^2 + 0,52 a_p^2 - 89,58 f^2 + 0,0015 V_c * a_p + 0,0021 V_c * f + 52,92 a_p * f$$

$$R^2 = 97,9\%$$

#### **F/ Modèle réduit**

Le modèle qui décrit la variation de  $R_t$  en fonction des facteurs et des interactions significatifs peut être défini de la façon suivante :

$$R_t = 0,003 V_c + 16,875 f + 52,917 a_p * f$$

$$R^2 = 95,3\%$$

#### **IV.2.1.3: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Rz**

Le tableau IV-4 montre les coefficients de régression estimés pour  $R_z$  et les valeurs de la probabilité  $P$  qui indiquent la signification des facteurs et des interactions.

Terme	Coef	Er-T	Coef	T	P
Constante	0,06	1,5397		0,038	0,970
$V_c$ (m/mi)	-0,02	0,0123		-1,890	0,076
$a_p$ (mm)	-0,26	3,3324		-0,079	0,938
$f$ (mm/tr)	37,32	16,2756		2,293	0,035

Vc (m/mi)*Vc (m/mi)	0,0011	0,0001	2,191	0,043
ap (mm)*ap (mm)	-5,48	4,4314	-1,237	0,233
f (mm/tr)*f (mm/tr)	-52,08	62,3169	-0,836	0,415
Vc (m/mi)*ap (mm)	0,01	0,0085	1,335	0,199
Vc (m/mi)*f (mm/tr)	-0,04	0,0319	-1,335	0,199
ap (mm)*f (mm/tr)	33,33	11,7506	2,837	0,011

S = 0,2442

R-carré = 96,2% R-carré (ajus) = 94,2%

Tab. IV-4 : Analyse de régression de Rz

### A/ Evolution de la rugosité Rz en fonction des paramètres du régime de coupe

La surface de réponse du critère de rugosité Rz en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la figure IV-9. Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur le critère de rugosité Rz.

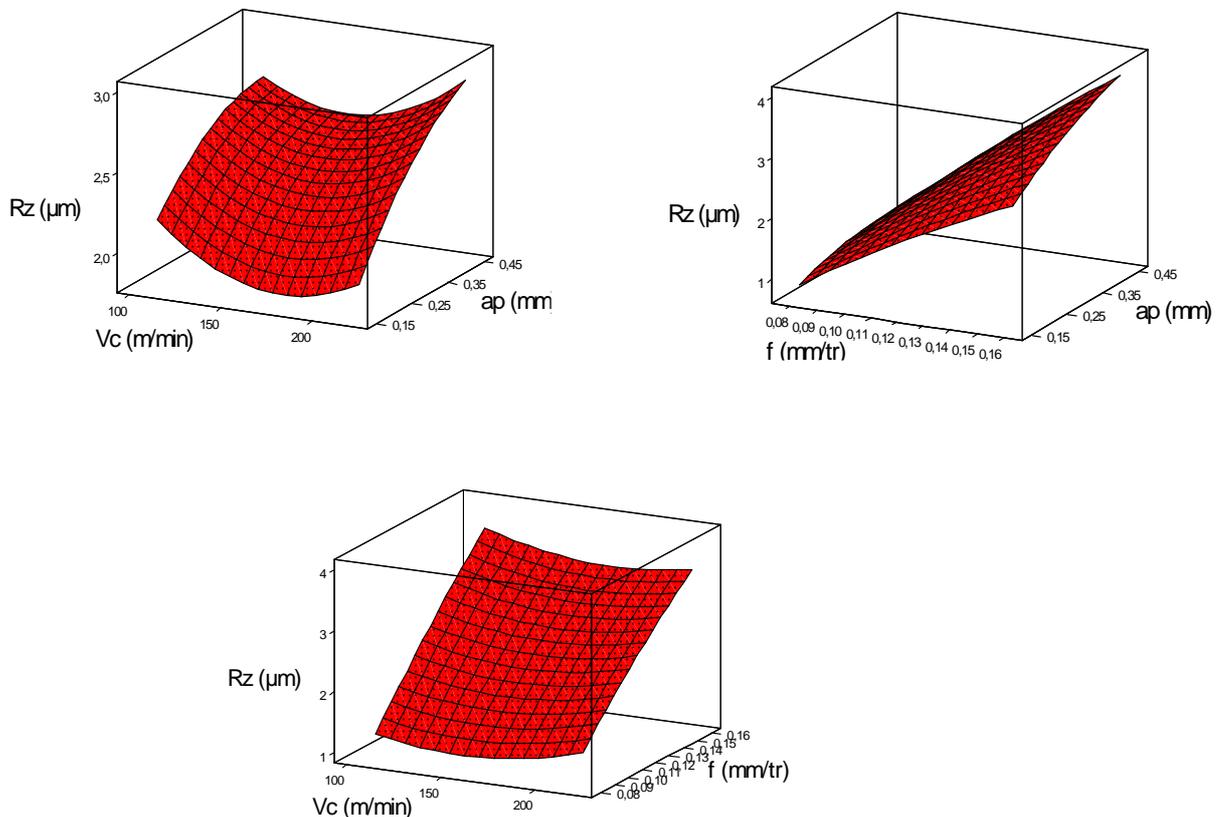


Fig. IV-9 Diagramme de surface pour Rz en fonction de Vc, ap et f

En considérant un intervalle de confiance de 95%, on constate que seules la vitesse d'avance f et les interactions Vc \*Vc, et ap\*f ont un impact significatif sur le critère de rugosité Rz puisque leurs valeurs de probabilité P sont inférieures à 0,05.

## B/ Graphique des effets principaux pour Rz

La figure IV-10 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur le critère de rugosité Rz.

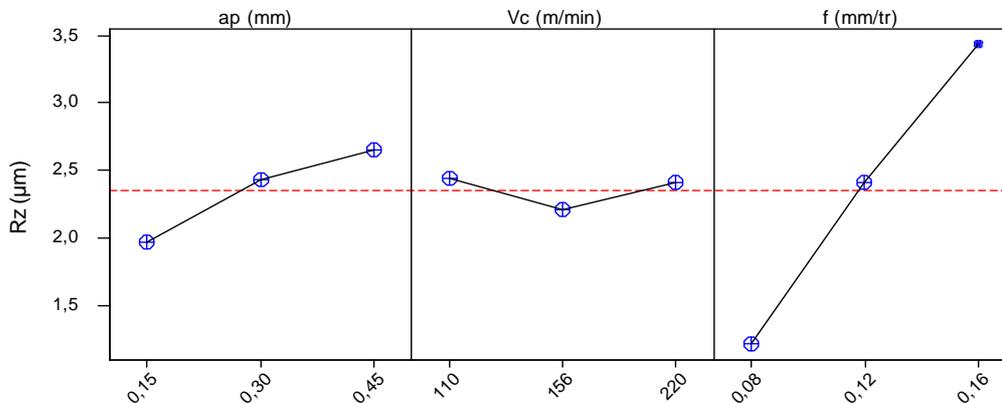


Figure. IV-10: Graphique des effets principaux pour Rz

La figure IV-10 montre que seule la vitesse d'avance a un effet significatif sur le critère de rugosité Rz. En effet, on remarque que la pente du paramètre f est plus grande par rapport à la pente de la vitesse de coupe et celle de la profondeur de passe.

## C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Rz

La figure IV-11 montre la matrice de diagrammes d'interactions pour Rz en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe.

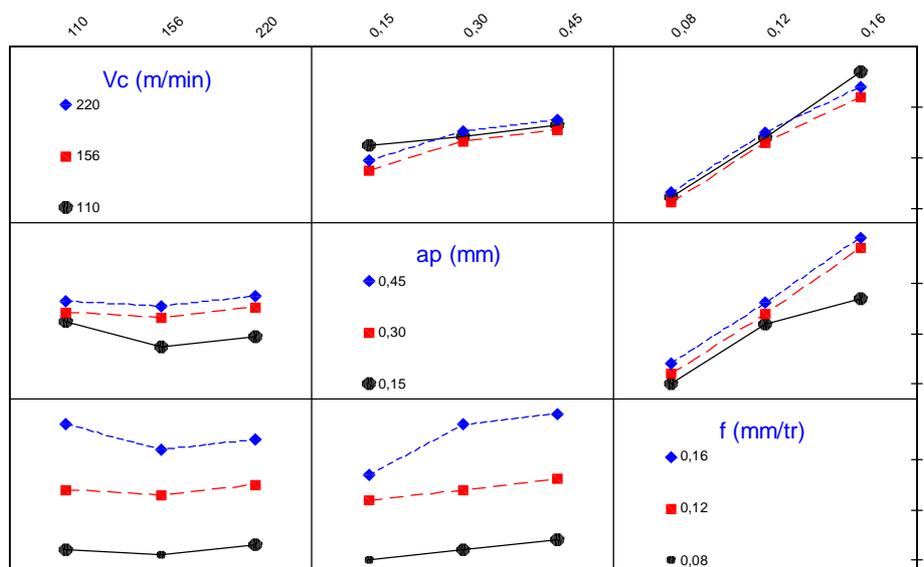


Figure. IV-11: Matrice de diagrammes d'interactions pour Rz

On remarque que pour le cas de l'interaction ap \* f, les lignes ne sont pas parallèles ce qui confirme l'existence d'une interaction entre la profondeur de passe et l'avance

## D/Graphique de contour de Rt

La figure IV-12 montre le graphique de contour pour Rz en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance.

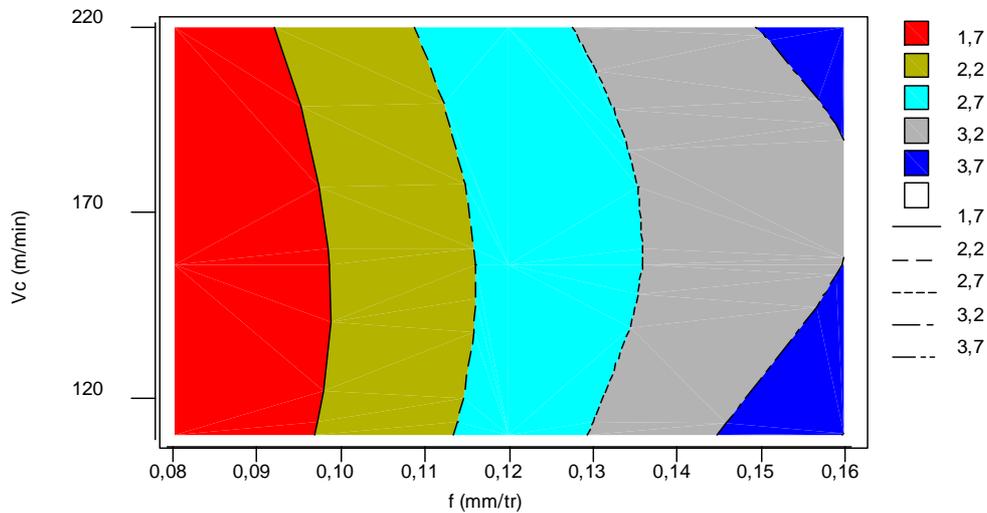


Figure. IV-12: Graphique de contour pour Rz

On remarque dans cette figure que la zone rouge indique les valeurs les plus faibles de Rz < 1,7  $\mu\text{m}$ , tandis que la zone bleue indique les valeurs les plus élevées de Rz > 3,7  $\mu\text{m}$ .

## E/ Modèle généralisé

Le modèle qui décrit la variation de Rz en fonction de tous les facteurs et les interactions peut être défini de la façon suivante :

$$Rz = 0,06 - 0,02 Vc - 0,26 ap + 37,32 f + 0,0001 Vc^2 - 5,48 ap^2 - 52,08 f^2 + 0,0011 Vc*ap - 0,04 Vc*f + 33,33 ap*f$$

$$R^2 = 96,2\%$$

## F/ Modèle réduit

Le modèle qui décrit la variation de Rz en fonction des facteurs et des interactions significatifs peut être défini de la façon suivante :

$$Rz = 40,32 f + 0,0014 Vc^2 + 35,38 ap*f$$

$$R^2 = 94,5\%$$

### IV.2.1.4: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Fa

Le tableau IV-5 montre les coefficients de régression estimés pour Fa et les valeurs de la probabilité P qui indiquent la signification des facteurs et des interactions.

Terme	Coef	Er-T	Coef	T	P
Constante	-9,4		25,24	-0,371	0,715
Vc (m/mi)	-0,3		0,20	-1,332	0,200

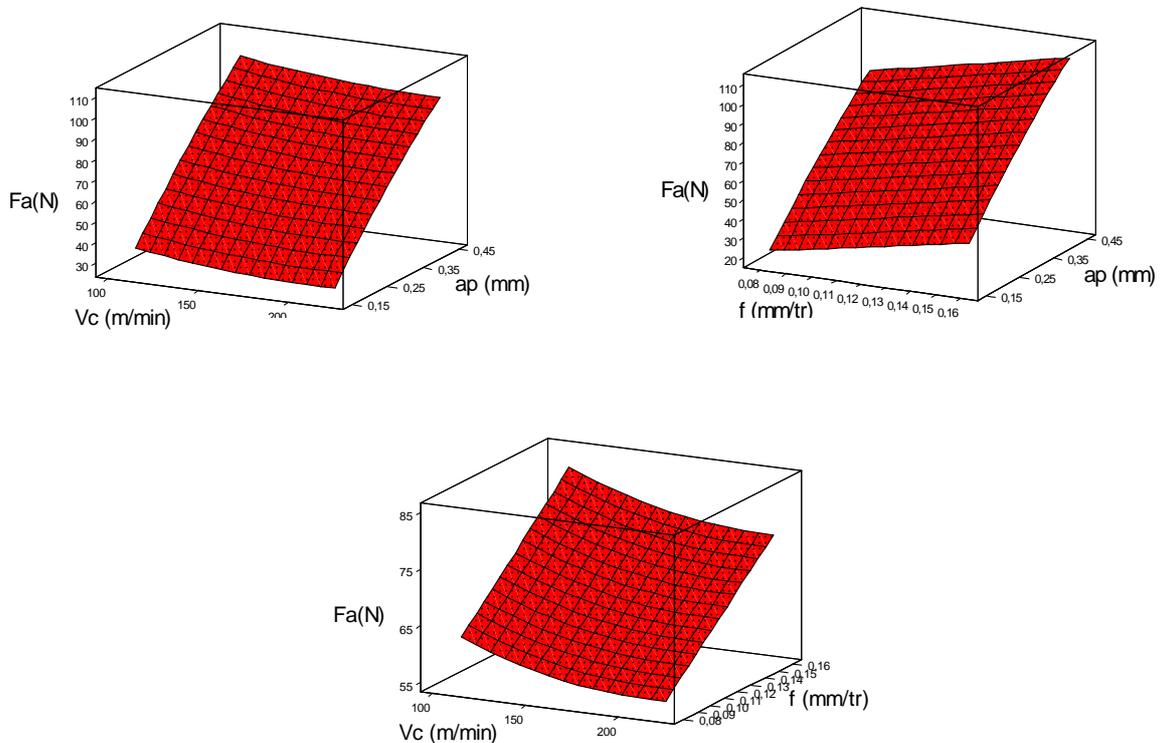
$a_p$ (mm)	287,8	54,63	5,269	0,000
$f$ (mm/tr)	214,7	266,81	0,805	0,432
$V_c$ (m/mi)* $V_c$ (m/mi)	0,0	0,00	1,195	0,248
$a_p$ (mm)* $a_p$ (mm)	-128,5	72,65	-1,769	0,095
$f$ (mm/tr)* $f$ (mm/tr)	64,2	1021,58	0,063	0,951
$V_c$ (m/mi)* $a_p$ (mm)	-0,0001	0,14	-0,159	0,875
$V_c$ (m/mi)* $f$ (mm/tr)	-0,1	0,52	-0,143	0,888
$a_p$ (mm)* $f$ (mm/tr)	107,6	192,63	0,559	0,584

$S = 4,004$        $R\text{-carré} = 98,8\%$        $R\text{-carré (ajus)} = 98,1\%$

**Tab. IV-5 : Analyse de régression de  $F_a$**

### A/ Evolution de $F_a$ en fonction des paramètres du régime de coupe

La surface de réponse du critère de rugosité  $F_a$  en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la figure IV-13. Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur  $F_a$ .

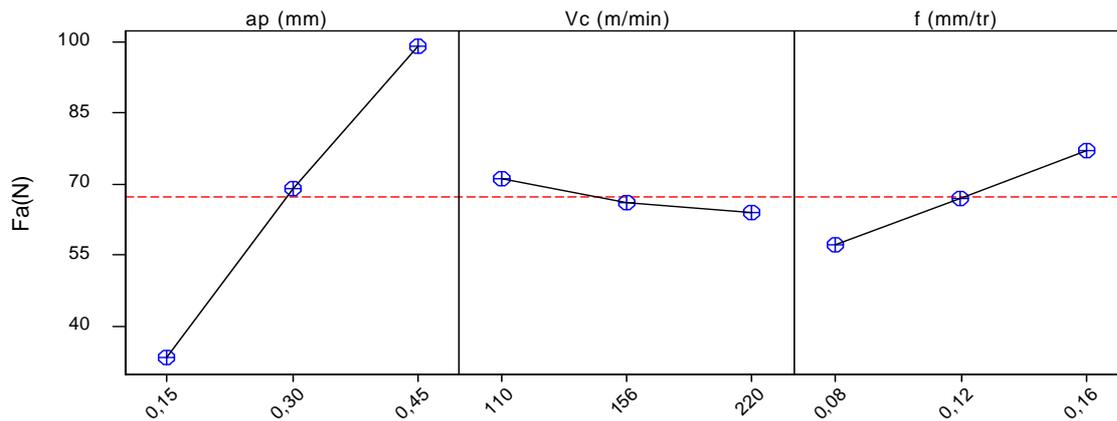


**Fig. IV-13 : Diagramme de surface pour  $F_a$  en fonction de  $V_c$ ,  $a_p$  et  $f$**

En considérant un intervalle de confiance de 95%, on constate que seule la profondeur de passe a un impact significatif sur la composante  $F_a$  puisque sa valeur de probabilité  $P$  est inférieure à 0,05.

### B/ Graphique des effets principaux pour $F_a$

La figure IV-14 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur  $F_a$ .

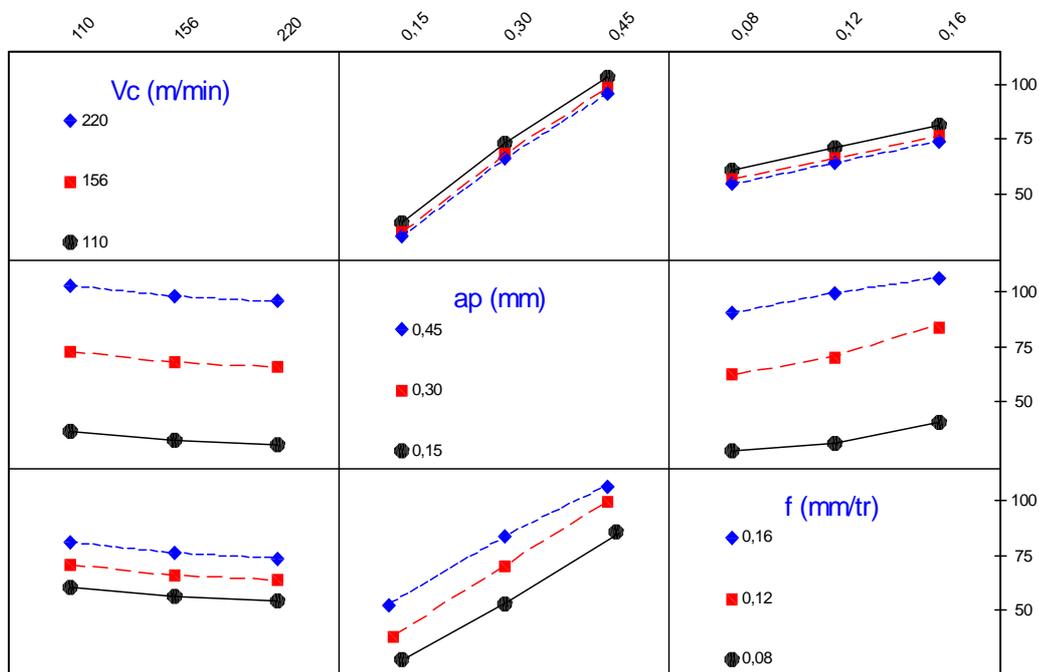


**Figure. IV-14 : Graphique des effets principaux pour Fa**

La figure IV-14 montre que seule la profondeur de passe a un effet significatif sur la composante Fa. En effet, on remarque que la pente du paramètre ap est plus grande que la pente de la vitesse de coupe et celle de l'avance.

### C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Fa

La figure IV-15 montre la matrice de diagrammes d'interactions pour Fa en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe.



**Figure. IV-15 : Matrice de diagrammes d'interactions pour Fa**

On remarque que toutes les lignes sont parallèles. Donc on n'a pas d'interactions entre la vitesse de coupe, la profondeur de passe et l'avance.

## D/Graphique de contour de Fa

La figure IV-16 montre le graphique de contour pour Fa en fonction de la vitesse de coupe et de la profondeur de passe.

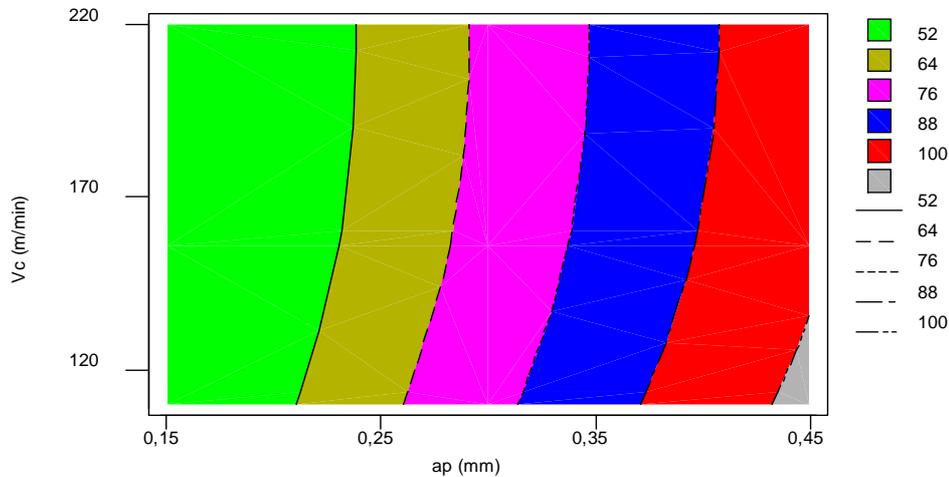


Figure. IV-16 : Graphique de contour pour Fa

On remarque dans cette figure que la zone verte indique les valeurs les plus faibles de Fa <52 N, tan disque la zone grise indique les valeurs les plus élevées de Fa >100 N.

## E/ Modèle généralisé

Le modèle qui décrit la variation de Fa en fonction de tous les facteurs et les interactions peut être défini de la façon suivante :

$$Fa = -9,4 - 0,3 Vc + 287,8 ap + 214,7 f + 0,0003 Vc^2 - 128,5 ap^2 + 64,2 f^2 - 0,0001Vc*ap - 0,1 Vc*f + 107,6 ap*f$$

$$R^2 = 98,8\%$$

## F/ Modèle réduit

Le modèle qui décrit la variation de Fa en fonction des facteurs et des interactions significatifs peut être défini de la façon suivante :

$$Fa = 291,12 ap$$

$$R^2 = 95,44\%$$

### IV.2.1.5: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Fr

Le tableau IV-6 montre les coefficients de régression estimés pour Fr et les valeurs de la probabilité P qui indiquent la signification des facteurs et des interactions.

Terme	Coef	Er-T	Coef	T	P
Constante	-22	9,722		-2,258	0,037
Vc (m/mi)	0,0003		0,077	0,341	0,737
ap (mm)	131	21,042		6,206	0,000

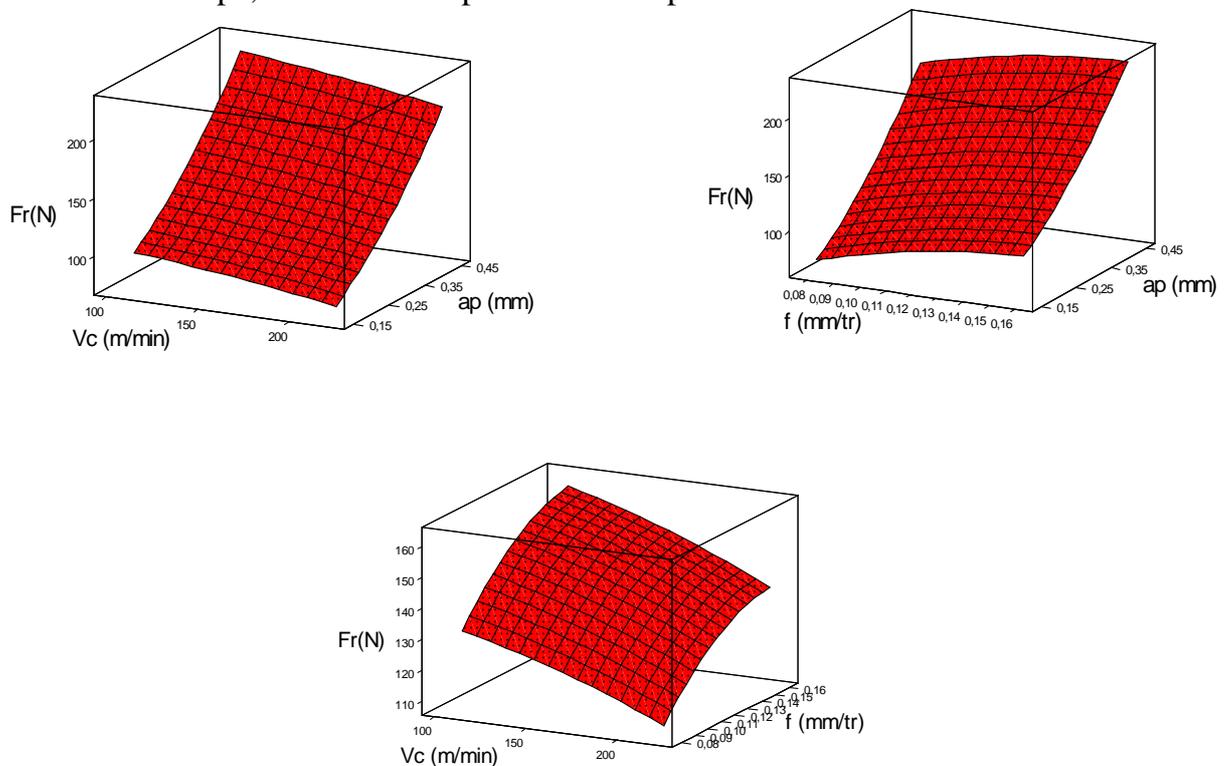
f (mm/tr	1312	102,772	12,766	0,000
Vc (m/mi)*Vc (m/mi	-0,0013	0,000	-2,816	0,012
ap (mm)*ap (mm)	488	27,982	17,427	0,000
f (mm/tr)*f (mm/tr	-3736	393,497	-9,495	0,000
Vc (m/mi)*ap (mm)	-0,0001	0,054	-0,766	0,454
Vc (m/mi)*f (mm/tr	-0,0002	0,201	-1,120	0,278
ap (mm)*f (mm/tr	-85	74,199	-1,142	0,269

S = 1,542      R-carré = 94,9%      R-carré (ajus) = 92,6%

**Tab. IV 6 : Analyse de régression de Fr**

### A/ Evolution de Fr en fonction des paramètres du régime de coupe

La surface de réponse de Fr en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la graphique figure IV-17. Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur Fr.



**Fig. IV-17: Diagramme de surface pour Fr en fonction de Vc, ap et f**

En considérant un intervalle de confiance de 95%, on constate que la profondeur de passe, l'avance, la vitesse de coupe et les interaction  $Vc*Vc$ ,  $ap*ap$  et  $f*f$  ont un impact significatif sur la composante Fr puisque leurs valeurs de probabilité P sont inférieures à 0,05.

### B/ Graphique des effets principaux pour Fr

La figure IV-18 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur Fr.

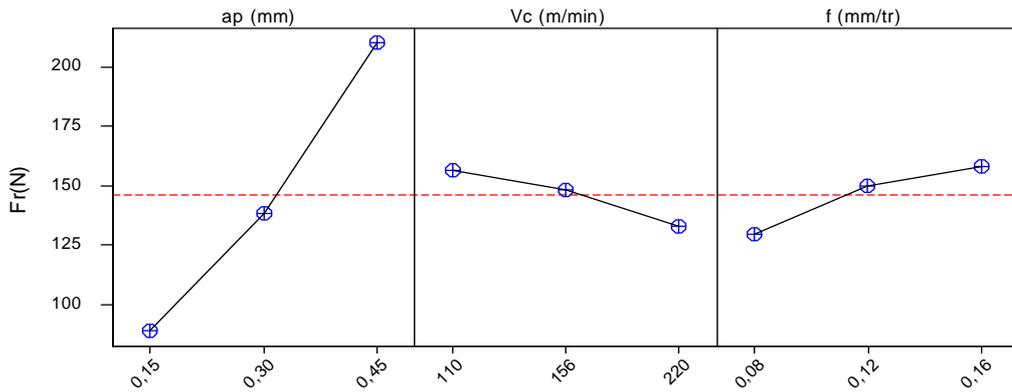


Figure. IV-18: Graphique des effets principaux pour  $F_r$

La figure IV-18 montre que la profondeur de passe a l'effet le plus significatif sur la composante  $F_r$  suivi de l'avance. En effet, on remarque que la pente du paramètre  $a_p$  est plus grande que la pente de la vitesse de coupe et celle de l'avance.

### C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour $F_r$

La figure IV-19 montre la matrice de diagrammes d'interactions pour  $F_r$  en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe.

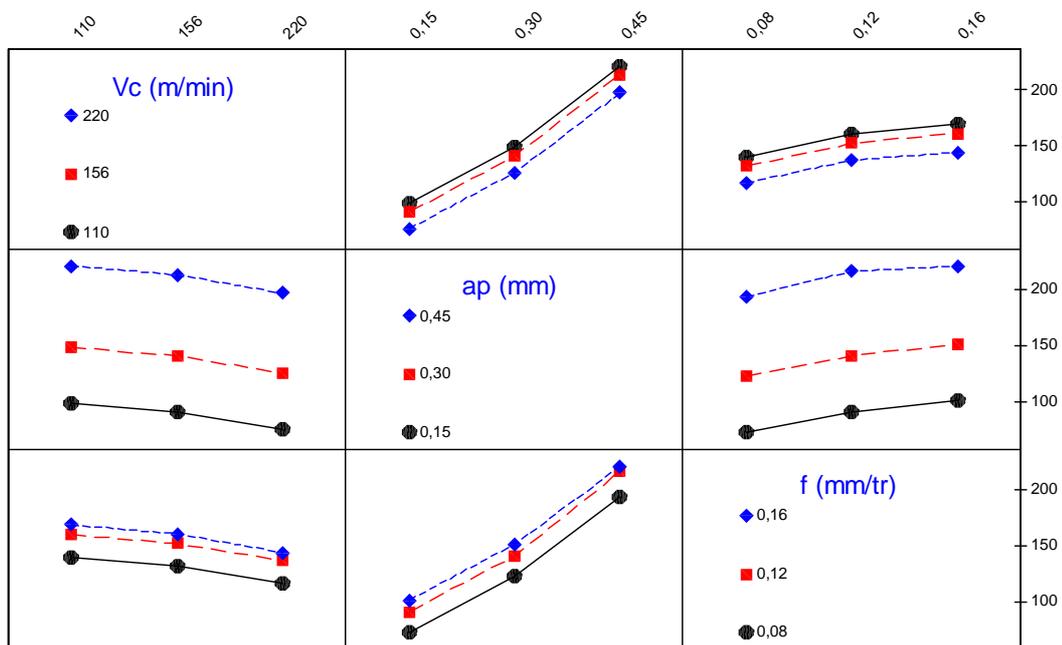


Figure. IV-19 : Matrice de diagrammes d'interactions pour  $F_r$

On remarque que toutes les lignes sont parallèles. Donc on n'a pas d'interactions entre la vitesse de coupe, la profondeur de passe et l'avance.

## D/Graphique de contour de Fr

La figure IV-20 montre le graphique de contour pour Fr en fonction de la vitesse de coupe et de la profondeur de passe.

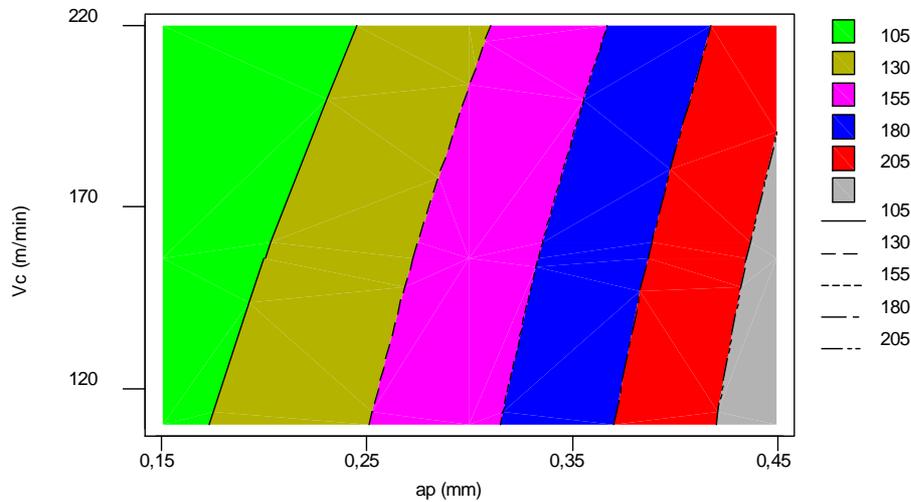


Figure. IV-20 : Graphique de contour pour Fr

On remarque dans cette figure que la zone verte indique les valeurs les plus faibles de Fr <105 N, tan disque la zone grise indique les valeurs les plus élevées de Fr >205 N.

## E/ Modèle généralisé

Le modèle qui décrit la variation de Fr en fonction de tous les facteurs et les interactions peut être défini de la façon suivante :

$$Fr = - 22 - 0,0003 Vc + 131 ap + 1,312 f - 0,0013 Vc^2 + 488 ap^2 - 3736 f^2 - 0,0001 Vc*ap - 0,0002 Vc*f - 85 ap*f$$

$$R^2 = 94,9\%$$

## F/ Modèle réduit

Le modèle qui décrit la variation de Fr en fonction des facteurs et des interactions significatifs peut être défini de la façon suivante :

$$Fr = - 24,5 - 0,0022 Vc + 132,4 ap + 1,5122 f - 0,0017 Vc^2 + 491ap^2 - 3742 f^2$$

$$R^2 = 93,32\%$$

### IV.2.1.6: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Fv

Le tableau IV-7 montre les coefficients de régression estimés pour Fv et les valeurs de la probabilité P qui indiquent la signification des facteurs et des interactions.

Terme	Coef	Er-T	Coef	T	P
Constante	-1,7	25,94		-0,067	0,947
Vc (m/mi	-0,3	0,21		-1,463	0,162

$a_p$ (mm)	491,7	56,13	8,760	0,000
$f$ (mm/tr)	340,7	274,15	1,243	0,231
$V_c$ (m/mi)* $V_c$ (m/mi)	0,0021	0,00	0,815	0,426
$a_p$ (mm)* $a_p$ (mm)	-193,2	74,64	-2,588	0,019
$f$ (mm/tr)* $f$ (mm/tr)	-337,5	1049,69	-0,322	0,752
$V_c$ (m/mi)* $a_p$ (mm)	-0,1	0,14	-0,585	0,566
$V_c$ (m/mi)* $f$ (mm/tr)	-0,1	0,54	-0,192	0,850
$a_p$ (mm)* $f$ (mm/tr)	666,7	197,93	3,368	0,004

$S = 4,114$

R-carré = 98,7% R-carré (ajus) = 99,5%

Tab. IV-7 : Analyse de régression de  $F_v$

### A/ Evolution de $F_v$ en fonction des paramètres du régime de coupe

La surface de réponse de  $F_v$  en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la figure IV-21. Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur  $F_v$ .

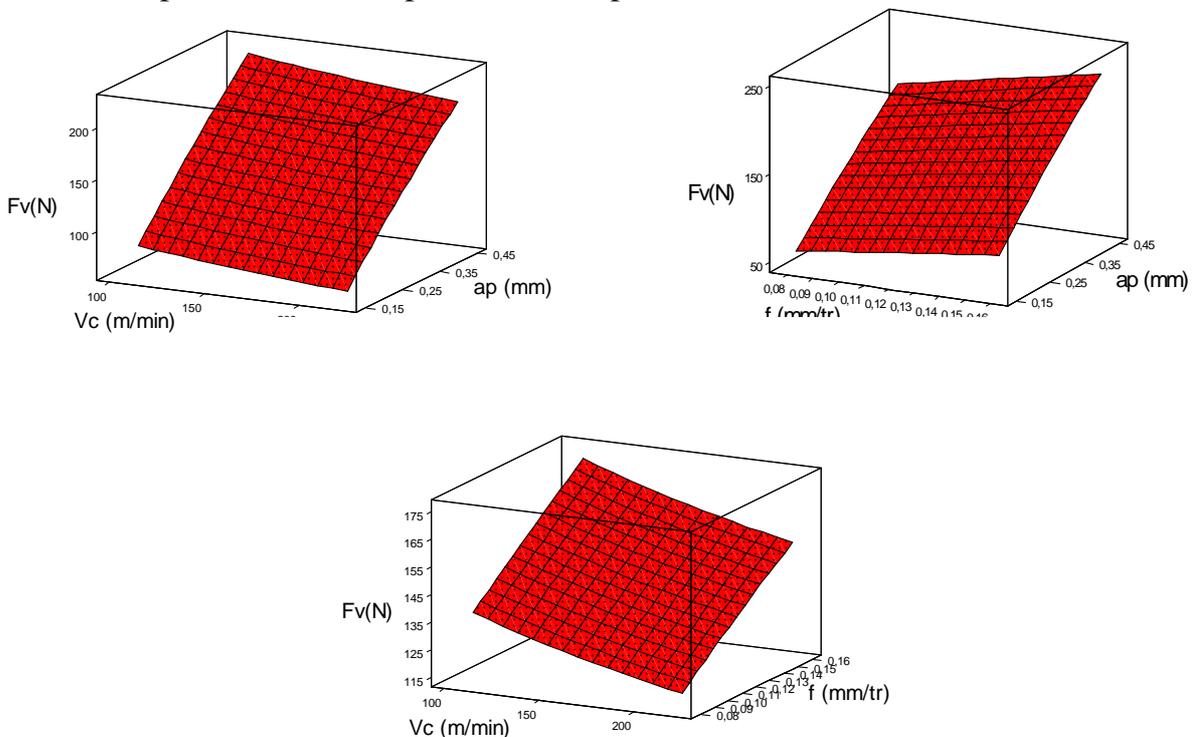


Fig. IV-21 : Diagramme de surface pour  $F_v$  en fonction de  $V_c$ ,  $a_p$  et  $f$

En considérant un intervalle de confiance de 95%, on constate que la profondeur de passe, l'interaction  $a_p*a_p$  et l'interaction  $a_p*f$  ont un impact significatif sur la composante  $F_v$  puisque leurs valeurs de probabilité  $P$  sont inférieures à 0,05.

### B/ Graphique des effets principaux pour $F_v$

La figure IV-22 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur  $F_v$ .

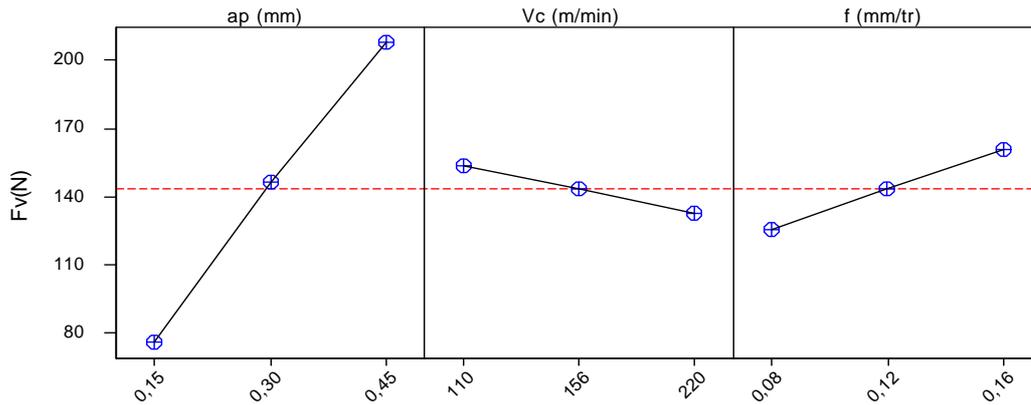


Figure. IV-22: Graphique des effets principaux pour Fv

La figure IV-22 montre que seule la profondeur de passe a un effet significatif sur la composante Fv. En effet, on remarque que la pente du paramètre ap est plus grande que la pente de la vitesse de coupe et celle de l'avance.

### C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Fv

La figure IV-23 montre la matrice de diagrammes d'interactions pour Fv en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe.

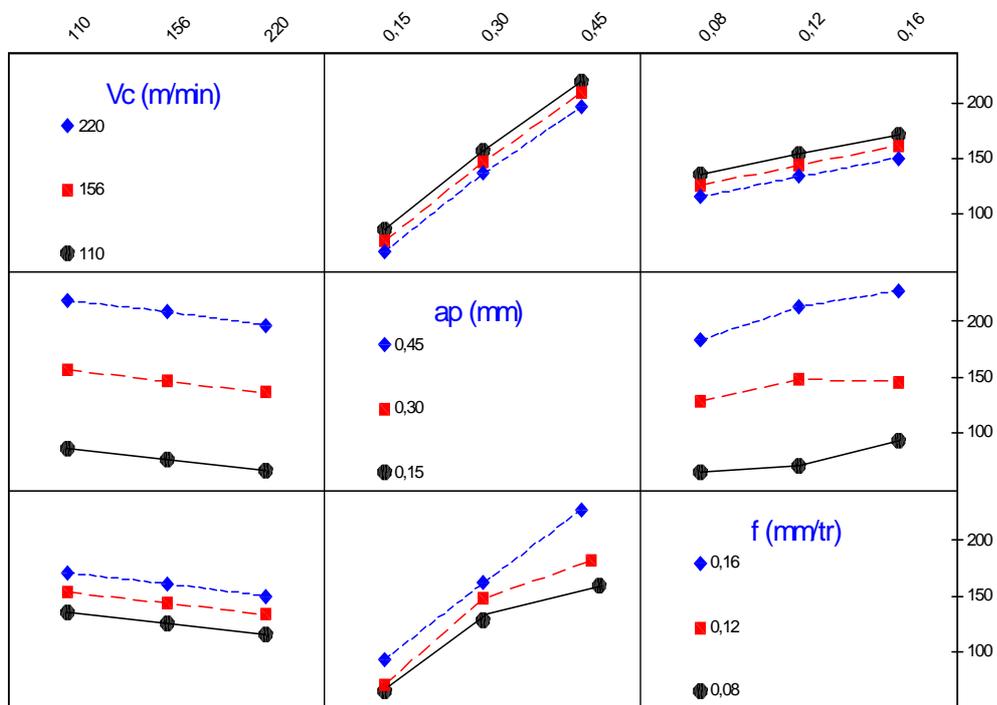


Figure. IV-23 : Matrice de diagrammes d'interactions pour Fv

On remarque que pour le cas de l'interaction ap \*f, les lignes ne sont pas parallèles ce qui confirme l'existence d'une interaction entre la profondeur de passe et l'avance.

## D/Graphique de contour de Fv

La figure IV-24 montre le graphique de contour pour Fv en fonction de la vitesse de coupe et de la profondeur de passe.

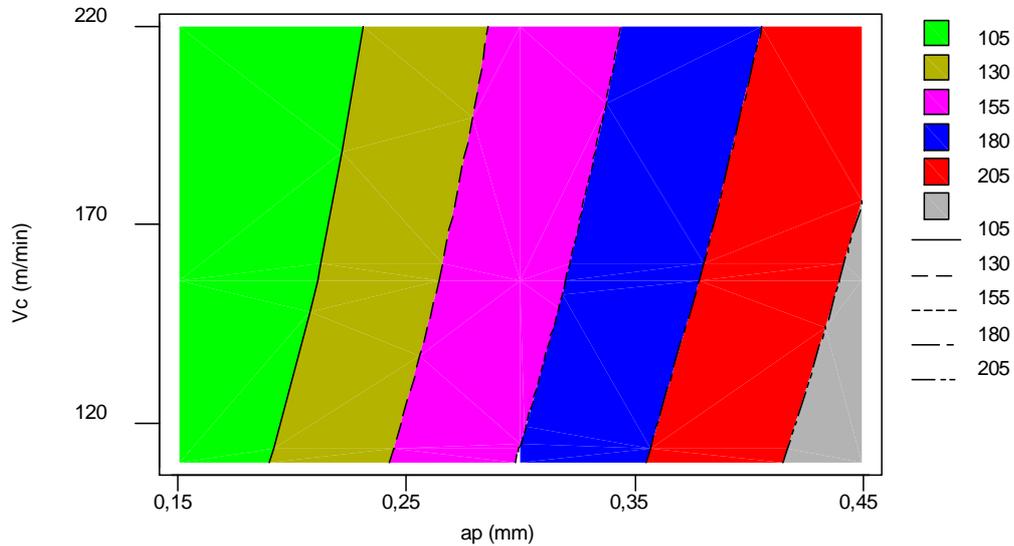


Figure. IV-24 : Graphique de contour pour Fv

On remarque dans cette figure que la zone verte indique les valeurs les plus faibles de Fv <105 N, tan disque la zone grise indique les valeurs les plus élevées de Fv >205 N.

## E/ Modèle généralisé

Le modèle qui décrit la variation de Fv en fonction des tous les facteurs et les interactions peut être défini de la façon suivante :

$$Fv = - 1,7 - 0,3 Vc + 491,7 ap + 0,0021 Vc^2 - 193,2 ap^2 - 337,5 f^2 - 0,1 Vc*ap - 0,0002 Vc*f + 340,7 f + 666,7 ap *f$$

$$R^2 = 98,7\%$$

## F/ Modèle réduit

Le modèle qui décrit la variation de Fv en fonction des facteurs et des interactions significatifs peut être défini de la façon suivante :

$$Fv = 497,3 ap - 195,11 ap^2 + 671,2 ap *f$$

$$R^2 = 95,15\%$$

## IV.2.2: Cas de la céramique mixte CC650/Inconel 718

Les résultats de l'évolution de la rugosité et des efforts de coupe pour le cas de la céramique mixte CC650 sont montrés sur le tableau IV-8.

Ordre Essai	Ordre Std	Vc(m/min)	ap mm)	f(mm/tr)	Ra (µm)	Rt (µm)	Rz (µm)	Fa(N)	Fr(N)	Fv(N)
1	3	110	0,15	0,16	0,34	1,21	1,31	36,21	91,1	81
2	24	220	0,3	0,16	0,69	2	1,66	40,41	110	86,9
3	5	110	0,3	0,12	1,05	3,4	2,01	50,39	120	109
4	4	110	0,3	0,08	0,49	1,59	1,46	62,7	141,1	145,8
5	1	110	0,15	0,08	0,84	3,1	1,81	79,6	160	165
6	26	220	0,45	0,12	1,19	4	3,5	93,1	170	178,8
7	20	220	0,15	0,12	0,64	1,74	1,61	100,1	212,1	200,4
8	11	156	0,15	0,12	0,99	3,9	3,2	109,4	235	230,26
9	9	110	0,45	0,16	1,34	5,1	4,6	116,6	241	246,6
10	12	156	0,15	0,16	0,49	1,41	1,45	30,9	71,1	70
11	7	110	0,45	0,08	0,84	2,2	1,8	36,5	90	79,93
12	17	156	0,45	0,12	1,2	3,6	2,15	46,46	100	102,1
13	21	220	0,15	0,16	0,64	1,79	1,6	66,78	121,1	122,5
14	19	220	0,15	0,08	0,99	3,3	1,95	75	140	142
15	25	220	0,45	0,08	1,34	4,2	3,64	87,5	151	163,8
16	22	220	0,3	0,08	0,79	1,94	1,75	96,01	192,1	180,47
17	6	110	0,3	0,16	1,14	4,1	3,34	103,2	215	188,99
18	14	156	0,3	0,12	1,49	5,3	4,74	116	221	237,15
19	10	156	0,15	0,08	0,82	3,41	2,75	26,53	61,1	63,12
20	23	220	0,3	0,12	1,17	4,2	3,1	30,5	80	74,7
21	27	220	0,45	0,16	1,53	5,6	3,45	42,11	90	85,3
22	15	156	0,3	0,16	0,97	3,79	2,9	55,04	111,1	106,81
23	16	156	0,45	0,08	1,32	5,3	3,25	57,06	130	131,5
24	2	110	0,15	0,12	1,67	6,2	4,94	68,41	141	159,5
25	13	156	0,3	0,08	1,12	3,94	3,05	88,9	182,1	152,8
26	18	156	0,45	0,16	1,47	6,1	4,64	96,79	205	179,1
27	8	110	0,45	0,12	1,82	7,3	6,04	110	211	230

Tab. IV-8 : Plan d'expérience de 27 essais pour l'élaboration des modèles de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des paramètres d'usinage pour la céramique mixte CC650.

### IV.2.2.1: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Ra

Le tableau IV-9 montre les coefficients de régression estimés pour Ra et les valeurs de la probabilité P qui indiquent la signification des facteurs et des interactions.

Terme	Coeff	Er-T	Coef	T	P
Constante	-0,5691	0,011678	-48,735	0,000	
Vc (m/mi	-0,0013	0,000093	-14,213	0,000	
ap (mm)	0,9944	0,025275	39,345	0,000	

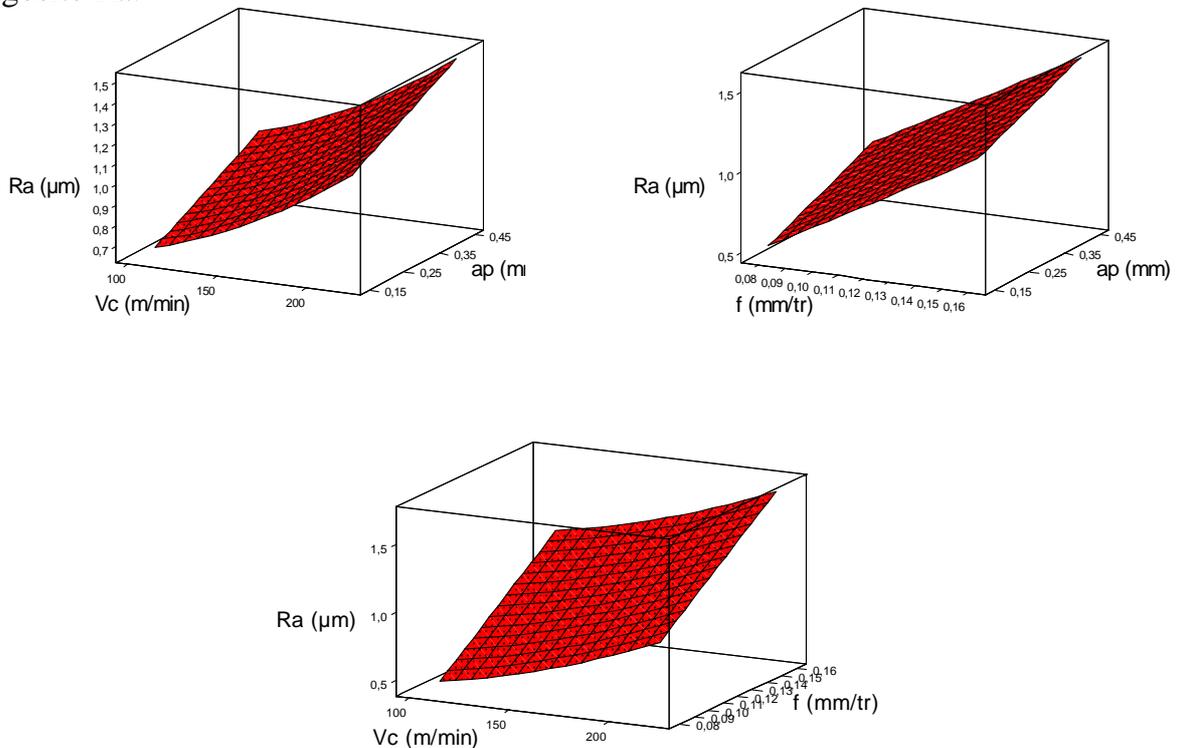
f (mm/tr	8,6667	0,123444	70,207	0,000
Vc (m/mi)*Vc (m/mi	0,0001	0,000000	66,781	0,000
ap (mm)*ap (mm)	0,0741	0,033611	2,204	0,042
f (mm/tr)*f (mm/tr	1,0417	0,472649	2,204	0,042
Vc (m/mi)*ap (mm)	0,0002	0,000065	0,000	1,000
Vc (m/mi)*f (mm/tr	-0,0003	0,000242	-0,000	1,000
ap (mm)*f (mm/tr	-0,4167	0,089123	-4,675	0,000

$$S = 0,001852 \quad R\text{-carré} = 95,7\% \quad R\text{-carré (ajus)} = 95,2\%$$

**Tab. IV-9 : Analyse de régression de Ra**

### A/ Evolution de la rugosité Ra en fonction des paramètres du régime de coupe

La surface de réponse du critère de rugosité **Ra** en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la figure IV-25. Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur le critère de rugosité Ra.



**Figure. IV-25 : Diagramme de surface pour Ra en fonction de Vc, ap et f.**

En considérant un intervalle de confiance de 95%, on constate que la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe ont un impact significatif sur le critère de rugosité Ra puisque la valeur de la probabilité P est inférieure à 0,05 (Tab. IV-9). Aussi, les interactions ayant un impact significatif sur le critère de rugosité Ra sont :  $Vc*Vc$ ,  $ap*ap$ ,  $f*f$  et  $ap*f$  puisque leurs valeurs de probabilité P sont inférieures à 0,05.

## B/ Graphique des effets principaux pour Ra

La figure IV-26 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur Ra.

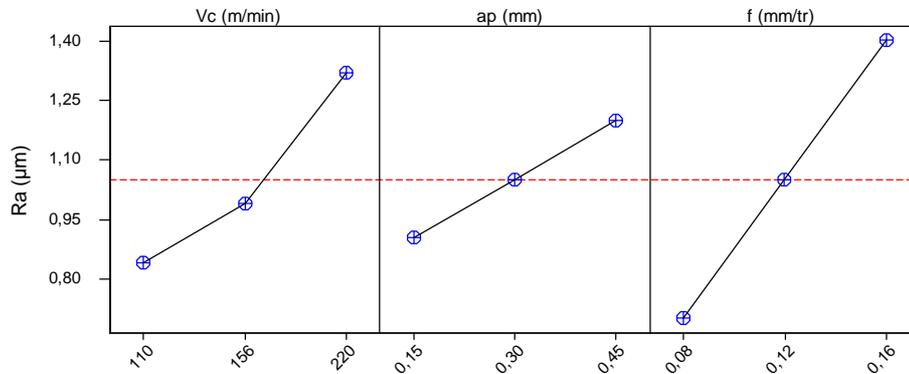


Figure. IV-26 : Graphique des effets principaux pour Ra

La figure IV-26 montre que l'avance, la vitesse de coupe et la profondeur de passe ont un effet significatif sur Ra.

## C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Ra

La figure IV-27 montre la matrice de diagrammes d'interactions pour Ra en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe.

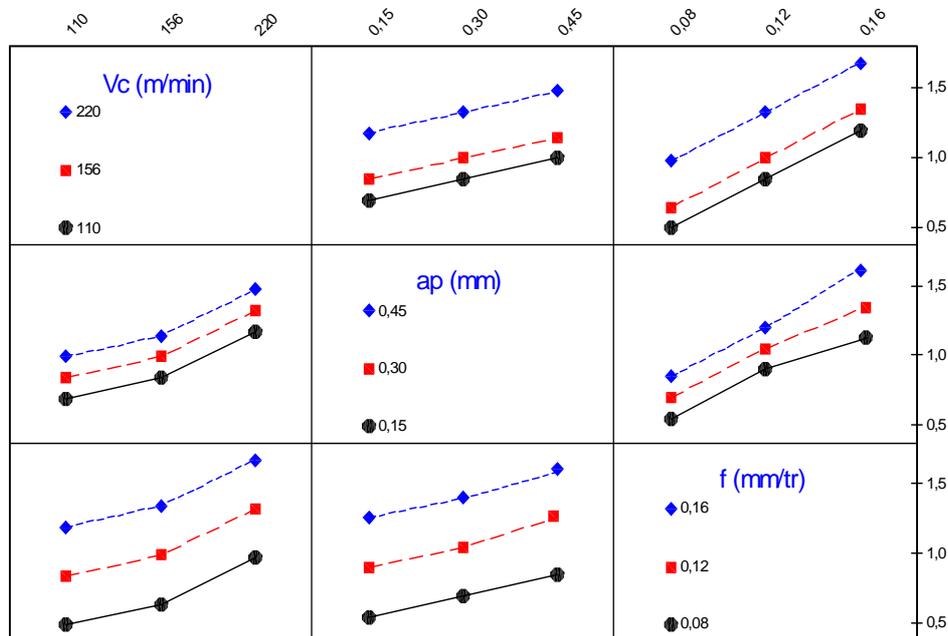


Figure. IV-27 : Matrice de diagrammes d'interactions pour Ra

On remarque que pour le cas de l'interaction ap \* f les lignes ne sont pas parallèles ce qui confirme l'existence d'une interaction entre la profondeur de passe et l'avance.

## D/Graphique de contour de Ra

La figure IV-28 montre le graphique de contour pour Ra en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance.

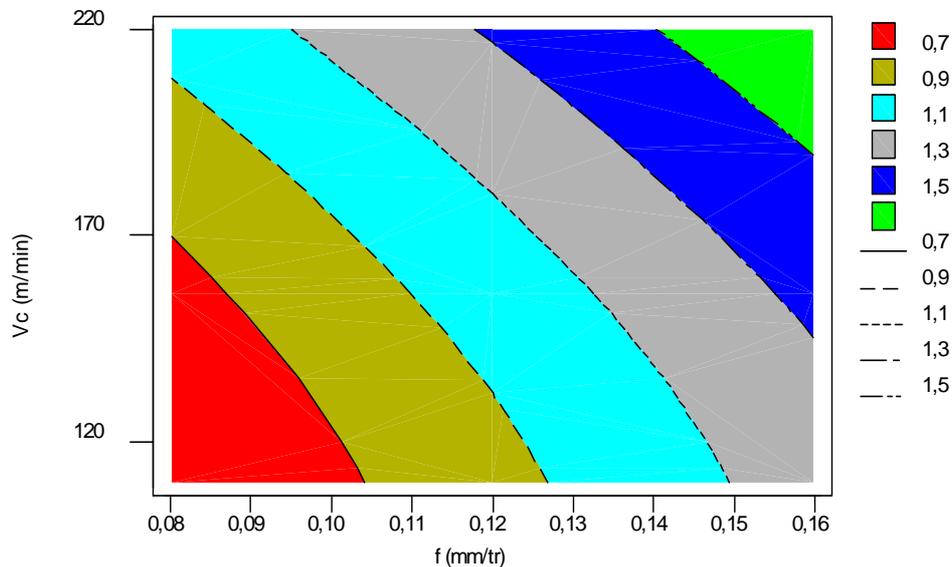


Figure. IV-28 : Graphique de contour pour Ra

On remarque dans cette figure que la zone rouge indique les valeurs les plus faibles de Ra < 0,7  $\mu\text{m}$ , tandis que la zone verte au coin supérieure indique les valeurs les plus élevées de Ra > 1,5  $\mu\text{m}$ .

## E/ Modèle généralisé

Le modèle qui décrit la variation de Ra en fonction de tous les facteurs et les interactions peut être défini de la façon suivante :

$$\text{Ra} = -0,5691 - 0,0013V_c + 0,9944a_p + 8,6667f + 0,0001 V_c^2 + 0,0741a_p^2 + 1,0417f^2 + 0,0002 V_c * a_p - 0,0003 V_c * f - 0,4167a_p * f$$

$$R^2 = 95,7\%$$

## F/ Modèle réduit

Le modèle qui décrit la variation de **Ra** en fonction des facteurs et des interactions significatifs peut être défini de la façon suivante :

$$\text{Ra} = -0,6125 - 0,0021V_c + 0,103a_p + 8,528f + 0,0025 V_c^2 + 0,0812a_p^2 + 1,1004f^2 - 0,4211a_p * f$$

$$R^2 = 94,12\%$$

## IV.2.2.2: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Rt

Le tableau IV-10 montre les coefficients de régression estimés pour Rt et les valeurs de la probabilité P qui indiquent la signification des facteurs et des interactions.

Terme	Coef	Er-T Coef	T	P
Constante	1,7	1,3782	1,205	0,245
Vc (m/mi	-0,1	0,0110	-5,528	0,000
ap (mm)	-1,1	2,9830	-0,378	0,710
f (mm/tr	42,5	14,5690	2,920	0,010
Vc (m/mi*Vc (m/mi	0,009	0,0000	8,031	0,000
ap (mm)*ap (mm)	-0,2	3,9668	-0,056	0,956
f (mm/tr*f (mm/tr	-100,0	55,7825	-1,793	0,091
Vc (m/mi*ap (mm)	0,003	0,0076	0,000	1,000
Vc (m/mi*f (mm/tr	0,011	0,0286	-0,000	1,000
ap (mm)*f (mm/tr	48,8	10,5185	4,635	0,000

S = 0,2186

R-carré = 98,8% R-carré (ajus) = 98,2%

Tab. IV-10 : Analyse de régression de Rt

### A/ Evolution de la rugosité Rt en fonction des paramètres du régime de coupe

La surface de réponse du critère de rugosité Rt en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur figure IV-29. Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur le critère de rugosité Rt.

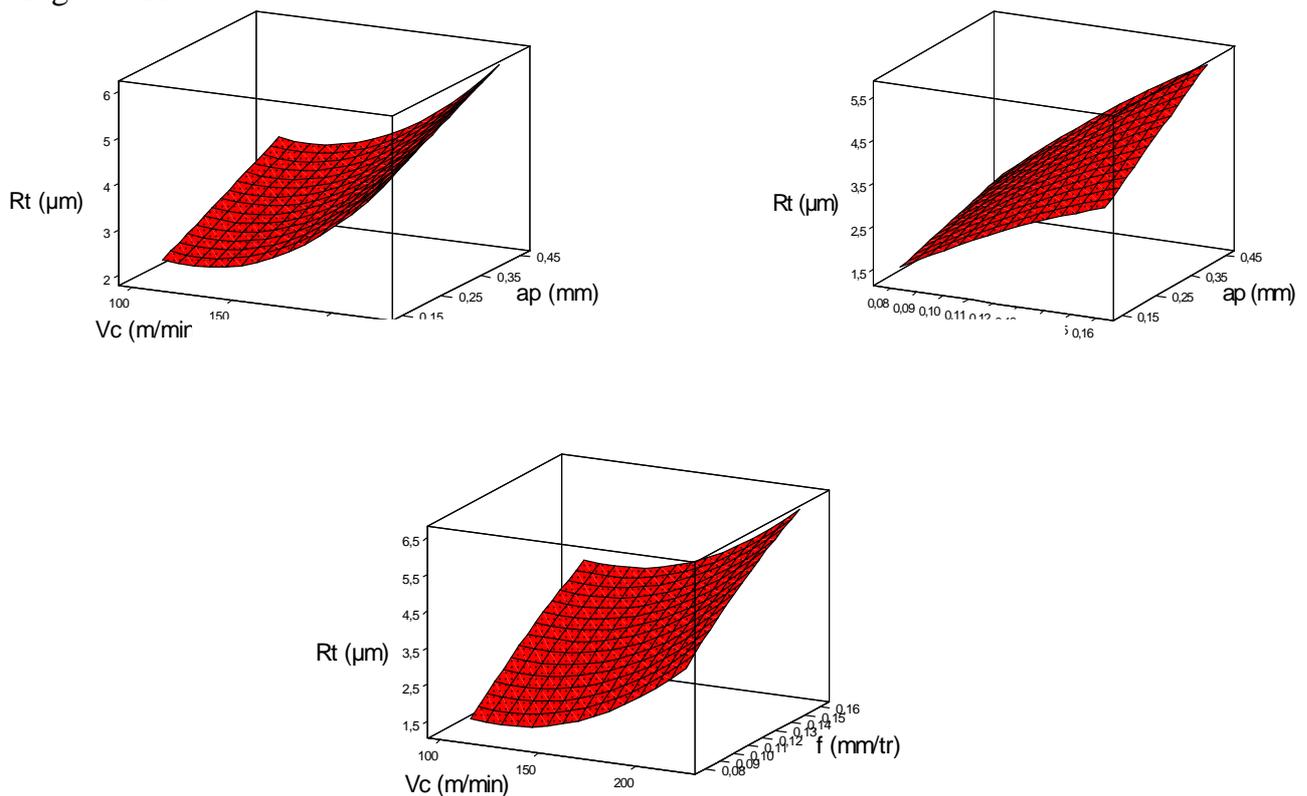


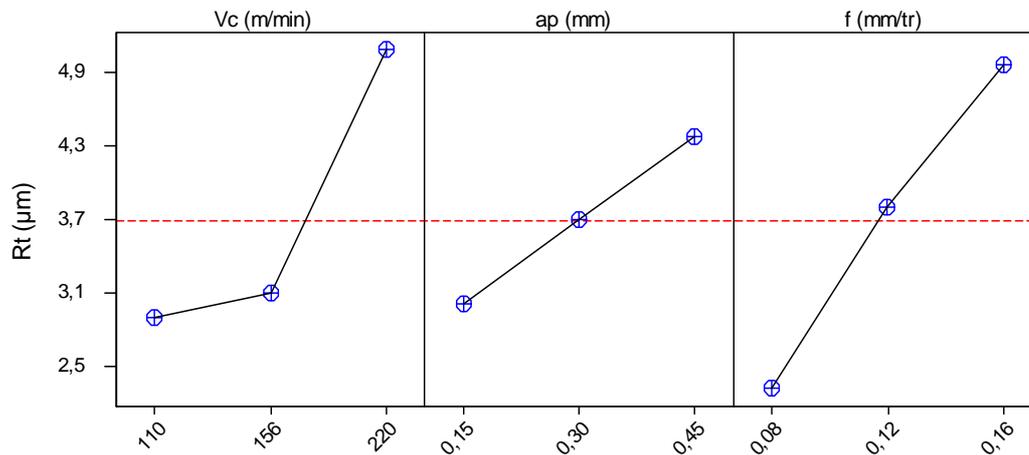
Figure. IV-29 : Diagramme de surface pour Rt en fonction de Vc, ap et f

En considérant un intervalle de confiance de 95%, on constate que seules la vitesse de coupe et la vitesse d'avance et les interactions Vc\*Vc et ap\*f ont un impact

significatif sur le critère de rugosité  $R_t$  puisque leurs valeurs de probabilité  $P$  sont inférieures à 0,05.

### B/ Graphique des effets principaux pour $R_t$

La figure IV-30, montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur  $R_t$ .

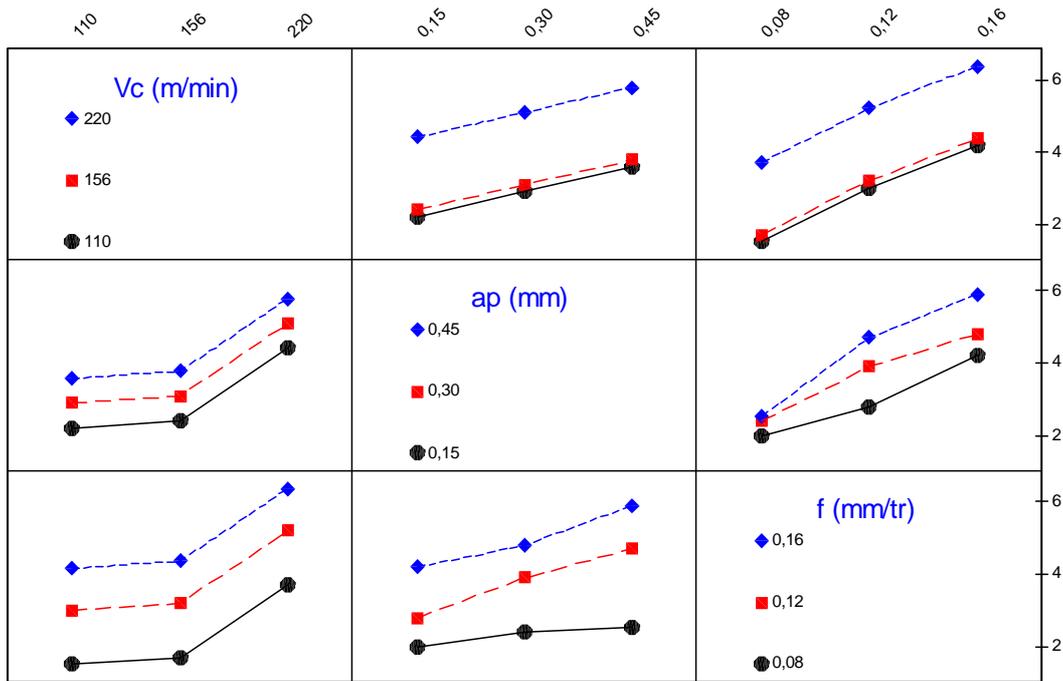


**Figure. IV-30: Graphique des effets principaux pour  $R_t$**

La figure IV-30 montre que la vitesse d'avance et la vitesse de coupe ont un effet significatif sur le critère de rugosité  $R_t$ . En effet, on remarque que la pente de  $f$  et celle de  $V_c$  sont plus grandes que la pente de la profondeur de passe.

### C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour $R_t$

La figure IV-31 montre la matrice de diagrammes d'interactions pour  $R_t$  en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe.

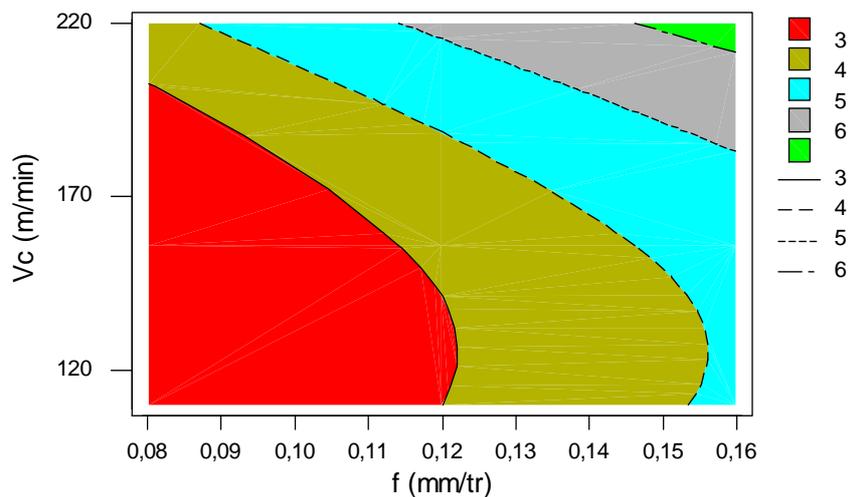


**Fig. IV-31: Matrice de diagrammes d'interactions pour Rt**

On remarque que pour le cas de l'interaction  $ap * f$ , les lignes ne sont pas parallèles ce qui confirme l'existence d'une interaction entre la profondeur de passe et l'avance

#### D/ Graphique de contour pour Rt

La figure IV-32 montre le graphique de contour pour Rt en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance.



**Fig. IV-32: Graphique de contour pour Rt**

On remarque dans cette figure que la zone rouge indique les valeurs les plus faibles de Rt < 3  $\mu\text{m}$ , tan disque la zone verte au coin supérieure indique les valeurs les plus élevées de Rt > 6  $\mu\text{m}$ .

### E/ Modèle généralisé

Le modèle qui décrit la variation de  $R_t$  en fonction de tous les facteurs et les interactions peut être défini de la façon suivante :

$$R_t = 1,7 - 0,1V_c - 1,1a_p + 42,5f + 0,009 V_c^2 - 0,2 a_p^2 - 100 f^2 + 0,003 V_c * a_p - 0,011 V_c * f + 48,8a_p * f$$
$$R^2 = 98,8\%$$

### F/ Modèle réduit

Le modèle qui décrit la variation de  $R_t$  en fonction des facteurs et des interactions significatifs peut être défini de la façon suivante :

$$R_t = -0,125V_c + 43,21f + 0,011 V_c^2 + 0,014 V_c^2$$
$$R^2 = 95,86\%$$

### IV.2.2.3: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur $R_z$

Le tableau IV-11 montre les coefficients de régression estimés pour  $R_z$  et les valeurs de la probabilité P qui indiquent la signification des facteurs et des interactions.

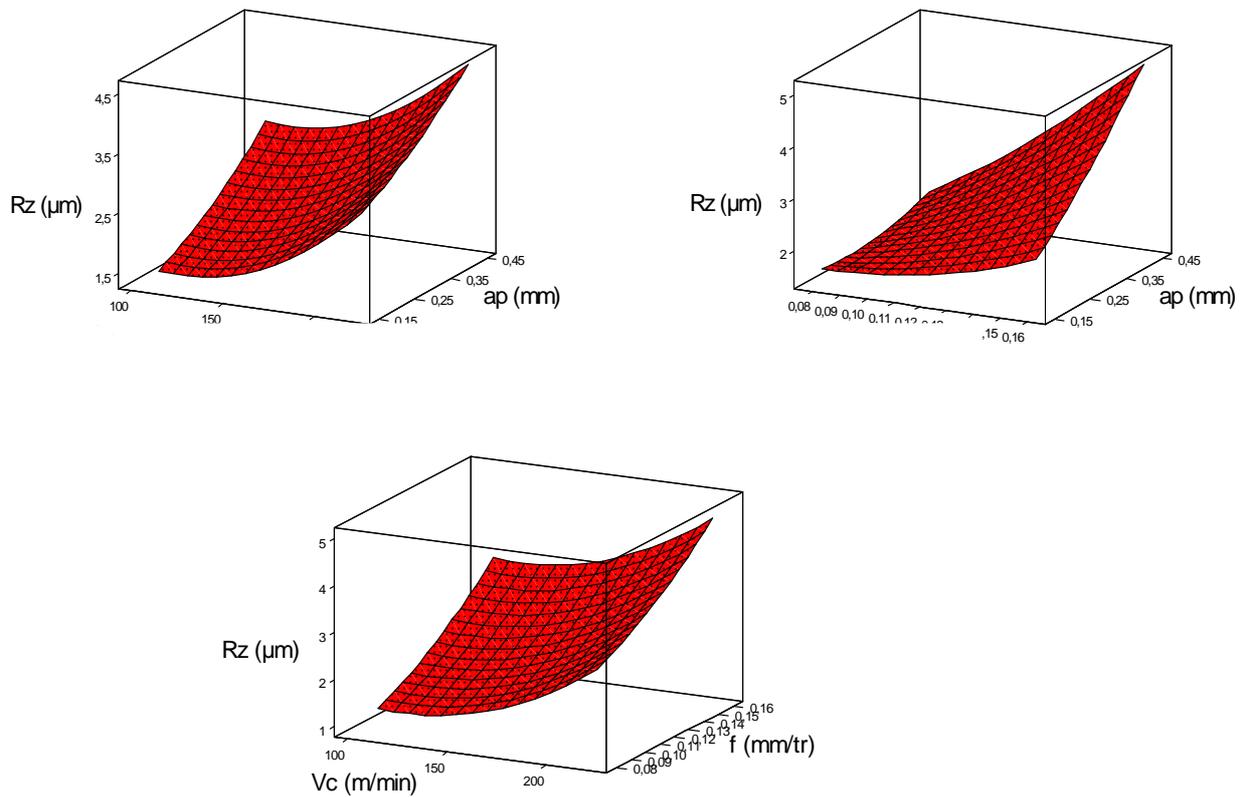
Terme	Coef	Er-T	Coef	T	P
Constante	5,87	1,3095		4,485	0,000
$V_c$ (m/mi	-0,04	0,0104		-3,711	0,002
$a_p$ (mm)	-10,31	2,8341		-3,636	0,002
$f$ (mm/tr	-33,50	13,8420		-2,420	0,027
$V_c$ (m/mi * $V_c$ (m/mi	0,004	0,0000		5,426	0,000
$a_p$ (mm) * $a_p$ (mm)	6,30	3,7688		1,671	0,113
$f$ (mm/tr * $f$ (mm/tr	119,79	52,9990		2,260	0,037
$V_c$ (m/mi * $a_p$ (mm)	0,005	0,0072		0,000	1,000
$V_c$ (m/mi * $f$ (mm/tr	-0,001	0,0271		-0,000	1,000
$a_p$ (mm) * $f$ (mm/tr	95,42	9,9936		9,548	0,000

$$S = 0,2077 \quad R\text{-carré} = 98,3\% \quad R\text{-carré (ajus)} = 97,4\%$$

Tab. IV 11: Analyse de régression de  $R_z$

### A/ Evolution de la rugosité $R_z$ en fonction des paramètres du régime de coupe

La surface de réponse du critère de rugosité  $R_z$  en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la figure IV-33. Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur le critère de rugosité  $R_z$ .

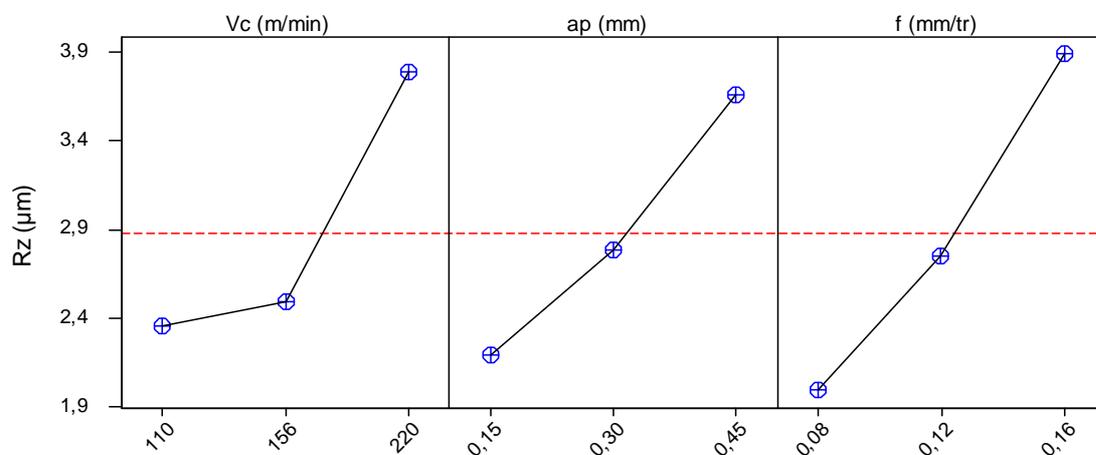


**Fig. IV-33: Diagramme de surface pour Rz en fonction de Vc, ap et f**

En considérant un intervalle de confiance de 95%, on constate que la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la profondeur de passe et les interaction  $V_c * V_c$ ,  $f * f$  et  $ap * f$  ont un impact significatif sur le critère de rugosité Rz puisque leurs valeurs de probabilité P sont inférieures à 0,05.

### B/ Graphique des effets principaux pour Rz

La figure IV-34 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur Rz.



**Figure. IV-34: Graphique des effets principaux pour Rz**

La figure IV-34 montre que la vitesse d'avance, la vitesse de coupe et la profondeur de passe ont un effet significatif sur le critère de rugosité Rz.

### C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Rz

La figure IV-35 montre la matrice de diagrammes d'interactions pour Rz en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe.

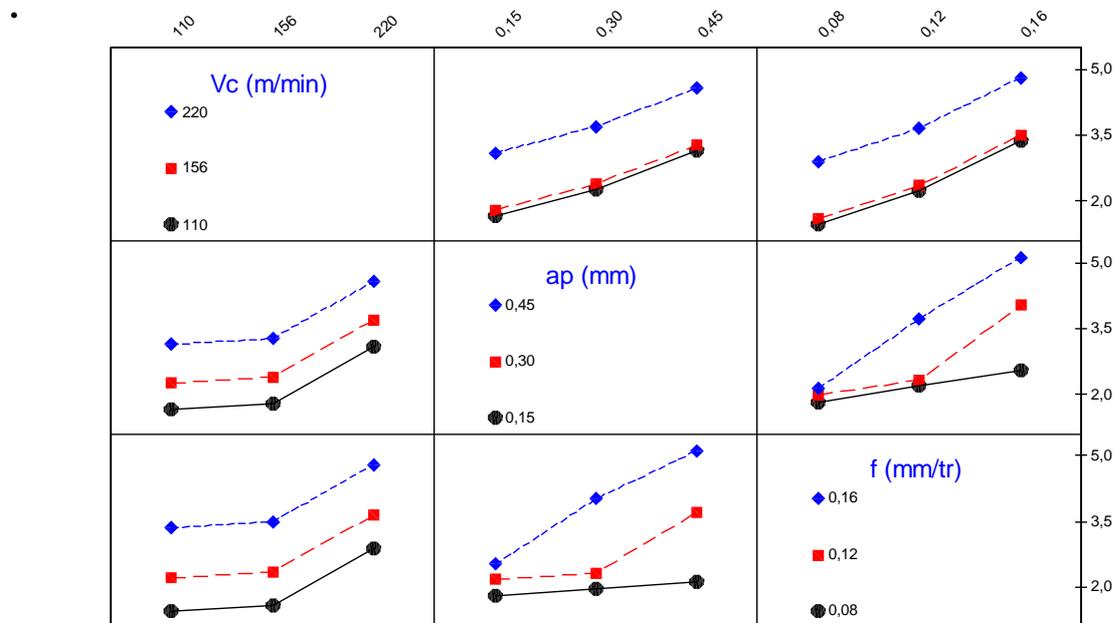


Figure. IV-35: la matrice de diagrammes d'interactions pour Rz

On remarque que pour le cas de l'interaction  $ap * f$ , les lignes ne sont pas parallèles ce qui confirme l'existence d'une interaction entre la profondeur de passe et l'avance.

### D/ Graphique de contour pour Rz

La figure IV-36 montre le graphique de contour pour Rz en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance.

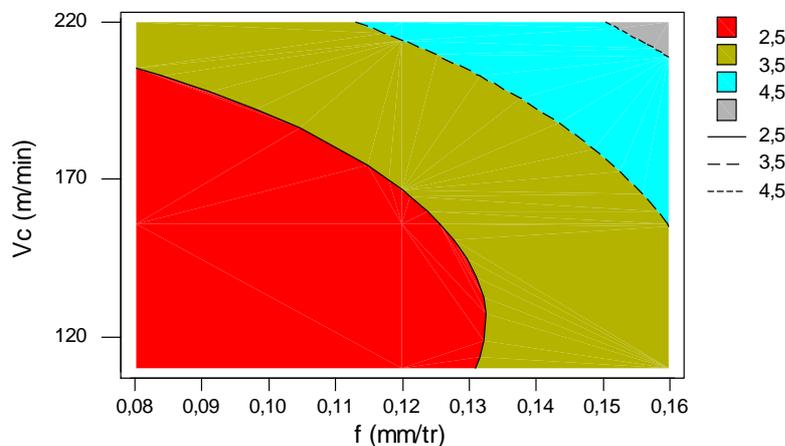


Figure. IV-36: Graphique de contour pour Rz

On remarque dans cette figure que la zone rouge indique les valeurs les plus faibles de Rz <2,5 µm, tan disque la zone grise indiquent les valeurs les plus élevées de Rz >4,5 µm.

### E/ Modèle généralisé

Le modèle qui décrit la variation de Rz en fonction de tous les facteurs et les interactions peut être défini de la façon suivante :

$$Rz = 5,87 - 0,04Vc - 10,31ap - 33,5f + 0,004 Vc^2 + 6,3 ap^2 + 119,79 f^2 + 0,005 Vc*ap - 0,001 Vc*f + 95,42 ap*f$$

$$R^2 = 98,3\%$$

### F/ Modèle réduit

Le modèle qui décrit la variation de Rz en fonction des facteurs et des interactions significatifs peut être défini de la façon suivante :

$$Rt = 6,12 - 0,051Vc - 10,66ap - 33,95f + 0,00318 Vc^2 + 119,96 f^2 + 97,22 ap*f$$

$$R^2 = 94,21\%$$

### IV.2.2.4: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Fa

Le tableau IV-12 montre les coefficients de régression estimés pour Fa et les valeurs de la probabilité P qui indiquent la signification des facteurs et des interactions.

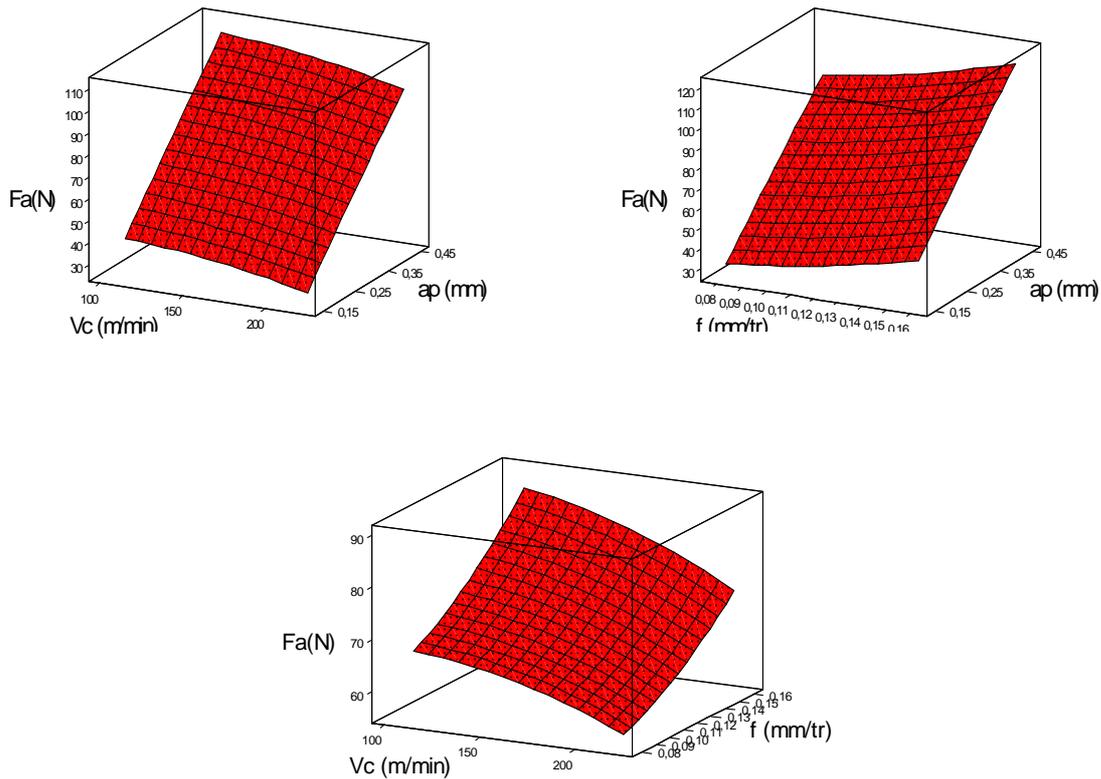
Terme	Coef	Er-T	Coef	T	P
Constante	-9,66	23,623		-0,409	0,688
Vc (m/mi	0,16	0,188		0,841	0,412
ap (mm)	225,21	51,129		4,405	0,000
f (mm/tr	-57,91	249,716		-0,232	0,819
Vc (m/mi*Vc (m/mi	-0,0021	0,001		-1,241	0,231
ap (mm)*ap (mm)	-33,01	67,991		-0,486	0,633
f (mm/tr*f (mm/tr	1278,47	956,124		1,337	0,199
Vc (m/mi*ap (mm)	-0,03	0,131		-0,224	0,825
Vc (m/mi*f (mm/tr	-0,42	0,490		-0,852	0,406
ap (mm)*f (mm/tr	170,42	180,289		0,945	0,358

$$S = 3,747 \quad R\text{-carré} = 97,9\% \quad R\text{-carré (ajus)} = 96,4\%$$

Tab. IV-12 : Analyse de régression de Fa

### A/ Evolution de Fa en fonction des paramètres du régime de coupe

La surface de réponse du critère de rugosité Fa en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la figure IV-37. Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur Fa.

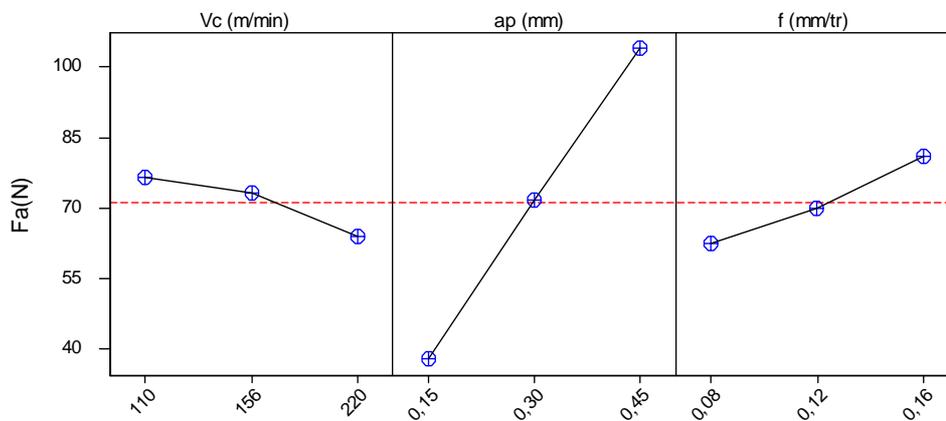


**Fig. IV-37: Diagramme de surface pour Fa en fonction de Vc, ap et f**

En considérant un intervalle de confiance de 95%, on constate que seule la profondeur de passe a un impact significatif sur la composante Fa puisque sa valeur de probabilité P est inférieure à 0,05.

### B/ Graphique des effets principaux pour Fa

La figure IV-38 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur Fa.



**Figure. IV-38 : Graphique des effets principaux pour Fa**

La figure IV-38 montre que seule la profondeur de passe a un effet significatif sur la composante Fa. En effet, on remarque que la pente du paramètre ap est plus grande que la pente de la vitesse de coupe et celle de l'avance.

### C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Fa

La figure IV-39 montre la matrice de diagrammes d'interactions pour Fa en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe.

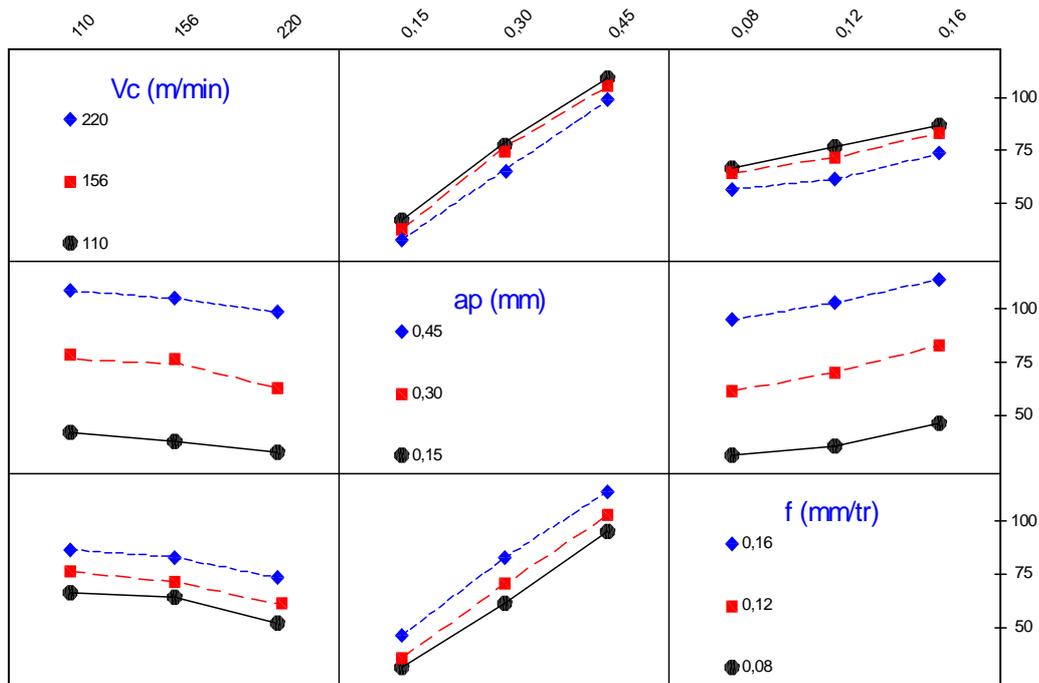
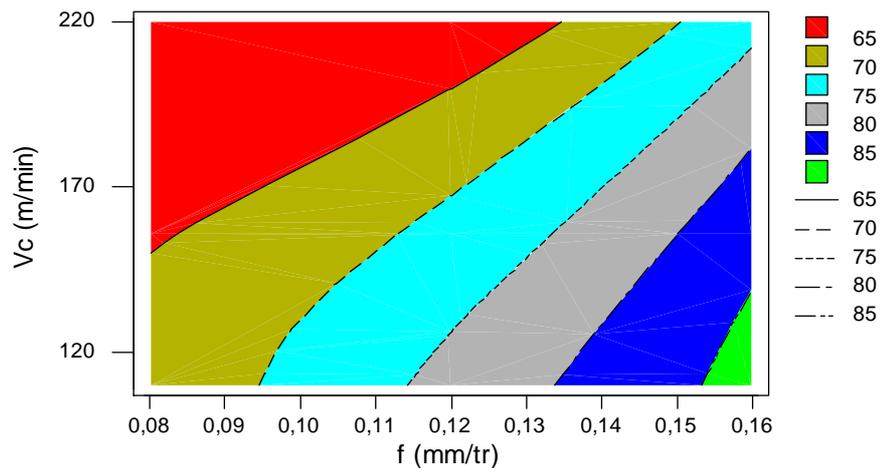


Figure. IV-39 : Matrice de diagrammes d'interactions pour Fa

On remarque que toutes les lignes sont parallèles. Donc il n'existe aucune interaction entre la vitesse de coupe, la profondeur de passe et l'avance

### D/Graphique de contour de Fa

La figure IV-40 montre le graphique de contour pour Fa en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance.



**Figure. IV-40 : Diagramme d'interaction pour Fa**

On remarque dans cette figure que la zone rouge indique les valeurs les plus faibles de Fa < 65 N, tan disque la zone verte indique les valeurs les plus élevées de Fa > 85 N.

#### **E/ Modèle généralisé**

Le modèle qui décrit la variation de Fa en fonction des tous les facteurs et les interactions est défini de la façon suivante :

$$Fa = - 9,66 + 0,16 Vc + 225,21 ap - 57,91 f - 0,0021 Vc^2 - 33,01 ap^2 + 1278,47 f^2 - 0,03 Vc*ap - 0,42 Vc*f + 170,42 ap*f$$

$$R^2 = 97,9\%$$

#### **F/ Modèle réduit**

Le modèle qui décrit la variation de Fa en fonction des facteurs et des interactions significatifs peut être défini de la façon suivante :

$$Fa = 231,53 ap$$

$$R^2 = 94,25\%$$

#### **IV.2.2.5: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Fr**

Le tableau IV-13 montre les coefficients de régression estimés pour Fr et les valeurs de la probabilité P qui indiquent la signification des facteurs et des interactions.

Terme	Coeff	Er-T	Coef	T	P
Constante	79	7,525		10,498	0,000
Vc (m/mi	-1	0,060		-18,418	0,000
ap (mm)	116	16,287		7,118	0,000
f (mm/tr	1209	79,546		15,200	0,000
Vc (m/mi*Vc (m/mi	0,012	0,000		15,097	0,000
ap (mm)*ap (mm)	486	21,658		22,459	0,000
f (mm/tr*f (mm/tr	-3545	304,571		-11,640	0,000
Vc (m/mi*ap (mm)	-0,031	0,042		-0,000	1,000

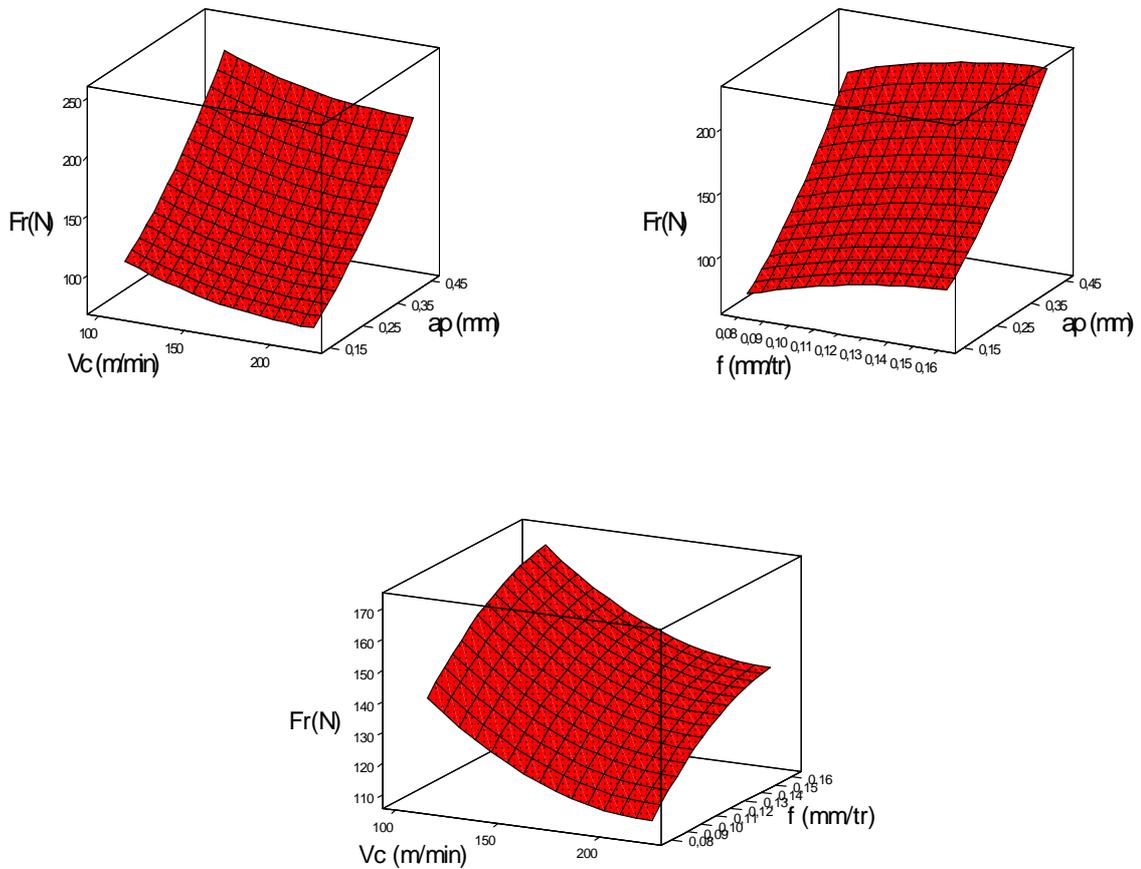
$V_c$ (m/mi)* $f$ (mm/tr	0,014	0,156	0,228	0,823
$a_p$ (mm)* $f$ (mm/tr	0,09	57,431	0,000	1,000

$S = 1,194$        $R\text{-carré} = 96,8\%$     $R\text{-carré (ajus)} = 96,1\%$

**Tab. IV-13 : Analyse de régression de Fr**

**A/ Evolution de Fr en fonction des paramètres du régime de coupe**

La surface de réponse de Fr en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la figure IV-41. Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur Fr.

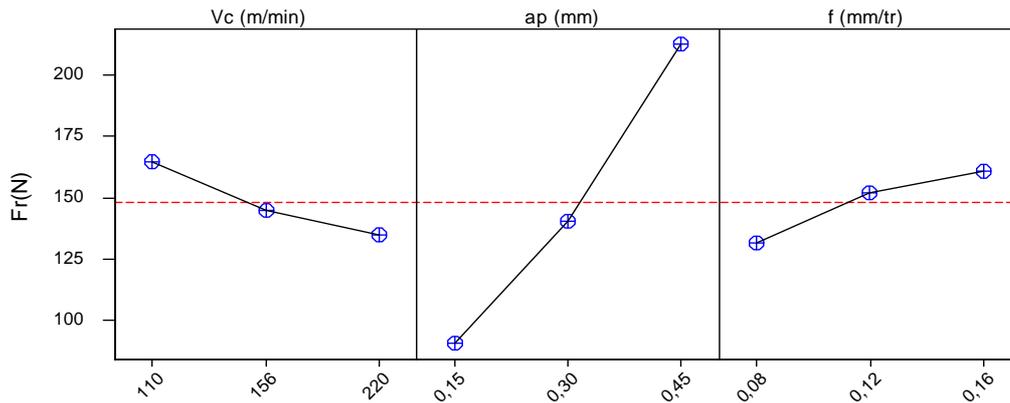


**Fig. IV-41: Diagramme de surface pour Fr en fonction de Vc, ap et f**

En considérant un intervalle de confiance de 95%, on constate que la vitesse de coupe, la profondeur de passe, l'avance et les interaction  $V_c * V_c$ ,  $a_p * a_p$  et  $f * f$  ont un impact significatif sur la composante Fr puisque leurs valeurs de probabilité P sont inférieures à 0,05.

**B/ Graphique des effets principaux pour Fr**

La figure IV-42 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur Fr.

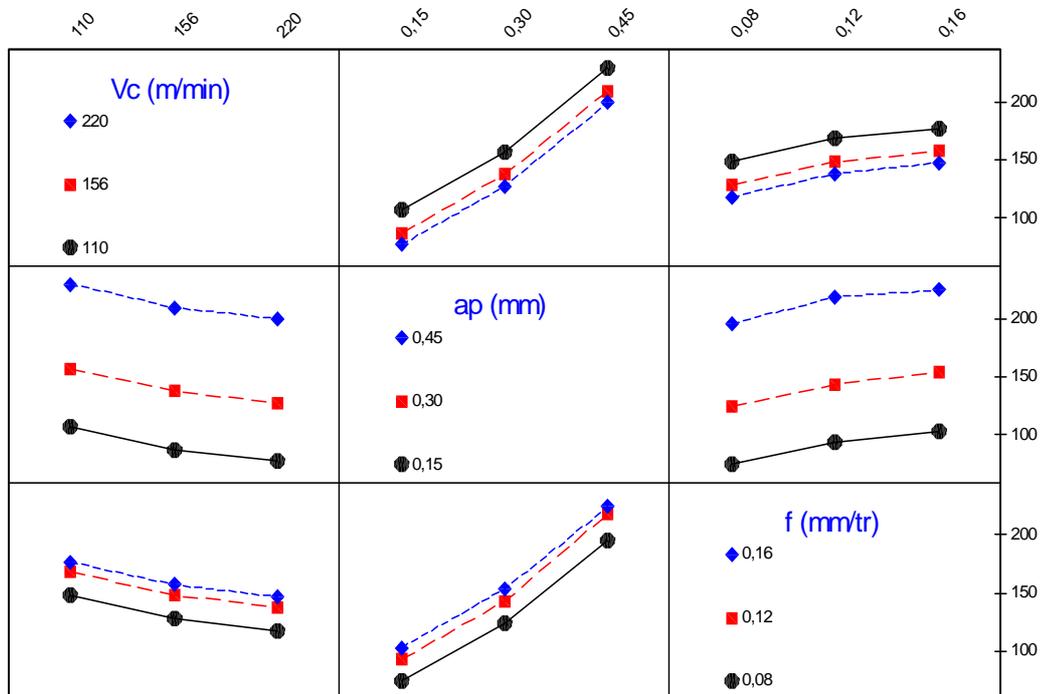


**Figure. IV-42: Graphique des effets principaux pour Fr**

La figure IV-42 montre que seule la profondeur de passe a l'effet le plus significatif sur le la composante Fr, suivie de la vitesse de coupe et de l'avance. En effet, on remarque que la pente du paramètre ap est plus grande que la pente de la vitesse de coupe et celle de l'avance.

### C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Fr

La figure IV-43 montre la matrice de diagrammes d'interactions pour Fr en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe



**Figure. IV-43 : Matrice de diagrammes d'interactions pour Fr**

On remarque que toutes les lignes sont parallèles. Donc il n'existe aucune interaction entre la vitesse de coupe, la profondeur de passe et l'avance.

## D/Graphique de contour de Fr

La figure IV-44 montre le graphique de contour pour Fr en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance.

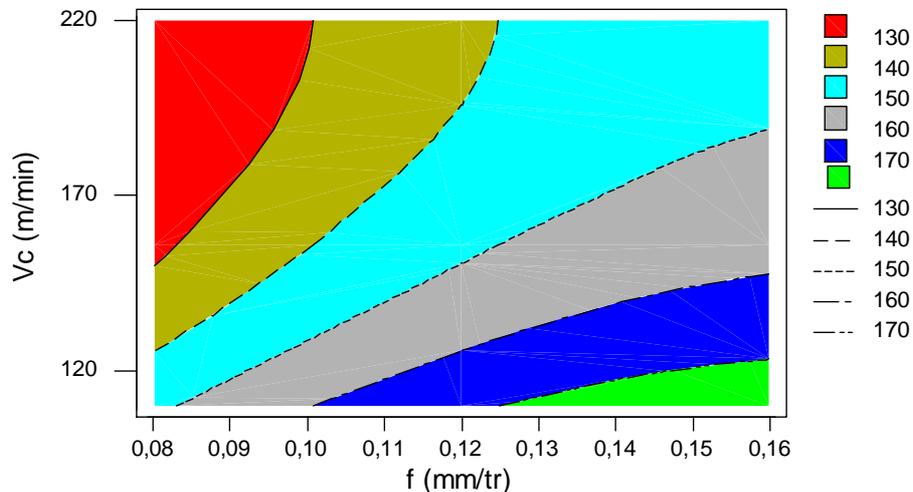


Figure. IV-44 : Graphique de contour pour Fr

On remarque dans cette figure que la zone rouge indique les valeurs les plus faibles de Fr < 130 N, tandis que la zone verte indique les valeurs les plus élevées de Fr > 170 N.

## E/ Modèle généralisé

Le modèle qui décrit la variation de **Fr** en fonction de tous les facteurs et les interactions est défini de la façon suivante :

$$Fr = 79 - Vc + 116ap + 1209 f + 0,012 Vc^2 + 486ap^2 - 3545 f^2 - 0,014 Vc*ap + 0,09 Vc*f + 0,003 ap*f$$

$$R^2 = 96,8\%$$

## F/ Modèle réduit

Le modèle qui décrit la variation de **Fr** en fonction des facteurs et des interactions significatifs peut être défini de la façon suivante :

$$Fr = 81 - 1,22Vc + 115,1ap + 1211 f + 0,0135Vc^2 + 490ap^2 - 3547 f^2 + 0,0041 ap*f$$

$$R^2 = 94,6\%$$

## IV.2.2.6: Analyse des effets des facteurs et des interactions sur Fv

Le tableau IV-14 montre les coefficients de régression estimés pour Fv et les valeurs de la probabilité P qui indiquent la signification des facteurs et des interactions.

Terme	Coeff	Er-T	Coef	T	P
Constante	129,1	38,31		3,370	0,004

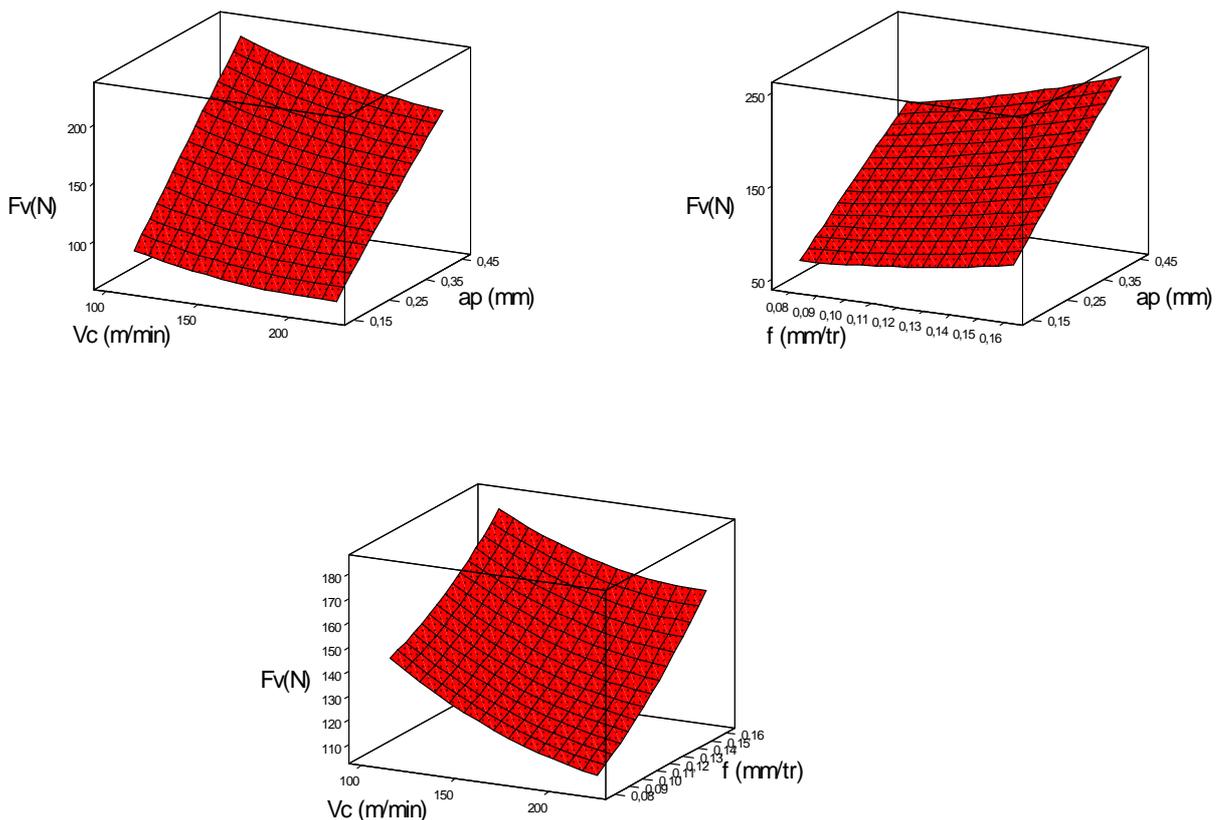
Vc (m/mi	-0,9	0,31	-2,882	0,010
ap (mm)	389,1	82,91	4,693	0,000
f (mm/tr	-792,6	404,93	-1,957	0,067
Vc (m/mi*Vc (m/mi	0,0015	0,00	2,127	0,048
ap (mm)*ap (mm)	-83,0	110,25	-0,752	0,462
f (mm/tr*f (mm/tr	2721,9	1550,40	1,756	0,097
Vc (m/mi*ap (mm)	-0,6	0,21	-2,835	0,011
Vc (m/mi*f (mm/tr	1,7	0,79	2,120	0,049
ap (mm)*f (mm/tr	1358,3	292,35	4,646	0,000

S = 6,076      R-carré = 97,2%      R-carré (ajus) = 96,8%

**Tab. IV-14 : Analyse de régression de Fv**

### A/ Evolution de Fv en fonction des paramètres du régime de coupe

La surface de réponse de Fv en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la figure IV-45. Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur Fv.



**Fig. IV-45: Diagramme de surface pour Fv en fonction de Vc, ap et f**

En considérant un intervalle de confiance de 95%, on constate que la vitesse de coupe, la profondeur de passe et les interactions  $Vc * Vc$ ,  $Vc * ap$ ,  $Vc * f$  et  $ap * f$  ont un impact significatif sur la composante Fv puisque leurs valeurs de probabilité P sont inférieures à 0,05.

## B/ Graphique des effets principaux pour Fv

La figure IV-46 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur Fv.

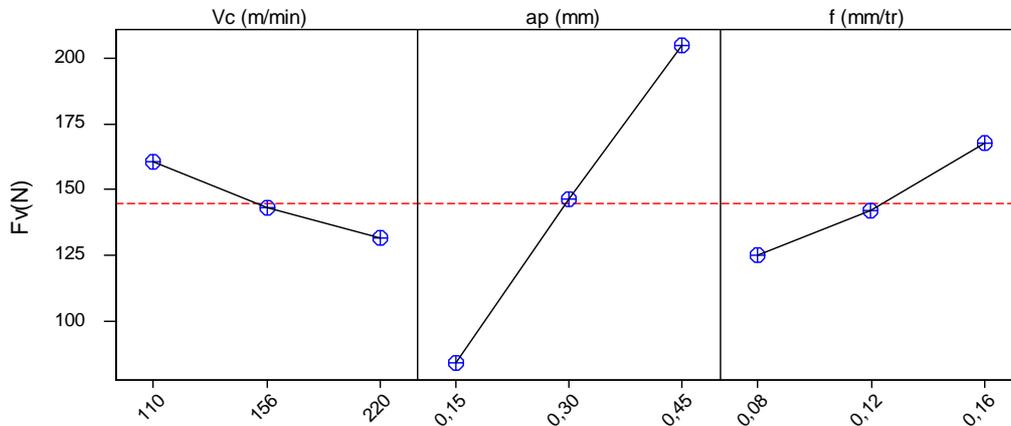


Figure. IV-46: Graphique des effets principaux pour Fv

La figure IV-46 montre que la profondeur de passe et la vitesse de coupe ont un effet significatif sur la composante Fv. En effet, on remarque que la pente du paramètre Vc et celle de ap sont plus grandes que la pente de l'avance.

## C/ Matrice de diagrammes d'interactions pour Fv

La figure IV-47 montre la matrice de diagrammes d'interactions pour Fv en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe.

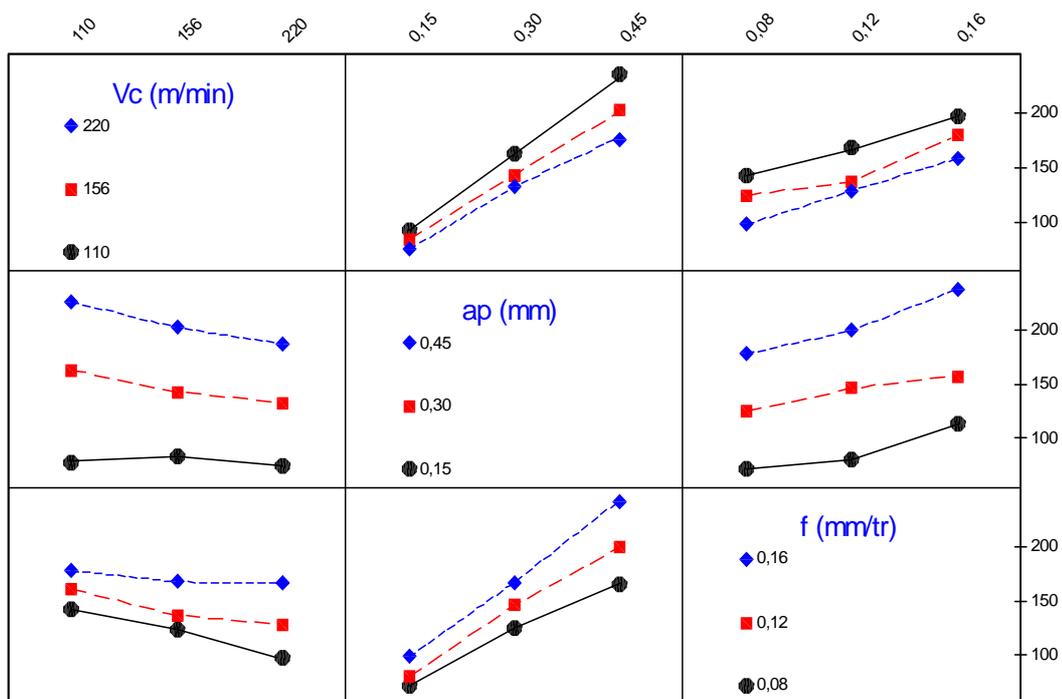


Figure. IV-47: Matrice de diagrammes d'interactions pour Fv

On remarque que toutes les lignes ne sont pas parallèles. Donc il existe des interactions entre la vitesse de coupe, la profondeur de passe et l'avance

#### D/Graphique de contour de Fv

La figure IV-48 montre le graphique de contour pour Fr en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance.

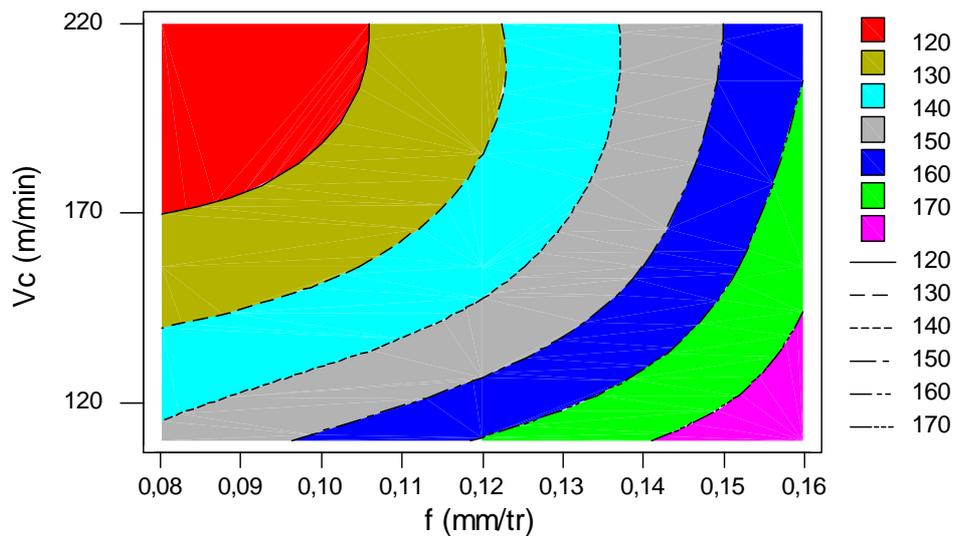


Figure. IV-48: Graphique de contour pour Fv

On remarque dans cette figure que la zone rouge indique les valeurs les plus faibles de Fv <120 N, tan disque la zone rose indique les valeurs les plus élevées de Fv >170 N.

#### E/ Modèle généralisé

Le modèle qui décrit la variation de  $F_r$  en fonction des tous les facteurs et les interactions est défini de la façon suivante :

$$F_v = 129,1 - 0,9V_c + 389,1 ap - 792,6 f + 0,0015 V_c^2 - 83 ap^2 + 2721,9 f^2 - 0,6V_c*ap + 1,7V_c*f + 1358,3 ap *f$$

$$R^2 = 97,2\%$$

#### F/ Modèle réduit

Le modèle qui décrit la variation de Fr en fonction des facteurs et des interactions significatifs peut être défini de la façon suivante :

$$F_v = 132,11 - 0,95V_c + 391,2 ap - 795,8 f + 0,0022 V_c^2 - 0,67V_c*ap + 1,88V_c*f + 1359,9 ap *f$$

$$R^2 = 96,5\%$$

### IV.3: Conclusions

Ce chapitre nous a permis de comprendre et d'exprimer la relation entre les phénomènes de la coupe tels que (rugosité et efforts de coupe) et les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) lors de l'usinage de l'Inconel 718. Les résultats de ce chapitre ont conduit aux conclusions suivantes :

Les modèles obtenus des différents critères de la rugosité pour les deux matériaux de coupe testés, montrent que :

- L'avance est le paramètre le plus influent suivie de la profondeur de passe.
- Seulement le critère de rugosité  $R_a$  est affecté par la vitesse de coupe pour le cas de la céramique composite CC670.
- Pour le cas de la céramique mixte CC650, la vitesse de coupe influe sur  $R_a$  et  $R_t$ .
- Pour les deux matériaux de coupe testés, seule l'interaction ( $a_p * f$ ) a une influence sur les différents critères de rugosité.

Les modèles obtenus des différentes composantes de l'effort de coupe pour les deux matériaux de coupe testés, montrent que :

- Pour le cas de la céramique composite CC670, les composantes  $F_a$  et  $F_v$  sont très affectées par la profondeur de passe. La composante  $F_r$  est affectée par la profondeur de passe suivie de l'avance.

## IV.4: Conclusion générale

Notre étude nous a permis de mettre en évidence quelques aspects du problème de la coupe et les phénomènes physiques qui y sont liés.

- ✚ Dans le premier chapitre, tous nos efforts ont été consacrés à l'étude bibliographique qui concerne l'usinabilité de l'Inconel 718. Ce dernier est un matériau très peu utilisé dans l'industrie algérienne. Nous avons montré l'intérêt économique qu'il peut apporter et les limites de l'usinabilité de ce matériau. L'apparition de l'Inconel 718 est favorisée par les besoins technologiques dans les industries modernes et l'évolution des matériaux de coupe à l'égard de la céramique et les carbures métalliques. C'est pour ça que nous avons cité aussi leurs caractéristiques, leurs domaines d'utilisation et leurs performances. En suite nous avons examiné les phénomènes régissant le processus de coupe en particulier, l'usure des outils de coupe, la rugosité des surfaces et les efforts de coupe.
- ✚ Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté une méthodologie de recherche qui repose sur la planification des expériences, pour cela nous avons fait appel à la méthode multifactorielle. Les équipements nécessaires à la réalisation des expériences ainsi que les conditions de coupe sont représentés aussi dans ce chapitre.
- ✚ Le troisième chapitre présente les différents résultats expérimentaux des essais de l'évolution de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe, du temps et de l'usure. Ainsi que les résultats expérimentaux de l'évolution de la température dans la zone de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe, et cela lors de l'usinage de l'inconel 718 par quatre matériaux de coupe qui sont :
  1. la céramique composite CC670.
  2. la céramique mixte CC650.
  3. le carbure revêtu GC1025.
  4. le carbure non revêtu H13A.

- ✚ Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté les différents résultats de l'impact de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe lors du tournage de l'Inconel 718 par la céramique composite CC670 et la céramique mixte CC650. Ensuite nous avons proposé des modèles mathématiques en se basant sur la méthodologie de la surface de réponse.
- ✚ Les résultats de l'évolution de la rugosité en fonction du temps montrent clairement que le meilleur fini de surface est obtenu lors de l'usinage de l'Inconel 718 par la céramique composite CC670. A la vitesse de 110 m/min, une avance de 0.08 mm/tr, une profondeur de passe de 0.15 mm et un temps de 150 (s), on a enregistré les valeurs de (0.8 ; 1.3 ; 1.8 ; 1.9)  $\mu\text{m}$  pour Ra successivement aux différentes nuances (CC670 ; CC650 ; GC1025 et H13A)
- ✚ La rugosité s'améliore lorsque l'angle de direction entre la résultante et l'axe Y augmente. Pour une vitesse de coupe de 110 m/min, une avance de 0.08 mm/tr, une profondeur de passe de 0.15 mm et un temps de 150 (s), la rugosité Ra varie de 5 à 0.4  $\mu\text{m}$  lorsque l'angle  $\alpha_y$  varie de 11 à 35 degrés.
- ✚ La profondeur de passe représente le paramètre principal influençant les efforts de coupe, les outils en céramique composite CC670 donnent des efforts de coupe plus faibles avec une stabilisation du sens de l'effort de coupe résultant par rapport aux autres matériaux de coupe testés. En effet, on a enregistré des variations de (3 ; 5 ; 23 ; 24) degrés pour  $\alpha_y$  pendant un temps d'usinage de 150 (s) et cela pour les différentes nuances testées (CC670 ; CC650 ; GC1025 et H13A)
- ✚ Les efforts spécifiques diminuent avec l'augmentation de la section du copeau et de la vitesse de coupe, ce qui minimise les contraintes qui provoquent la rupture de la plaquette.
- ✚ L'usure frontale a une influence importante sur l'évolution des efforts de coupe ainsi que sur l'évolution de la rugosité de l'Inconel 718.
- ✚ La vitesse de coupe représente le facteur le plus influent sur la génération de la chaleur dans la zone de coupe.
- ✚ La combinaison des vitesses de coupe et des avances les plus élevées, génère la plus haute température dans la zone de coupe.

Les modèles obtenus des différents critères de la rugosité pour les deux matériaux de coupe testés, montrent que :

- ✚ L'avance est le paramètre le plus influent suivie de la profondeur de passe.
- ✚ Seule le critère de rugosité Ra est affecté par la vitesse de coupe pour le cas de la céramique composite CC670. Et pour le cas de la céramique mixte CC650, la vitesse de coupe influe sur Ra et Rt.
- ✚ Pour les deux matériaux de coupe testés, seulement l'interaction (profondeur de passe\* avance) a une influence sur les différents critères de rugosité.
- ✚ Les modèles obtenus des différentes composantes de l'effort de coupe pour les deux matériaux de coupe testés, montrent que :
- ✚ Pour le cas de la céramique composite CC670, les composantes Fa et Fv sont très affectées par la profondeur de passe. La composante Fr est affectée par la profondeur de passe suivie de l'avance.

En conclusion, ces modèles sont très intéressants pour faire des prédictions.

## IV.5: Perspectives

Les résultats obtenus dans ce travail ouvrent d'importances perspectives à travers les quelles nous pouvons:

1. Continuer à étudier l'usinabilité de l'inconel 718 à l'état traité, et cela dans le but d'avoir une meilleure caractérisation scientifique de l'usinabilité de ce matériau.
2. Continuer à étudier le comportement de nouveaux matériaux de coupe en termes de l'usure, des efforts de coupe, de la température générée et de la rugosité obtenue lors de l'usinage des super alliages réfractaires.
3. Approfondir les connaissances qui existent entre l'usure des outils de coupe et le changement du sens d'influence du vecteur effort résultant par rapport aux trois axes. En effet, cette méthode (étude du changement de sens d'influence), nous permet de localiser l'usure produite sur l'outil.
4. utiliser d'autres méthodes statistiques pour le traitement des résultats.
5. déterminer des modèles mathématiques en fonction d'autres variables.
6. Etudier l'effet des contraintes résiduelles sur la surface de la pièce.

## IV.6: *Références bibliographiques*

- [ADR 01] ADRIAN SHARMAN., RICHARD C.DEWES., DAVID K ASPINWALL.;** Tool life when high speed ball nose end milling Inconel 718, *Journal of Materials Processing Technology* 118 (2005), PP. 29-35.
- [AIA 82] ALA PASSERON.;** Usinage "Tournage", *Techniques de l'ingénieur BM* 7086.
- [ALT 06] A ALTIN., M NALBANT., A TASKEZEN.;** The effects of cutting speed on tool wear and tool life when machining Inconel 718 with ceramic tools, *Journal of Materials & Design* 28 (2006), PP. 2518-2522.
- [BRO 82] BENOIT BROQUERIE.;** Usinage "Fluides de coupe, rôle en usinage et classification", *Techniques de l'ingénieur BM7046*.
- [CÉD 01] CÉDRIC DUCROS., VÉRONIQUE BÉNEVEN., FRÉDÉRIC SANCHETTE.;** Revêtement, caractérisation et essais d'usinage de systèmes multicouches réalisés par PVD sur outil en carbure cémenté.
- [CHO 99] I.A CHOUDHURY., M.A EL-BARADIE.;** Machinability of nickel-base super alloy: A general review, *Journal of Materials Processing Technology* 77 (1998), PP. 278-284.
- [COS 07] J.P COSTES., Y GUILLET., G POULACHON., M DESSOLY.;** Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in machining of Inconel 718, *Journal of MACHINT TOOLS & MANUFACTURE* 47 (2007), PP. 1081-1087.
- [CZA 62] A.A CZAPLICKI.;** l'usinabilité et la coupe des métaux. *Revue de la société royale belge des ingénieurs et industries*. N° 12 PP 7087. 1962.
- [DEV 07] A DEVILLES., F SCHNEIDER., S DOMINIAK., D DUDZINSKI., D LARROUQUERE.;** Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools, *Journal of WEAR* 262 (2007), PP. 931-942.

- [DUD 04] D DUDZINSKI., A DEVILLES., A MOUFKI., D LARROUQUE RE., V ZERROUKI., J VIGNEAU.;** A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy, Journal of MACHINT TOOLS & MANUFACTURE 44 (2004), PP. 439-456.
- [EZU 05] E.O EZUGWU., J BONNEY., D.A FADARE., W.F SALES.;** Machining of nickel-base, Inconel 718, alloy with ceramic tools under finishing conditions with various coolant supply pressures, Journal of Materials Processing Technology 162-163 (2005), PP. 609-614.
- [EZU 04] E.O EZUGWU., J BONNEY.;** Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base Inconel 718, alloy with coated carbide tools, Journal of Materials Processing Technology 153-154 (2004), PP. 1045-1050.
- [FRA 82] FRANCOIS L.;** Usinage "Endommagement des outils de coupe", Techniques de l'ingénieur B 7042.
- [JAW 01] A JAWAID., S KOKSAL., S SHARIF.;** Cutting performance and wear characteristics of PVD coated and uncoated carbide tools in face milling Inconel 718 aerospace alloy, Journal of Materials Processing Technology 116 (2001) , PP. 2-9.
- [LLI 02] L Li., N HE., M WANG., Y.G WANG.;** high speed cutting of Inconel 718 with coated carbide and ceramic inserts, Journal of Materials Processing Technology 129 (2002), PP. 127-130.
- [LOR 82] F LOROY.;** Usinage "Endommagement des outils de coupe", Techniques de l'ingénieur B7042.
- [MAT 70] P MATHON.;** usinabilité et lois générales d'usinage des aciers et des fontes. Mec, Mat, Elec. N° 246-247 PP 23-43.
- [MAT 69] P MATHON.;** Usinabilité et propriétés mécanique des fontes ; fonderies N° :275-71 PP 71-84
- [MUA 07] MUAMMER NALBANT., ABDULLAH ALTIN., ASAN GOKKAYA.;** The effect of coating material and geometry of cutting tool and cutting speed on machinability properties of Inconel 718 super alloys, Journal of Materials & Design 28 (2007), PP. 1719-1724.

- [MUA 07] MUAMMER NALBANT., ABDULLAH ALTIN., HASAN GOKKAYA.;** The effect of cutting speed and cutting tool geometry on machinability properties of nickel-base Inconel 718 super alloys, *Journal of Materials & Design* 28 (2007), PP. 1334-1338.
- [NID 01] [http:// www. nidi.org](http://www.nidi.org);** All Metals and Forge
- [PAU 02] PAUL BLANARD.;** Nickel et alliages base nickel superalliages, DUNOD, (2002).
- [PAW 07] R.S PAWADE., SUHAS S.JOSHI., P.K BRAHMANKAR., M RAHMAN.;** An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718, *Journal of Materials Processing Technology* 51 (2007), PP. 1220-1224.
- [PAW 08] R.S PAWADE., SUHAS S.JOSHI., P.K BRAHMANKAR., M RAHMAN.;** Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity of high-speed turned Inconel 718, *Journal of MACHINT TOOLS & MANUFACTURE* 28 48 (2007), PP. 15-28.
- [ROB 73] M ROBERT., G GODIN.;** Etude comparée de deux testes rapides d'usinabilité, corrélation avec des résultats d'essais de longue durée. *Revue de Mat. N°* PP 1021-1032.
- [SHA 06] A.R.C ShARMAN.,J.I HOGHES., K RIDGWAY.;** An analysis of the residual stresses generated in Inconel 718 when turning, *Journal of Materials Processing Technology* 173 (2006) 359-367.
- [WAN 03] Z.Y WANG., K.P RAJURKAR., J FAN., S LEI., Y.C SHIN., G PETRESCU.;** Hybrid machining of Inconel 718, *Journal of MACHINE TOOLS & MANUFACTURE* 43 (2003), PP. 1391-1396.
- [YAL 05] YALLESE M.A., BOULANOUAR L., OULAA N., REZAIGUIA A., KRIBES N;** "Influence des conditions d'usinage sur les efforts de coupe lors du tournage du 100 Cr 6 (60 HRC) avec le CBN Premier Congrès International, Conception et Modélisation des systèmes Mécaniques" du 23 au 25 mars 2005 Hammamet, Tunisie.