

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**  
**UNIVERSITE 8 MAI 1945 GUELMA**



**FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**Mémoire de Magister**

Option: Mécanique des matériaux

---

**Evaluation des performances des matériaux de coupe lors de l'usinage de la fonte grise Ft25**

---

Sous la direction du : **Pr .M. A. YALLESE**

Présenté par : **KAHOUL NAJIB**

Devant le jury composé de MM :

<b>M. LAHMAR</b>	Pr. à l'université de Guelma	Président
<b>M. A. YALLESE</b>	Pr. à l'université de Guelma	Rapporteur
<b>S. GUENFOUD</b>	Pr. à l'université de Guelma	Examineur
<b>A. BELBAH</b>	M/C à l'université de Guelma	Examineur

**2012**

# REMERCIEMENTS

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

Je remercie aussi Monsieur le Professeur M. LAHMAR pour avoir présidé le jury. Mes remerciements vont également à Monsieur le Professeur S. GUENFOUD, et à Monsieur le *Docteur* A.BELBAH pour leur participation au jury.

Que toutes les personnes qui ont participé à la réalisation de ce travail trouvent ici ma reconnaissance la plus sincère et particulièrement MM : Mohamed AIB et A/Aziz MADI.

J'exprime ma profonde gratitude à toute ma famille pour son soutien.

## ملخص

يلعب حديد الزهر دوراً هاماً في الصناعات الحديثة، و هو مقسم إلى عدة أصناف، الزهر الرمادي، الزهر الأبيض، الزهر المطاوع و الزهر الصلب هذه الأخيرة لها مميزات خاصة جداً من بينها الصلابة العالية، هذه الخاصية تجعل تشغيل هذه الأزهار صعباً جداً مما يؤدي إلى قصر مدة حياة أداة القطع. فكان من المهم إيجاد أدوات قطع تستطيع قطع هذه الأزهار.

في هذه الدراسة تناولنا ستة مواد قطع مختلفة (الخرزف الأسود CC650 ، و الخرزف الأبيض CC 620 ، الخرزف المغلف CG 1690 ، الخرزف الغير المغلف CC 6090 ، الكاربيد المغلف CG4005 و الكاربيد الغير المغلف H13A). الهدف من هذا البحث هو من جهة دراسة مختلف الظواهر التي تتدخل أثناء قطع الزهر (Ft 25) خاصة قوى القطع، خشونة السطح و تآكل أداة القطع، مع تغير مختلف شروط القطع (سرعة القطع، سرعة التغذية، عمق التمريرة و زمن التشغيل). من جهة أخرى، قمنا بدراسة إحصائية معتمدين في ذلك على (ANOVA) لاقتراح نماذج رياضية.

## Résumé

Les fontes jouent un rôle extrêmement important dans l'industrie d'aujourd'hui. Ils sont divisés en plusieurs catégories, fonte grise, fonte blanche, fonte malléable et fonte trempée. Les fontes présentent des propriétés très sévères, tels que une dureté élevée. Ces caractéristiques rendent l'usinage de ces fonte très difficile ce qui conduit généralement à des durées de vie des outils très limitées. 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 fontes.

Cette étude concerne l'évaluation de six matériaux de coupe recommandés pour l'usinage des fontes. Ces matériaux sont des céramiques mixtes céramiques blanches céramique revêtus et non revêtus, carbures revêtus et non revêtus. L'objectif de cette recherche est d'une part d'examiner les différents phénomènes intervenants lors de l'usinage à sec de la fonte Ft 25 tels que, les efforts de coupe, la rugosité et l'usure de l'outil, avec la variation de différents paramètres du régime de coupe (vitesse de coupe, avance par tour, profondeur de passe et temps d'usinage). 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 et cela dans le but de proposer des modèles mathématiques de la rugosité, des efforts de coupe et de l'usure pour faire des prédictions.

## Abstract

The pig iron and cast iron plays an extremely important part in the industry of today. They are divided into several categories, grey iron, white pig iron, malleable pig iron and soaked cast iron. The pig iron and cast iron presents very severe properties, such as a high hardness. These characteristics return the machining of this very difficult cast iron what generally leads to lifespan of the tools very limited. From there, it is very interesting to find cutting plates which have better performances and to select a beach of the parameters of the mode of cut where these plates productively can and effectively to machine this pig iron and cast iron.

This study is focused on the evaluation of five cutting materials recommended for the pig iron and cast iron grey Ft25. These materials are ceramics black CC650, white ceramics CC620, ceramics covered GC1690, ceramics not revêtuCC6090, carburize covered GC4005 and carburize not covered H13A. The purpose of this research is on the one hand to examine the various intervening phenomena during the dry machining of cast iron grey Ft25, cutting forces, surface roughness and tool wear, with the variation of various cutting parameters (cutting speed, feed, depth of cut and the machining time). Moreover, we made a statistical analysis of the results based on the analysis of variance (ANOVA) and the response surface methodology and that in the aim to propose mathematical models of the surface roughness, cutting forces and tool wear to make predictions.

# SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b>	7
<b>Chapitre I : Etude bibliographique</b>	
1 Généralités sur la coupe des métaux	9
1-1 Introduction.	9
1-2 Définition de la coupe des métaux	9
1-3 Définitions de l'aptitude à l'usinage	9
1-4 Evolution des matériaux de coupe	10
1-5 Endommagement des outils de coupe	20
1-5-1 Introduction	20
1-5-2 Les différentes formes d'usure des outils	21
I-5-3 Phénomènes provoquant l'usure	25
I-5-4 Relation entre l'usure et le temps	26
I-5-5 Critères d'usure	26
I-5-6 En pratique	27
I-5-7 Modèles de lois d'usure	28
I-5-8 Bilan des modèles d'usure	29
1-6 Rugosité des surfaces usinées	30
1-6-1 Critère de qualité	30
I-7 Efforts de coupe	31
I-7-1 Mesure des efforts de coupe	32
I-8 Les Fontes	33
I-8-1 Action des principaux éléments présents dans la fonte	34
I-8-2 Classification des fontes	35
I-8-3 Usinabilité des fontes	43
<b>Chapitre II : Procédure Expérimentale</b>	
II-1 Introduction	
II-2 Matériels utilisés	47
II-2-1 Machine-outil	47
II-2-2 Le matériau utilisé pour les essais d'usinage	48
II-2-3 Plaquettes de coupe	49
II-2-4 Porte outil	50
II-2-5 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe	51
II-2-6 Chaîne de mesure et caractéristiques	52
II-2-7 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité	53
II-2-8 Microscope pour la mesure de l'usure	53
II-2-9 Autres équipements	54
II-3 Conditions de coupe	55
II-4 planification des expériences	55
II-5 Conclusion	57

## **Chapitre III : Etude des performances des différents matériaux de coupe**

III-1 Introduction	59
III-2 Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe	59
III-3 Evolution des pressions de coupe en fonction de la vitesse de coupe	61
III-4 Evolution de l'effort résultant en fonction de la vitesse de coupe	62
III-5 Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe	63
III-6 Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage	65
III-7 Evolution des rugosités en fonction du temps d'usinage	71
III-8 Evolution de l'usure en fonction du temps d'usinage	78
III-9- Comparaison entre les performances des matériaux à outils	85
III-9-1 Comparaison entre les efforts de coupe enregistrés	85
III-9-2 l'influence de la nuance de l'outil sur la rugosité Ra	90
III-9-3 l'influence de la nuance de l'outil sur l'usure en dépouille VB	93
III-9-4 Tenues des outils	99
III-10 Conclusion	102

## **Chapitre IV : Modèles mathématiques**

IV-1 Introduction	104
IV-2 Modèles de l'effort de coupe en fonction des paramètres de coupe	104
IV-2-1 Effort axial $F_x$	105
IV-2-2 Effort radial $F_y$	110
IV-2-3 Effort tangentiel $F_z$	115
IV-3 Modèles de la rugosité en fonction des paramètres de coupe	119
IV-3-1 Critère de rugosité Ra	120
IV-3-2 Critère de rugosité Rt	125
IV-4 Conclusions	130
Conclusion générale	131
Nomenclature	132
Références bibliographiques	133

## INTRODUCTION GENERALE

Depuis le début du 19<sup>ième</sup> siècle, nous pouvons faire un nouveau constat : l'évolution de l'homme passe par une évolution technologique et industrielle. Quelque soit le secteur d'activité alimentaire, automobile, énergie, etc.... dans les technologies employées aujourd'hui pour produire, il y a toujours au sein du processus de fabrication, obligatoirement une opération d'usinage, que ce soit pour produire la pièce désirée, la machine qui produira la pièce, l'outillage qui produira la pièce, etc.

Ainsi, l'histoire industrielle de notre civilisation est en partie liée à l'évolution de l'usinage et nous constatons que, depuis deux décennies l'usinage connaît une évolution très rapide à travers l'Usinage Grande Vitesse (UGV), le tournage dur et l'usinage sans lubrification. Est ce l'indication d'une nouvelle révolution industrielle à laquelle les outils « d'usinage » vont contribuer ? Ces derniers ont en effet toujours participé et aidé aux progrès de l'usinage.

Aujourd'hui, plus que jamais, les industriels cherchent à gagner du temps et à diminuer les coûts de fabrication tout en respectant l'environnement. En dépit de ces considérations, les concepts liés à l'usinage ont surtout évolué grâce à de nombreux essais expérimentaux sans bénéficier de vraies approches scientifiques.

L'étude des phénomènes de coupe des matériaux durs consiste à rechercher les relations entre les caractéristiques des matériaux usinés, celles de l'outil et les paramètres fondamentaux caractérisant les conditions de coupes (forces, puissance, consommées performances du procédé).

L'objectif de ce travail est l'étude de l'usinage de la fonte Ft 25 à 240 HB, usiné par six outils : la céramique mixte CC650, la céramique blanche CC620, la céramique revêtu GC1690, la céramique non revêtu CC6090, le carbure revêtu GC4005 et le carbure non revêtu H13A.

Dans le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique sur la coupe des métaux. Dans ce chapitre, nous présentons les points suivants : Matériaux de coupe, Usinabilité, Usure, Rugosité, Effort.

Dans le deuxième chapitre nous avons défini une méthodologie de travail qui repose sur la planification des expériences, et les conditions de coupe ainsi que les équipements utilisés.

Dans le troisième chapitre traite les performances des outils en termes d'usure en dépouille, d'efforts de coupe et de rugosité, des surfaces usinées et leurs évolutions en fonction des temps d'usinage et vitesse de coupe.

Dans le quatrième chapitre nous avons présenté les modèles mathématique liés aux résultats expérimentaux ou sont déterminés les coefficients de détermination et les constantes des différents modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés.

# **Chapitre I**

## **Etude bibliographique**

## **1-Généralités sur la coupe des métaux**

### **1-1 Introduction**

L'usinage est un procédé de génération de surfaces. Il consiste à créer une nouvelle surface par enlèvement de matière (formation de copeaux) en utilisant un outil- coupant. Les caractéristiques de cette surface dépendent du couple outil-matière, c'est -à- dire des paramètres mis en jeu pendant la coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance, profondeur de passe...) [1].

### **1-2 Définition de la coupe des métaux**

L'usinage des métaux met en jeu deux processus élémentaires, la création et l'évacuation d'un copeau, qui font jouer deux mécanismes physiques de base, la déformation plastique au sein du copeau et le contact de celui-ci avec l'outil. La modélisation de la formation du copeau repose sur la compréhension de ces deux mécanismes et a pour objet la prévision de la géométrie du copeau, des efforts de coupe et des échauffements de la pièce et de l'outil à partir des conditions de coupe et des propriétés thermomécaniques du matériau usiné et de l'outil [2].

### **1-3 Définitions de l'aptitude à l'usinage :**

L'usinage est exclusivement une opération de mise en forme par outil coupant avec formation de copeaux. Il a pour but de fabriquer des pièces avec une précision macro et micro géométrique imposée pour un prix de revient minimal. La solution adoptée en pratique, sera toujours une affaire de compromis car en dehors des progrès techniques, toute précision n'est accrue qu'en augmentant le prix de revient.

Ceci permet de définir deux premiers critères caractérisant l'aptitude à l'usinage et qui seraient donc:

- La précision de cotes macro et micro géométriques,
- Le prix de revient.

D'autres facteurs qui définissent l'aptitude à l'usinage sont :

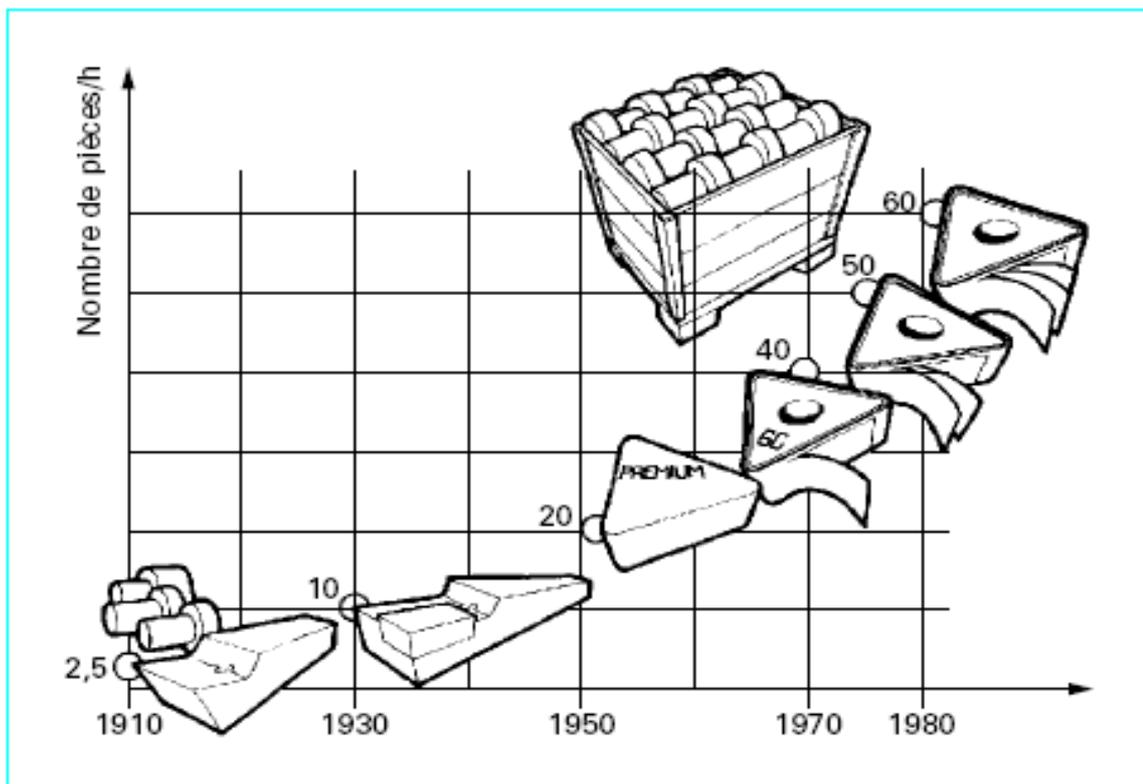
- L'état de surface.
- Les efforts de coupe.
- La durée de vie de l'outil (endommagement des outils).
- La morphologie du copeau.

Les mesures des cotes macro et micro géométriques et des efforts de coupe sont des mesures instantanées. Elles demandent un matériel adapté qui est très rarement mis en œuvre en permanence dans le cadre d'une production continue. En ce qui concerne les mesures relatives à la durée des outils, elles sont longues et délicates et demandent un temps considérable lorsqu'elles sont faites dans des conditions de production industrielles.

En pratique, les variations d'usinabilité sont telles que, malgré l'utilisation de notions telles que celles de vitesse de coupe minimale ou d'avance minimale, il arrive d'obtenir des temps de tenues d'outils pratiquement nuls ou même des casses d'outils, ce qui est particulièrement coûteux. Les avantages industriels du maintien dans limites aussi étroites que possible de l'usinabilité sont donc certains. Ceci est valable quelque soit le facteur d'aptitude à l'usinage considéré, cependant l'usage fait apparaître que le facteur qui concerne la tenue des outils à une importance majeure [3].

#### 1-4 Evolution des matériaux de coupe :

L'évolution des matériaux constituant les outils de coupe a été une source de gain de productivité très importante pour l'industrie. Elle a entraîné, au cours du XXième siècle, un doublement de la productivité tous les dix ans [4] : figure I-1.



**Figure I-1** Augmentation de la productivité [5]

Cette amélioration de la productivité résulte d'un accroissement important des vitesses de coupe permises, grâce à l'amélioration des performances des matériaux des outils (figure I-2, I-3). Elle résulte aussi des études et travaux à la fois techniques et fondamentaux portant sur les propriétés suivantes des matériaux :

- la dureté pour combattre l'usure,
- la résistance mécanique à chaud pour supporter les échauffements à grande vitesse,

- la ténacité pour encaisser les chocs dus aux interruptions d'usinages ou aux vibrations
- l'inertie chimique pour éviter les dégradations de l'outil par diffusion d'impuretés en provenance de la pièce usinée [4].

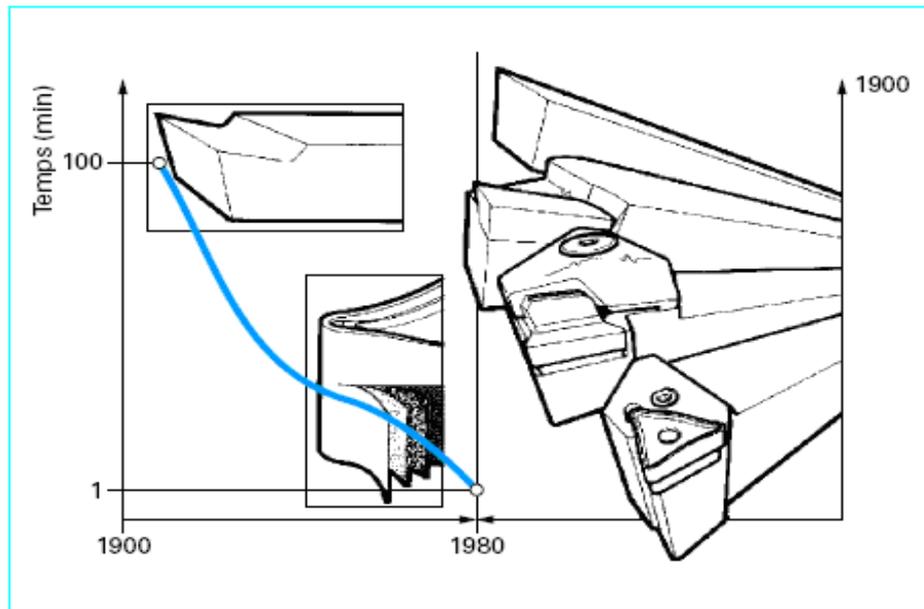


Figure I-2 Evolution des outils et des temps de coupe [5]

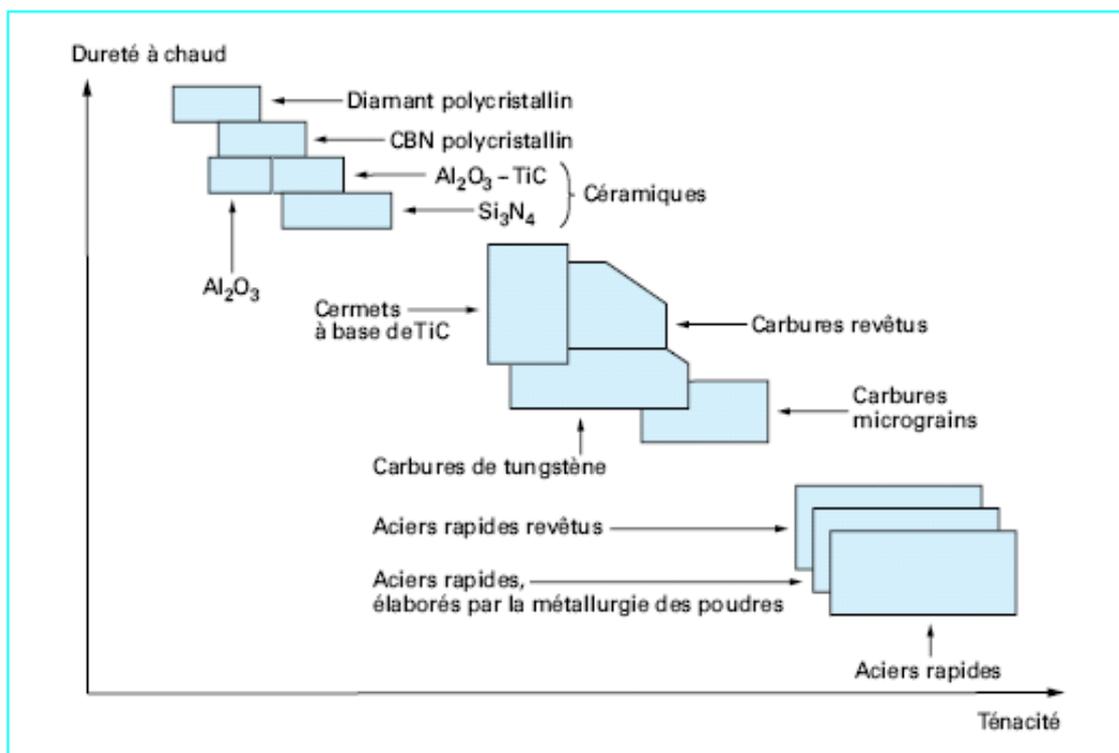


Figure I-3 Comparaison de matériaux de coupe [6]

Les outils de coupe modernes sont composés de deux parties distinctes afin d'augmenter leurs performances et leurs durées de vie :

**Un substrat** : qui a pour rôle d'encaisser les efforts mécaniques et les contraintes thermiques de l'usinage (haute résistance à la pression et à la flexion et ténacité suffisante). Acier rapide (AR) ; carbures revêtus (GC) ; carbures non revêtus (C) ; cermets (CT) céramiques (CC) ; nitrures de bore cubiques (CB) ; diamants poly cristallins (CD).

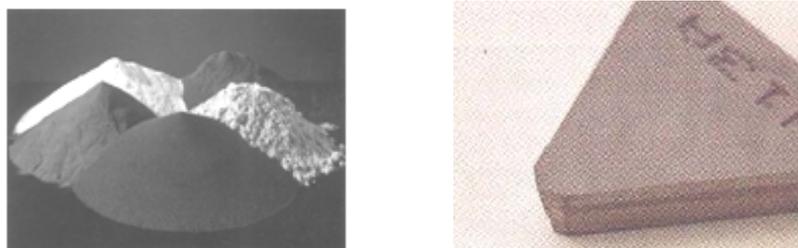
**Un revêtement** : qui a pour fonction d'améliorer la résistance à l'usure, l'inertie chimique et thermique, ainsi que le glissement du copeau sur l'outil pour son évacuation.

**A- les substrats** : Les substrats actuels appartiennent à des familles de matériaux très diverses :

**a) les aciers rapides** : substrats obtenus par frittage de poudres métalliques avec une prédominance du fer. Ces poudres sont fortement chargées en carbone 0,7 à 1,6 % mais aussi en éléments tels que le Tungstène (12 à 20 % pour le type T) ou le Molybdène (3,5 à 10% pour le type M) qui caractérisent des familles différentes possédant des propriétés différentes (Type T : arête de coupe résistante à l'abrasion ou Type M : grande résistance à la chaleur). D'autres éléments en additifs viennent renforcer les propriétés de ces matériaux (Chrome, Vanadium ou Cobalt par exemple). On obtient avec ces matériaux des duretés de l'ordre de 740 à 1000 Hv. Ils sont beaucoup utilisés pour :

- Le tournage (10% du marché),
- Le perçage (80% du marché)
- Le fraisage (40% du marché).

**b) Les carbures** : substrats obtenus par frittage de poudres métalliques sans fer (figure I-4). Ces matériaux sont souvent formés de carbure de tungstène, de titane ou de silicium pour les plus utilisés. Afin de lier les grains de carbure entre eux on utilise des éléments métalliques comme le cobalt, qui allie sa ductilité à la dureté des carbures. On obtient avec ces matériaux des outils présentant des duretés variables comprises entre 1250 et 1800 HV. Ils sont utilisés pour usiner des matériaux durs car ils possèdent une ténacité accrue par rapport aux aciers rapides. Il existe un grand nombre de possibilités d'usinage avec ces matériaux. En effet, selon les proportions de carbure et de liant, les propriétés et les capacités de l'outil changent beaucoup. [4]

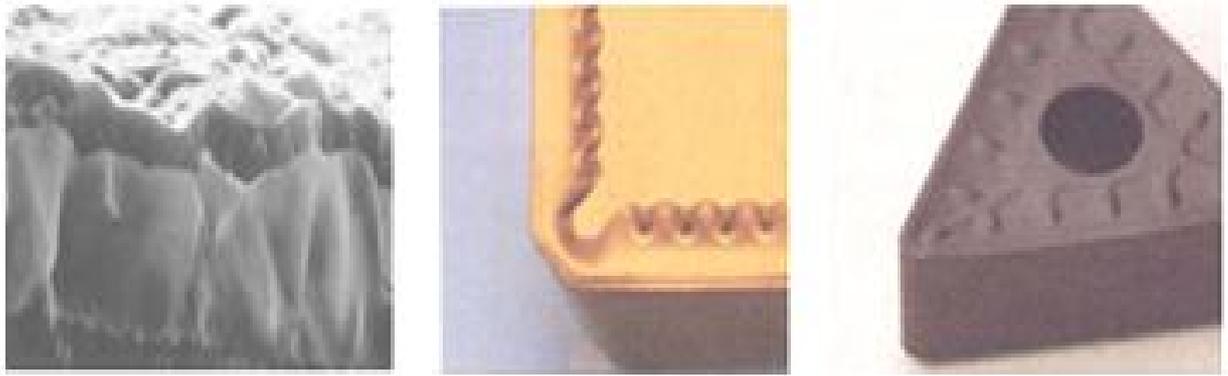


**Figure I-4** Carbures non revêtus.

**c) Les carbures revêtus :** sont recouverts d'une couche de quelques micromètres de nitrure ou de carbure de titane, ou encore d'oxyde d'aluminium (figure I-5).

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.



**Figure I-5** Carbures revêtus [5]

**d) Les cermets :** sont des carbures, des nitrures, des carbonitrures ou des borures liés par un métal ou un alliage ferreux (figure I-6). Les liants sont donc de plusieurs types (cobalt, nickel, nickel-fer, nickel-chrome, etc.). La dénomination de cermets est peu utilisée dans l'industrie car souvent ils sont assimilés à des carbures cémentés. On obtient avec ces matériaux des outils pouvant avoir des duretés de l'ordre de 1500 à 2000 HV. Leur dureté à chaud permet de faire des usinages dans des conditions extrêmes : 1000°C. Les cermets ont des applications très diverses (tournages, fraisage, etc.), et ont une très bonne résistance mécanique, une faible conductivité thermique et une bonne résistance à la diffusion et à l'usure. Ils sont donc souvent utilisés en tournage de semi-finition ou de finition des aciers. [4]

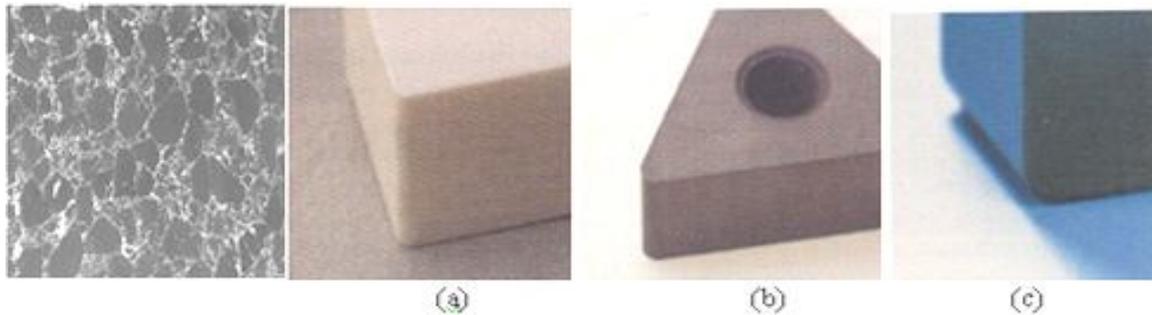


**Figure I-6** Cermets [5]

e) **Les céramiques** : sont des matériaux frittés à base de céramiques : alumines, nitrures de siliciums, etc. Ce sont des matériaux qui ont une très grande dureté et une très grande résistance à l'usure. En contre partie, ce sont les outils les plus fragiles.

Les céramiques sont très utilisées pour l'usinage des fontes par exemple.

On choisit les substrats en fonction de leurs propriétés mais aussi en référence au rapport prix / rentabilité d'usinage / qualité d'usinage. En effet, le prix des outils peut varier de 1,5 à 2,3 euros pour des plaquettes en aciers rapides à plusieurs dizaines d'euros pour certains cermets. [4].



**Figure I-7** (a) Céramique pure, (b) CC mélangée, (c) CC à bas Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [5]

f) **Nitrures de Bore Cubique (CBN)** : Le nitrure de bore cubique est le matériau le plus dur après le diamant. Le Pc- BN (le nitrure de bore poly cristallin) est 50 fois plus résistant à l'abrasion que le carbure de tungstène et 5 fois plus que l'oxyde d'alumine et le nitrure de silicium. Il conserve sa résistance et n'a pas tendance à réagir avec le fer ou l'air aux hautes températures de coupe qui sont caractéristiques de l'usinage des aciers durs. Sa température d'utilisation en atmosphère oxydante atteinte 1400°C. En atmosphère inerte ou réductrice, il résiste à des températures allant jusqu'à 2000°C. Dans l'hydrogène sec, on peut atteindre les 3000°C. D'après Peter RIGBY leurs propriétés physiques de dureté, de résistance à la compression et de conductivité thermique leur confèrent une résistance à l'abrasion qui leur permet surtout d'usiner avec des vitesses de coupe plus importantes qu'avec des outils carbures, tout en assurant des états de surface excellents pour des durées de vie élevées. Ses propriétés ont conduit à l'utilisation du CBN comme matériau d'outil depuis le début des années 1970. [7]



**Figure I-8** Nitrure de bore cubique [5]



(a) insert unique brasé

(b) insert full face

(c) insert économique fritté

**Figure I-9** État de livraison des plaquettes C-BN (d'après Sandvik).

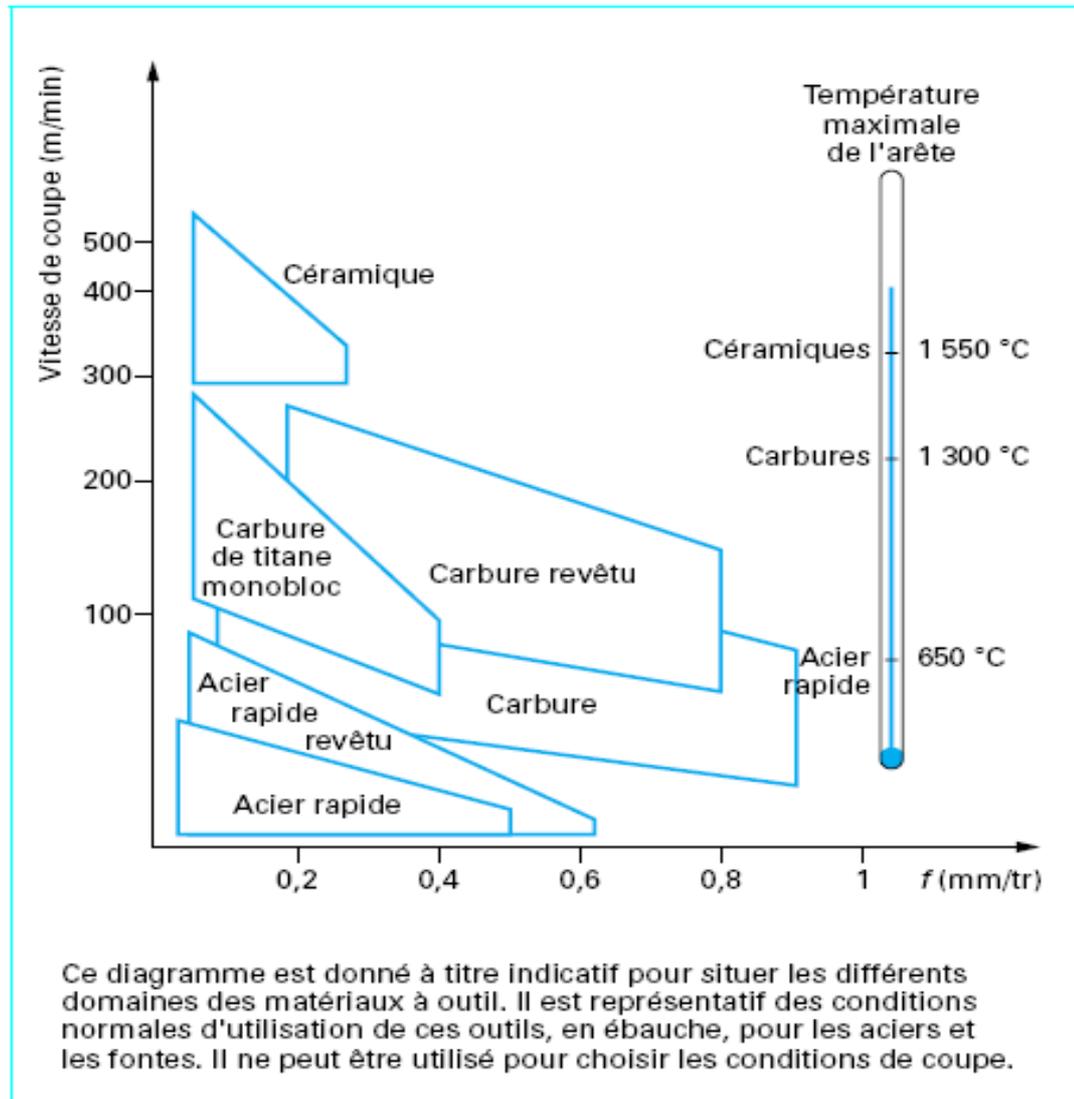
Les plaquettes C-BN sont commercialisées soient sous forme :

- d'insert brasé (figure *a*) ;
  - de plaquettes dites « full face » (couche de C-BN sur toute la face de coupe, fig-*b*)
  - ou d'insert dit « économique » : il s'agit d'un brevet déposé par Sandvik où les parties C-BN sont frittées sur toute la hauteur de la plaquette donc réversibles (fig- *c*).
- [8]

**g) Les diamants polycristallins (CD)** (figure I-10) 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.

On peut aussi récapituler les domaines d'emploi des différents matériaux d'outils (en incluant l'acier rapide) (figure I-10).

**Figure I-10** diamante polycristallins (CD).

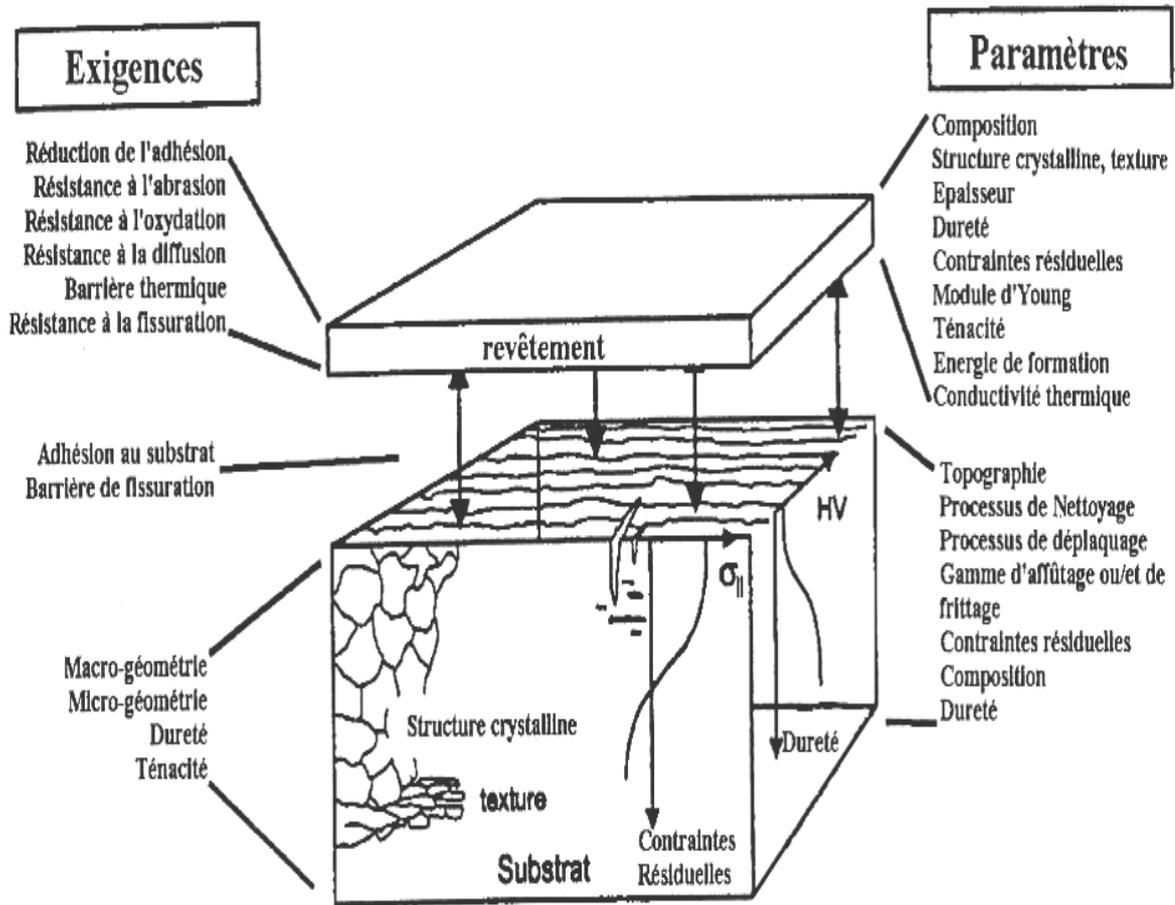


**Figure I-11** Domaine d'emploi des divers matériaux à outil coupant [5]

### B- les revêtements :

Les revêtements sont depuis quelques années un nouvel axe de recherche dans le monde industriel afin d'améliorer les conditions de coupe et la productivité. Ils prennent une place de plus en plus importante dans le monde de l'usinage, puisque en 2001, 90% des outils carbures fabriqués sont revêtus.

Le principe consiste à recouvrir d'un film mince (jusqu'à 10 $\mu$ m d'épaisseur) les outils en matériaux ayant des propriétés particulières comme par exemple une très grande dureté (2000 à 3200 HV) ou des coefficients de frottements faibles. Comme nous pouvons le voir sur la figure I-12, le rôle recherché pour le revêtement est complexe. Il doit à la fois protéger le substrat de l'usure (adhésion, abrasion, oxydation, diffusion), faire office de barrière thermique, résister à la fissuration et tout ceci grâce à un dépôt d'épaisseur très faible.



**Figure I-12** Représentation des exigences envers les revêtements et des paramètres à maîtriser pour répondre aux exigences [4]

Actuellement, les revêtements les plus couramment utilisés sont les carbures de titane (TiC), les nitrures de titane (TiN), les carbonitrures de titane (TiCN) ou l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Le dépôt choisi dépend du but recherché : résistance à l'usure et/ou à l'oxydation, tenue à la température, réduction du frottement, etc. (tableau I-1) La combinaison de plusieurs de ces objectifs oriente les tendances actuelles et futures.

**Tableau I-1** Comparatif des propriétés de certains revêtements de + à +++++

Revetement	Résistance à L'usure	Résistance chimique	Résistance thzermique	Résistance frottement
TiC	+++++	+	+	+++
TiN	+++	+++	+++	+++++
Ti(C ,N)	++	++	++	++++
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	++++	+++++	+++++	++
HfN	+++	++++	++++	++++

Des dépôts plus durs sont désormais utilisés, comme les nitrures de bore cubique (CBN) ou les dépôts diamants. Dans ces cas là, c'est la dureté qui est recherchée afin de faciliter la résistance à l'usure.

Le dépôt peut être monocouche ou multicouche. L'intérêt du multicouche est de pouvoir cumuler les propriétés de chaque dépôt et d'avoir une meilleure résistance à la fissuration.

Le principe du dépôt multicouche permet aussi d'envisager des revêtements plus complexes, comme par exemple des revêtements composés de métaux et métalloïdes comme le (Ti,Cr)N, le (Ti,V)N ou le Ti(B,N).

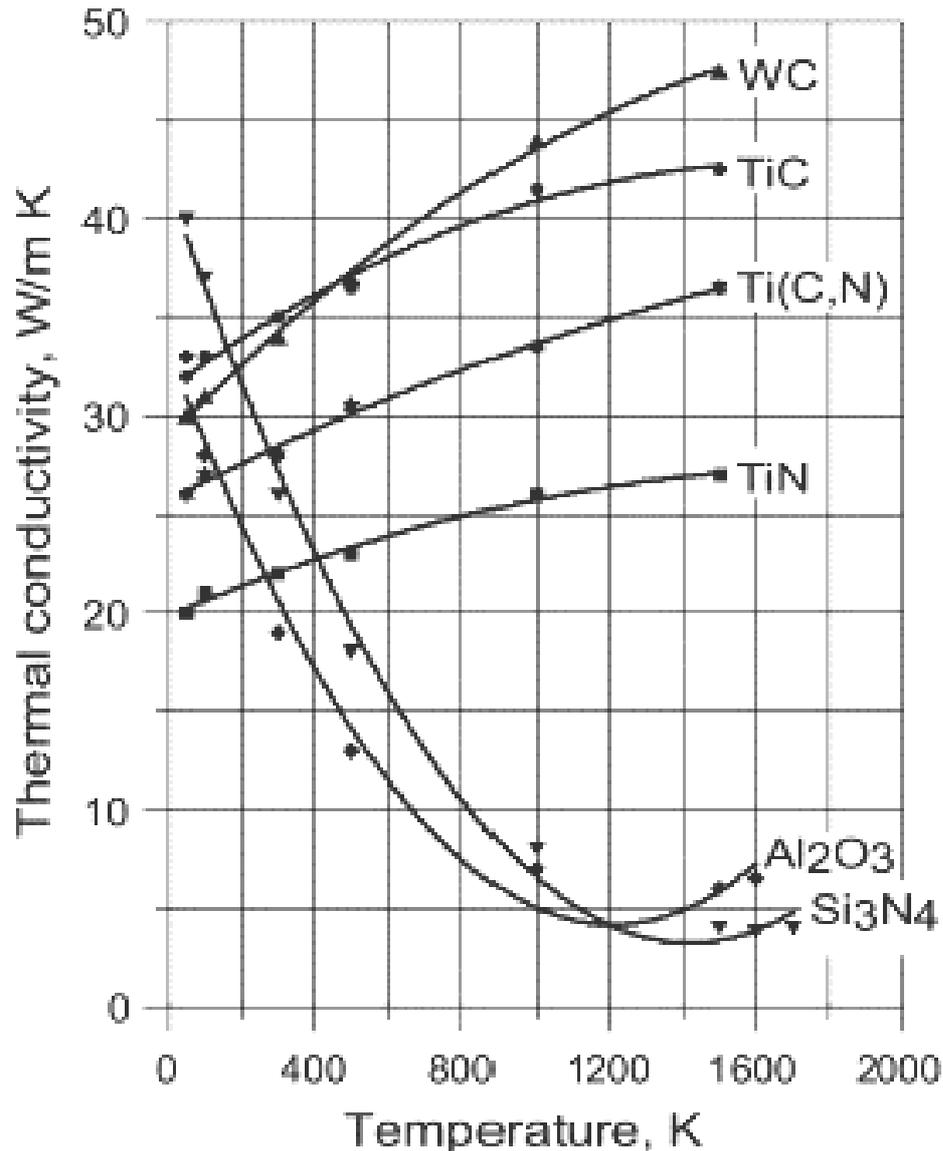
De nombreux revêtements sont mis au point, car l'évolution des outils de coupe est, aujourd'hui, davantage basée sur l'évolution des revêtements que sur celle des substrats. L'évolution des revêtements est devenue très rapide, alors qu'elle était quasiment inexistante il y a 20 ans. Cela est dû en grande partie à l'évolution de l'usinage à grande vitesse et à sec.

Actuellement, environ 90% des outils carbure en vente sont désormais revêtus. Les outils complexes comme les forêts sont revêtues par le procédé CVD (Chemical Vapor Deposition) et les outils de type plaquette carbure sont plutôt revêtus par le procédé PVD (Physical Vapor Deposition). Les coûts de revient des revêtements ont beaucoup baissé et sont désormais assez faibles par rapport aux autres facteurs intervenant dans l'usinage :

- pièce produite,
- frais d'immobilisation du matériel et d'amortissement des machines,
- coût de la main d'œuvre. [4]



**Figure I-13** revêtements multicouches  
(Cette coupe pour un Plaquette de carbure revêtue Multicouches (TICN+ AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TIN)).



**Figure 1-14** Evolution de la conductivité thermique en fonction de la température des constituants des outils et des revêtements.

Le procédé de déposition consiste à créer un lien étroit entre le substrat et son revêtement. La performance d'adhésion au substrat est donc un critère essentiel pour le choix du revêtement. Ceux-ci seront également sélectionnés pour leurs propriétés à haute température (dureté, ténacité, conductivité thermique). Par exemple, l'emploi de l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dans les revêtements multicouches aura une fonction d'isolant thermique afin de conserver les propriétés mécaniques du substrat

Le revêtement étant la partie de l'outil réellement en contact avec la matière usinée, il sera donc conçu de manière à lui donner des propriétés bien spécifiques destinées à réaliser certaines performances. La résistance à l'usure, le coefficient de frottement et l'inertie chimique figurent parmi les caractéristiques qu'un revêtement apporte à un outil de coupe [9].

## 1-5 Endommagement des outils de coupe

### 1-5-1 Introduction

De nos jours, les industries de fabrication ont pour objectifs, primordiaux, la réduction de coûts d'exploitation ainsi que l'amélioration de la qualité du produit. Dans les procédés d'usinage, par enlèvement de matière, le coût de l'opération d'usinage et la qualité du produit final sont des contraintes nécessaires à prendre en compte dans un environnement de plus en plus compétitif, où les investisseurs exigent un meilleur rendement de leurs investissements.

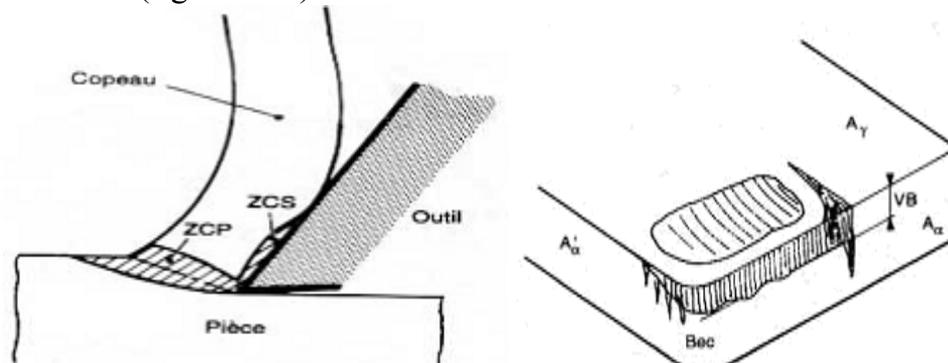
La dégradation de l'état de l'outil affecte aussi bien la qualité des surfaces usinées, les tolérances (spécifications) géométriques imposées, la tenue de l'outil dans le temps, et engendre des efforts élevés, qui ont pour effet d'augmenter la puissance de coupe et l'énergie consommée.

D'autres facteurs non négligeables peuvent également agir négativement sur le processus de coupe et le bon fonctionnement de la machine-outil. Nous citerons entre autres la variation des caractéristiques mécaniques du matériau de la pièce à usiner, la nuance de l'outil utilisé et les variations des conditions de coupe.

L'usure de l'outil découle des sollicitations sévères que subit le tranchant à l'interface outil-copeau. Celles-ci sont d'abord de nature physique mais aussi mécanique.

Il s'agit de contraintes permanentes ou cycliques et d'actions de frottement en surface. Cette usure se manifeste sous plusieurs formes, dont les principales sont : l'usure en dépouille, l'usure en cratère, usure par déformation plastique ainsi que l'usure en entaille. [10]

La formation du copeau implique le triple frottement sec de deux corps pressés l'un contre l'autre (figure I-15) :



ZCP : zone de cisaillement primaire.

ZCS : zone de cisaillement secondaire

**Figure 1-15** Formation du copeau et usure [11]

## 1-5-2 Les différentes formes d'usure des outils

### a) Usure en dépouille

Elle est due au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil et provoque une bande striée parallèle à l'arête de coupe. Elle influe sur l'état de surface de la pièce usinée et sur la précision dimensionnelle de l'usinage car elle modifie la position de l'arête de coupe (figure I-16).

C'est un critère général pour la tenue d'outil, caractérisée par une valeur d'usure admissible VB.

Les valeurs indiquées se rapportent généralement à une tenue d'outil (durée de vie  $T=15$  min).

VB critique = 0,6mm en ébauche et 0,3mm en finition

Cela est dû à une vitesse de coupe excessive ou à une mauvaise position angulaire de l'outil (face de coupe / pièce)

#### Mesures correctives :

- Choisir une nuance présentant une meilleure résistance à l'usure.
- Réduire la vitesse de coupe. [12]

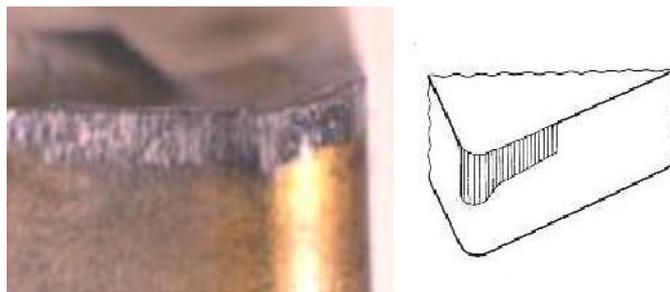


Figure I-16 Usure en dépouille (KANNAMETAL) [13]

### b) Usure en entaille ou par oxydation

Elle apparaît ponctuellement au niveau du point de contact entre l'arête principale de coupe et la surface de la pièce mais elle peut aussi apparaître sur la face de dépouille secondaire. Elle est due à l'écaillage ou l'oxydation de la pièce (figure I-17).

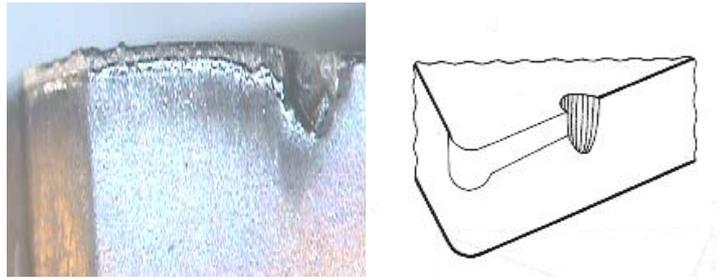
Ce genre d'usure due à des phénomènes métallurgiques (calamine des pièces forgées, différence de taille de grain des pièces moulées, oxydation des aciers, austénitiques par exemple) est caractérisé par l'indice VN. Suivant l'importance de cette usure, il y a des risques de rupture.

En général : VN critique = 1mm

**Remarque :** cette usure en entaille est souvent accompagnée d'une usure en dépouille. Cependant il est à remarquer que les entailles doivent être exclues de la mesure de VB.

#### Mesures correctives :

- Accroître la rigidité de l'arête de coupe
- Choisir un outil avec un angle de direction d'arête plus faible ( $45^\circ$ )
- Réduire l'avance. [12]



**Figure I-17 Usure en entaille [14]**

### c) Usure en cratère

C'est une usure en creux sur la face de coupe, caractérisée par la profondeur de cratérisation (indice KT) et le rapport  $K_t/K_M$  ou son angle de cratérisation  $\gamma_c$ . Elle peut avoir à terme une incidence sur la tenue d'outil (durée de vie : effondrement ou recul de l'arête de coupe) (figure I-18).

Elle est due au frottement du copeau sur la face de coupe de l'outil. Lors de l'usinage, la température élevée à l'interface copeau- outil et les pressions de contact entre le copeau et l'outil, provoquent une diffusion importante de la matière de l'outil vers le copeau par processus d'adhésion.

Elle donne aussi une déformation plastique de la pointe de l'outil, caractérisée par une flèche SVp et un renflement de la face de dépouille.

L'usure est souvent constatée sur les outils carbures, elle provoque généralement la rupture de la pointe de l'outil

$$\text{Valeur limite : } K_T \text{ critique} = 0,06 + 0,3f$$

La valeur critique est celle à partir de laquelle l'outil est considéré comme hors d'usage avec risque important de rupture de l'outil.

L'usure est généralement due à une vitesse de coupe excessive ou à une avance trop faible.

#### Mesures correctives :

- Utiliser des nuances de métal dur revêtu
- Choisir des plaquettes à géométrie positive
- Réduire la vitesse de coupe ou augmenter l'avance [12]



**Figure I-18 Usure en cratère [13]**

#### d) Ecaillage et fracturation de l'arête de coupe

C'est une destruction de l'arête de coupe par arrachement de petits fragments d'outil, elle est généralement accompagnée d'une usure de la face de dépouille et de ce fait n'est pas toujours reconnaissable. Elle est générée par les chocs thermiques et les vibrations. Elle peut générer des ruptures. Les écaillages en dehors de la partie active de l'arête proviennent de l'impact de copeaux par suite d'une mauvaise évacuation. Cette usure est souvent le fait de chocs thermiques ou d'arête trop fragile (figure I-19).

##### Mesures correctives :

- Choisir une nuance plus tenace.
- Utiliser une plaquette présentant une géométrie d'arête plus stable.
- Réduire l'avance en début de coupe, en cas d'écaillage par impact de copeaux.
- Choisir une géométrie brise-copeaux différente.
- Modifier l'angle de direction d'arête de l'outil.
- Faire une préparation d'arête de coupe (rodage de l'arête de 0,04 mm par exemple). [12]

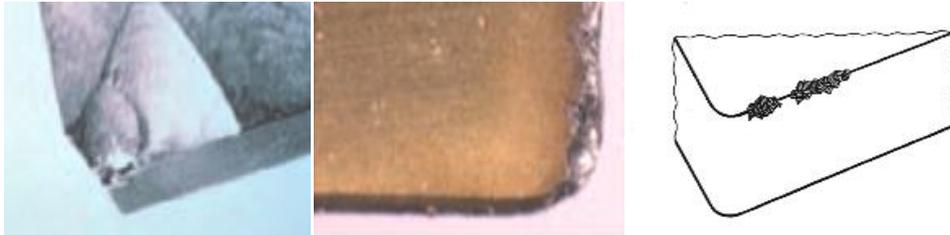


Figure I-19 Ecaillage de l'arête de coupe [13]

#### e) Rupture de la plaquette

Une rupture de la plaquette signifie en général détérioration de l'outil et de la pièce. Ses causes sont multiples et dépendent de la machine et de la pièce. Elle est souvent le résultat d'entailles sur l'arête de coupe, d'une cratérisation ou d'une usure trop importante (figure I-20).

##### Mesures correctives :

- Choisir une nuance plus tenace
- Utiliser une plaquette plus robuste et dotée d'un rayon de bec plus important
- Choisir une géométrie brise-copeaux pour section de copeaux plus importante
- Réduire l'avance et éventuellement aussi la profondeur de passe.

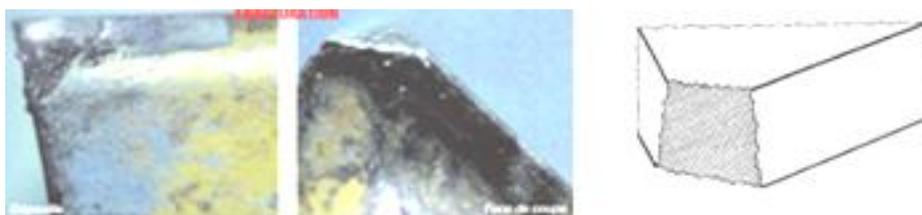


Figure I-20 Rupture de la plaquette [14]

### f) Arêtes rapportées

Les arêtes rapportées résultent d'une accumulation de métal de la pièce usinée sur la face de coupe, en particulier dans le cas de matériaux difficilement usinables. Il arrive parfois que cet apport de métal se détache et détériore l'arête de coupe. Il mène en outre à des états de surface médiocres.

Le phénomène est dû à une vitesse de coupe et une avance trop faible ou des angles de coupe non appropriés (figure I-20).

#### Mesures correctives :

- Accroître la vitesse de coupe
- Utiliser des métaux durs revêtus ou des cermets
- Choisir une géométrie d'arête positive
- Travailler avec arrosage. [12]

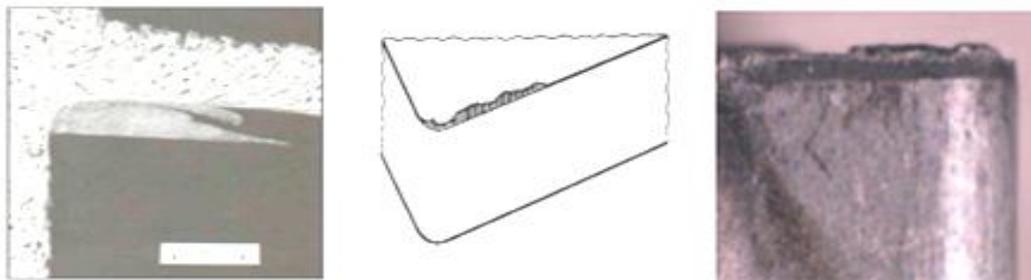


Figure I-20 Arête rapportées [1].

### g) Déformation plastique

Elle est occasionnée par une sollicitation trop importante de l'arête de coupe (matériaux usinés trop durs) en combinaison avec des températures d'usinages élevées. La zone de déformation plastique du matériau dépassé, il y aura rupture (figure I-21)

On peut trouver cette déformation plastique en parallèle d'une cratérisation. En effet le cratère affaiblit la section de l'outil.

Critère caractéristique : VBC et SVP

#### Mesures correctives :

- Réduire la vitesse de coupe
- Réduire l'avance
- Utiliser une nuance de métaux durs plus résistante à l'usure [12]

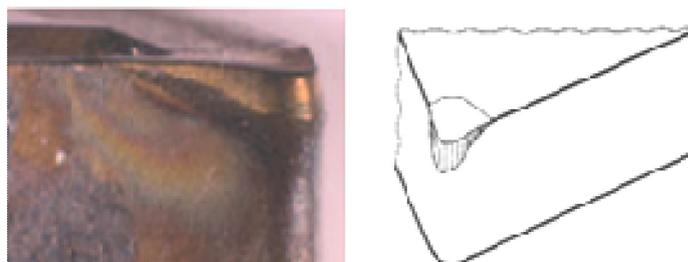


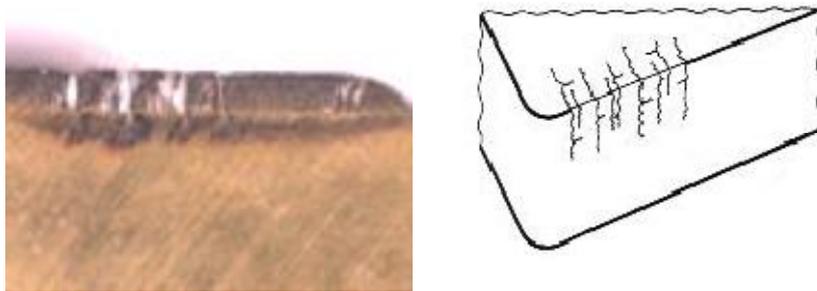
Figure I-21 Déformation plastique [13]

### h) Fissurations de l'arête de coupe ou usure en peigne

Légères fissures sensiblement perpendiculaires à l'arête de coupe occasionnées par les chocs thermiques résultant des interruptions de coupe, en particulier dans le cas du fraisage. Risque de rupture ! (figure I-22).

#### Mesures correctives :

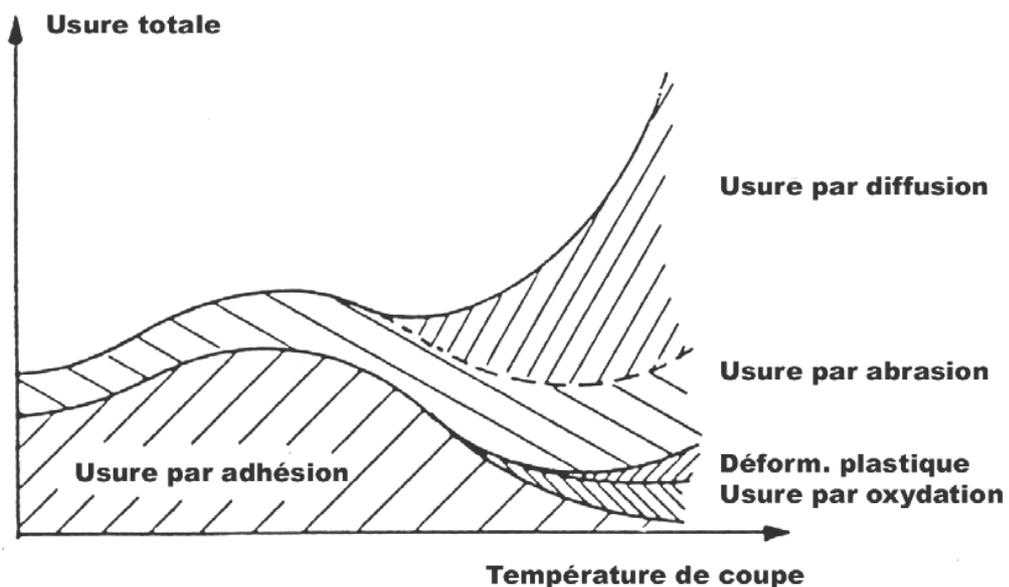
- Utiliser une nuance présentant une meilleure résistance aux chocs thermiques.
- Contrôler l'arrosage.



**Figure I- 22** Fissurations de l'arête de coupe [13]

### I-5-3 Phénomènes provoquant l'usure

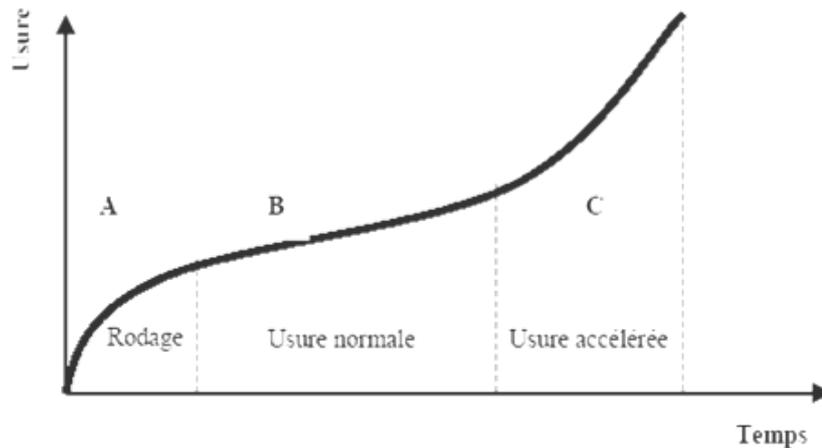
D'une façon générale, l'usure de deux matériaux en contact est due à des phénomènes d'ordre mécanique et physico-chimique. Ces phénomènes dépendent essentiellement de la température de coupe et selon König et Aachen ces derniers se divisent comme le montre la figure I-23. [7]



**Figure I-23** Causes d'usure [7]

### I-5-4 Relation entre l'usure et le temps

La durée de vie de l'outil de coupe est directement liée à son usure ou, à sa détérioration pour un temps donné. L'allure tracée sur la figure I-24, se divise en trois zones A, B et C. Elle représente la relation entre l'usure et le temps de coupe.



**Figure I-24** Evolution de l'usure en fonction du temps de coupe [15]

- **Zone A :** Est celle du rodage ou usure initiale. Elle donne lieu à une usure intense qui se caractérise par l'arrachement d'une quantité importante de petites particules de la surface de l'outil, plus les surfaces de la partie active de l'outil sont nettes (lisses), plus l'évolution de l'usure est faible.
- **Zone B :** Correspond à l'usure normale. Elle est plus stable, c'est-à-dire linéaire. Elle est caractérisée par une pente très faible comparativement aux autres zones.
- **Zone C :** C'est la zone d'usure accélérée (catastrophique), là où les deux types d'usure (celle en dépouille et en cratère) se réunissent.

### I-5-5 Critères d'usure

Les différents critères actuellement utilisés se rangent en deux catégories (figure I-25).

#### A) Critères directs

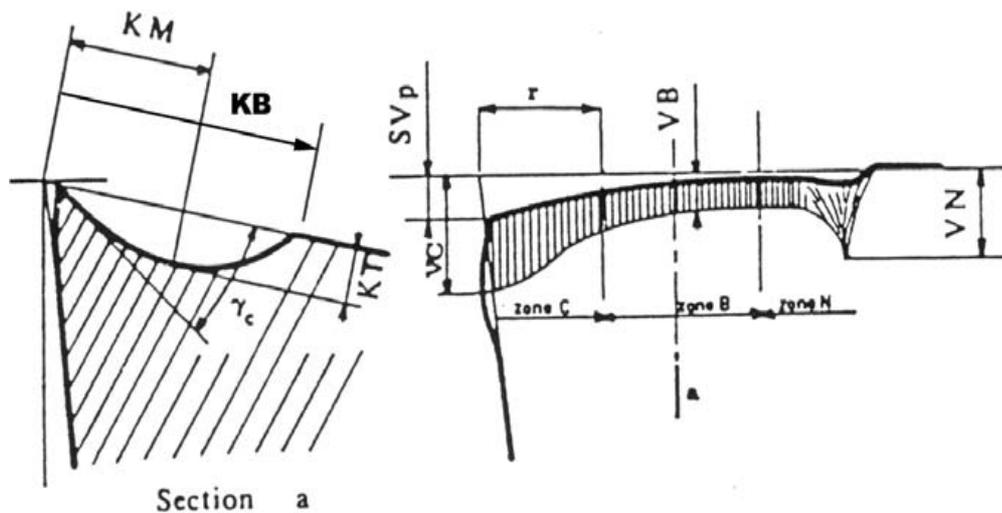
Basés sur l'évolution de l'usure, tels que :

- Critère d'usure frontale caractérisé par la largeur moyenne  $VB$ , de la bande d'usure sur la face en dépouille de l'outil.
- Critère de cratérisation défini par la valeur limite de la profondeur du cratère  $KT$ , ou par la valeur limite du rapport de cratérisation  $KT/KM$  ou par la valeur limite de l'angle de cratérisation  $\gamma_c$ .
- Critère de « mort d'outil » utilisé principalement pour les outils en acier rapide.
- Critère d'usure volumétrique ou massique caractérisé par la perte en poids de l'outil, mesuré par pesée ou à l'aide de traceurs radioactifs.
- Critère basé sur les variations de cotes des surfaces usinées. Il est actuellement utilisé pour la détermination de l'usinabilité des aciers.

## B) Critères indirects

Ils sont basés sur la variation de certaines grandeurs physiques de la coupe en fonction de l'usure de l'outil, ce sont par exemple :

- Les efforts de travail spécifique de coupe ;
- La rugosité de surface usinée ;
- La température de coupe à la pointe de l'outil. [15]



**Figure I-25** Schéma de la caractérisation de l'usure d'un outil d'après la norme NFE 66 505. [16]

### Indice :

- KM : Distance du centre du cratère / pointe initiale de l'outil
- KT : profondeur d'un cratère
- KB : Largeur du cratère
- $\gamma_c$  : Angle de cratérisation
- VB : Hauteur de l'usure en dépouille
- VN : profondeur d'entaille par rapport à l'arête de coupe initiale
- VBC : Profondeur entre l'arête initiale et la zone usée
- SV : Profondeur entre l'arête initiale et la pointe de l'outil usée [16]

### I-5-6 En pratique

D'un point de vue pratique, l'usure frontale est la plus importante à considérer puisque elle détermine l'état de surface de la pièce usinée et la précision dimensionnelle. Dans le cas des outils en acier rapide, les mesures de l'usure frontale présentent une dispersion importante due principalement à l'hétérogénéité des aciers à outils et de la matière à usiner et la présence d'une zone morte au voisinage du bec, qui se traduit par l'apparition d'une arête qui protège la face en dépouille dans certains cas. Par contre, l'expérience montre que l'évolution de l'usure des outils à plaquette en carbure, qui permettent des vitesses de coupe plus élevées, peut être définie de façon satisfaisante par la seule mesure de l'usure frontale, dans une large plage des paramètres de coupe.

Pour des paramètres de coupe élevés (provoquant une élévation de température entre outil et copeau) l'usure par diffusion s'accélère ce qui favorise une évolution rapide de la cratérisation.

La durée de vie d'un outil en carbure ou en céramique correspond à la durée au bout de laquelle on atteint une usure maximale admissible selon le mode d'usinage. Les critères directs les plus utilisés sont ceux de l'usure en dépouille limite VB limite et l'usure en cratère limite KT<sub>max</sub>. On peut aussi rencontrer des critères indirects qui sont basés sur la variation de certaines grandeurs physiques de la coupe en fonction de l'usure de l'outil.

### I-5-7 Modèles de lois d'usure

#### A- Modèle de TAYLOR généralisé

Taylor fut le premier à proposer en 1907, un modèle mathématique reliant la durée effective de coupe T d'un outil aux paramètres de coupe.

$$T = C \cdot V^n \quad (I.1)$$

V : Vitesse de coupe,

T : Durée de vie de l'outil,

n : Exposant de TAYLOR,

C : Constante dépendant du couple outil/matière.

Ce modèle est représenté par une droite dans un graphe à coordonnées logarithmiques

$$\log T = n \cdot \log V + \log C \quad (I.2)$$

Gilbert (1950) a proposé la généralisation du modèle de Taylor. La constante C est remplacé par une expression qui tient compte de la géométrie de l'outil et du copeau.

$$T = K \cdot a^x \cdot f^y \cdot V^n \quad (I.3)$$

K : dépend de la nature de l'outil et du matériau usiné,

a : Profondeur de passe,

f : Avance,

x, y : Exposants dépendant de la nuance de l'outil.

#### B- Modèle de COLDING

Ce modèle (1958-1960) tient compte de la courbure négative de la courbe (figure I-26). Ce sont des polynômes de la forme :

$$K + aX + C \cdot Y - Z - K \cdot X \cdot Z = 0 \quad (I.4)$$

Ou

$$K + a \cdot X + bX^2 + cY + dY^2 + eZ^2 - Z + f \cdot X \cdot Y + g \cdot Y \cdot Z + h \cdot X \cdot Z = 0$$

avec  $X = \log F$ ,  $Y = \log V$  et  $Z = \log T$

La complexité de ce modèle et la difficulté d'obtenir toutes les constantes a, b, c, d, e, f, g et h pour chaque cas le rendent très peu exploitable. Il rend pourtant compte des diverses particularités du phénomène de coupe, notamment de l'existence de valeur optimale de l'avance que les modèles plus simples ne laisse pas apparaître.

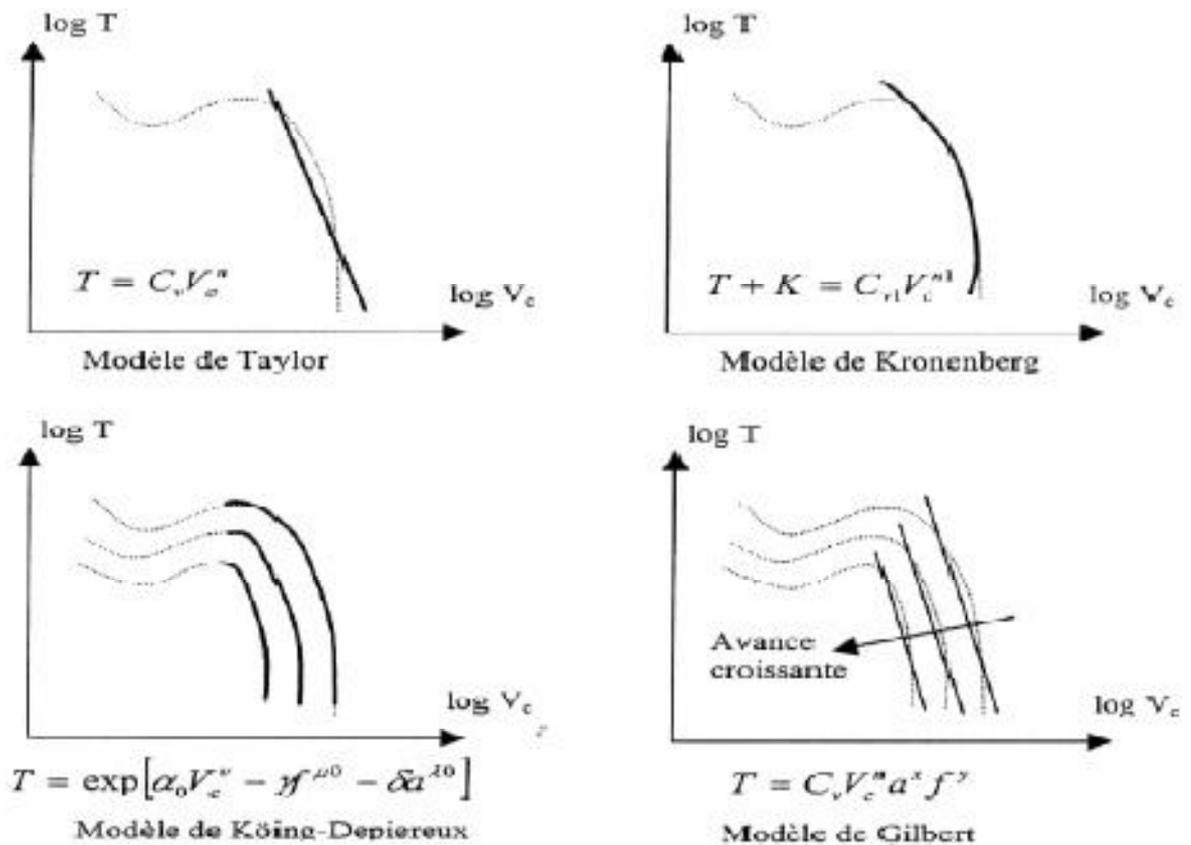
### C- Modèle de KONING-DEPIEREUX (1969)

La durée de vie de l'outil est calculée à partir de la formule suivante :

$$T = \exp(-\alpha \cdot V^n - \gamma \cdot A\mu - \sigma \cdot F^y) \quad (I.5)$$

Ce modèle conduit à une représentation correcte de la loi d'usure et son type exponentiel est en accord avec les courbes expérimentales qui déterminent l'usure des outils. [10]

### I-5-8 Bilan des modèles d'usure



**Figure I-26** Représentation graphique des différents modèles [10]

Compte tenu des dispersions liées aux essais d'usure, le modèle simple de Taylor est suffisamment représentatif il est couramment utilisé aujourd'hui pour tous les matériaux d'outils.

## 1-6 Rugosité des surfaces usinées

### 1-6-1 Critère de qualité

On appelle états de surface les irrégularités dues au procédé d'élaboration de la pièce. Ces irrégularités sont classées en trois catégories :

**Écarts géométriques** : planéité, rectitude, circularité, cylindricité, etc.

**Ondulation** : irrégularités géométriques telles que la distance entre deux sommets est de 0,5 à 2,5mm pour l'automobile par exemple,

**Rugosité** : irrégularités géométriques telles que la distance entre deux pics soit comprise entre 0 et 0,5mm.

Le schéma de la (figure I-28) montre certains paramètres permettant la caractérisation de la rugosité d'une surface.

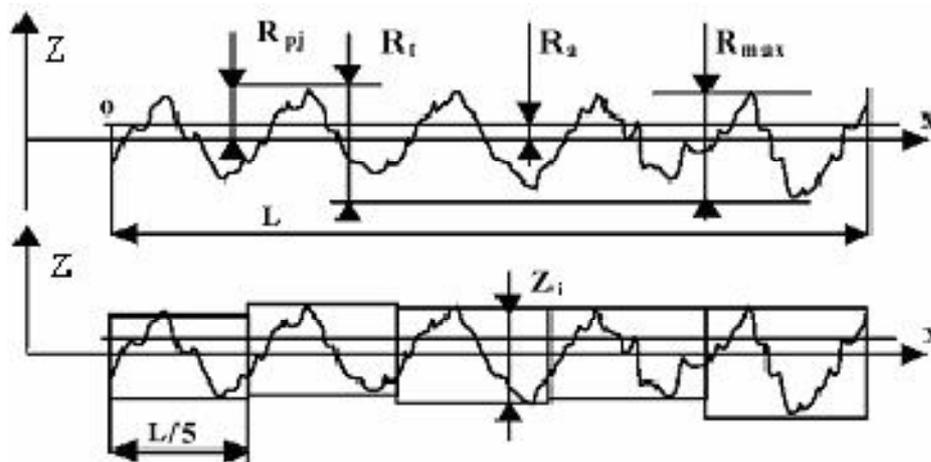


Figure I-28 Paramètres des critères de rugosité [17]

La ligne moyenne Ox est définie telle que :

$$\int_0^L y dx = 0 \quad (I.6)$$

Le critère de qualité choisi est la :

a) **Rugosité moyenne arithmétique Ra** : Selon la norme de l'ISO (1998), ce paramètre est défini comme étant la moyenne arithmétique des valeurs absolues des déviations du profil de la rugosité et est exprimé mathématiquement par l'équation (I.7). Cette rugosité moyenne arithmétique est aussi dite C.L.A (Center Line Average). [15]

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (I.7)$$

La rugosité  $Rz$  est la moyenne sur cinq longueurs de base, figure I-28, relation (I-8) :

$$Rz = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Zi \quad (I.8)$$

**b) Rugosité totale  $R_{max}$** : elle représente la hauteur maximale des irrégularités du profil de rugosité

**c) Rugosité totale  $R_t$**  : représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil, relevé sur toute la longueur de pal page  $L$ .

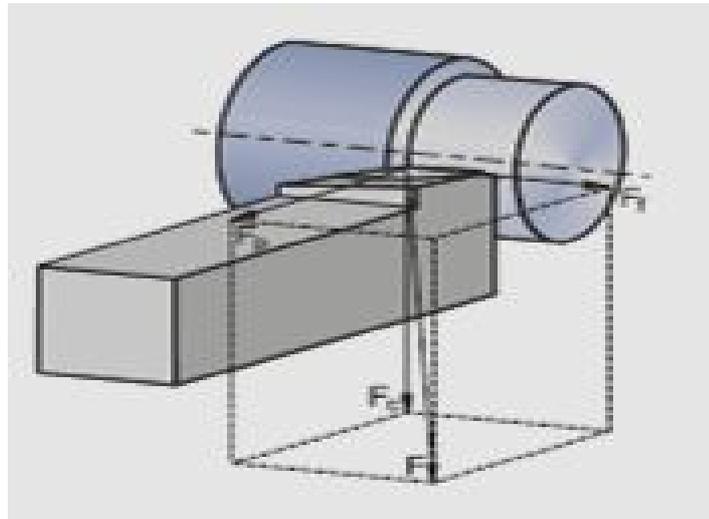
### I-7 Efforts de coupe

La résultante des efforts exercés sur l'outil peut être décomposée dans les différents plans géométriques (Figure I-29). On définit ainsi les différentes composantes des efforts [16]

**L'effort axial ( $F_y$ ) ou effort d'avance** : il correspond à la force appliquée sur l'outil parallèlement à l'axe de rotation de la pièce à usiner. Il est pratiquement nul dans la configuration de coupe orthogonale.

**L'effort radial ( $F_x$ )** : qui est défini comme étant l'effort parallèle au rayon de la pièce. Il est appelé aussi effort de pénétration.

**L'effort tangentiel ( $F_z$ ) ou l'effort de coupe** : c'est l'effort parallèle à la tangente à la surface de la pièce au niveau de la pointe de l'outil. [1]



**Figure I-29** Schéma des différentes composantes de l'effort de coupe (tournage) [17]

La connaissance des efforts de coupe est à la base de l'évaluation de la puissance nécessaire à la coupe. Quand on veut connaître le rendement mécanique d'une machine-outil. On a besoin de savoir quelle est la puissance prise à l'outil et donc d'avoir des renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machines et prévoir les déformations des pièces.

Elle intervient dans la précision d'usinage dans les conditions d'opposition des vibrations auto-excitées ou broutage et indirectement, dans la formation de l'état de surface. Enfin, les efforts de coupe étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal dans le processus de la formation du copeau, sont susceptibles de fournir des renseignements sur l'usinabilité du matériau coupé. [7]

### I-7-1 Mesure des efforts de coupe

La mesure des efforts de coupe se fait à l'aide d'une table dynamométrique de marque Kistler. Pour se faire, on mesure les déformations imposées par les efforts de coupe sur la table à l'aide de capteurs piézoélectriques précontraints dans les trois directions de l'espace. Les tables dynamométriques présentent des qualités appréciées en usinage à cause de leur sensibilité, leur précision et surtout leur grande rigidité qui leur permet de les utiliser sans perturber l'opération d'usinage. Grâce à la platine Kistler, on peut obtenir les différentes composantes ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) de l'effort global de coupe ( $F_{rés}$ ). [4]

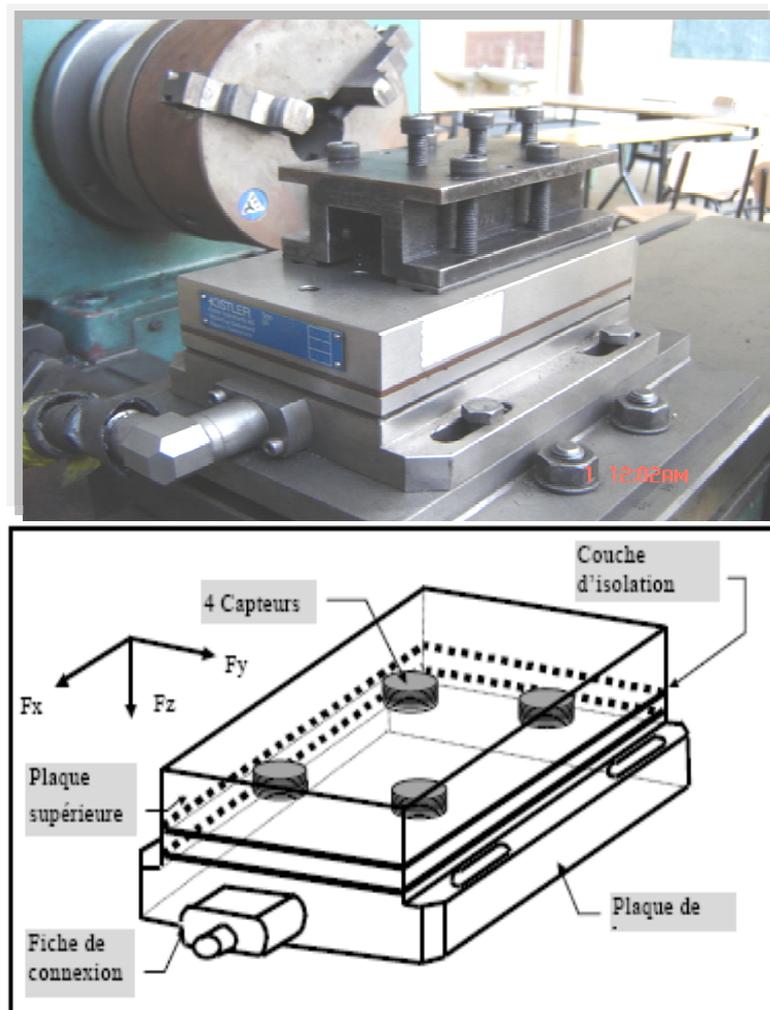


Figure I-30 Capteur d'effort de coupe KISTLER.

### I-8 Les Fontes

La fonte a une température de fusion allant de 1135<sup>0</sup>C à 1150<sup>0</sup>C en fonction du pourcentage de carbone et de silicium qu'elle contient. La fonte est un précurseur dans la fabrication de l'acier à partir de minerai (hématite) et de coke. C'est l'alliage qui sort du haut-fourneau et qui sera affiné an acier par chauffage (décarburation). On l'appelle alors fonte brute, pour la distinguer de la fonte élaborée, généralement issue d'une fusion distincte, de composition déterminée, et destinée à la production de pièces moulées. [18]

La catégorie fontes regroupe les alliages fer-carbone présentant une teneur en carbone C > 2% (généralement jusqu'à 4%). (Figure I-31). Les éléments d'alliage sont généralement le silicium, le manganèse, le phosphore et le soufre. Il est possible d'améliorer la résistance à la corrosion et à la chaleur par l'addition de nickel, de chrome, de molybdène et de cuivre. L'ajout d'alliages aux fontes influence l'usinabilité, dans la mesure où ils font office de formateurs de carbure ou influent sur la résistance et/ou la dureté.

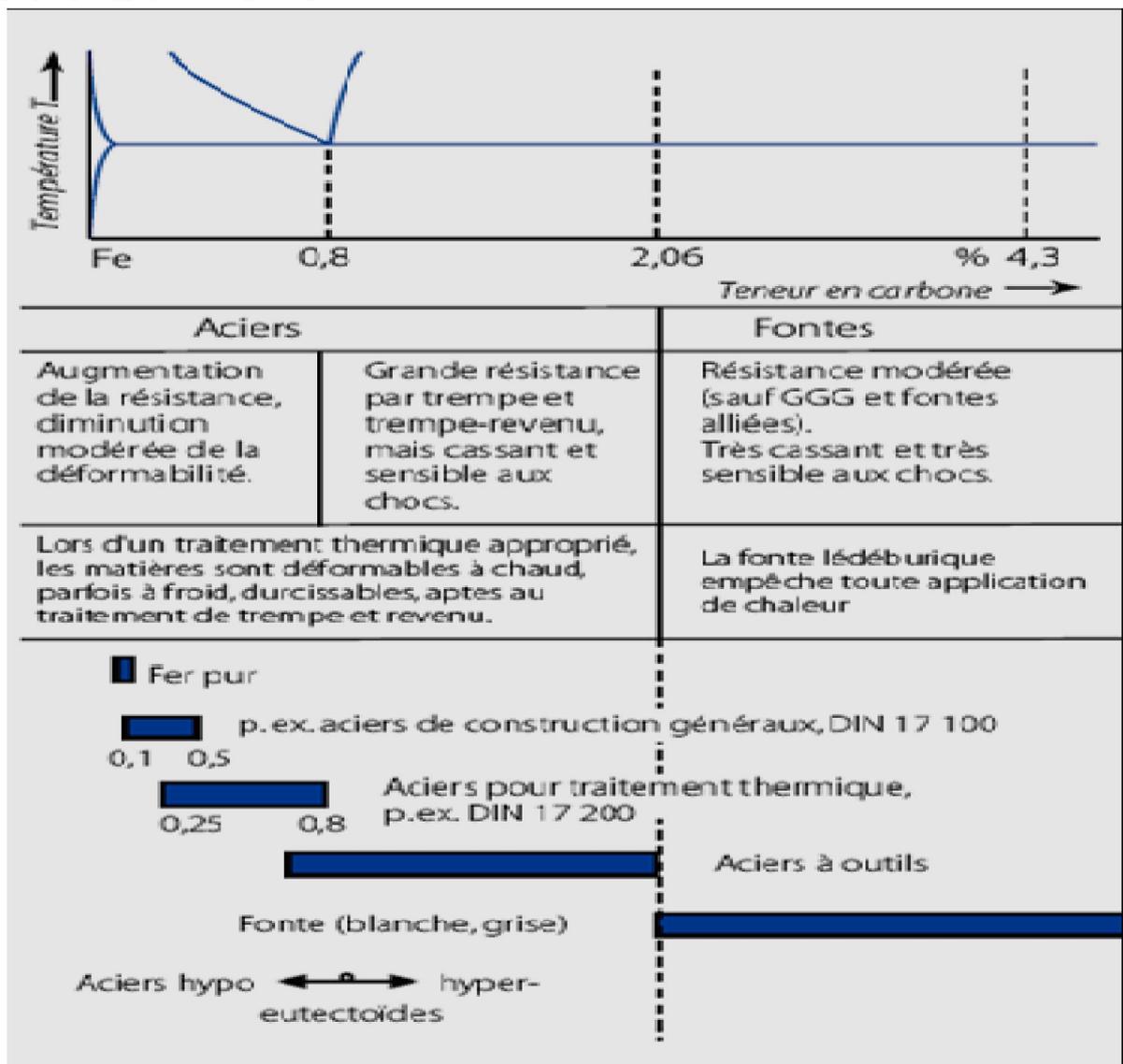


Figure I-31 Classification schématique des alliages fer-carbone [19]

### I-8-1 Action des principaux éléments présents dans la fonte

**Carbone** : on le trouve sous forme de graphite et combiné au fer. On a remarqué que l'augmentation du carbone graphitique se fait plus rapidement que celle du carbone total. C'est pour cette raison que l'on peut dire que le carbone est un élément graphitisant.

**Chrome** : c'est un élément très durcissant et carburigène. Il affine la perlite, améliorant ainsi les caractéristiques mécaniques.

Avec 1% de chrome, apparition de carbures.

Avec 2% de chrome, la fonte devient blanche

Avec 12% de chrome les carbures s'affinent

Avec 30% de chrome la structure est une ferritique au chrome donnant une bonne résistance à la corrosion.

**Cuivre** : éléments soluble dans le fer jusqu'à 1.5%. C'est un graphitisant, 1% de cuivre équivaut à 0.3% de silicium. Il stabilise le graphite et affine la perlite.

**Étain** : cet élément est intéressant dans les pièces courantes de fonderie, lorsque l'on veut obtenir une matrice perlitique. Ainsi avec 0.1% de Sn seulement, on transforme une matrice ferrito-perlitique en une matrice perlitique.

**Manganèse** : il est maintenu à une teneur suffisante pour neutraliser le soufre en formant du sulfure de manganèse (MnS). Cette teneur minimale est fixée à  $Mn = 1.7 \%S + 0.3$

Au dessus de cette proportion, il agit comme un faible stabilisant des carbures. En outre il affine la perlite et de ce fait élève la résistance à la traction. Sa teneur dans les fontes grises est généralement de 0.5 à 0.8%.

**Molybdène** : élément carburigène, il favorise la formation de structure aciculaire et affine celle-ci Bonne action sur la résistance aux chocs. On l'associe souvent au nickel et au chrome en addition de 0.3 à 1%. On peut en trouver jusqu'à 10% dans les fontes blanches.

**Nickel** : soluble dans le fer, il n'est pas carburigène. C'est un élément graphitisant, trois fois moins énergétique que le silicium. Il affine la structure et plus on en ajoute, plus il modifie celle-ci qui passe de perlite en martensite, puis en austénite.

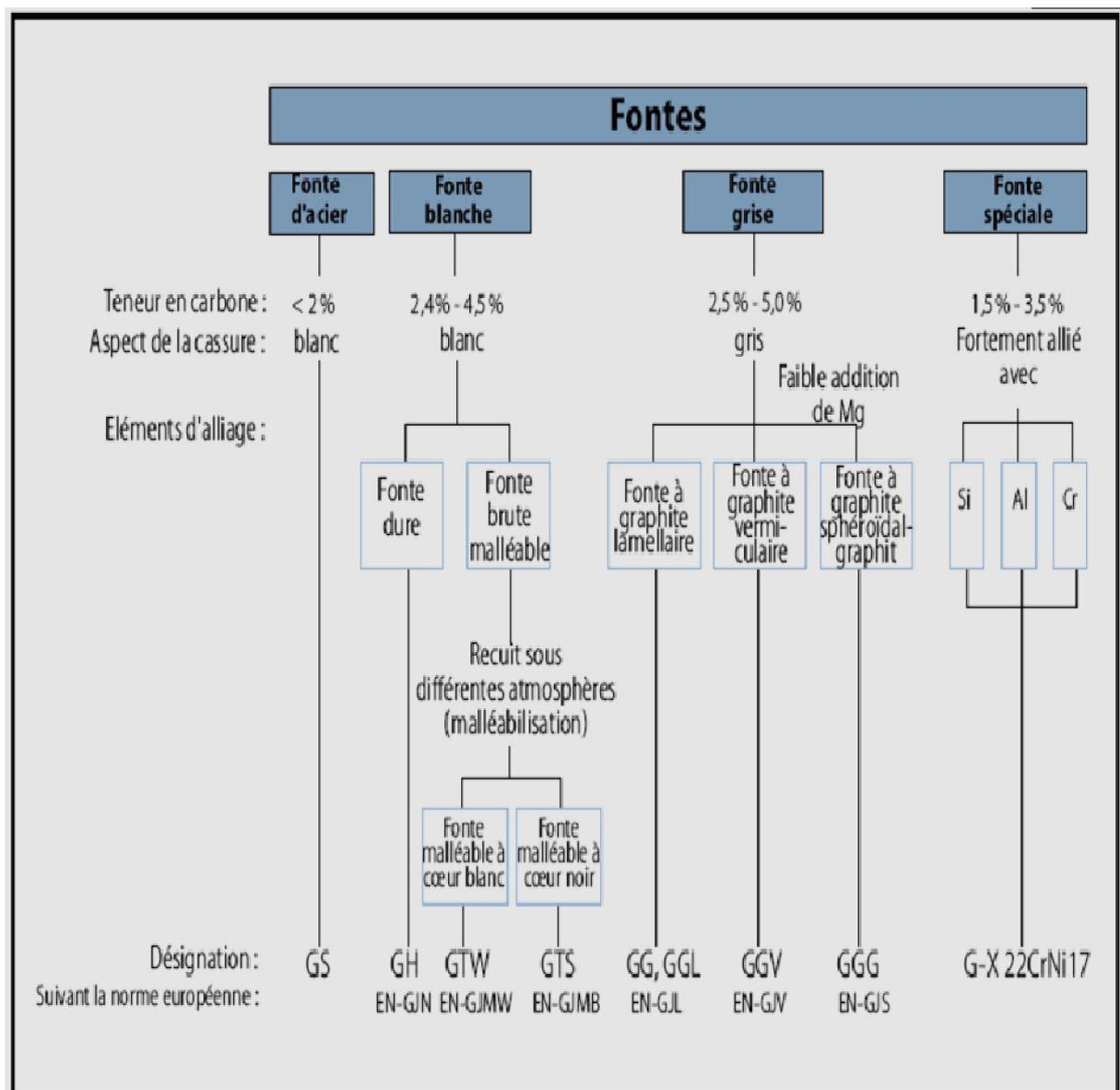
**Phosphore** : sa teneur varie en pratique de 0.05 à 1.5%. A partir d'une teneur de 0.1% environ, il forme un eutectique Fe-Fe<sub>3</sub>C-Fe<sub>3</sub>P fondant à 983C°. Cet eutectique phosphoreux ou steadite, crée des difficultés d'usinage et peut engendrer des porosités. Cependant le phosphore améliore beaucoup la fluidité et la coulabilité des fontes, tant que la composition n'est pas hypereutectique. Pour cette raison on emploie des fontes phosphoreuses de 0.7 à 1.2% de phosphore pour la fabrication des pièces à parois minces.

**Silicium** : c'est un graphitisant puissant, il déplace les points de transformation vers la gauche, ainsi pour 2% de silicium, l'eutectique se trouve à 3.7% au lieu de 4.3% de carbone, et l'eutectoïde à 0.6% de carbone au lieu de 0.8% de carbone. Il augmente également la température eutectique. Ces deux actions combinées font diminuer l'intervalle de solidification pour une teneur en carbone donné, d'où une meilleure fluidité. On en trouve généralement de 1% à 3%.

**Soufre** : c'est un élément nuisible qui diminue la coulabilité. Il stabilise les carbures et rend la fonte dure, fragile et poreuse. On combat son effet par une addition de manganèse. [20]

**I-8-2 Classification des fontes**

La figure I-32 présente la classification de différentes fontes.



**Figure I-32** Classification des fontes [19]

### 1-8-2-1 La fonte d'acier

Se trouve sous la forme d'acier moulé, qui ne sera plus usiné ultérieurement que comme procédé de fabrication. En raison de sa bonne ténacité, la fonte d'acier est utilisée dans toutes les applications impliquant des sollicitations diverses ainsi que des charges dynamiques et momentanées.

### 1-8-2-2 Fontes blanches

Leur solidification se fait suivant le diagramme fer-cémentite. De ce fait, leur structure est formée d'un réseau important de carbures et d'une matrice perlitique. Leur cassure présente un aspect métallique blanc brillant. Ces fontes ont une bonne coulabilité, légèrement inférieures aux fontes grises.

Il ne faut pas confondre fonte blanche avec les fontes trempées, il ne s'agit pas là d'une fonte martensitique. Une fonte de composition comparable à celle d'une fonte grise, coulée contre un refroidisseur peut se transformer en fonte blanche sur une certaine épaisseur. Cela permet d'allier de bonnes caractéristiques de résistance à l'usure avec une meilleure capacité de résistance aux chocs. Dans la zone de transition entre la fonte blanche et la fonte grise, existe une structure intermédiaire (fonte blanche dans laquelle sont insérées des lamelles de graphite) dite fonte truitée.

Par rapport aux aciers, les fontes blanches présentent une dureté élevée, d'où une grande résistance à l'usure par frottement et par abrasion, par contre cette dureté les rend fragiles et pratiquement in usinables par les moyens courants.

	Fonte	Fonte trempée
Ct %	2.8 à 3.6	3 à 3.6
Si%	0.5 à 1.3	0.5 à 1.6
Mn%	0.4 à 0.9	0.25 à 0.7
HB	300 à 575	350 à 575
Rm(N/mm)	140 à 350	140 à 350

### Applications courantes

**Fontes blanches :** Boulets de broyage, galets d'écrasement, pièces de pompes pour matériaux abrasifs, pièces mécaniques devant résister à l'abrasion, garniture de meules, etc...

**Fontes trempées :** Cylindres de laminoirs, roues de wagons, galets de ponts roulants, etc. [20]

### 1-8-2-3 La fonte dure

Possède une structure cassante, elle n'atteint pas les valeurs de résistance à la traction élevées comme la fonte d'acier. Dans la construction mécanique, la fonte dure pleine (solidification blanche sur toute la section) n'est utilisée que modérément et quasi exclusivement à l'état non traité. La fonte trempée revêt essentiellement une plus grande importance (refroidissement ciblé pour que la solidification blanche ne concerne que la couche superficielle) en raison de sa surface dure et résistante à l'usure pour une meilleure ténacité dans le noyau. Exemples d'application : cylindres, arbres à cames, poinçons, etc.

### 1-8-2-4 La fonte malléable

N'obtient ses propriétés caractéristiques que par un recuit (malléabilisation). Suivant le traitement thermique, l'on obtient de la fonte malléable à cœur noir ou blanc. Concernant la résistance, la fonte malléable se situe entre la fonte grise et la fonte d'acier. [19]

Il existe trois catégories de fontes malléables normalisées :

- fonte malléable à cœur blanc : NF A32-701
- fonte malléable à cœur noir : NF A32-702
- Fonte malléable perlitique : NF A32-703

L'intérêt des fontes malléables est que tout en gardant de bonnes propriétés de coulabilité des fontes, ces matériaux ont des caractéristiques mécaniques se rapprochant de l'acier. [20]

#### a) fabrication et structure

Les pièces à obtenir sont d'abord moulées en fonte blanche. Tout le carbone est donc combiné sous forme de cémentite. Cette cémentite est ensuite transformée entièrement ou du moins en grande partie en graphite par traitement thermique. Suivant le type de fonte malléable à obtenir, différentes techniques de fabrication sont utilisées en partant de compositions légèrement différentes :

##### a-1) Pour les malléables à cœur blanc

% C <sub>i</sub>	% Si	% Mn	% S	% P
2.7 à 3.2	0.6 à 0.9	0.2 à 0.5	0.08 à 0.25	0.05 à 0.15

##### a-2) Pour les malléables à cœur noir

% C <sub>i</sub>	% Si	% Mn	% S	% P
2.7 à 2.8	1 à 1.7	0.3 à 0.65	0.06 à 0.2	0.08 à 0.15

#### b) fonte malléable à cœur blanc

Elles sont aussi appelées fonte malléable européenne. Les pièces sont placées dans un four et entourées d'une atmosphère oxydante. Elles sont chauffées aux environs de 1000C° et maintenues à cette température. La superficie des pièces commence à se décarburer, puis le carbone présent à l'intérieur des pièces diffuse vers la surface où il est brûlé. Les durées du traitement peuvent atteindre 60 à 90 heures.

Dans les parties minces, la structure obtenue est entièrement ferritique et sans carbone. Dans les parties plus épaisses on peut trouver à cœur quelques nodules de graphite et de la perlite. On traite de cette manière les pièces relativement minces le plus souvent inférieures à 10mm.

**c) fontes malléables à cœur noir**

Elles sont aussi appelées fonte malléable américaine. Son traitement a évolué dans le temps et actuellement, on la traite le plus souvent de la façon suivante : chauffage vers  $930^{\circ}\text{C}$ , après un maintien, variable, refroidissement (qui peut être rapide) jusqu'à  $730$   $740^{\circ}\text{C}$ . Maintien, puis refroidissement final. On obtient donc par ce traitement une structure entièrement ferritique parsemée de nodules de graphite de forme IV répartis de façon uniforme. On traite par cette méthode des pièces dont l'épaisseur va généralement jusqu'à 50 à 60mm.

**d) Fonte malléable perlitique :** Cette nuance est obtenue à partir d'une malléable à cœur noir, selon deux méthodes différentes.

- Le début du traitement est identique à celui de la malléable à cœur noir, on le termine par un refroidissement rapide au passage de la température eutectoïde pour qu'il subsiste environ 0.8 à 1% de carbone combiné dans la matrice (ce qui formera une matrice perlitique). On utilise à cet effet le refroidissement à l'air froid soufflé ou à l'huile. On pratique ensuite un revenu à haute température de façon à globuliser la perlite pour améliorer la ductilité et l'usinabilité. Cette méthode est assez délicate car il est difficile d'éviter la formation de ferrite.

- La seconde méthode consiste à effectuer un traitement de trempe et de revenu sur une fonte malléable à cœur noir. On réchauffe les pièces à  $850$   $870^{\circ}\text{C}$  et on trempe à l'huile généralement, le revenu effectué entre  $550$  et  $720^{\circ}\text{C}$  amènera la fonte à la dureté recherchée. On obtient ainsi une structure de martensite revenue.

**1-8-2-5 Fontes grises :** Dans ces fontes, la plupart du carbone se trouve sous forme de lamelles de graphite, formées par la solidification suivant le diagramme fer-graphite. Ce graphite donne aux fontes une cassure d'aspect gris, d'où leur nom.

**A) Structure**

**1- Graphite :** dans l'espace, les particules de graphite se présentent comme des feuilles au profil plus ou moins tourmenté. Au microscope, elles apparaissent alors sous forme de bâtonnets aux extrémités effilées. Leur longueur peut atteindre le millimètre.

**2-Matrice :** comme dans les aciers, la matrice à l'état brut de coulée est composée de ferrite, perlite, ou d'un mélange des deux. On y trouve en plus des cristaux d'eutectique phosphoreux lorsque celui-ci dépasse 0.1% environ. Elle peut également contenir des carbures, lorsque la vitesse de refroidissement est importante ou lorsqu'elle contient des éléments carburigènes.

**3-Ferrite :** elle est plus dure que celle des aciers en raison de sa teneur en silicium plus élevée. La tendance à sa formation croît avec la quantité de carbone équivalent et celles des éléments graphitisants, mais elle diminue avec la vitesse de refroidissement (sauf s'il y a du graphite de type D).

**4-Perlite :** sa dureté croît avec la finesse de ses lamelles, sa qualité et sa finesse dépendent de la composition chimique de la fonte et augmentent avec la vitesse de refroidissement.



Figure I-33 Structure d'une fonte grise.

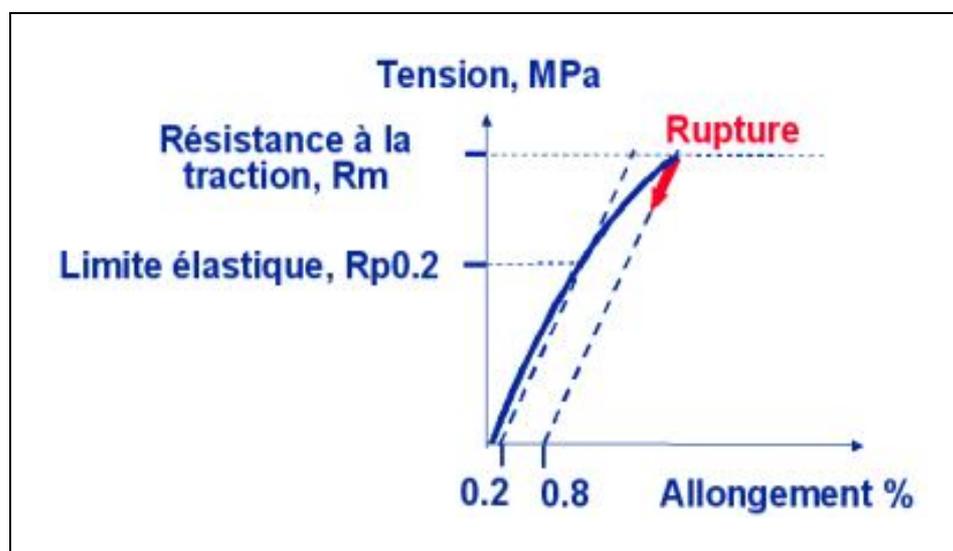


Figure I-34 Tension allongement, pour une fonte grise typique [21]

### A-1) influence du graphite

Si les lamelles de graphite n'ont que très peu d'influence sur la résistance à la compression, par contre il diminue considérablement la résistance à la traction de la matrice.

D'une part car il diminue la section efficace, d'autre part car les lamelles du fait de leur forme créent un effet d'entaille.

De ce fait lorsqu'un acier et une fonte présentent une dureté identique, la résistance à la traction de la fonte est beaucoup plus faible que celle de l'acier.

**Exemple :** XC 38 recuits HB = 180 Rm = 600 N/mm  
Fonte grise HB = 200 Rm = 200 N/mm

### A-2) influences de la structure de la matrice

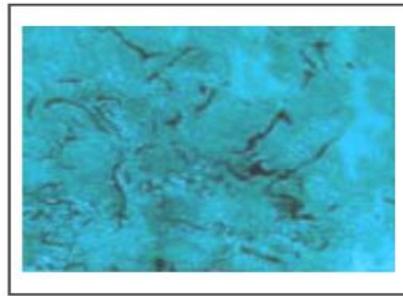
L'influence des différents constituants est identique à celle qu'ils auraient dans un acier, mis à part la dureté de la ferrite qui est plus importante que dans le cas d'un acier (effet durcissant du silicium).

### A-3) influences de l'épaisseur

Les caractéristiques mécaniques dépendent beaucoup de l'épaisseur des pièces, car celle-ci fait varier la vitesse de refroidissement qui elle-même a une grande influence sur la grosseur et la répartition du graphite ainsi que lorsque l'épaisseur des pièces diminue, la résistance et la fragilité augmentent, d'où la composition chimique de la fonte devra être adaptée aux épaisseurs des pièces pour obtenir les caractéristiques mécaniques voulues. [20]

**B) Les différents types de fonte grise** se distinguent essentiellement par la forme géométrique du graphite qu'elles contiennent.

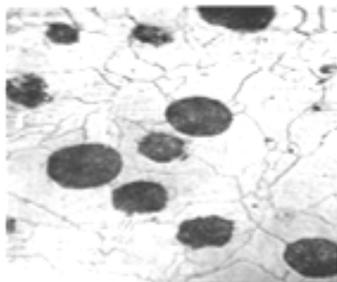
**B-1) La fonte à graphite lamellaire** (dite fonte grise ou GG) possède des propriétés d'amortissement exceptionnelles, mais n'est pas aussi résistante que la fonte blanche. Même des modifications de structure minimales engendrent d'importantes variations de la durée de vie de l'outil.



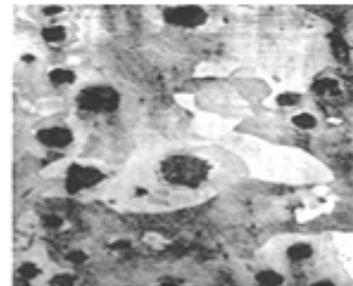
**Figure I-35** Structure de la fonte grise à graphite lamellaire.

**B-2) La fonte à graphite sphéroïdal** (dite fonte sphéroïdale ou GGG) présente une capacité d'amortissement plus faible (env. d'un facteur 2), mais est relativement bien usinable. Matière récente. [19]

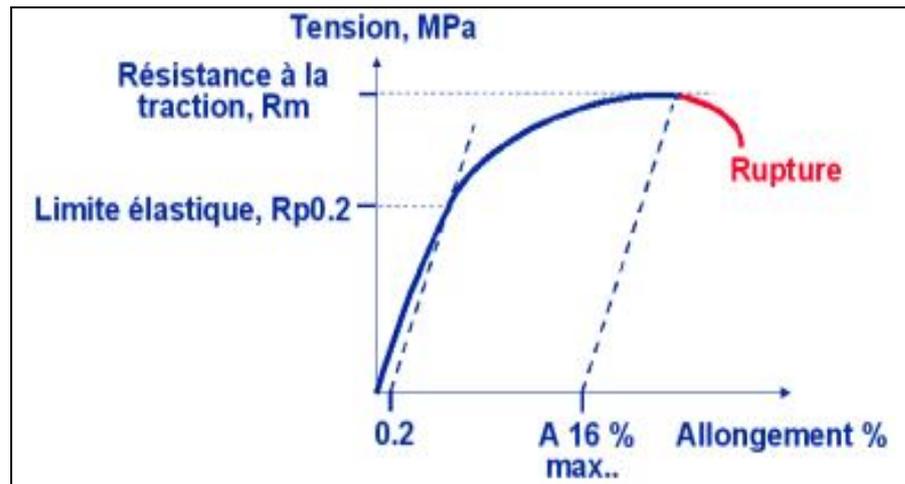
Ces fontes sont caractérisées par un graphite de solidification sphéroïdal (de forme VI) réparti de manière uniforme dans la matrice ferritique, ferrito-perlitique, perlitique (à l'état brut de coulée). Leurs différentes propriétés et caractéristiques mécaniques sont définies par la norme NF A32-201.



**Figure I-36** Sphérulites de graphite  
Dans une fonte à graphite sphéroïdal  
à matrice entièrement ferritique par  
recuit.



**figure I-37** Fonte à graphite sphéroïdal  
à matrice perlitique mais dans laquelle  
est entouré de ferrite, ce qui donne une  
structure en bull's eyes (yeux-de-bœuf)



**Figure I-38** Tension allongement pour une fonte à graphite sphéroïdal.

### B-2-1) Elaboration

La fonte de base destinée à la transformation en GS peut être élaborée dans l'un des quelconques fours généralement utilisés en fonderie. Elle peut avoir une composition chimique variable, mais une très faible teneur en soufre, généralement inférieure à 0.02%.

%C	%Si	%Mn	%S	%P
2.7 à 2.8	1 à 1.7	0.3 à 0.65	0.06 à 0.2	0.08 à 0.15

%C	%Si	%Mn	%S	%P
3.2 à 4	1.8 à 2.8	0.18 à 0.8	$\leq 0.06$	$\leq 0.02$

### Remarque

Si on coulait cette fonte sans transformation, on aurait une fonte grise, pour obtenir de la fonte GS dans cette fonte de base, on introduit un alliage contenant deux sortes d'éléments, ayant des rôles opposés immédiatement avant coulée.

Des blanchissants qui ont pour rôle d'empêcher temporairement la formation du graphite en lamelles et à donner de la fonte blanche.

Des éléments graphitisants qui provoquent la formation de sphéroïdes de graphite. Il est donc possible d'utiliser plusieurs types d'alliages mais les plus couramment utilisés sont des mélanges de Fe-Si-Mg qui sont des produits bon marché.

Si on utilise un alliage à 6% de Mg, il en faudra une quantité moyenne de 2.8% ce qui permettra d'obtenir des teneurs résiduelles de l'ordre de 0.05% de Mg.

### B-2-2) Désignation normalisée

La fonte à graphite sphéroïdal est désignée par le symbole FGS suivi de deux nombres.

- le premier représentant la valeur minimale de la résistance à la traction en N/mm
- le deuxième représente la valeur minimale de l'allongement pour cent.

### B-2-3) caractéristiques mécaniques

Par référence à la norme, la qualité des fontes GS est définie par ses caractéristiques mécaniques déterminées sur des éprouvettes usinées à partir d'un bloc échantillon coulé à part. Les formes et dimensions de ces blocs sont parfaitement définies par la norme. Le tableau ci-dessous résume ces caractéristiques :

Qualité	Caractéristiques mécaniques		Constituant Prédominant de La structure	Durté Brinell
	Rm N/mm	Re N/mm		
FGS 800-2	800	480	structure de revenu	248-352
FGS 700-2	700	420	Perlte	229-302
FGS 600-3	600	370	Perlte	192-269
FGS 500-7	500	320	Ferrit- Perlte	170-241
FGS 400-12	400	250	Ferrit	<=201
FGS 370-17	370	230	Ferrit	<=179

**Remarque :**  $1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa} = 0.102 \text{ Kgf/mm}$

L'allongement est mesuré sur une longueur initiale entre repères  $L_0=5 \times d$ . [20]

**B-3) la fonte à graphite vermiculaire :** (dite GGv) allie les propriétés positives des fontes grise et sphéroïdale. Elle se situe ainsi entre la fonte grise et la fonte sphéroïdale. La fonte GGv croît sous la forme de doigts et de branches depuis une lamelle et ne contient pas plus de 20% de billes de graphite. Elle est notamment utilisée dans la construction de moteurs diesel. Ce type de fonte pose à l'heure actuelle encore problème au niveau de son usinabilité. [19]

**1-8-2-6 Fontes alliées ou spéciales :** Lorsque l'on a besoin d'une fonte possédant des propriétés particulières, on peut faire appel à ce type de fonte, dont les éléments d'addition peuvent faire varier les propriétés physiques, chimiques ou mécaniques. Les utilisations que l'on rencontre le plus souvent dans l'industrie, font appel aux qualités suivantes :

#### 1-8-2-6-1 Fontes blanches

**a) Les fontes ni-hard :** sont des fontes à structure martensitique, dont la caractéristique principale est la résistance à l'usure, et ce jusqu'à  $700\text{C}^\circ$ .

**b) Les fontes à carbures de chrome :** en plus de leur résistance à l'usure, présentent une bonne résistance à l'oxydation jusqu'à  $900\text{C}^\circ$ .

**c) Les fontes ferritiques au chrome :** elles se caractérisent par une conservation des caractéristiques jusqu'à  $600\text{C}^\circ$ , une excellente résistance au gonflement et à l'oxydation, jusqu'à  $1000\text{C}^\circ$  et une bonne résistance à la corrosion par de nombreux acides.

### 1-8-2-6-2 Fontes grises et GS

Les qualités suivantes intéressent aussi bien les fontes grises que les fontes GS, à l'exception des fontes à 14-18% de silicium dont le graphite est lamellaire.

**a) Les fontes perlitiques améliorées :** elles permettent par une addition modérée en éléments une amélioration des caractéristiques mécaniques ou de la résistance à l'usure, aux frottements, une amélioration de la résistance aux températures inférieures à 550°C ou une augmentation de la résistance à la corrosion par des milieux moyennement agressifs.

**b) Les fontes bainitiques ou martensitiques :** elles sont obtenues à l'état brut de coulée, ces structures présentent une excellente résistance à l'usure par frottement même sous des pressions élevées, alliée à des caractéristiques mécaniques élevées et une bonne capacité d'amortissement des vibrations.

**c) Les fontes ferritiques à 5-7% de Si :** elles forment une couche de silice en surface qui empêche le développement de l'oxydation et le gonflement des particules de graphite. Les températures d'utilisation atteignent 850°C (Graphite lamellaire) ou 900°C (graphite sphéroïdal).

**d) Les fontes ferritiques à 14-18% de Si :** à graphite lamellaire, excellente résistance à la corrosion par la plupart des acides organiques et minéraux à toute concentration et par les sels très agressifs.

**e) Les fontes austénitiques :** elles forment un groupe important défini dans la norme NF A32-301. Parmi les vingt qualités définies, chacune correspond à une application particulière (Ni-Resist, Nicrosital, Nomag,...). Selon les qualités, ces fontes possèdent les propriétés suivantes :

- \* bonne résistance à la corrosion dans divers milieux.
- \* résistance aux températures élevées jusqu'à 900°C.
- \* bonne résilience à basse température jusqu'à -200°C.
- \* résistance à l'usure par frottement supérieure à celle des aciers gamma.
- \* résistivité électrique élevée.
- \* à magnétisme.
- \* coefficient de dilatation adaptable suivant la quantité d'éléments d'addition. [20]

### 1-8-3 Usinabilité des fontes

Les propriétés d'usinabilité des fontes sont fortement influencées par la quantité et la formation du graphite intégré. Les inclusions de graphite dans la fonte réduisent d'une part le frottement entre l'outil et la matière et d'autre part, interrompent la structure métallique de base. Il en résulte, comparativement à l'acier, une meilleure usinabilité, caractérisée par des copeaux courts, une réduction des efforts de coupe et une augmentation de la durée de vie des outils.

Lors de l'usinage de fonte dure (fonte blanche), l'arête de coupe est fortement sollicitée en raison du pourcentage élevé de cémentite dans la structure de la matière. Pour atteindre une durée de vie économique, la vitesse de coupe devrait être réduite et la dureté de la matière augmentée. Une diminution de la profondeur de passe réduit à cet égard la charge sur les tranchants de l'outil.

L'utilisation d'outil céramique de coupe permet, comparé aux carbures, de faire passer le facteur de la vitesse de coupe de 3 à 4.

En raison de la bonne déformabilité plastique des nuances de fonte malléable, des copeaux continus indésirés se forment lors de l'usinage. Le graphite de recuit et le sulfure de manganèse intégré dans la structure de base entraînent toutefois une amélioration du bris de copeaux et donc des propriétés d'usinage. En raison de sa structure diverse.

L'usinabilité de la fonte malléable à cœur blanc est, suivant l'épaisseur de paroi, plus difficile pour les pièces épaisses en raison du pourcentage élevé de perlite que pour les pièces minces (la couche carbonée atteint en général une épaisseur de 7 mm). C'est la raison pour laquelle la fonte malléable à cœur blanc est essentiellement utilisée pour les pièces minces. Pour la fonte malléable à cœur noir, contrairement à celle à cœur blanc, une structure uniforme en ferrite avec graphite de recuit intégré est présente sur l'ensemble de la section de la pièce en fonte. La fonte malléable à cœur noir est ainsi généralement plus facilement usinable que celle à cœur blanc. Elle est de préférence utilisée pour les pièces épaisses, qui devront être usinées à sec ultérieurement.

Pour la fonte à graphite lamellaire, la structure de base similaire à l'acier constituée de lamelles de graphite est coupée, ce qui engendre la formation de copeaux cisailés ou fragmentés pendant l'usinage. Cela occasionne toujours des copeaux courts (généralement copeaux en poussière). Une usure frontale extrême des faces de dépouille est ainsi évitée. En outre, l'on peut constater une diminution des efforts de coupe. Lors de l'usinage, les arêtes de la pièce peuvent présenter des éclats.

La qualité d'état de surface obtenue dépend du procédé de fabrication, des conditions de coupe ainsi que de la finesse et de l'uniformité de la structure de la fonte grise. En cas d'altération de la structure lamellaire (p. ex. lamelles en forme de rosettes– « B-graphite »), la durée de vie peut varier jusqu'à un facteur 10 à vitesses de coupe élevées et dans les mêmes conditions.

Dans la fonte à graphite sphéroïdal (GGG), le graphite se présente sous la forme d'inclusions globulaires. La structure de base des nuances présentant une résistance moindre et une bonne ténacité (p. ex. fonte GGG 40 illustrée) est essentiellement composée de ferrite d'excellente usinabilité. Il se forme des copeaux en vrille, qui sont toutefois légèrement cassants en raison des inclusions de graphite. Lors de l'usinage à des vitesses de coupe plus élevées, l'usure des faces de dépouille est problématique. Les copeaux présentent alors une caractéristique de cassure tenace et

tendent, particulièrement lors de la coupe à sec, à former des copeaux apparents, c.-à-d. plastifié de la matière entre les faces de dépouille et la pièce.

Dans le cas de la fonte vermiculaire (GGV), le graphite vermiculaire est ramifié comme un corail. Il peut ainsi offrir pour l'usinage des services aussi bons que le graphite lamellaire. La fonte GGV présente, pour des vitesses de coupe faibles, d'importants avantages par rapport à la fonte GGG et se différencie peu, par sa caractéristique d'usinage, de la fonte GG pour une dureté identique. Ainsi, l'usinabilité de la fonte GGV perlitique pour une vitesse de coupe de  $V_c=300$  m/min, ressemble à celle de la fonte GG-25. A des vitesses de coupe supérieures à 300 m/min, une usure des faces de dépouille accrue se manifeste sur l'arête de coupe, qui est due à l'effet abrasif des inclusions de graphite.

La zone extérieure des pièces coulées (peau de fonderie) présente, en raison des inclusions non métalliques, d'une structure modifiée et/ou d'un calaminage, une usinabilité pire que celle de la zone centrale. En conséquence, si les paramètres de coupe ne sont pas réduits, l'usure abrasive s'intensifie et des entailles d'usure se forment sur les tranchants de l'outil.

Le tableau résume les valeurs de coupe types à atteindre en fonction du type de fonte à usiner.

Matière	Procédé	Outil/ matière de coupe	Avance par dent $f_z$ [mm/Z]	Vitesse de coupe $v_c$ [m/min]
GG/GGG	Fraisage	Surfaçage/carbure rev.	0,25	500 ... 1.000
		Surfaçage/CBN	0,15	1.500 ... 2.000
	Perçage	10 mm/carbure monobloc	0,15 ... 0,20	100 ... 150
	Alésage/tour- nage de finition	Outil à aléser/carbure	0,10 ... 0,15	200 ... 400
GGV	Valeurs de coupe légèrement supérieures à celles de la fonte GG/GGG			

**Tableau 1-16** Vitesses de coupe types réalisables pour fontes

S'exprimer sur l'usinabilité des fontes en association avec les indications de dureté Brinell (HB) est relativement incertain. Cette indication ne permet de tirer aucune conclusion sur la dureté d'abrasion de la fonte, qui a une influence particulièrement négative sur l'usinabilité en raison des inclusions de sable et de carbure libre. Ainsi, une fonte présentant une dureté Brinell de 180 HB et un nombre de carbure libre possède des propriétés d'usinage nettement plus difficiles qu'un type de fonte de même dureté, mais avec une structure 100% perlitique et sans carbure libre.[19]

# **Chapitre II**

## **Procédure Expérimentale**

## II-1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences. Un banc d'essais comportant un tour, une plate forme pour l'acquisition des efforts de coupe, un rugosimètre pour déterminer la rugosité de la pièce usinée et un microscope pour la mesure en de l'usure en dépouille VB.

Les expériences sont effectuées au laboratoire de coupe des métaux du département de Génie Mécanique à l'Université de 08 Mai 1945.

## II-2 Matériels utilisés

### II-2-1 Machine-outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque «TOS TRENCIN», modèle **SN 40C** de puissance sur la broche égale à 6.6KW (figure II-1). Les fréquences de rotation disponibles sur la machine sont comme suit (45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400; 2000) tr/min.

-Les avances disponibles 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.



**Figure II-1** Tour parallèle modèle SN40C.

## II-2-2 Le matériau utilisé pour les essais d'usinage

C'est un Fonte grise (structure graphitique) de nuance *ISO est Ft25*.

C'est le type de fonte le plus généralement utilisé. Ses principaux avantages d'utilisation sont excellente coulabilité et usinabilité, bonne résistance à l'usure, grande capacité d'amortissement des vibrations.

Pour nos essais, ils sont réalisés sur des éprouvettes de diamètre =100mm et de longueur L= 400mm (figure II-2).



**Figure II-2** Eprouvette utilisée pour les essais.

La composition chimique de la fonte **Ft 25** est représentée dans le tableau II-1. La structure de la Ft25 est représentée sur la figure II-3.

élément	Pourcentage (%)
Carbone	2.8
Silicium	1.2
Manganèse	1
Phosphore	0.4
soufre	0.03

**Tableau II-1** Composition chimique de la fonte *Ft 25*.



**Figure II-3** Structure de la fonte grise Ft25.

### II-2-3 Plaquettes de coupe

Les plaquettes utilisées sont amovibles de forme carrée, à fixation par trou central, est par bride. Toutes les informations qui concernent les plaquettes de coupe sont regroupées dans le Tableau (II-2).

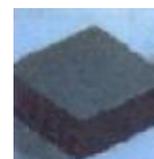
Matériaux de coupe	Désignation	Marque	Géométrie	Composition Chimique	Rayon du bec $r_\epsilon$
Céramique revêtue	GC1690	Sandivik coromant	SNGA 12-04-08	Céramique en $\text{Si}_3\text{N}_4$ revêtue (CVD)	0.8mm
Céramique non revêtu	CC6090	Sandivik coromant	SNGA 12-04-08	Céramique pure à base $\text{Si}_3\text{N}_4$	0.8mm
Céramique blanche	CC620	Sandivik coromant	SNG 12-04-08	Céramique pure $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$	0.8mm
Céramique noire	CC650	Sandivik coromant	SNGA 120408 T 010 20	Céramique mixte $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Tic}$	0.8mm
Carbure revêtu	GC4005	Sandivik coromant	SNMG 12-04-08-MF	Carbure de (W) revêtue (CVD)	0.8mm
Carbure non revêtu	H13A	Sandivik coromant	SNMG 12-04-08-QF	Carbure de tungstène	0.8mm

**Tableau II-2** Plaquettes de coupe utilisées.

-**Céramique revêtue GC1690 (CC)-K10 (K01-K20)**: Nuance céramique de nitrure de silicium revêtue par CVD. GC1690 est hautement recommandée pour les opérations d'ébauche légère, de semi-finition et de finition dans les fontes.



- **céramique non revêtu CC6090 (CN)- K10 (K01-K20)**: Nuance de céramique pure à base de nitrure de silicium. Bonne résistance à l'usure à température élevée. Recommandée pour l'ébauche et la finition grande vitesse des fontes en conditions favorables. Supporte quelques coupes intermittentes.



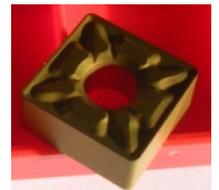
- **Céramique blanche CC620 (CA) – K01 (K01- K05)** : Céramique pure à base  $AL_2O_3$ , recommandée pour la finition grande vitesse des fontes grises en conditions stables et à sec.



-**Céramique noir CC650 (CM) –K01- (K01-K05)** : Céramique mixte  $Al_2O_3+Tic$ , recommandée pour la finition sous vitesse élevées des fontes grises et des fontes trempées en conditions stables.



-**Carbure revêtu GC 4005K15 (K10-K25)** : Nuance carbure à revêtement CVD pour l'ébauche à la finition à des vitesses de coupe faibles à moyennes dans les fontes grises et nodulaires. Substrat gradient d'une dureté et d'une ténacité optimisée avec revêtement résistant à l'usure. Très bonne sécurité d'arête à sec comme sous arrosage.



-**Carbure non revêtu H13A (HW)- K20 (K10- K25)** : Nuance carbure non revêtu, à bonne ténacité et résistance à l'usure par abrasion. Bon choix pour vitesses faibles à modérées et avances élevées dans les fontes.



#### II-2-4 Porte outil :

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé deux portes outils dont la désignation est indiquée au tableau (II-3).

**Tableau II-3** Portes outils utilisés

Désignation	marque	$\chi$	$\gamma$	$\lambda$
CSBNR25x25M12	TIZIT SIMPLEX	75°	-6°	-6°
PSBNR25x25M12	Sandivik	75°	-6°	-6°



**Figure II-4** Portes-outils utilisés

## II-2-5 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

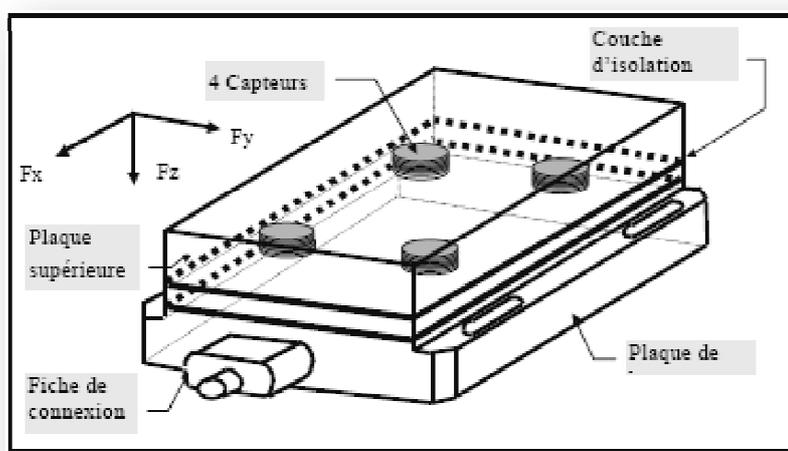
Pour mesurer l'amplitude des efforts de coup, nous avons utilisé un dynamomètre (KISTLER 9257B), qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composants de l'effort de coupe. Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on en cite : la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel et enfin un traceur ou une imprimante pour tracer les courbes.

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté 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 (figure II-5).

Les forces agissantes sur plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux.

Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes :

- Force axiale :  $F_x$ .
- Force radiale :  $F_y$ .
- Force tangentielle :  $F_z$



**Figure II-5** Capteur d'effort de coupe KISLER.

## II-2-6 Chaîne de mesure et caractéristiques

Dynamomètre à 3 composantes (9257B) : la porte outil type 9403 vissable est employée pour des outils de tournage avec une section maximum de 26x26.

- grande rigidité, fréquence propre très élevée.
- large gamme de mesure.
- bonne linéarité, sans hystérésis.
- faible interaction (<1%).
- utilisation simple (prêt à l'emploi).
- construction compacte.
- résistant au lubrifiant selon mode de protection IP67.
- câble spécial à haute isolation de la connexion entre le dynamomètre et l'amplificateur.
- Amplificateur multi canaux, destiné à la mesure des efforts de coup.
- ordinateur personnel PC).
- Traceur.

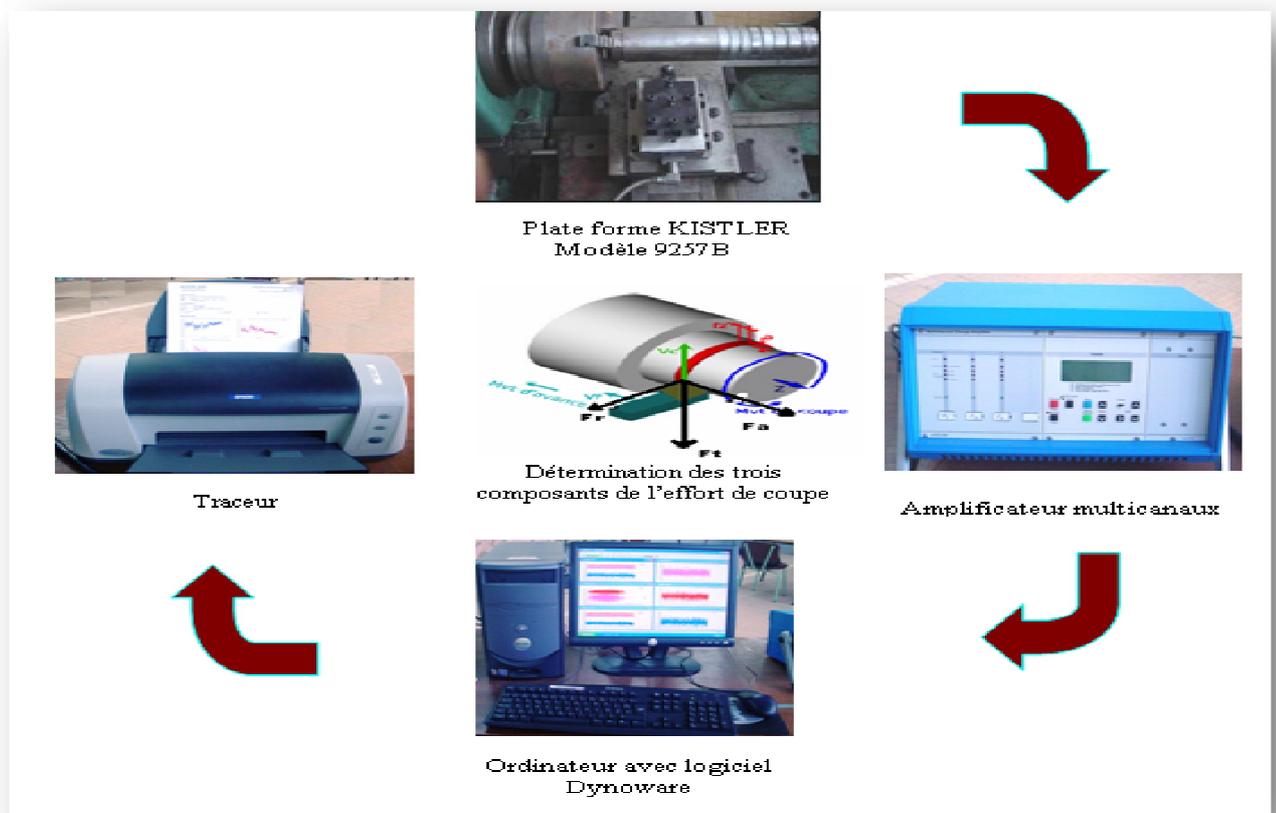


Figure II-6 chaîne de mesure des efforts de coupe.

### II-2-7 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Pour la mesure des différents critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_z$ ) nous avons utilisé un rugosimètre SJ 201 (Mitutoyo), (figure II-7). ce dernier est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de  $5\mu\text{m}$  se déplacement linéairement sur la surface mesurée.

Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce.



**Figure II-7** Rugosimètre SJ 201 (Mitutoyo).

### II-2-8 Microscope pour la mesure de l'usure

La mesure de l'usure a été faite par un microscope optique HUND type W-AD équipé d'une caméra CCD (figure II-8). Ce dernier sert à mesurer les grandeurs de l'usure sur la surface en dépouille principale et la surface en dépouille auxiliaire, ainsi que la majorité des paramètres du cratère et cela suivant la norme *NF E 66-505*. La plaquette de coupe est placée sous l'objectif du microscope sur une table micrométrique à mouvements croisés et à affichage digital, avec une précision de  $0,001\mu\text{m}$ . La ligne de référence de mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'oculaire du microscope puis, on déplace la plaquette de coupe à l'aide des jauges micrométriques jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure.

Sur le cadran digital on fait une lecture directe qui donnera la valeur de l'usure VB. Après chaque séquence de travail la plaquette de coupe est démontée du porte-outil, puis nettoyée et enfin placée sur la table du microscope pour mesurer les différentes grandeurs de l'usure. Les essais d'usure réalisés sont de longue durée [Norme ISO 36 85] et cela pour évaluer la durée de vie des plaquettes utilisées à différentes vitesses de coupe. Ils sont effectués jusqu'à une valeur d'usure VB dépassant légèrement l'usure admissible  $[VB] = 0,3 \text{ mm}$ .



**Figure II-8** Microscope pour la mesure de l'usure.

### II-2-9 Autres équipements

- un pied à coulisse pour mesurer le diamètre de la pièce.
- un appareil photo numérique pour prendre les photos des différents équipements utilisés.

### II-3- Conditions de coupe

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer l'élément du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ), la géométrie de la partie active de l'outil ( $\alpha$ ,  $\chi$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$ ), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine ...).

Les conditions de coupe utilisées pour les différents essais sont indiquées dans les tableaux (II-4 et II-5) tous les essais ont été réalisés sans lubrification.

<i>Les paramètres constants</i>	<i>valeurs</i>	<i>Les paramètres Variables</i>	<i>valeurs</i>
$V_c$ (m/min)	600	$f$ (m/tr)	0.08 ; 0.16 ; 0.24
$a_p$ (mm)	0.4		
$V_c$ (m/min)	600	$a_p$ (mm)	0.4 ; 0.8 ; 1.2
$f$ (m/tr)	0.08		
$a_p$ (mm)	0.4	$V_c$ (m/min)	300 ; 400; 600
$f$ (m/tr)	0.08		

**Tableau (II-4)** condition de coupe pour les essais d'effort de coupe et la rugosité (essais de courte durée).

<i>Les paramètres constants</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Les paramètres variables</i>	<i>Valeurs</i>
$f$ (mm/tr)	0.08	$V_c$ (m/min)	300
$a_p$ (mm)	0.5		600

**Tableau II-5** Conditions de coupe pour les essais d'usure, effort de coupe et de la rugosité en fonction du temps (essais longue durée).

### II-4 planification des expériences

Les paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ), ainsi que la géométrie de la partie active de l'outil ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$ ,  $\chi$ ,  $\varepsilon_r$ ), sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, la durée de vie de l'outil, la rugosité,... représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences.

### II-4-1 Méthode de planification des expériences

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation du procédé de coupe.

La stratégie de recherche expérimentale consiste à déterminer tout d'abord le nombre d'essais nécessaires. Le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (fonction entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs.

Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base ( $V_c, f, a_p$ ) sur les diverses fonctions d'optimisation (Rugosité, Efforts de coupe, durée de vue). Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante:

$$N = q^k \dots\dots\dots$$

(II-1)

Où:

- N: nombre d'essais ;
- q: nombre de niveaux de variations des facteurs de base ;
- k: nombre de facteurs de base.

Dans notre cas, nous avons trois facteurs de base ( $k=3$ ) et chaque facteur a trois niveaux de variation (un niveau supérieur (+1), niveau moyenne (0) et un niveau inférieur (-1)).

Nous avons alors:  $N=3^3 =27$ .

Les essais ont été numérotés de 1 à 27. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe.

Niveau de facteurs	Valeur naturelle des facteurs		
	Vc (m/min)	f (m/tr)	ap (mm)
N° des essais	Valeurs codifiées des facteurs		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	+1
4	-1	0	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	0
7	-1	+1	+1
8	-1	+1	0
9	-1	+1	-1
10	0	-1	0
11	0	-1	+1
12	0	-1	0
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	+1
16	0	+1	0
17	0	+1	-1
18	0	+1	0
19	+1	-1	+1
20	+1	-1	0
21	+1	-1	-1
22	+1	0	0
23	+1	0	+1
24	+1	0	0
25	+1	+1	-1
26	+1	+1	0
27	+1	+1	+1

Tableau II-6 Matrice de planification pour en plan 3<sup>3</sup>

## II-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**

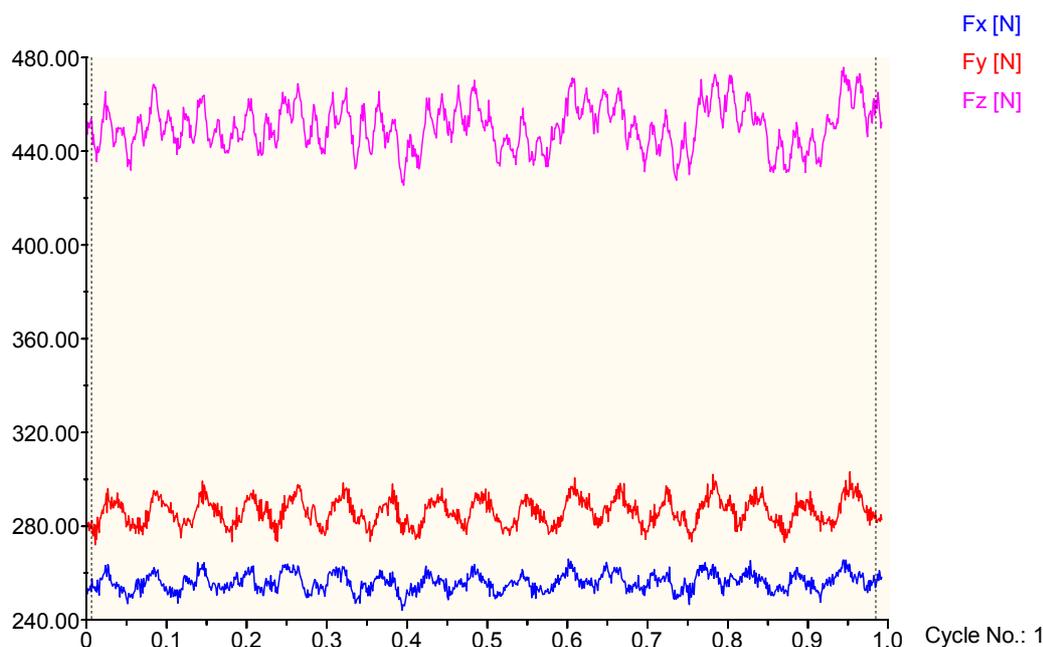
## **Etude des performances des différents matériaux de coupe**

### III-1 Introduction

Ce chapitre porte sur l'évolution des différents phénomènes de coupes étudiées tels que les efforts, les pressions de coupe, la rugosité de surface et l'usure en fonction des paramètres du régime de coupe et du temps d'usinage pour les différentes nuances de plaquettes utilisées. Les résultats expérimentaux obtenus à partir des mesures effectuées par les équipements exposés au chapitre II seront présentés et nous ferons une analyse complète pour comprendre le comportement des outils de coupe lors de l'usinage de la fonte grise Ft25.

### III-2 Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe

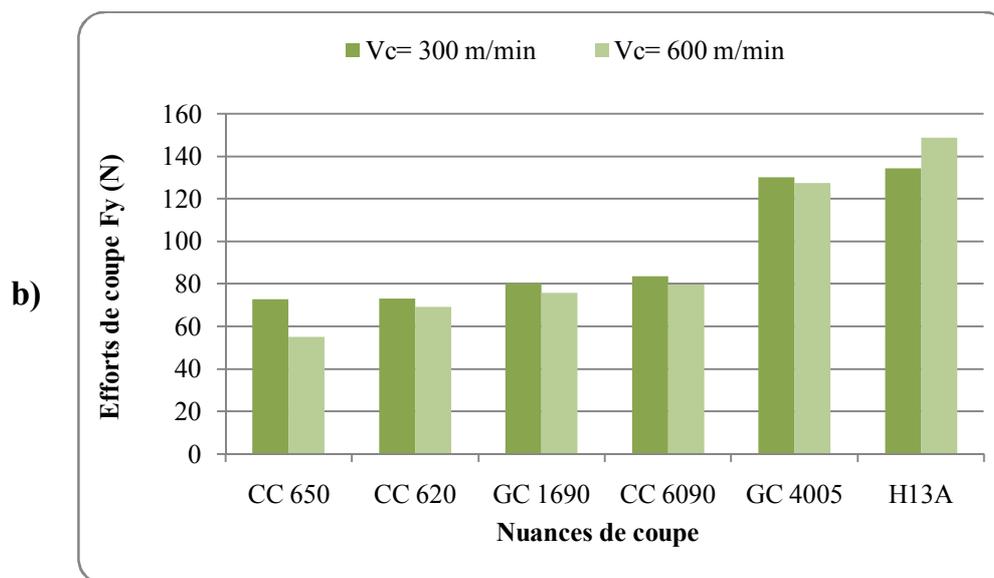
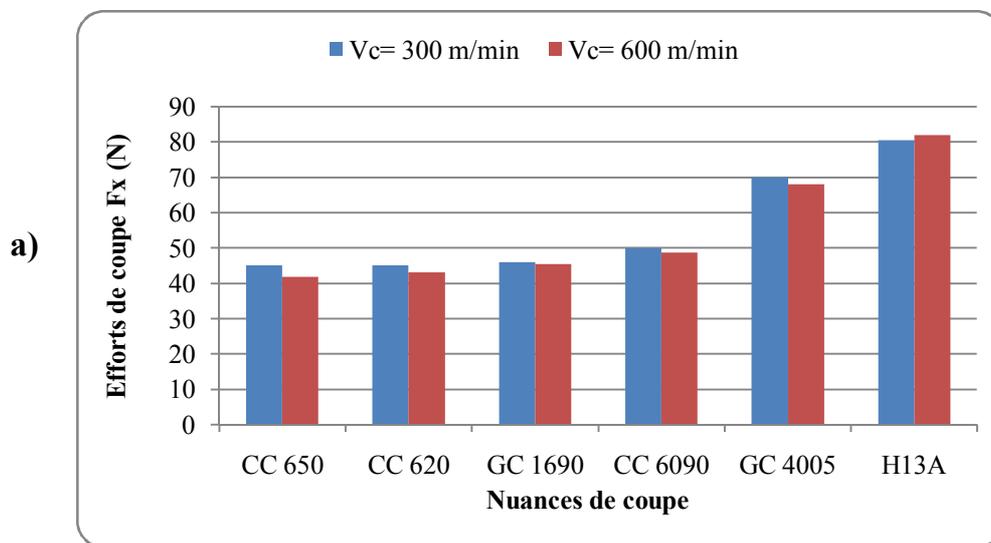
La figure III-1 présente un exemple d'acquisition des efforts de coupe par la plateforme Kistler. Ces résultats correspondent aux profils des trois composantes des efforts enregistrés (effort axial, effort radial et effort tangentiel).

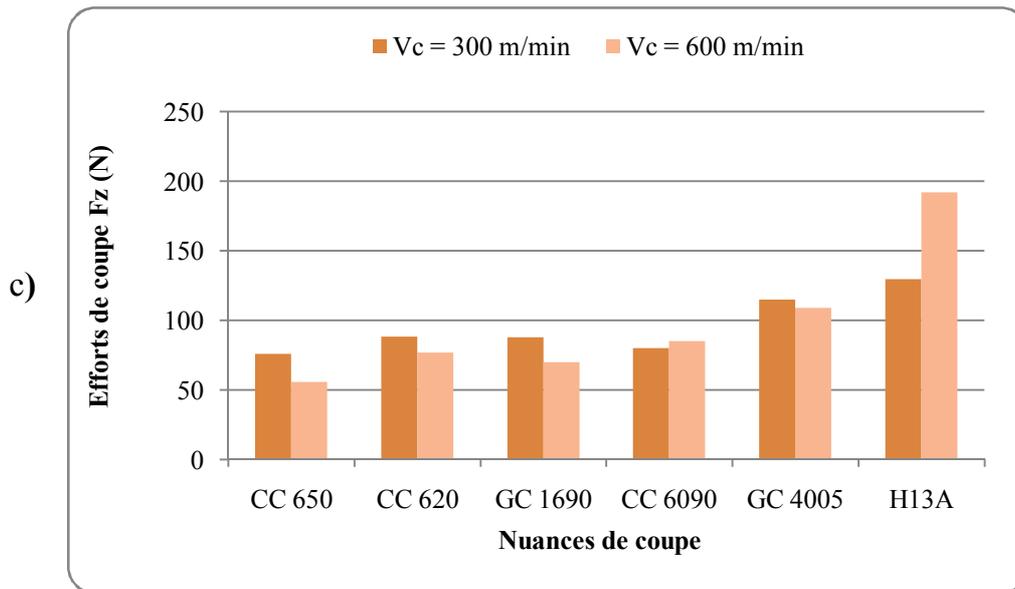


**Figure III-1** Exemple d'acquisition des efforts de coupe.

Les figure III-2 (a, b et c) montrent l'évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour les six matériaux de coupe testés. Cette évolution est presque la même pour toutes les nuances. On a remarqué une diminution des efforts de coupe, cela est dû à l'augmentation de la température dans la zone de coupe qui rend le matériau plus plastique et par conséquent les efforts nécessaires à la coupe diminuent.

Pour la nuance H13A (carbure non revêtu), on a remarqué un changement de l'allure vers l'augmentation à cause de l'usure en dépouille accéléré de ce matériau. Du point de vue effort de coupe, cette nuance n'est pas adaptée pour usiner ca fonte aux vitesses de coupe supérieures à 300 m/min. Généralement les six nuances donnent des valeurs des efforts très voisines avec une légère différence qui varie d'un matériau à un autre à cause du matériau de coupe lui-même, du type de revêtement et de la géométrie du brise-copeau.





**Figure III-2** Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour différents matériaux testés à  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.5\text{mm}$ .

### III-3 Evolution des pressions de coupe en fonction 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,

$$K_c = F_z / (f \times a_p). \quad (\text{III-1})$$

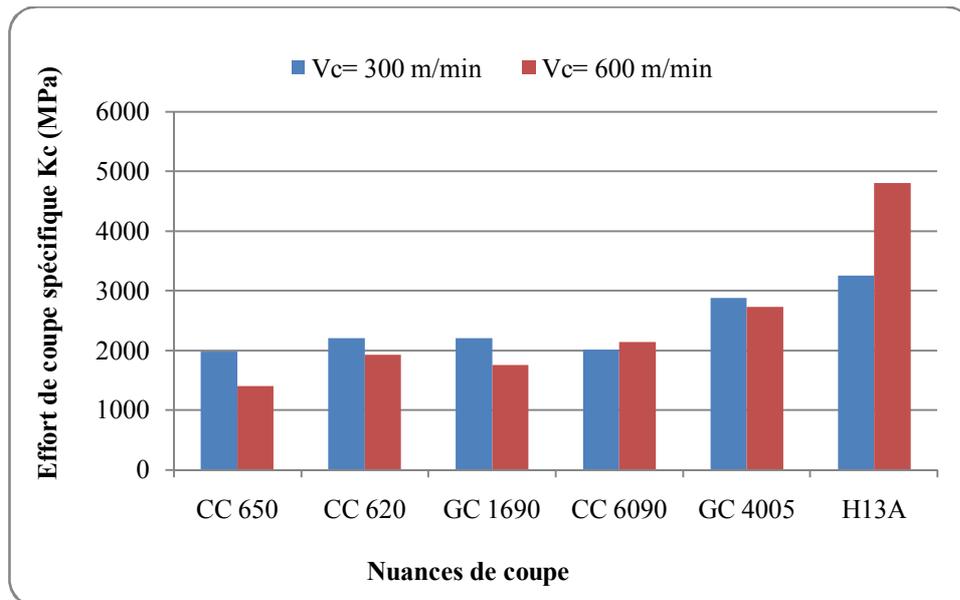
**Kc:** Pression de coupe [MPa].

**Fz :** Effort tangentiel [N].

**f :** Avance [mm/tr].

**ap:** Profondeur de passe [mm].

La figure III-3 présente une décroissance des pressions de coupe en fonction de la vitesse de coupe. On peut remarquer sur cette figure que les pressions de coupe diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Cette réduction peut s'expliquer par les hautes températures générées pendant la coupe, à l'interface pièce-outil-copeau, qui à leur tour entraînent un adoucissement plastique important du matériau usiné et ainsi une diminution des efforts de coupe et de la pression spécifique. Pour la nuance H13A (carbure non revêtu), on a remarqué un changement brusque de l'allure vers l'augmentation à cause de l'usure accéléré de ce matériau.



**Figure III-3** Evolution des pressions de coupe en fonction de la vitesse pour différents matériaux testés à  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.5\text{mm}$ .

#### III-4 Evolution de l'effort résultant en fonction de la vitesse de coupe

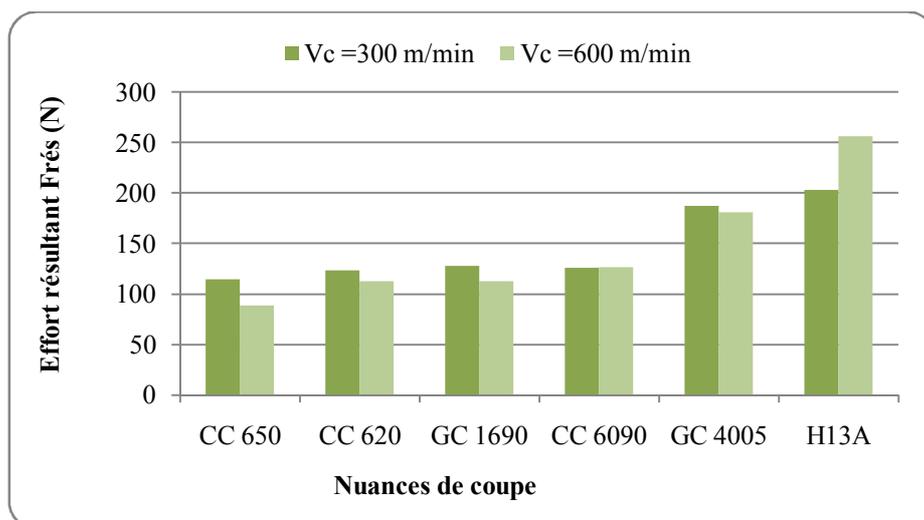
Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage.

La résultante de coupe  $F_{rés}$ , peu utilisée en pratique, est la somme de 3 composantes :

$$F_{rés} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

III-2

En analysant l'allure de l'effort de coupe résultant (Figure III- 4), on constate que ce dernier diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Une élévation de la vitesse de coupe de 300 à 600m/min, conduit à une diminution de l'effort résultant de 22.48% pour la céramique mixte CC650 de 8.89% pour la céramique blanche CC620 de 11.69% pour la céramique revêtu GC1690 et pour le carbure revêtu GC4005 on a remarqué une diminution de effort résultant de 3.41%. Pour le carbure non revêtu H13A, on a enregistré un taux d'élévation pour l'effort résultant ( $F_{rés}$ ) de 46.81 %. Cette augmentation résulte de l'usure de ce matériau. Pour la céramique non revêtu CC6090 on a remarqué une légère élévation de effort résultant de 0.33%.



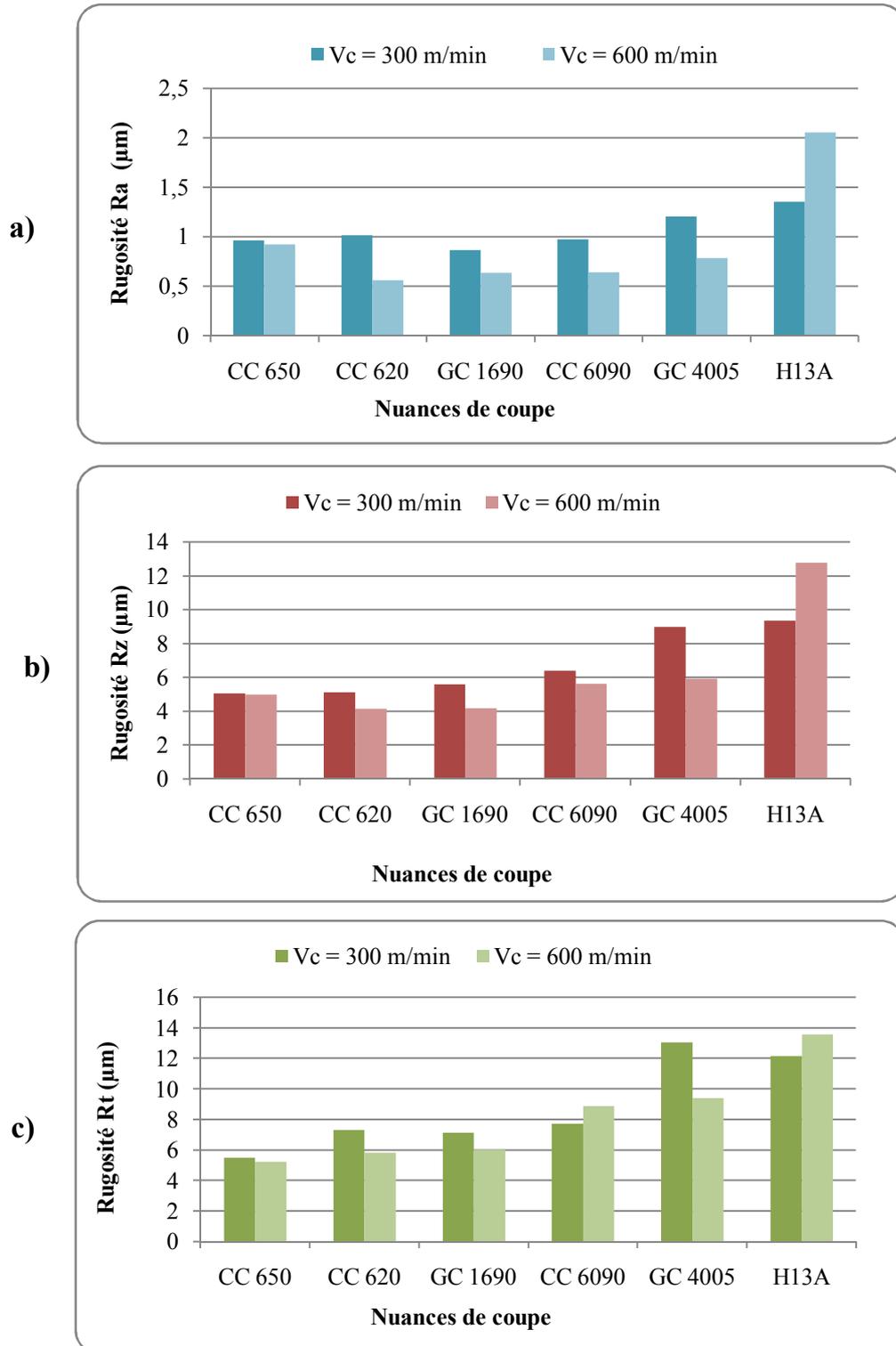
**Figure III- 4** Evolution de l'effort de coupe résultant en fonction de la vitesse de coupe à  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.5\text{mm}$

### III-5 Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe

La caractérisation de la qualité de surface usinée a été limitée aux critères de rugosité totale ( $R_t$ ), moyenne arithmétique ( $R_a$ ) et moyenne des hauteurs des irrégularités ( $R_z$ ).

Les figures III-5 (a, b et c), montrent l'évolution des critères de rugosité  $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_z$  en fonction de la vitesse de coupe. On constate que l'état de surface s'améliore quand la vitesse de coupe croît. Cette amélioration est due aux bonnes conditions de frottement aux interfaces pièce- outil- copeau. Une élévation de la vitesse de coupe de 300 à 600m/min, conduit à une diminution de la rugosité  $R_a$  de 4.1%, pour la céramique mixte CC650, de 44.55% pour la céramique blanche CC620, de 26.74% pour la céramique revêtu GC1690 et pour la céramique non revêtu CC6090 de 34.02%. Pour le carbure revêtu GC4005 on a remarqué une diminution de  $R_a$  de 35%. Pour le carbure non revêtu H13A, on a enregistré un taux d'élévation de 34.14 %. Cette augmentation résulte de l'usure de ce matériau. Pour la rugosité  $R_t$  on enregistre une diminution de 5.25% pour la céramique mixte CC650, de 19.94% pour la céramique blanche CC620, de 18.54% pour la céramique revêtu GC1690 et pour le carbure revêtu GC4005 de 27.96%. Pour la céramique non revêtu CC6090 et le carbure non revêtu H13A, on a enregistré une augmentation de 12.96 % et 10.52%. Pour la rugosité  $R_z$  on a enregistré une diminution de la rugosité  $R_z$  de 1.38% pour la céramique mixte CC650, de 19.01% pour la céramique blanche CC620, de 25.35%

pour la céramique revêtu GC1690 et pour la céramique non revêtu CC6090 de 12.48%. Pour le carbure revêtu GC4005 on a remarqué une diminution de Ra de 34.07%. Pour le carbure non revêtu H13A, on a enregistré un taux d'élévation de 26.89 %.



**Figure III-5** Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse pour différents matériaux testés à  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.5\text{mm}$ .

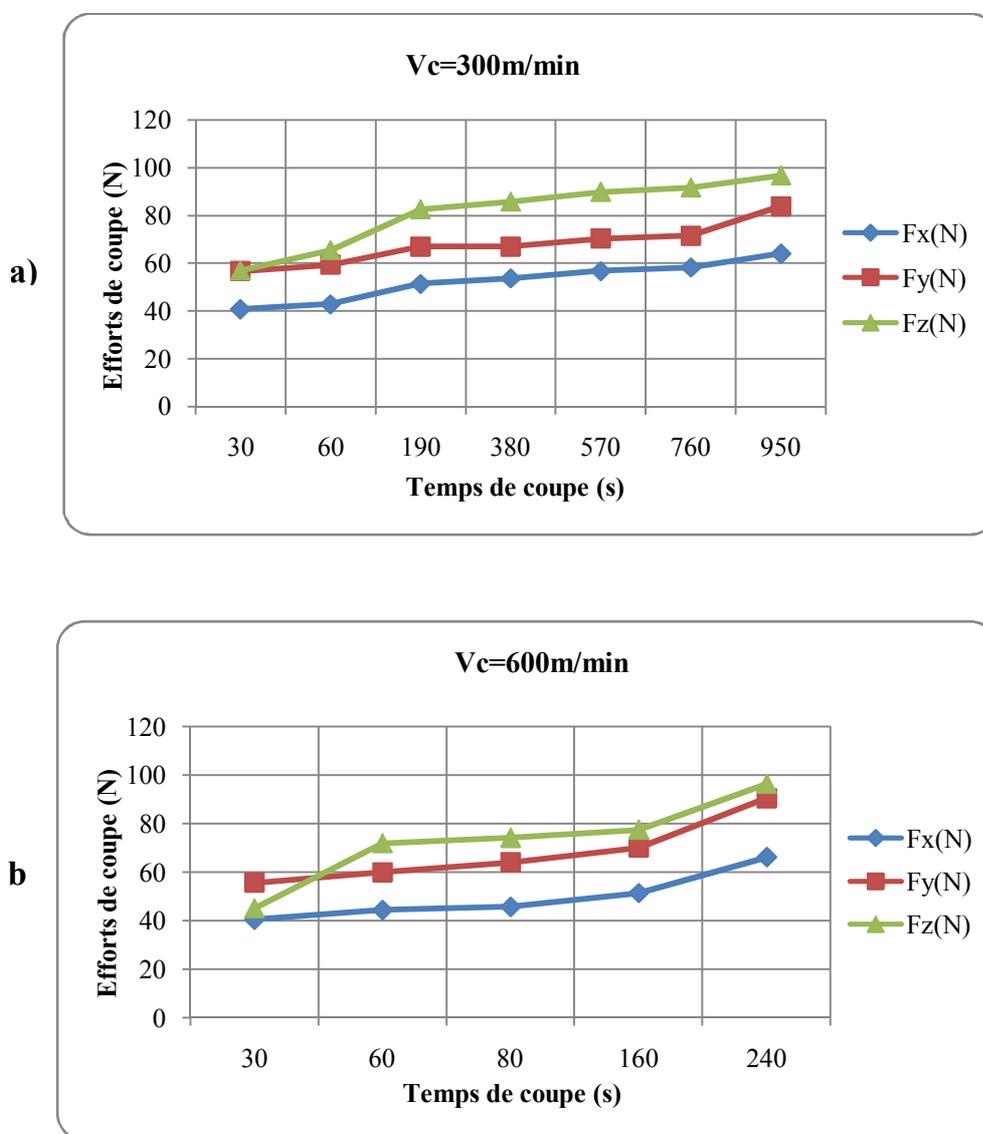
### III-6 Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage

Dans cette partie, nous exposons les résultats de l'évolution des trois composantes de l'effort de coupe en fonction du temps d'usinage, et cela pour deux vitesses de coupe

$V_c = 300$  et  $600 \text{ m/min}$ .

#### III-6-1 Céramique mixte CC650

Les figures III-6 (a et b) montrent l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage pour la céramique mixte CC650 à la vitesse de coupe  $V_c = 300$  et  $600 \text{ m/min}$  avec une profondeur de passe  $a_p = 0.5 \text{ mm}$  et une avance de  $0.08 \text{ mm/tr}$ .



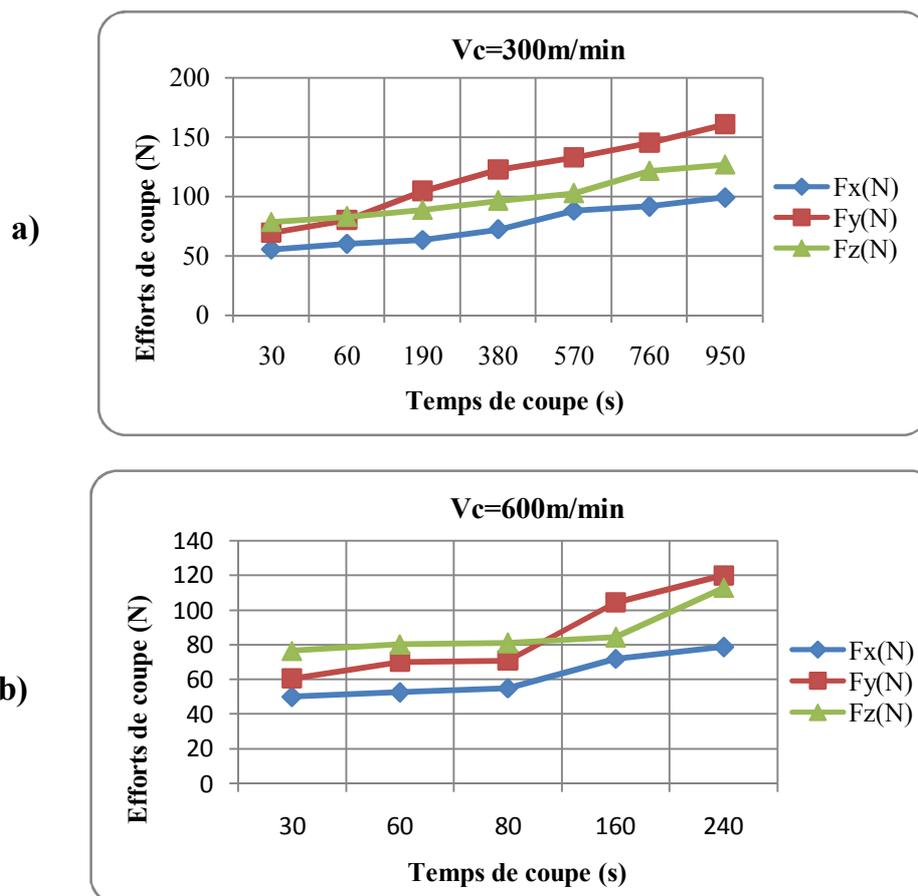
**Figure III-6** Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage pour l'outil CC650,  $f = 0.08 \text{ mm/tr}$ ,  $a_p = 0.5 \text{ mm}$ ,  $V_c = 300 \text{ m/min}$  et  $V_c = 600 \text{ m/min}$ .

Il ressort des résultats de la figure III-6 que pour les conditions de coupe testées, l'effort principal est l'effort tangentiel. Il est à signaler que le temps d'usinage a un effet énorme sur la variation des efforts de coupe. Les courbes représentatives des efforts de coupe ( $F_x$  ;  $F_y$  et  $F_z$ ) de la (figure III-6 (a)) sont relatives au chariotage effectué par une plaquette de céramique mixte CC650 a la vitesse de coupe 300 m/min. Pour un temps d'usinage ( $t= 30$  secondes), les valeurs des efforts de coupe ( $F_x$  ;  $F_z$  et  $F_y$ ) sont respectivement de (40.89 ; 56.76 et 57.07) N. A la fin de l'usinage (pour un temps de 950 secondes), les valeurs des efforts de coupe ( $F_x$  ;  $F_y$  ;  $F_z$ ) sont successivement (64.1 ; 83.89 ; 96.74) N, cela correspond à une augmentation de (36.2% pour  $F_x$  ; 32.33% pour  $F_y$  et 38.37% pour  $F_z$ ). A la vitesse de 600 m/min (figure III-6 (b)) avec un temps d'usinage ( $t = 30$  secondes), les valeurs des efforts de coupe ( $F_x$  ;  $F_y$  ;  $F_z$ ) sont respectivement de (40.59 ; 55.66 ; 45.17) N. A la fin de l'usinage (pour un temps de 240 secondes), les valeurs d'efforts de coupe sont (66.2 ; 90.51 ; 96.52), Ce qui correspond à une augmentation de (38.68% pour  $F_x$  ; 38.5% pour  $F_y$  et 53.2% pour  $F_z$ ).

### III-6-2 Céramique blanche CC620

Pour les essais réalisés par la céramique blanche CC620 (figure III-7 (a)), les valeurs des efforts de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) atteignent (55.54; 69.43 et 78.74) N pour  $V_c=300$  m/min,  $f=0.08$ mm/tr,  $a_p=0.5$ mm et  $t= 30$  secondes. Après 950 secondes d'usinage les valeurs d'efforts de coupe ( $F_x$  ;  $F_y$  ;  $F_z$ ) sont (99.43 ; 160.9 ; 127.08) N, cela correspond à une augmentation de (44.14% pour  $F_x$  ; 56.84% pour  $F_y$  et 38.03% pour  $F_z$ ).

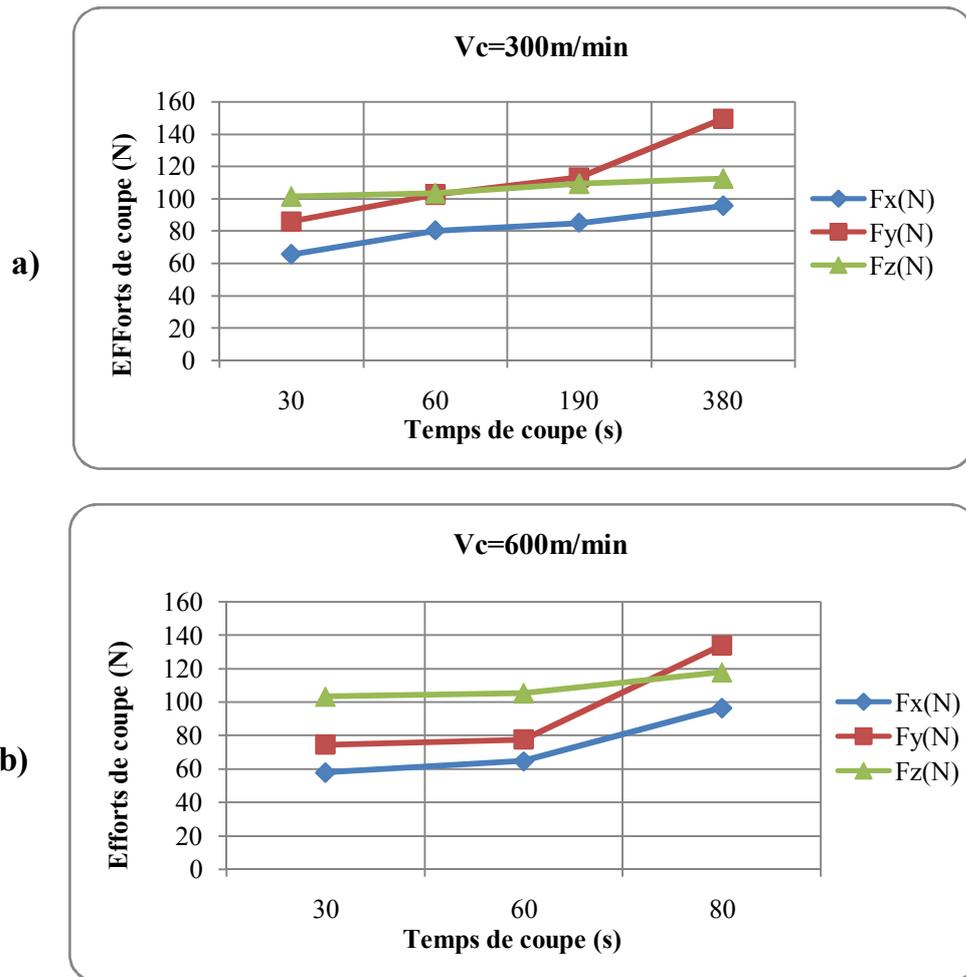
Pour la vitesse 600m/min (figure III-7(b)), on a remarqué une diminution des efforts de coupe, cela est dû à l'augmentation de la température dans la zone de coupe qui rend le matériau plus plastique. Les valeurs des efforts de coupe sont (50.2 ; 60.58 ; 76.6) N pour un temps d'usinage 30 secondes. Après 240 secondes d'usinage les valeurs d'efforts de coupe ( $F_x$  ;  $F_y$  ;  $F_z$ ) sont (78.81 ; 120.06 ; 112.74) N, Ce qui correspond à une augmentation de (36.30% pour  $F_x$  ; 49.54% pour  $F_y$  et 32.05% pour  $F_z$ ).



**Figure III-7** Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage pour l'outil CC620  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$ ,  $V_c = 300$  et  $600\text{m/min}$ .

### III-6-3 Céramique revêtu GC1690

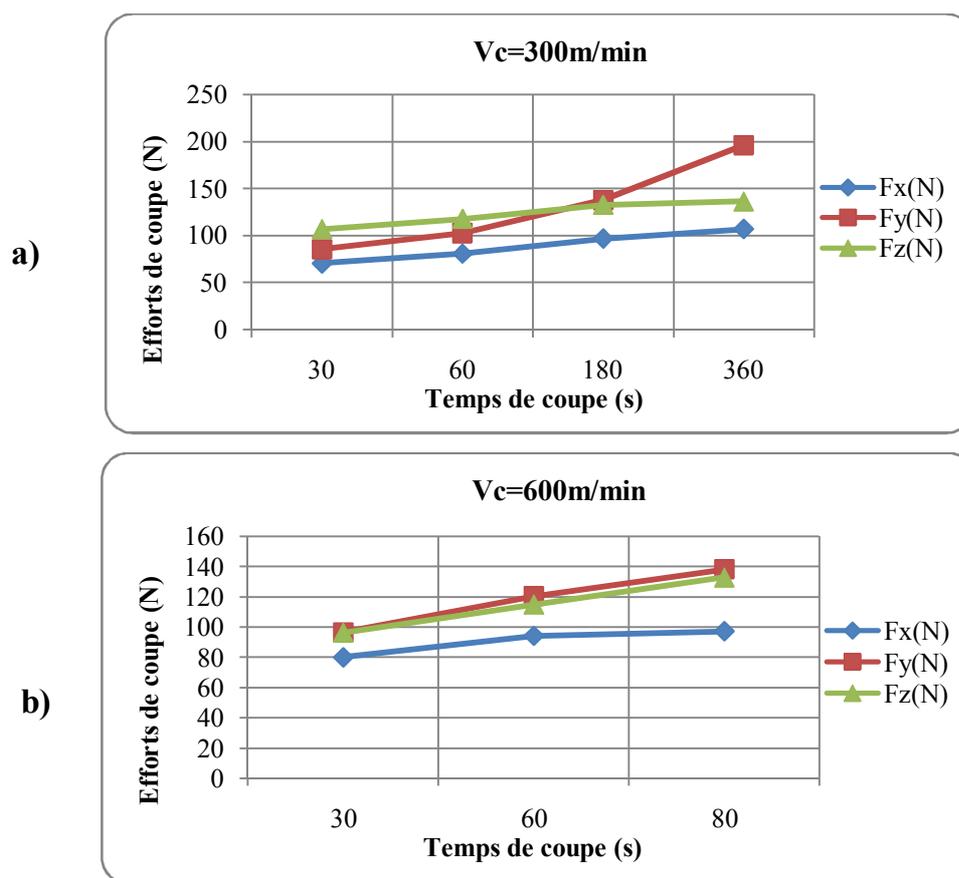
La figure III-8 (a et b) montre l'influence du temps d'usinage sur les composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) lors de l'usinage réalisé par la céramique revêtu GC1690 avec deux vitesses testées  $300\text{ m/min}$  et  $600\text{ m/min}$ . L'augmentation du temps d'usinage de  $30$  secondes à  $380$  secondes induit une augmentation respective des efforts de coupe de  $(65.61 ; 85.91 ; 101.49)\text{ N}$  à  $(95.68 ; 149.54 ; 125.38)\text{ N}$  à la vitesse de coupe de  $300\text{ m/min}$  (figure III-8(a)), cela correspond à une augmentation de  $(31.42\%$  pour  $F_x$  ;  $42.55\%$  pour  $F_y$  et  $19.05\%$  pour  $F_z$ ). Pour la vitesse  $600\text{m/min}$  (figure III-8(b)), avec un temps d'usinage ( $t = 30$  secondes), les valeurs des efforts de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) sont respectivement de  $(57.97 ; 74.61 ; 103.42)\text{ N}$ . A la fin de l'usinage ( $t= 80$  secondes), les valeurs d'efforts de coupe sont  $(96.5 ; 133.83 ; 117.85)\text{ N}$ , ce qui correspond à une augmentation de  $(39.92\%$  pour  $F_x$  ;  $44.25\%$  pour  $F_y$  et  $12.24\%$  pour  $F_z$ ).



**Figure III-8** Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage pour l'outil GC1690,  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$ ,  $V_c=300$  et  $600\text{m/min}$

#### III-6-4 Céramique non revêtu CC6090

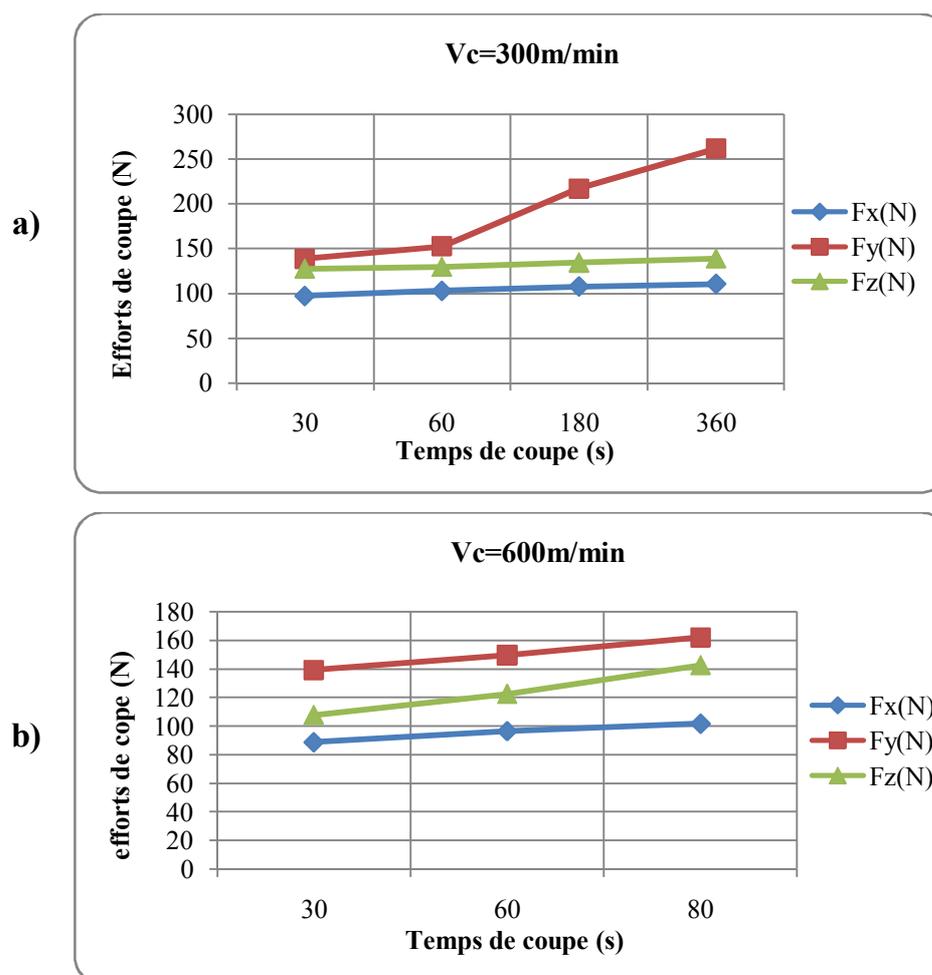
Les résultats de l'influence du temps d'usinage sur les efforts de coupe dans les mêmes conditions pour la céramique CC6090 sont représentés sur la figure III-9 (a et b). Pour un temps de usinage (de  $t=30$  à  $t=380$ ) secondes et la vitesse de coupe de  $300\text{m/min}$  (figure III-9(a)), les efforts de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) varient respectivement de (70.66 ; 85.78 et 106.93) N à (107.18 ; 196.18 ; 136.66) N, cela correspond à une augmentation de (34.07% pour  $F_x$  ; 56.27% pour  $F_y$  et 21.75% pour  $F_z$ ). Pour un temps de usinage (de  $t=30$  à  $t=80$ ) secondes avec une vitesse de coupe  $600\text{m/min}$  (figure III-9(b)), les efforts de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) varient respectivement de (80.01 ; 96.45 ; 96.27) N à (97.11 ; 137.94 ; 132.76) N. Ce qui correspond à une augmentation de (17.6% pour  $F_x$  ; 30.07% pour  $F_y$  et 27.48% pour  $F_z$ ).



**Figure III-9** Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage pour l'outil CC6090,  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$  et  $V_c=300$  et  $600\text{m/min}$ .

### III-6-5 Carbure métallique revêtu GC 4005

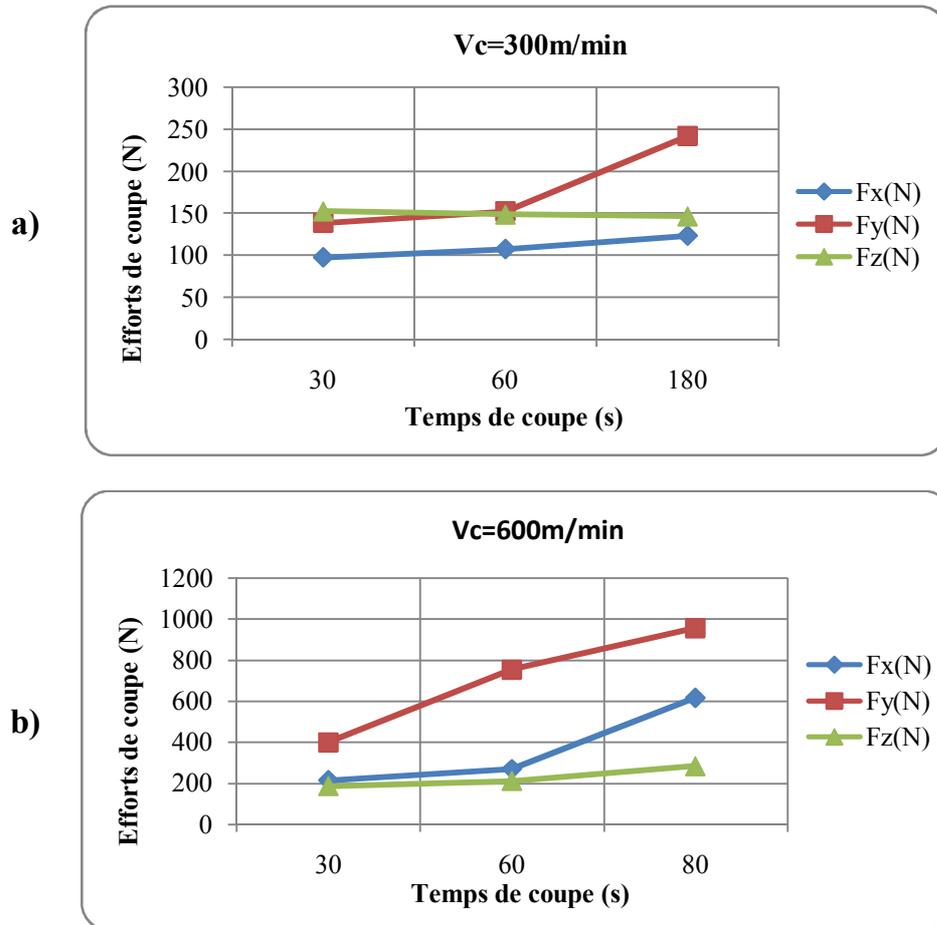
Les résultats de l'évolution de l'effort de coupe en fonction du temps d'usinage de la nuance GC4005 (figure III-10 (a et b)) montrent que les valeurs des efforts de coupe s'accroissent avec le temps à cause de l'usure. Les efforts sont de l'ordre de (97.35 ; 138.7 ; 127.56) N pour  $V_c=300\text{m/min}$  (figure III-10 (a));  $f = 0.08 \text{ mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$  et ( $t=30\text{min}$ ). A la fin de l'usinage, les efforts de coupe sont respectivement (110.47 ; 261.29 ; 138.85) N à ( $t=380$  secondes), cela correspond à une augmentation de (11.87% pour Fx ; 46.91% pour Fy et 8.13% pour Fz). Pour la vitesse  $600\text{m/min}$  (figure III-10 (b)), les composantes de l'effort de coupe (Fx, Fy et Fz) s'accroissent successivement de (88.76 ; 139.33 ; 107.79) a ( $t= 30$  secondes). A la fin de l'usinage, les efforts de coupe sont respectivement (101.78 ; 161.86 et 142.51) N à ( $t=80$  secondes), Ce qui correspond à une augmentation de (12.79% pour Fx ; 13.91% pour Fy et 24.36% pour Fz).



**Figure III-10** Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage pour l'outil GC4005,  $f = 0.08$  mm/tr ;  $a_p = 0.5$  mm,  $V_c = 300$  et  $600$  m/min

### III-6-6 Carbure métallique H13A

La figure III-11 (a et b) montre l'influence du temps d'usinage sur les composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) pour l'usinage réalisé par le carbure non revêtu H13A. Pour un temps d'usinage ( $t = 30$  secondes) (figure III-11 (a)), les valeurs des efforts de coupe ( $F_x$  ;  $F_y$  et  $F_z$ ) sont respectivement de (97.5 ; 138.7 et 152.59) N. A la fin de l'usinage (pour un  $t =$  de 190 secondes et  $V_c = 300$  m/min), les valeurs des efforts de coupe sont successivement (123.29 ; 241.85 ; 146.48) N. A la vitesse de 600 m/min (figure III-11 (b)), avec un temps d'usinage ( $t = 30$  secondes), les valeurs des efforts de coupe ( $F_x$  ;  $F_y$  ;  $F_z$ ) sont respectivement de (215.3 ; 400.56 ; 186.2) N. pour un temps de 80 secondes, les valeurs des efforts de coupe ( $F_x$  ;  $F_y$  ;  $F_z$ ) sont respectivement de (616.91 ; 956.7 ; 284.12) N.



**Figure III-11** Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage pour l'outil carbure H13A,  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$  ;  $V_c=300$  et  $600\text{m/min}$

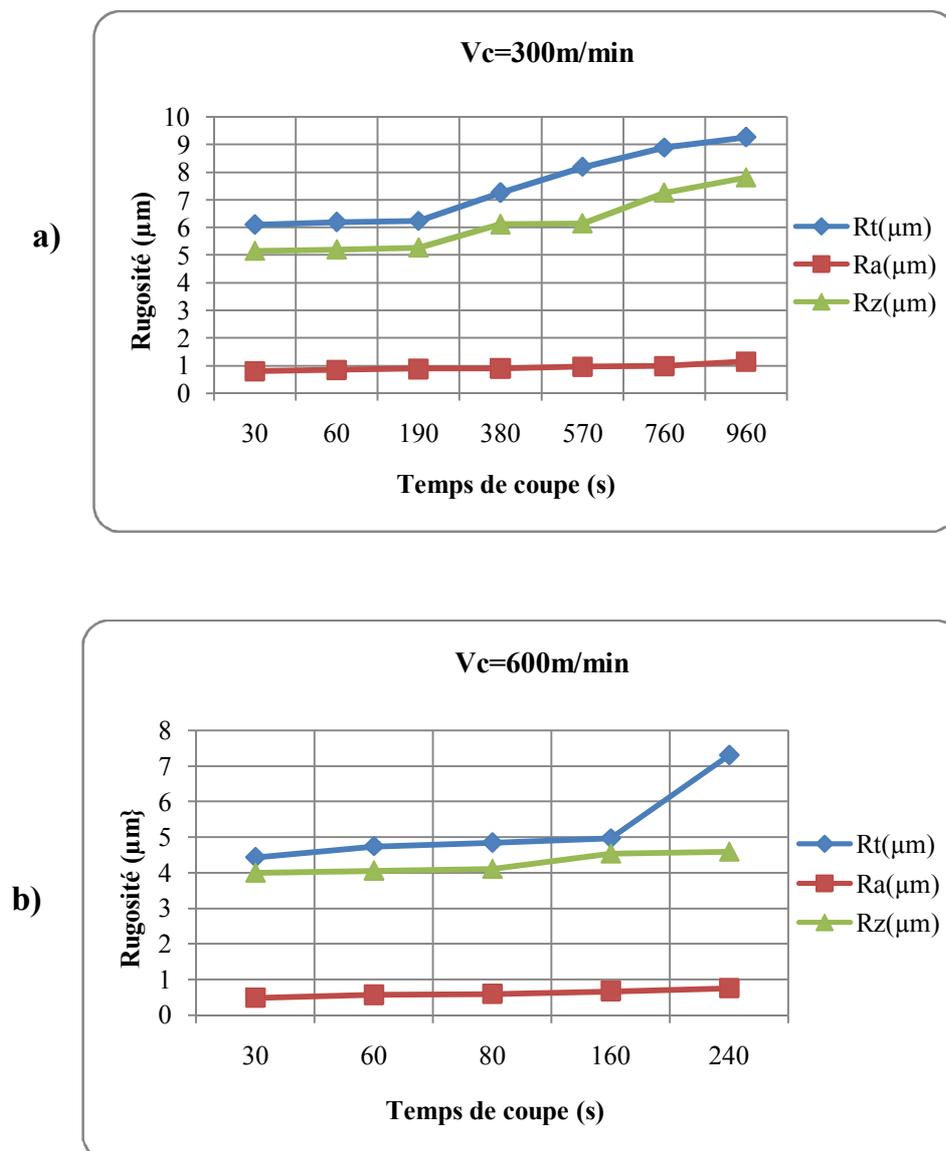
### III-7 Evolution des rugosités en fonction du temps d'usinage

Les figures III-12 à 17 illustrent l'évolution des trois critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_z$ ) en fonction du temps d'usinage pour les outils suivants: CC650, CC620, GC1690, CC6090, GC4005 et H13A à  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$ ,  $V_c=300$  et  $600\text{m/min}$ . On remarque que toutes les courbes prennent une allure ascendante ce qui signifie que le temps d'usinage a un effet important sur la rugosité.

#### III-7-1 Céramique mixte CC650

Les courbes des trois critères de rugosité ( $R_t$ ,  $R_a$  et  $R_z$ ) en fonction du temps d'usinage à  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$  et  $V_c=300\text{m/min}$  pour la céramique mixte CC650 sont exposées dans la figure III-12 (a). Pour un temps d'usinage variant de 30 à 950 secondes, les critères de rugosité passent de (6.1 ; 0.8 ; et 5.12)  $\mu\text{m}$  à (9.26 ; 1.14 et 7.81)  $\mu\text{m}$ . Cela représente une évolution des trois critères ( $R_t$  ;  $R_a$  ;  $R_z$ ) de (34.12% ; 29.82% ; 34.44%) respectivement.

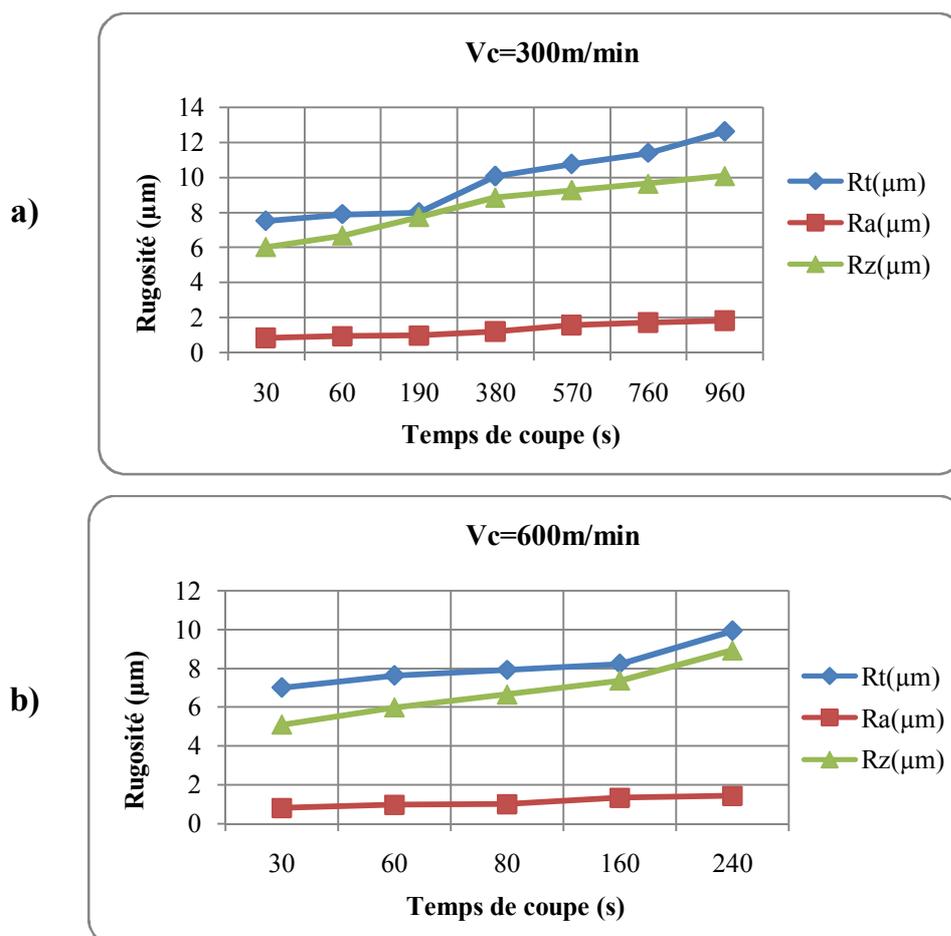
La figure III-12 (b) montre l'effet du temps d'usinage sur les critères de rugosité pour la céramique *mixte* CC650 pour la vitesse de coupe 600m/min. Il s'avère que pour l'opération de chariotage après 30 secondes d'usinage, les critères de rugosité ( $R_t$ ,  $R_a$  et  $R_z$ ) prennent directement les valeurs de (4.44; 0.5 et 4.01)  $\mu\text{m}$ . A la fin de l'usinage les critères de rugosité ( $R_t$ ,  $R_a$  et  $R_z$ ) sont respectivement (4.97 ; 0.68 ; 4.55)  $\mu\text{m}$  pour un temps d'usinage de 240 secondes. Cela représente une augmentation de (10.66% ; 26.47% ; 11.86%).



**Figure III-12** Evolution des rugosités en fonction du temps d'usinage à  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$  ;  $V_c = 300$  et  $600\text{m/min}$  pour l'outil céramique CC650.

### III-7-2 Céramique blanche CC620

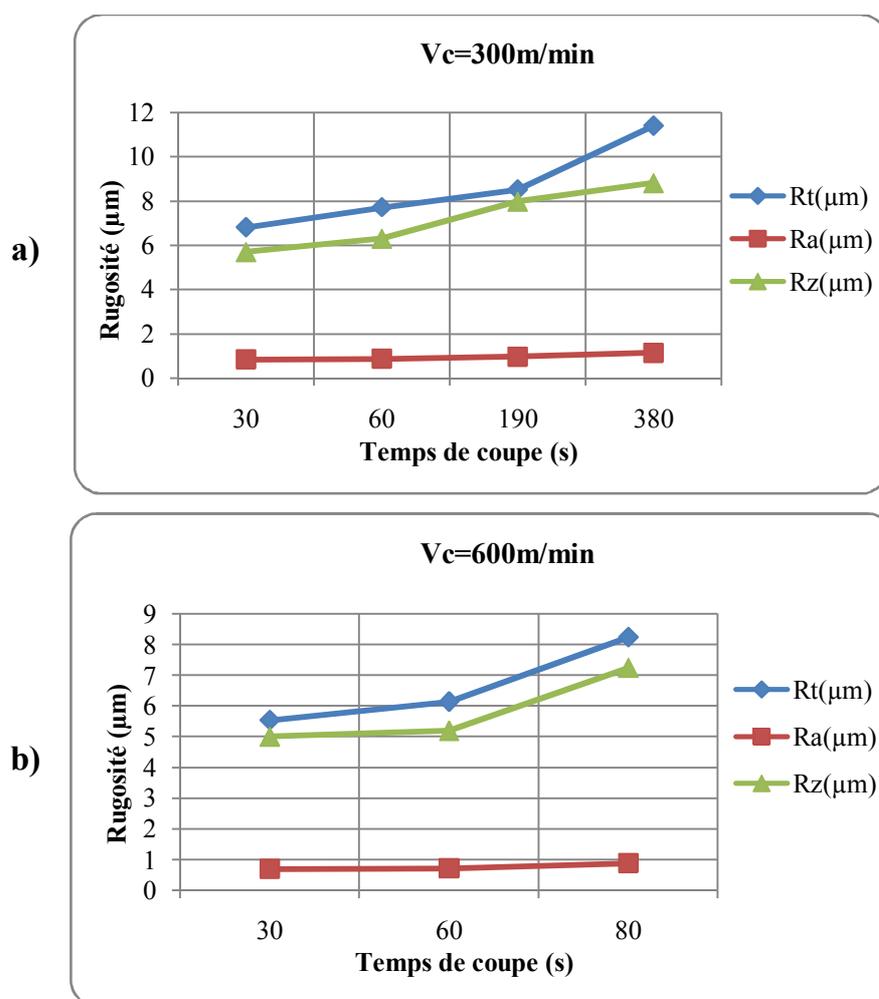
Les résultats des rugosités enregistrées lors du chariotage par la céramique blanche CC620 dans les mêmes conditions de coupe que la céramique CC650 sont illustrés dans la figure III-13 (a et b). Pour un temps d'usinage de 30 secondes et la vitesse de coupe 300 m/min figure III-13 (a), les trois critères de rugosité ( $R_t$ ,  $R_a$  et  $R_z$ ) prennent directement les valeurs de (7.52; 0.91 et 6.03)  $\mu\text{m}$ . après 950 secondes d'usinage, les critères de rugosité ( $R_t$ ;  $R_a$  et  $R_z$ ) augmentent et prennent les valeurs successivement de (12.62 ; 1.84 et 10.09) $\mu\text{m}$ . Cela représente une évolution des trois critères de (40.41% ; 50.54% ; 40.23%). Alors que pour la figure III-13 (b), ( $V_c=600$  m/min), les valeurs des critères de rugosité ( $R_t$ ,  $R_a$  et  $R_z$ ) sont successivement (7.01; 0.89 et 5.74)  $\mu\text{m}$  à un temps d'usinage de 30 secondes. Pour un temps d'usinage de 240 secondes les critères de rugosité ( $R_t$ ;  $R_a$  et  $R_z$ ) prennent les valeurs de (8.31, 1.43 et 7.93)  $\mu\text{m}$ , Cela représente une évolution de (15.64%, 37.76%, 27.61%).



**Figure III-13** Evolution des rugosités en fonction du temps d'usinage à  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$  ;  $V_c=300$  et  $600\text{m/min}$  pour l'outil CC620.

### III-7-3 Céramique revêtu GC1690

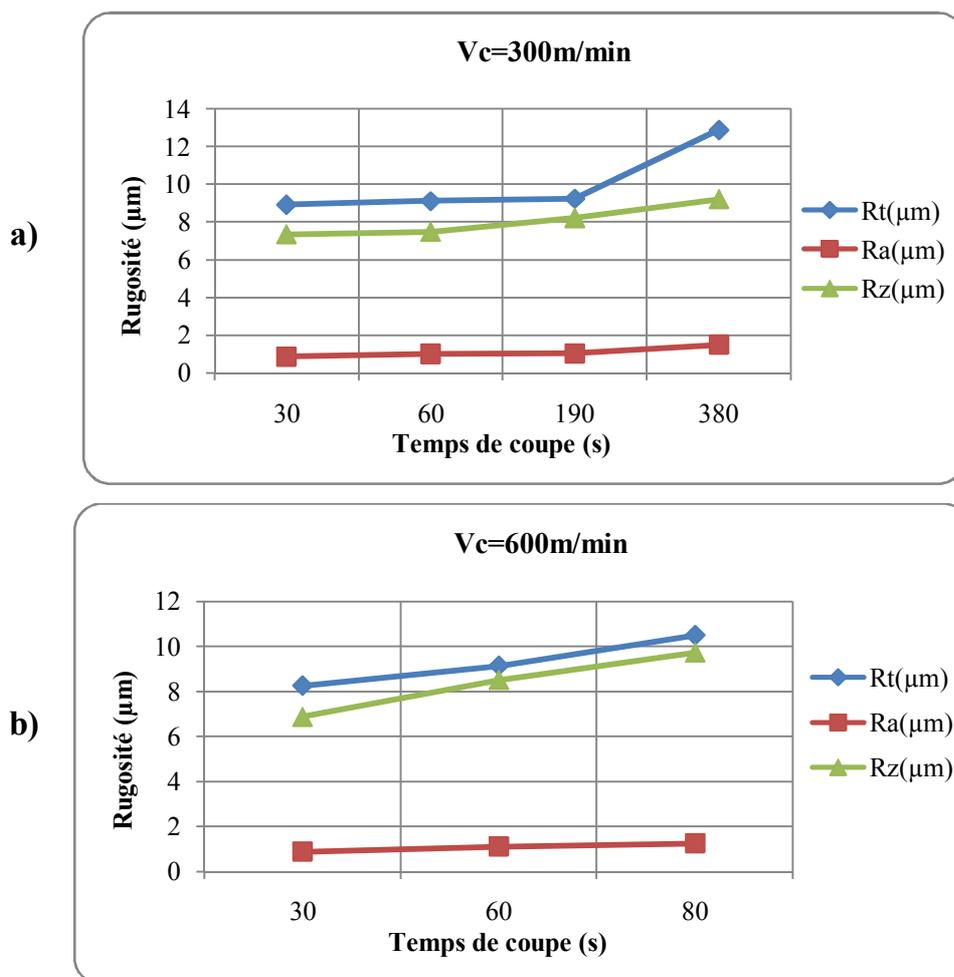
La figure III-14 (a et b) montre l'impact du temps d'usinage sur les critères de rugosité dans les mêmes conditions de coupe que la céramique blanche CC620 et pour un chariotage exécuté par un outil en céramique (Nitrure de Silicium) revêtu GC1690. Lorsque le temps d'usinage varie de 30 à 380 secondes, pour la vitesse de coupe 300 m/min (figure III-14 (a)), les critères de rugosité ( $R_t$ ,  $R_a$  et  $R_z$ ) passent successivement de (6.81; 0.84 et 5.69)  $\mu\text{m}$  à (11.39; 1.14 et 8.81)  $\mu\text{m}$ . Pour la vitesse de coupe 600 m/min (figure III-14 (b)), les critères de rugosité ( $R_t$ ,  $R_a$  et  $R_z$ ) passent de (5.54 ; 0.7 et 5.01)  $\mu\text{m}$  à (8.24 ; 0.88 et 7.24)  $\mu\text{m}$ , lorsque le temps de usinage varie de 30 à 80 secondes. Ce qui représente une augmentation des différents critères ( $R_t$ ,  $R_a$ ,  $R_z$ ) de (32.76% ; 20.45% ; 30.80%).



**Figure III-14** Evolution des rugosités en fonction du temps d'usinage à  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$  ; pour l'outil céramique GC1690,

### III-7-4 Céramique non revêtu CC6090

La figure III-15 (a et b) montre l'influence du temps d'usinage sur les trois critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_z$ ) à  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$  et  $V_c=300$  et  $600\text{m/min}$ , pour l'outil céramique CC6090. On note que même pour ces conditions de coupe, les courbes de rugosité ont une allure ascendante. Cette synthèse confirme que le temps d'usinage a une énorme influence sur les critères de rugosité étudiés.

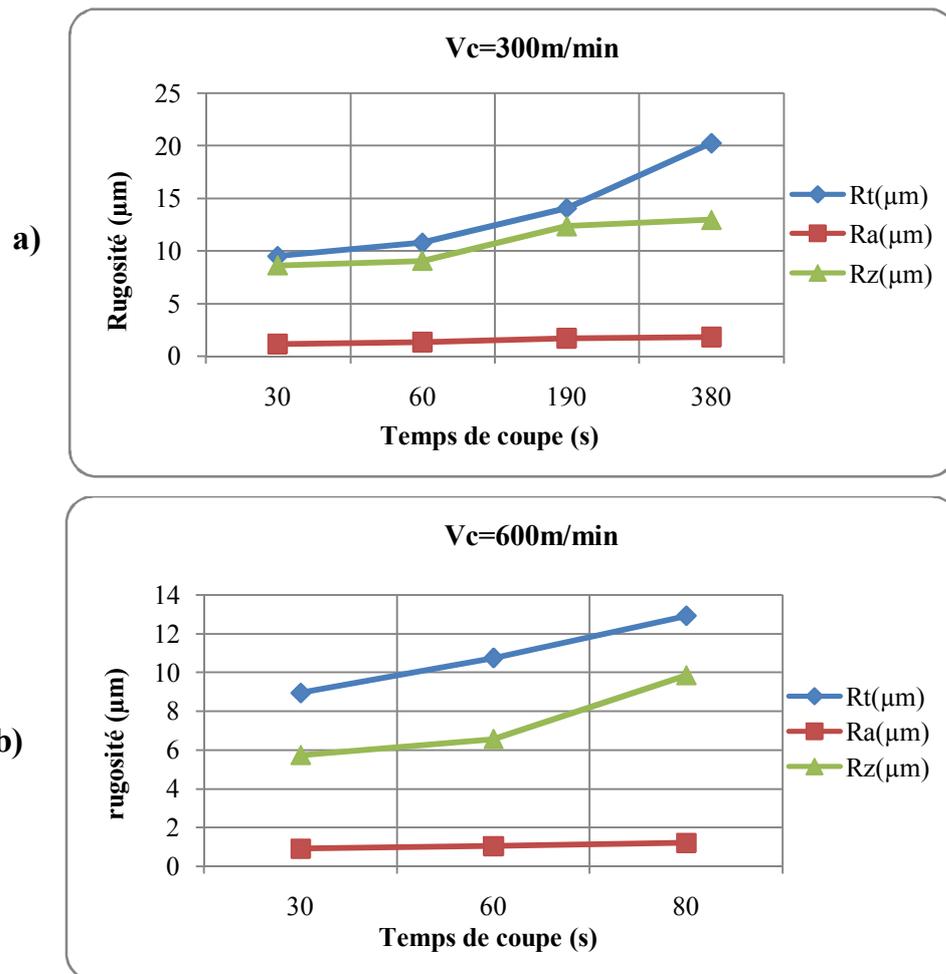


**Figure III-15** Evolution des rugosités en fonction du temps d'usinage à  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$  ;  $V_c=300$  et  $600\text{m/min}$  pour l'outil CC6090,

Au début du chariotage à  $t=30$  secondes et  $V_c=300\text{m/min}$  (figure III-15 (a)), les trois critères de rugosité ( $R_t$ ,  $R_a$  et  $R_z$ ) sont respectivement ( $8.91$ ;  $0.87$  et  $7.35$ )  $\mu\text{m}$ . A la fin du chariotage à  $t=380$  secondes, les rugosités atteignent les valeurs de ( $12.88$ ;  $1.49$  et  $8.99$ )  $\mu\text{m}$ . La figure III-15 (b) présente l'évolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage à  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$  et  $V_c=600\text{m/min}$  pour la céramique non revêt CC6090.

Au début du chariotage à  $t=30$  secondes, les trois critères de rugosité ( $R_t$ ,  $R_a$  et  $R_z$ ) sont respectivement (8.27; 0.8 et 6.89)  $\mu\text{m}$ . A la fin du chariotage à  $t=80$  secondes, les rugosités atteignent les valeurs de (10.01; 0.99 et 9.74)  $\mu\text{m}$ . ce qui présente une augmentation de (17.38% ; 19.19% ; 29.26%).

### III-7-5 Carbure revêtu GC4005



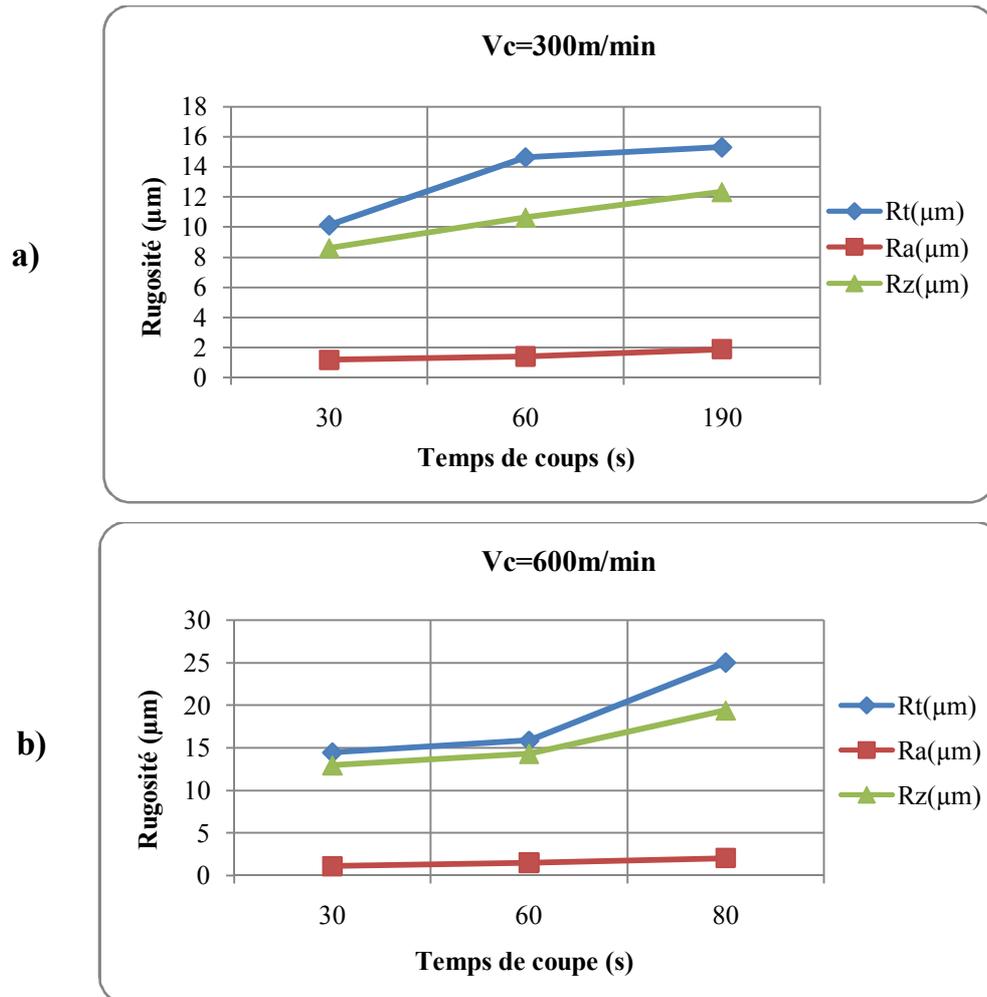
**Figure III-16** Evolution des rugosités en fonction du temps d'usinage à

$f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$  ;  $V_c=300$  et  $600\text{m/min}$  pour l'outil carbure GC4005.

Les résultats des rugosités trouvées lors du chariotage par le carbure revêtu GC 4005 dans les mêmes conditions de coupe sont illustrées dans la figure III-16 (a et b). Pour un temps d'usinage de 30 secondes à la vitesse de coupe 300m/min (figure III-16 (a)), les trois critères de rugosité ( $R_t$ ,  $R_a$  et  $R_z$ ) prennent les valeurs de (9.5; 1.12 et 7.83)  $\mu\text{m}$ . Pour un temps de usinage de 380 secondes, les critères de rugosité atteignent les valeurs de (20.26 ; 1.79 et 12.97)  $\mu\text{m}$ .

Pour la vitesse de coupe  $V_c=600\text{m/min}$  (figure III-16 (b)), lorsque le temps d'usinage varie de 30 à 80 secondes les critères de rugosité ( $R_t$ ,  $R_a$  et  $R_z$ ) passent de (8.96; 0.91 et 5.74)  $\mu\text{m}$  à (12.91; 1.21 et 9.86)  $\mu\text{m}$ , cela présente une augmentation de (30.59% ; 24.79% ; 41.78%). On remarque qu'à la fin de l'usinage  $t=80$  secondes, la rugosité  $R_a$  ne dépasse pas 1.21 $\mu\text{m}$ .

### III-7-6 Carbure non revêtu H13A



**Figure III-17** Evolution des rugosités en fonction du temps d'usinage à  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$  ;  $V_c = 300$  et  $600\text{m/min}$  pour l'outil carbure H13A.

La figure III-17 (a) montre l'évolution des critères de rugosité ( $R_t$ ,  $R_a$  et  $R_z$ ) en fonction du temps d'usinage à  $V_c=300$  m/min pour un carbure non revêtu H13A. Pour une opération de chariotage à  $t=30$  secondes, les rugosités sont (10.15; 1.18 et 8.61)  $\mu\text{m}$ . A  $t=190$  secondes, les critères de rugosité ( $R_t$ ,  $R_a$  et  $R_z$ ) enregistrés sont (15.33 ; 1.88 et 12.35)  $\mu\text{m}$ .

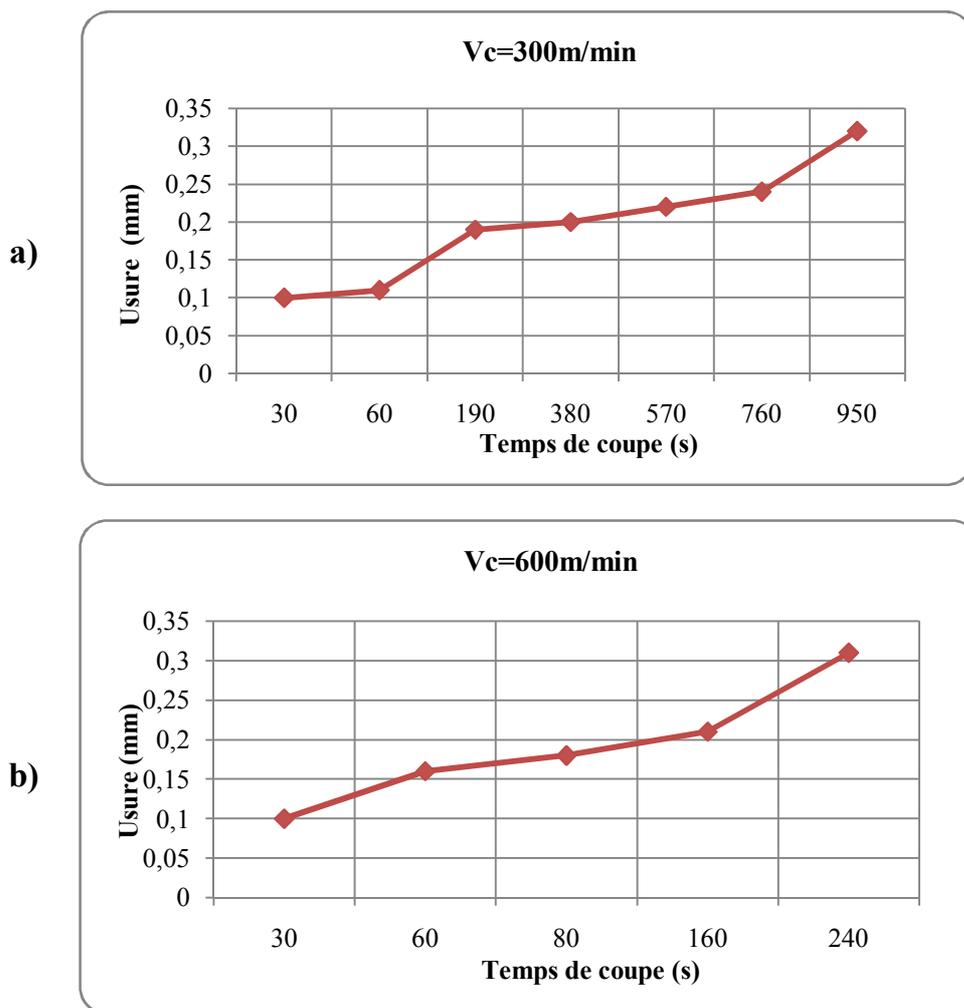
La figure III-17 (b) montre l'influence du temps d'usinage sur les trois critères de rugosité ( $R_t$ ,  $R_a$  et  $R_z$ ) à  $V_c=600\text{m/min}$ . Au début du chariotage à  $t=30$  secondes, les trois critères de rugosité ( $R_t$ ,  $R_a$  et  $R_z$ ) sont respectivement ( $14.46$  ;  $1.15$  ;  $12.97$ )  $\mu\text{m}$ . A la fin du chariotage à  $t=80$  secondes, les rugosités atteignent les valeurs de ( $25.05$  ;  $2.04$  ;  $19.43$ )  $\mu\text{m}$ . Cela correspond a une augmentation de ( $42.27\%$  ;  $42.64\%$  et  $33.24\%$ ).

### III-8 Evolution de l'usure en fonction du temps d'usinage

Les figures III-18 jusque III-23, présentes les courbes de tendances de la relation fonctionnelle entre l'usure en dépouille et le temps d'usinage. Ces dernières montrent que l'usure obéit aux mêmes lois connues dans la littérature. Autrement dit cette fonction se caractérise par trois phase principales: La première phase correspond aux premières secondes de travail et elle se distingue par une usure intensive appelée souvent usure initiale ou rodage. Dépassant la zone de rodage, l'usure devient stable et évolue linéairement avec le temps. Cette phase est nommée usure normale. La troisième phase où l'usure en dépouille et en cratère se réunissent et on aboutit en fin de compte à l'effondrement de l'arête tranchante.

#### III-8-1 Céramique mixte CC650

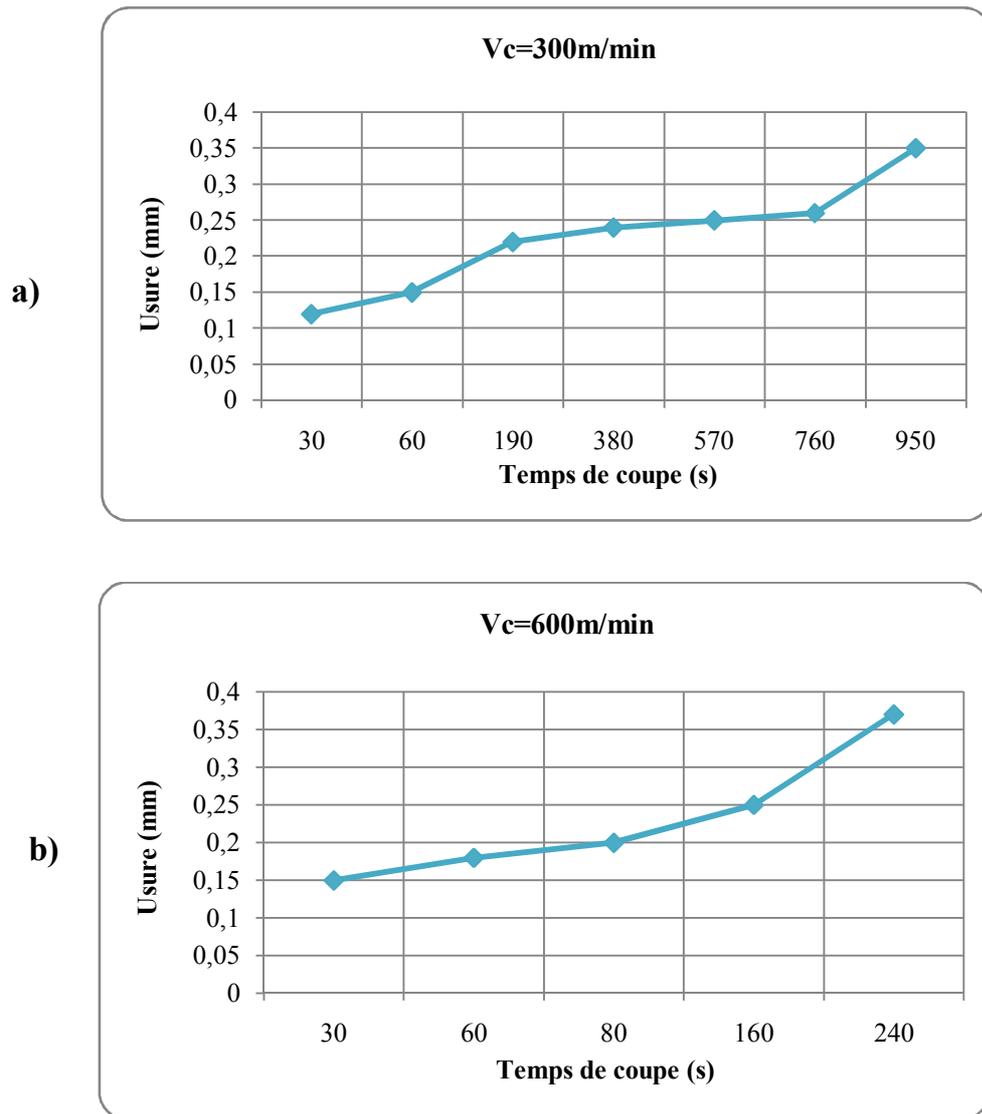
La figure III-18 (a et b) présente l'évolution de l'usure en dépouille  $VB$  de l'outil céramique CC650 en fonction du temps d'usinage à  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$  et  $V_c=300$  et  $600\text{m/min}$ . D'après la courbe de la figure III-18 (a), pour un temps d'usinage de 30 secondes et une vitesse de coupe de  $300\text{m/min}$ , l'usure en dépouille  $VB$  de la plaquette CC650 atteint la valeur de  $0.1\text{mm}$ . A la fin de l'usinage à  $t=950$  secondes, l'usure en dépouille est de  $0.32\text{mm}$ . Pour la vitesse de coupe  $600\text{m/min}$  (figure III-18 (b)) l'usure  $VB$  est de  $0.12\text{mm}$  après 30 secondes d'usinage. A la fin de l'usinage à  $t= 240$  secondes, l'usure en dépouille  $VB$  atteint la valeur de  $0.37\text{mm}$ , cette valeur dépasse la valeur admissible ( $VB=0.3\text{mm}$ ). On enregistre une durée de vie de cet outil de 855 secondes pour la vitesse de coupe de  $300\text{ m/min}$  et 230 secondes pour la vitesse de coupe de  $600\text{m/min}$ .



**Figure III-18** Evolution de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage à  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$  et  $V_c=300$  et  $600\text{m/min}$  pour l'outil céramique CC650.

### III-8-2 Céramique blanche CC620

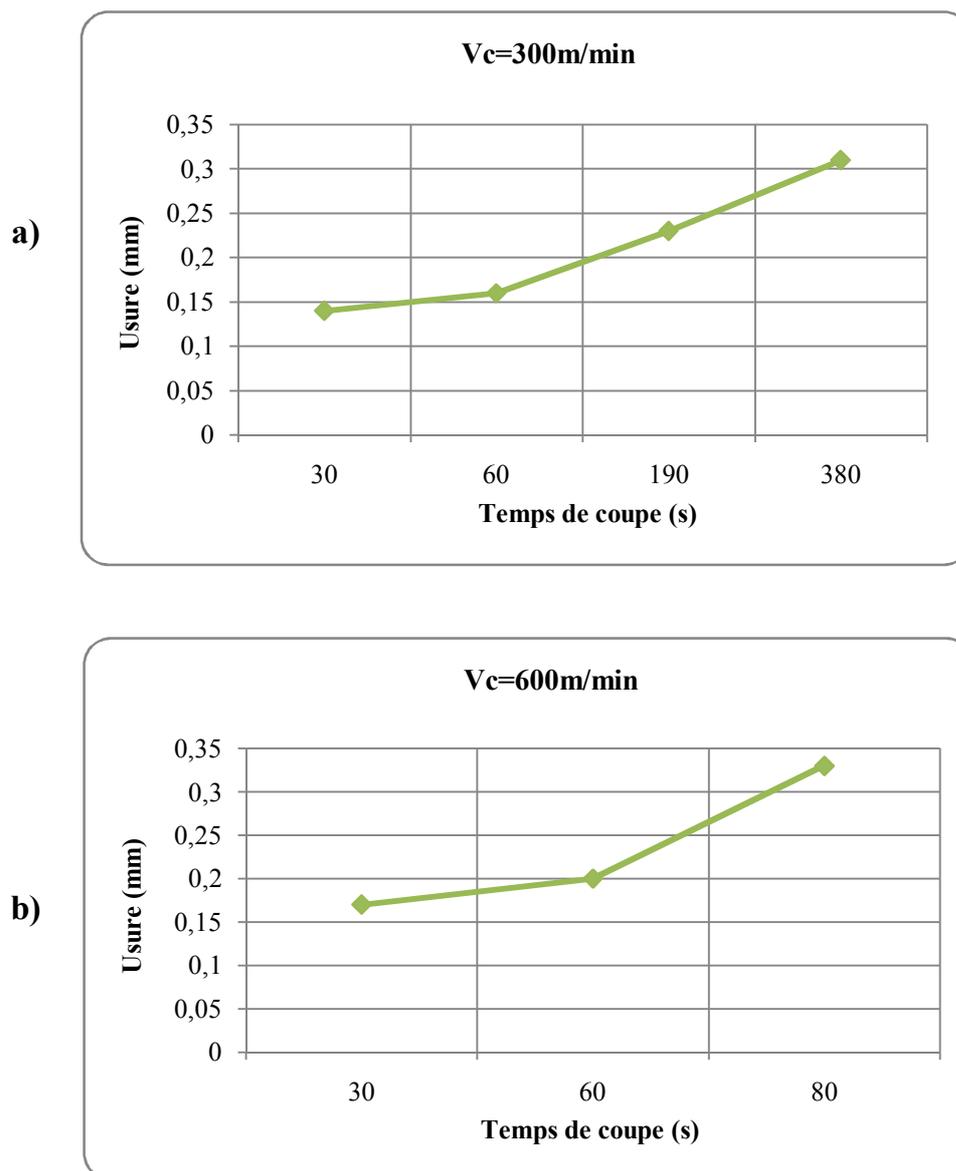
Lors de chariotage par la plaquette céramique blanche CC620 (figure III-19 (a)) à la vitesse de coupe de  $300\text{m/min}$ , l'usure VB est de  $0.12\text{mm}$ , après 30 secondes d'usinage, et de  $0.35\text{mm}$  pour un temps d'usinage de 950 secondes. Lors du chariotage à la vitesse de coupe de  $600\text{m/min}$ , l'usure en dépouille VB varie de  $0.15$  à  $0.37\text{mm}$  pour un temps d'usinage qui varie de 30 à 240 secondes. Dans ces conditions de coupe, la tenue de la céramique CC620, est de 855 secondes pour la vitesse de coupe de  $300\text{m/min}$ , et 200 secondes pour la vitesse de coupe de  $600\text{m/min}$ .



**Figure III-19** Evolution de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage à  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$  et  $V_c=300$  et  $600\text{m/min}$  pour l'outil CC620.

### III-8-3 Céramique revêtu GC1690

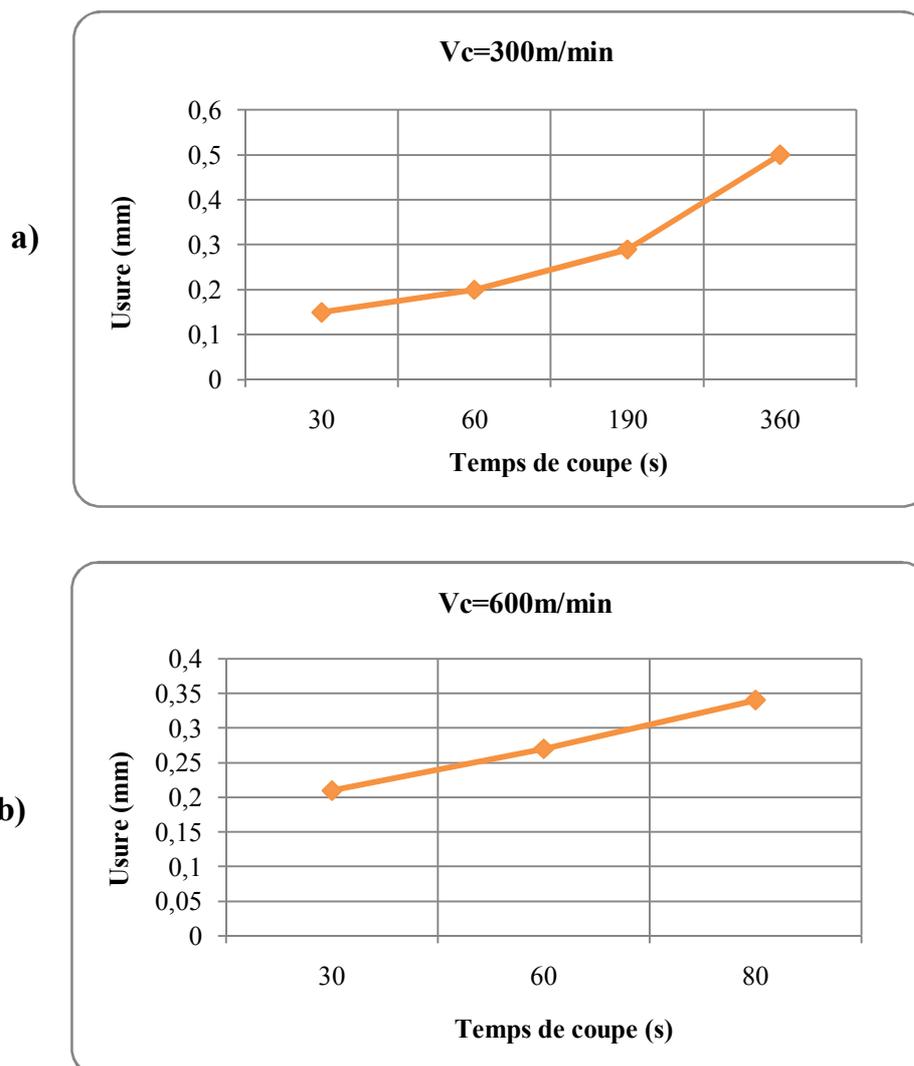
Pour l'usinage effectué par la plaquette en céramique en nitrure de silicium revêtu GC1690 (figure III-20 (a)), son usure VB est de 0.14mm après 30 secondes d'usinage et 0.31mm pour une temps d'usinage de 380 secondes ce que signifie que l'usure en dépouille dépasse sa valeur admissible, sa tenue est inférieure à 380 secondes pour la vitesse de coupe 300m/min. D'après la courbe de la figure III-20 (b), l'usure VB de la céramique est de 0.33mm pour un temps d'usinage de 80 secondes et une vitesse de coupe  $V_c=600\text{m/min}$ , sa tenue est de 75 secondes.



**Figure III-20** Evolution de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage à  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$  et  $V_c=300$  et  $600\text{m/min}$  pour l'outil GC1690.

#### III-8-4 Céramique non revêtu CC6090

Le premier essai de tournage réalisé par la céramique non revêtu CC6090 (figure III-21(a)) donne une usure en dépouille de 0.15mm. Pour un temps d'usinage de 380 secondes, l'usure VB est de 0.5mm ce qui signifie que l'arête de cet outil est sérieusement endommagée. La tenue de la céramique non revêtu CC6090 est inférieure à 380 secondes, à la vitesse de coupe 300m/min. Pour la vitesse de coupe 600m/min (figure III-21(b)) l'usure VB est de 0.34mm, cette valeur dépasse la valeur admissible ( $V_B=0.3\text{mm}$ ). On enregistre une durée de vie de cet outil de 68 secondes.

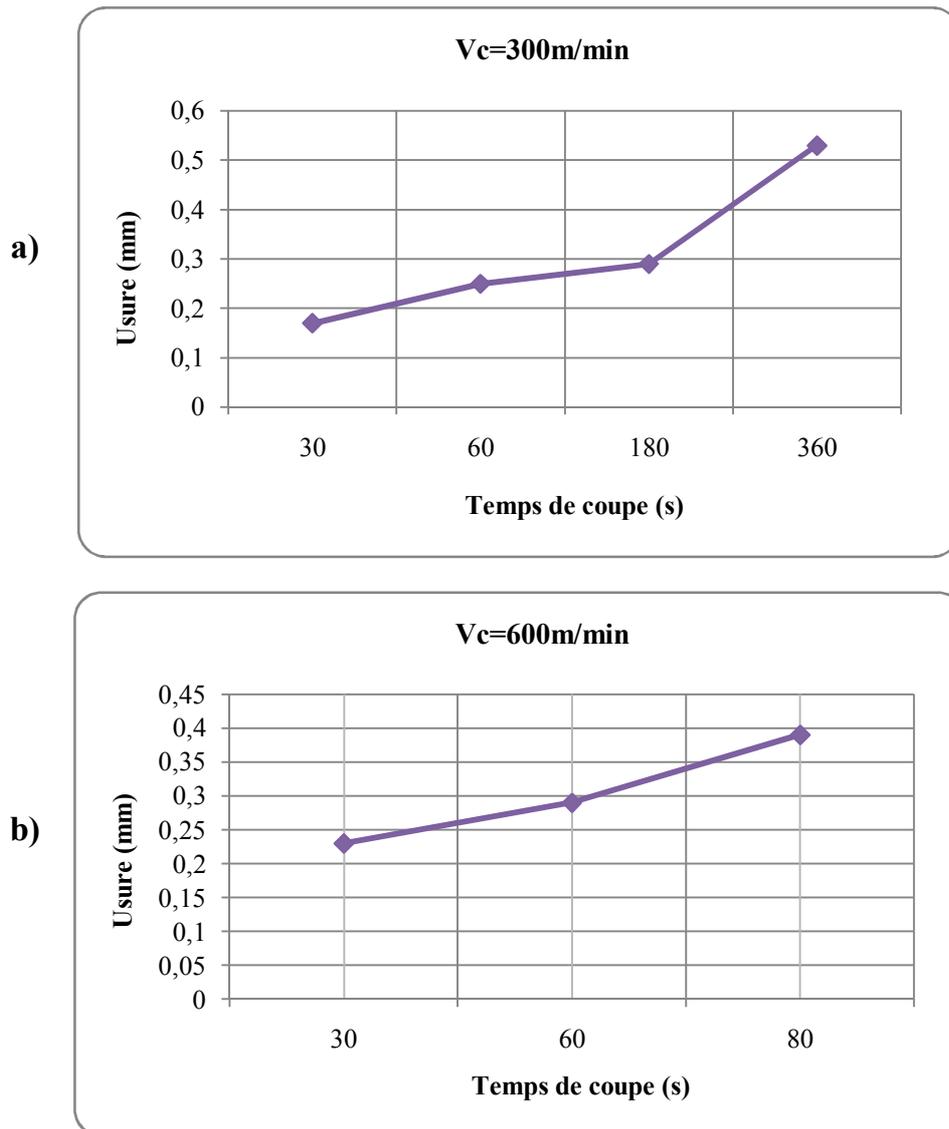


**Figure III-21** Evolution de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage à  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$ ,  $V_c=300$  et  $600\text{m/min}$  pour l'outil CC6090.

### III-8-5 Carbure revêtu GC4005

La figure III-22 (a et b) montrent successivement l'évolution de l'usure en dépouille VB de l'outil GC4005 en fonction du temps d'usinage à  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$  et  $V_c=300\text{m/min}$  et  $V_c=600\text{m/min}$ .

Pour un temps d'usinage de 380 secondes à la vitesse de coupe  $300\text{m/min}$ , (Figure III-22(a)) l'usure en dépouille VB du carbure revêtu GC4005 est de  $0.53\text{mm}$ . A un temps de 80 secondes, l'usure VB est de  $0.39\text{mm}$  pour la vitesse de coupe  $600\text{m/min}$  (Figure III-22(b)). La durée de vie de la plaquette GC4005 est de 180 secondes pour la vitesse de coupe  $300\text{m/min}$  et 60 secondes pour la vitesse de coupe  $600\text{m/min}$ .



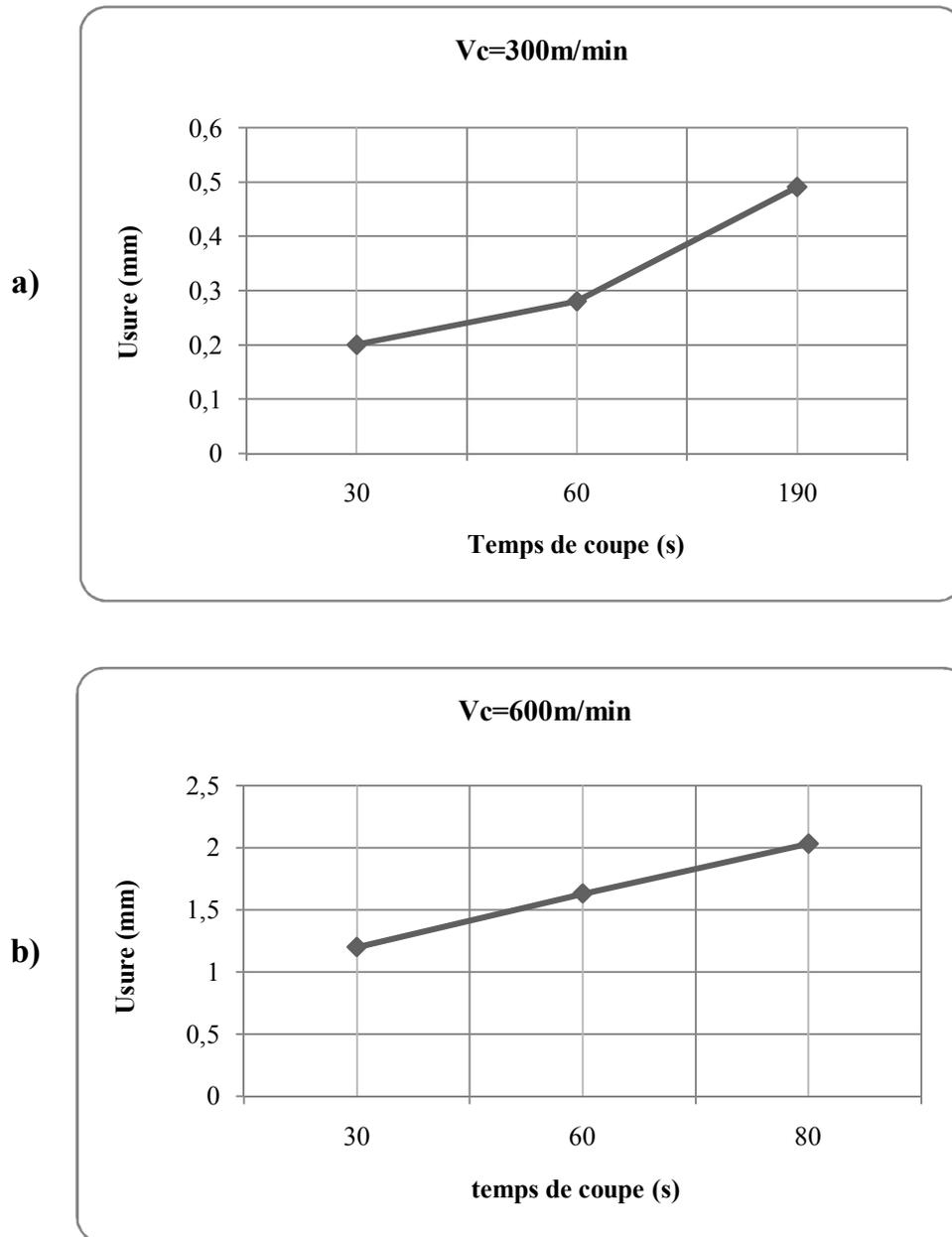
**Figure III-22** Evolution de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage à  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$  pour l'outil GC4005.

### III-8-6 Carbure non revêtu H13A

La figure III-23 (a et b) montre successivement l'évolution de l'usure en dépouille VB des outils carbure H13A en fonction du temps d'usinage à  $f=0.08\text{mm/tr}$  ;  $a_p=0.5\text{mm}$  et  $V_c=300\text{m/min}$  et  $V_c=600\text{m/min}$ .

La figure III-23 (a) illustre l'évolution de l'usure en dépouille VB du carbure non revêtu H13A. Pour la première vitesse de coupe ( $V_c = 300\text{m/min}$ ), l'usure en dépouille de cet outil est de  $0.49\text{mm}$ . La tenue de l'outil pour ces conditions de coupe n'est que de 70 secondes pour une usure admissible  $[VB]=0.3\text{mm}$ .

A la deuxième vitesse ( $V_c = 600 \text{ m/min}$ ) figure III-23 (b), l'usure dépasse sa valeur admissible et vaut 2.03mm ce qui signifie que l'arête de cet outil est sérieusement endommagée. La nuance H13A (carbure non revêtu) n'est pas adaptée pour usiner cette fonte aux vitesses de coupe supérieures à 300 m/min, à cause de l'usure accélérée de ce matériau.



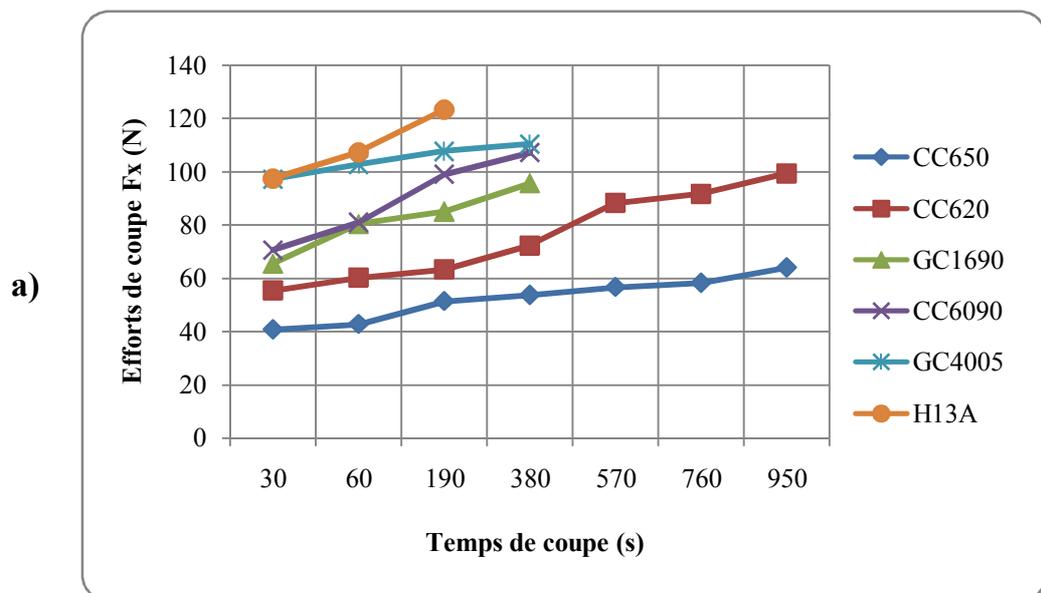
**Figure III-23** Evolution de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage à  $f=0.08 \text{ mm/tr}$  ;  $a_p=0.5 \text{ mm}$  pour l'outil H13A.

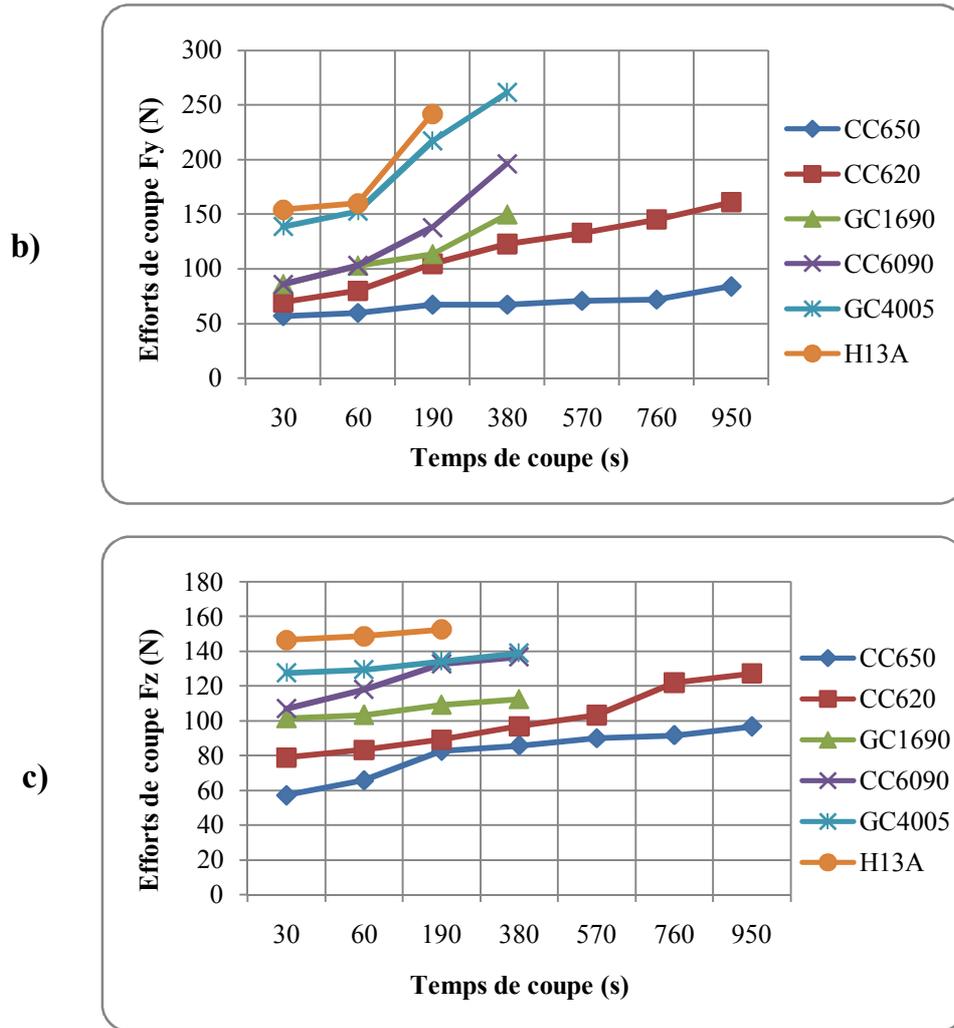
### III-9- Comparaison entre les performances des matériaux à outils

Pour voir l'influence de la nuance de l'outil sur la rugosité de la surface usinée corrélé avec l'acquisition des efforts de coupe, et l'usure en dépouille lors de l'usinage de la fonte grise Ft25, nous avons fait une comparaison entre les six matériaux de coupe : la céramique mixte (CC650), la céramique blanche (CC620), la céramique revêtu (GC1690), la céramique non revêtu (CC6090), le carbure métallique revêtu (GC 4005), et le carbure métallique non revêtu (H13A), et cela pour deux vitesses de coupe testées ( $V_c=300$  et  $600\text{m/min}$ ), avec l'avance et la profondeur de passe qui sont maintenues constants ( $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.5\text{mm}$ ).

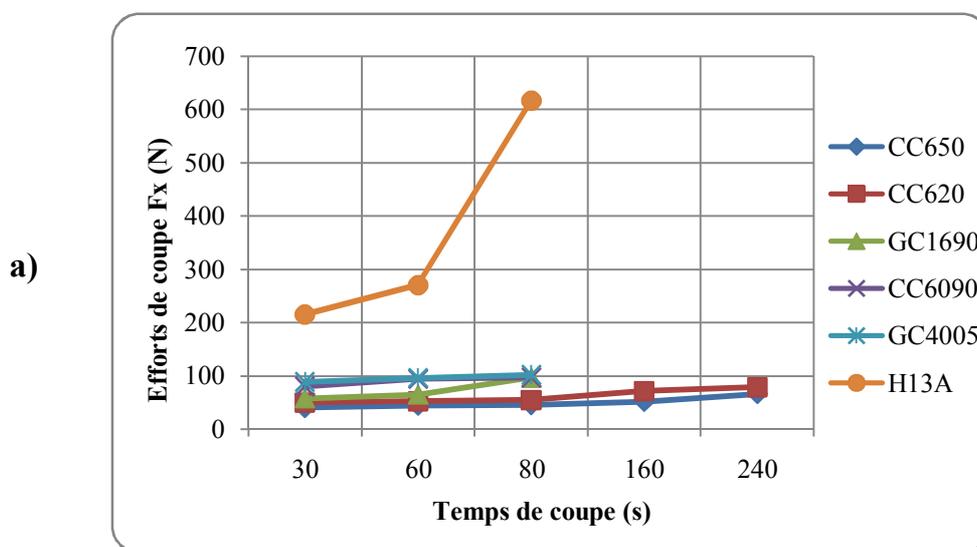
#### III-9-1 Comparaison entre les efforts de coupe enregistrés

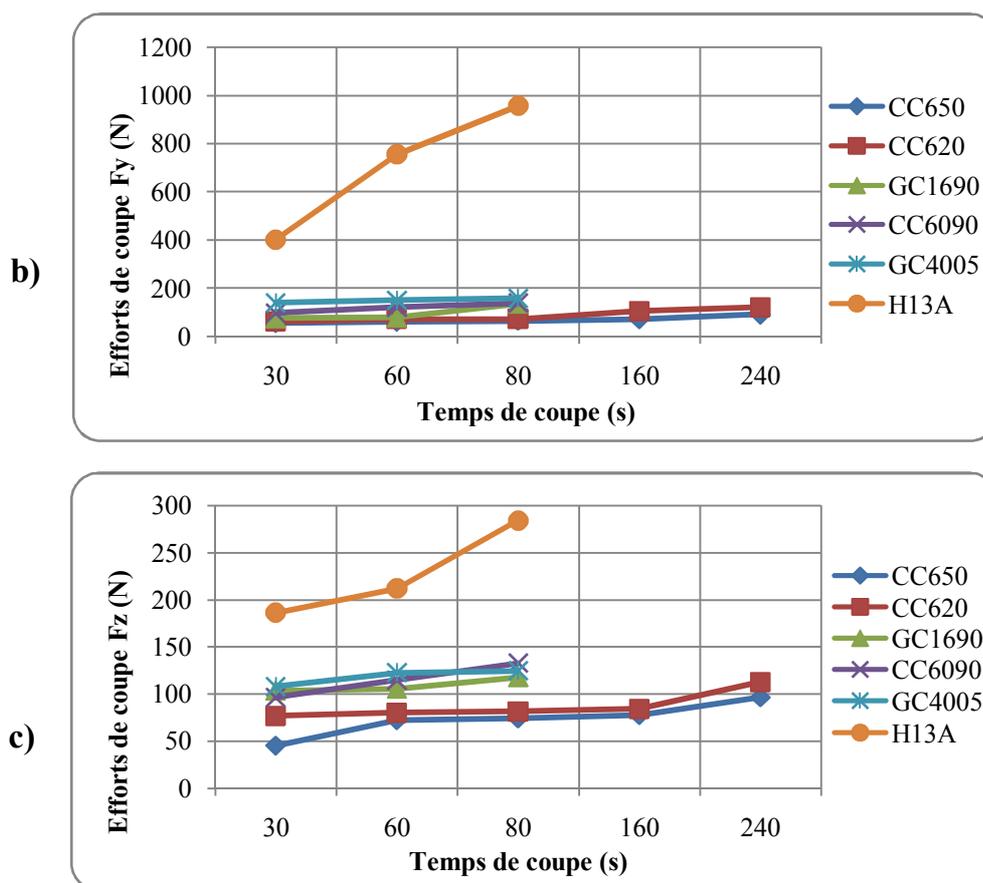
Les résultats de la (figure III-24, III-25), montrent la différence enregistrée entre l'évolution de l'effort de coupe ( $F_x$  ;  $F_y$  ;  $F_z$ ) en fonction du temps. L'analyse de ces courbes montre que, les efforts enregistrés avec les deux céramiques CC650 et CC620 sont inférieures par rapport aux efforts enregistrés par les autres matériaux. A la vitesse de  $600\text{m/min}$  Figure III-25 le carbure H13A engendre des efforts de coupe important ( $F_x=616.91$ ;  $F_y= 956.7$ ;  $F_z= 284.12$ ) N, et cela à cause de l'usure maximale observée sur le bec de l'outil.





**Figure III-24** Evolution de l'effort de coupe ( $F_x$  ;  $F_y$  ;  $F_z$ ) en fonction du temps lors de l'usinage des fûts Ft25 avec différents matériaux de coupe,  $V_c=300\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.5\text{mm}$ .





**Figure III-25** Evolution de l'effort de coupe ( $F_x$  ;  $F_y$  ;  $F_z$ ) en fonction du temps, avec différents matériaux de coupe,  $V_c=600\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.5\text{mm}$ .

Si on compare les résultats des efforts de coupe obtenue par les six nuances de coupe figures III-26 et III-27, pour une vitesse de coupe 300 et 600m/min, on remarque que le CC650 est la nuance CC620 plus performante que les autres nuances. La supériorité de la céramique CC650 réside dans le fait quelle possède une grande résistance à l'usure, par conséquent un système usinant stable (Efforts de coupe faibles). Les figures III-26 et III-27 montre que les six nuances donnent des valeurs des efforts voisines avec une légère différence qui varie d'un matériau à un autre à cause du composition chimique matériau de coupe lui-même, du type de revêtement, sauf la nuance H13A donne des efforts de coupe élevés. Ceci est une conséquence de l'évolution de l'usure sur les surfaces en dépouille et d'attaque de l'outil, puisque dans ce cas la surface de contact entre l'outil et la pièce augmente ce qui augmente les forces de frottement. Du point de vue effort de coupe, cette nuance n'est pas adaptée pour usiner la fonte grise Ft25 à des vitesses de coupe élevées.

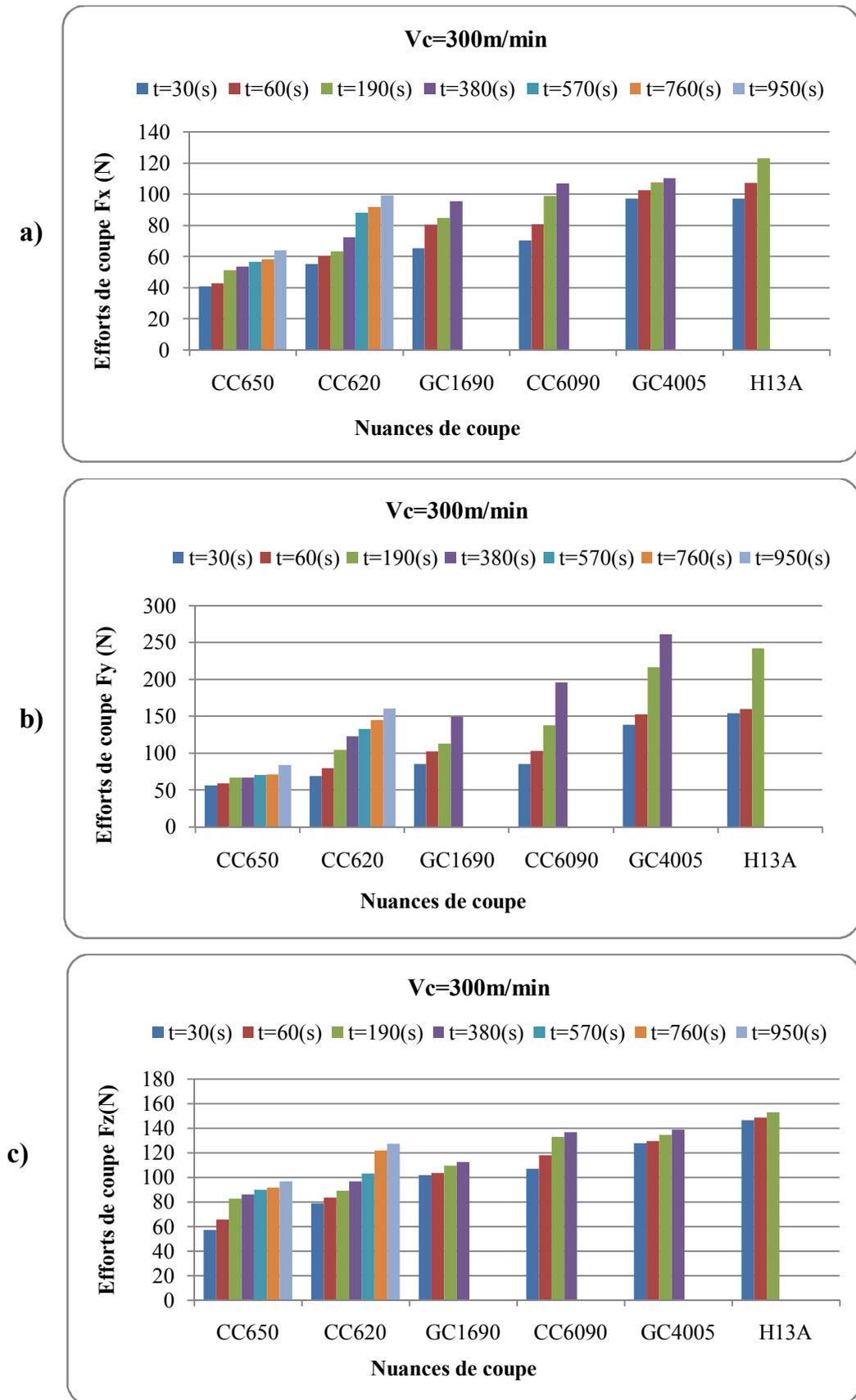


Figure III-26 Comparaison entre les efforts enregistrés pour les six nuances de coupe  $V_c=300\text{m/min}$ ,  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.5\text{mm}$ .

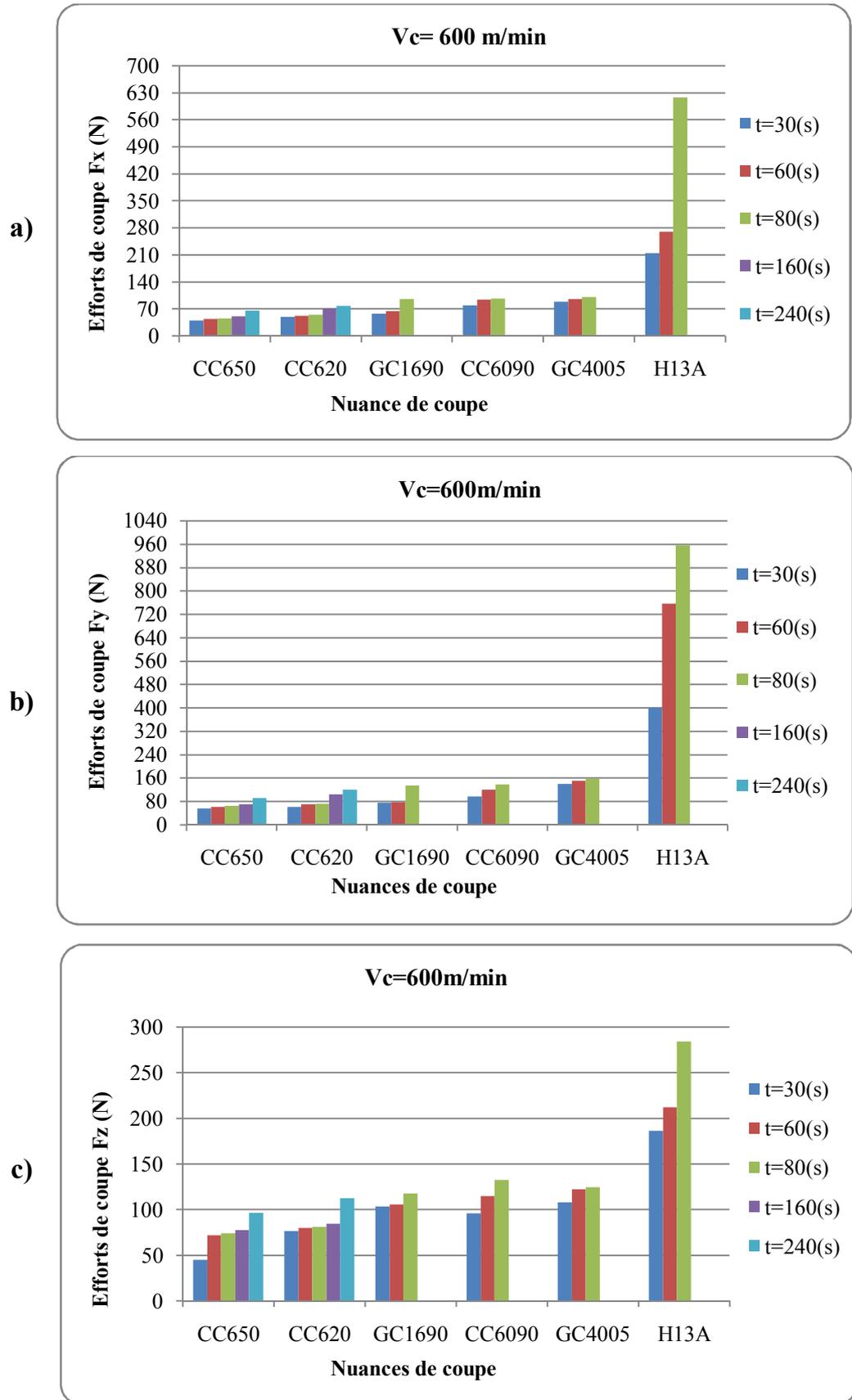
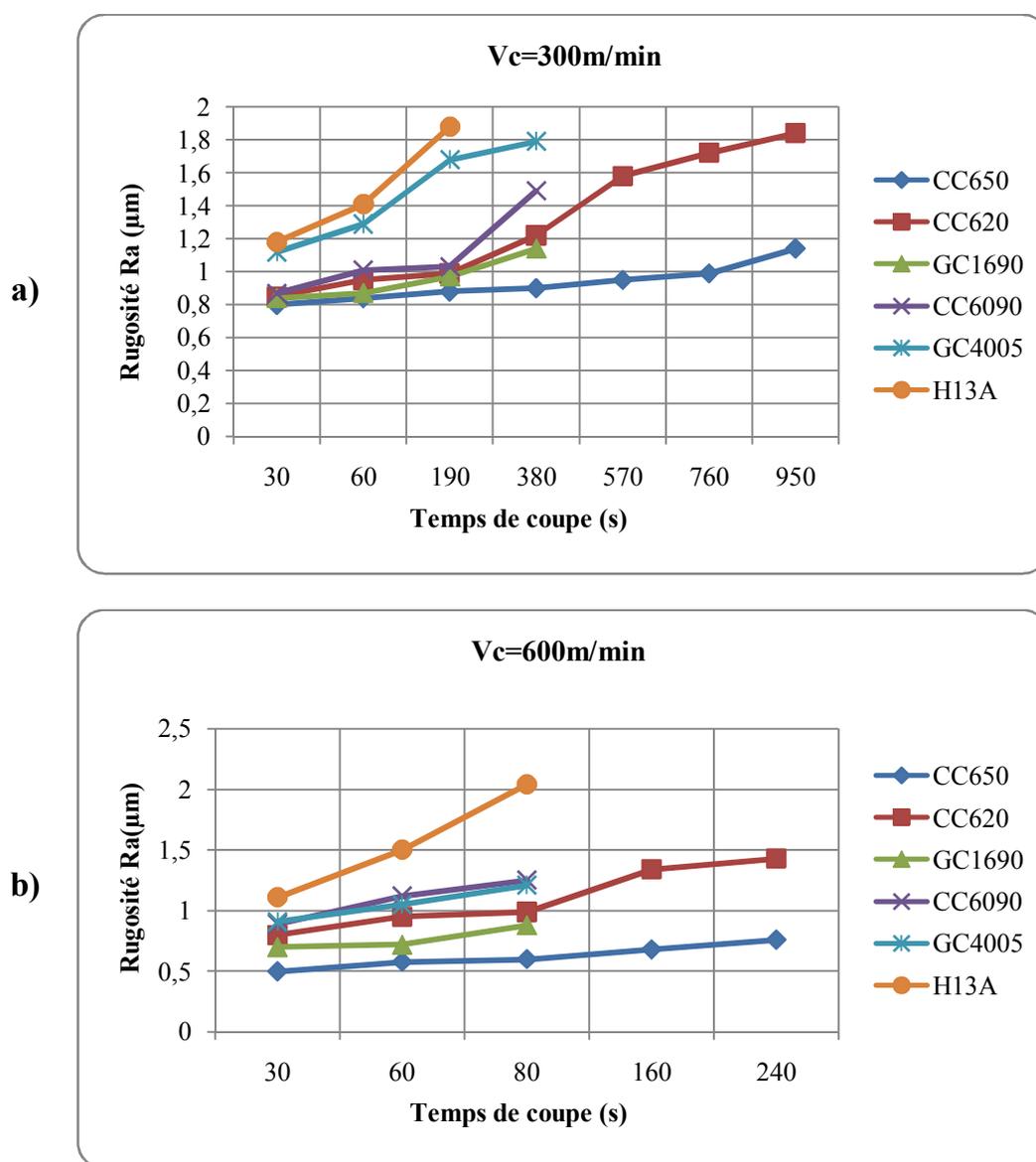


Figure III-27 Comparaison entre les efforts enregistrés pour les différent nuances de coupe  $f=0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.5\text{mm}$ .

### III-9-2 l'influence de la nuance de l'outil sur la rugosité Ra

Les courbes de la figure III-28 (a et b), montrent la différence enregistrée entre la rugosité Ra, obtenue lors de l'usinage de la fonte Ft25 avec les six matériaux de coupe utilisés. L'avance et la profondeur de passe sont maintenues constantes. L'analyse de ces courbes montre que l'état de surface générée par la céramique CC650 et la céramique GC1690 sont meilleurs par rapport aux l'autres matériau de coupes testés. A la vitesse de 300 m/min la céramique CC650 ne dépasse pas 1.2 $\mu$ m à la fin de l'usinage. Par contre à la vitesse de 600m/min la céramique CC650 ne dépasse pas la valeur de 1 $\mu$ m à la fin de l'usinage.



**Figure III-28** Evolution de la rugosité Ra en fonction du temps lors de l'usinage de la fonte Ft25 avec différents matériaux de coupe,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.5\text{mm}$ .

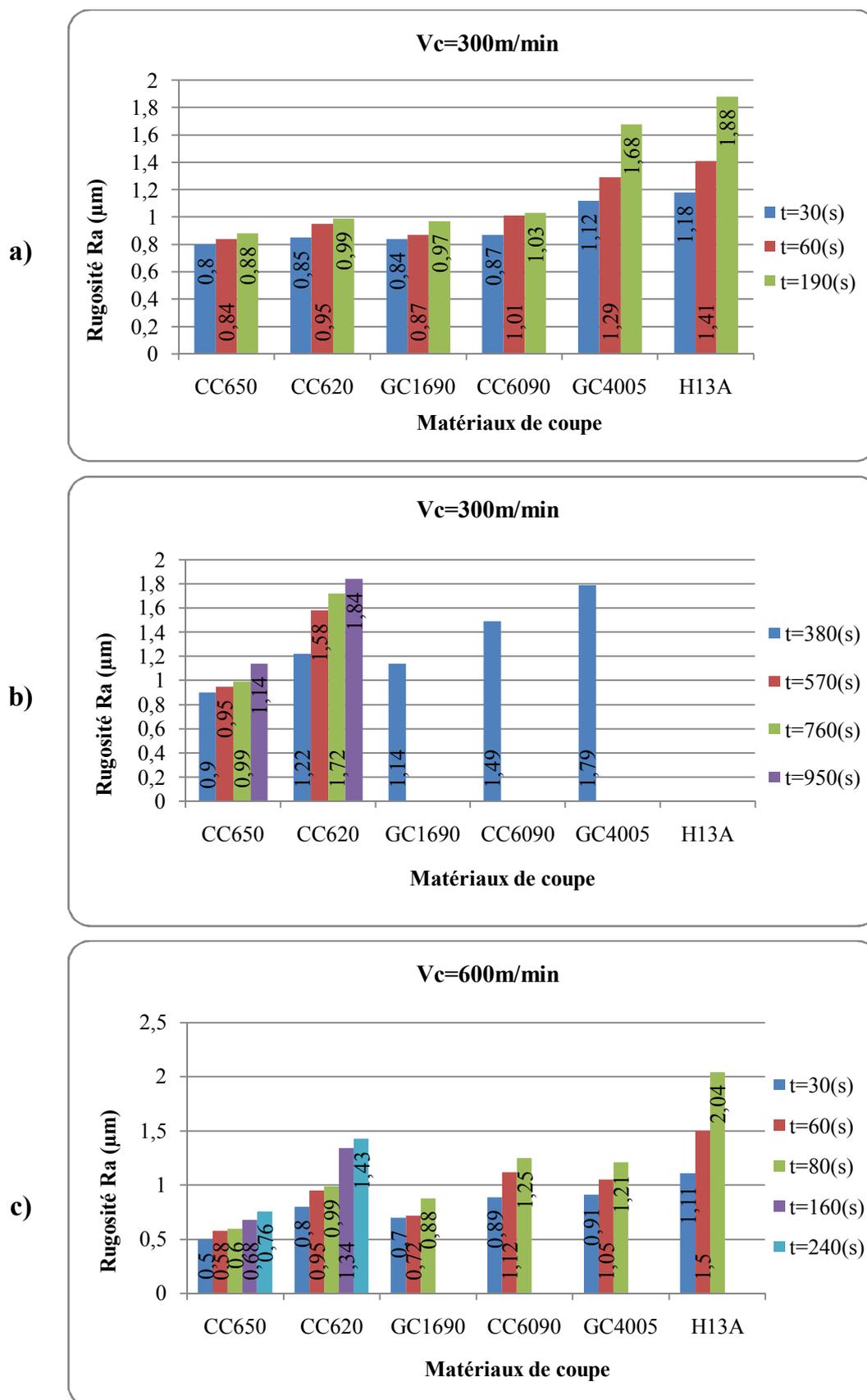


Figure III-29 Comparaison entre les rugosités (Ra) enregistrés pour les différents matériaux de coupe Vc=600m/min, f=0.08mm/tr, ap=0.5mm.

La figure III-29 (a, b et c) présente une comparaison entre les différentes nuances pour différents temps d'usinage. Nous signalons que l'arête rapportée était presque toujours absente lors de l'usinage. Si on compare les résultats des rugosités obtenues par les différentes nuances de coupe, pour une vitesse de coupe 300 et 600m/min, on remarque que pour la céramique CC650 la qualité de surface usinée reste presque stable le long de la plage des temps de coupe avec une légère augmentation des valeurs de la rugosité à la fin de l'usinage. L'analyse des résultats montre aussi que la céramique GC1690 donne des bons états de surface par rapport à la nuance CC6090, à cause de ses performances (concernant l'influence de la couche supérieure du revêtement). Concernant le carbure H13A, cette nuance n'est pas capable d'usiner à des vitesses supérieures à 300 m/min. Pour des vitesses supérieures à 300 m/min l'usure est catastrophique pour cette nuance ce qui conduit à une croissance brusque de la rugosité.

### III-9-3 l'influence de la nuance de l'outil sur l'usure en dépouille VB

La figure III-30 (a et b), montre l'évolution de l'usure en dépouille VB lors de l'usinage de fonte Ft25 avec les outils en, céramique noire (CC650), céramique blanche (CC620), la céramique revêtue (GC1690), la céramique non revêtue CC6090, le carbure métallique revêtue (GC4005) et non revêtue (H13A).

La figure III-30 (a), montre l'évolution de l'usure en dépouille VB des différents matériaux de coupe à la vitesse de coupe  $V_c=300$  m/min. Les courbes sont scindées en trois groupes :

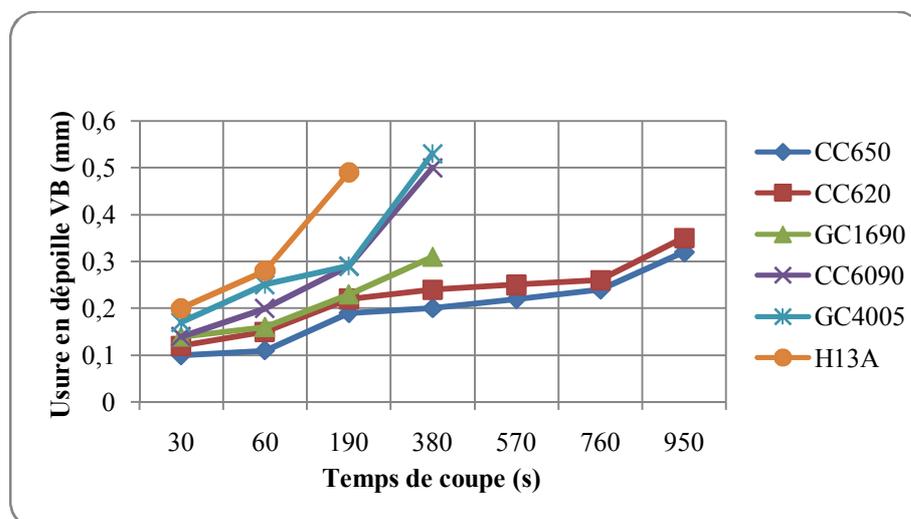
- le premier groupe de ces courbes est relatif à un temps d'usinage  $t=950$  secondes, l'usure maximale est enregistrée avec la céramique blanche CC620 ( $VB = 0.35\text{mm}$ ), suivi par la céramique mixte CC650 avec une usure ( $VB = 0.32\text{mm}$ ). Les deux valeurs dépassent la valeur admissible  $[VB]=0.3\text{mm}$
- le deuxième groupe est relatif à un temps de coupe  $t= 380$  secondes, l'usure maximale est enregistrée avec le carbure revêtue GC4005 ( $VB=0.53\text{mm}$ ), suivi par la céramique non revêtue CC6090 avec une usure ( $VB=0.5\text{mm}$ ), et en dernier lieu la céramique revêtue GC1690 avec une usure  $VB=0.31\text{mm}$ .

- la troisième courbe est relative à un temps  $t=190$  secondes, l'usure maximale est enregistrée avec le carbure non revêtu H13A ( $VB = 0.49\text{mm}$ ), donc la durée de vie est plus petite que les précédentes.

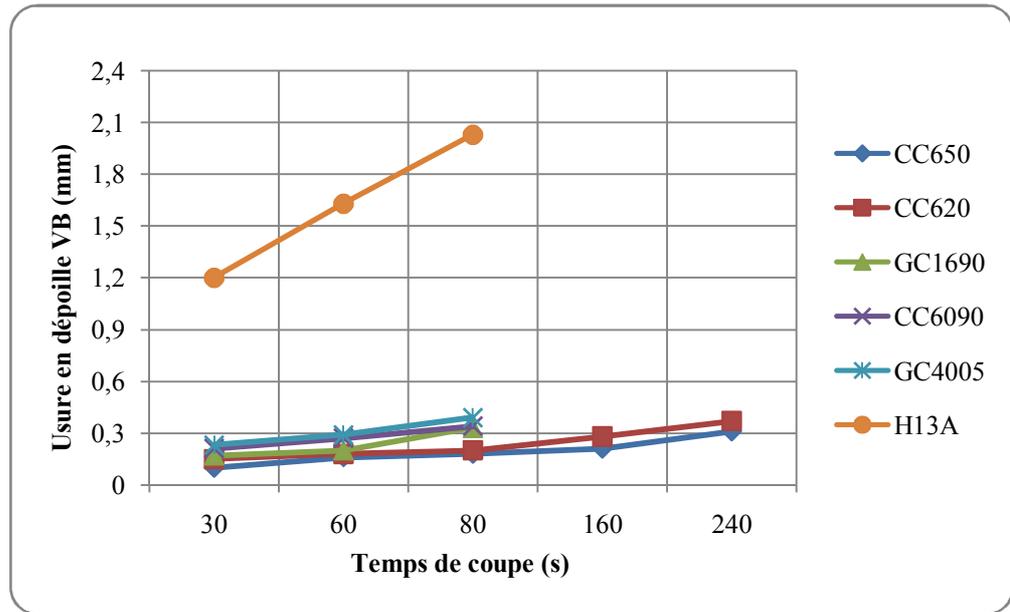
Les courbes de la figure III-30 (b) représentatives de, l'usure  $VB$  des différents matériaux de coupe à la vitesse de coupe  $V_c=600$  m/min. sont, scindées en deux groupes :

- le premier groupe de ces courbes est relatif à un temps d'usinage  $t=240$  secondes, l'usure maximale est enregistrée avec le céramique blanche CC620 ( $VB = 0.37\text{mm}$ ), suivi par le céramique noir CC650 avec une usure ( $VB = 0.31\text{mm}$ ). Les deux valeurs dépassent la valeur admissible  $[VB]=0.3\text{mm}$

- le deuxième groupe est relatif à un temps de coupe  $t= 80$  secondes, l'usure minimale est enregistrée avec le céramique revêtu GC1690 ( $VB=0.33\text{mm}$ ), suivi par le céramique non revêtu CC6090 avec une usure ( $VB=0.34\text{mm}$ ) en troisième lieu le carbure revêtu GC4005 avec une usure ( $VB= 0.37\text{mm}$ ) et en dernier lieu le carbure métallique H13A avec usure ( $VB = 2.03\text{mm}$ ), ce qui signifie que l'arête de cet outil est sérieusement endommagée. La nuance H13A (carbure non revêtu) n'est pas adaptée pour usiner cette fonte aux vitesses de coupe supérieures à 300 m/min, à cause de l'usure accélérée de ce matériau. L'analyse de ces résultats montre que la vitesse de coupe a une influence significative sur l'usure des différents matériaux de coupe testés. En effet avec l'augmentation de cette dernière, l'usure s'accroît d'une façon remarquable.



a)  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.5\text{mm}$  et vitesse de coupe 300 m/min.

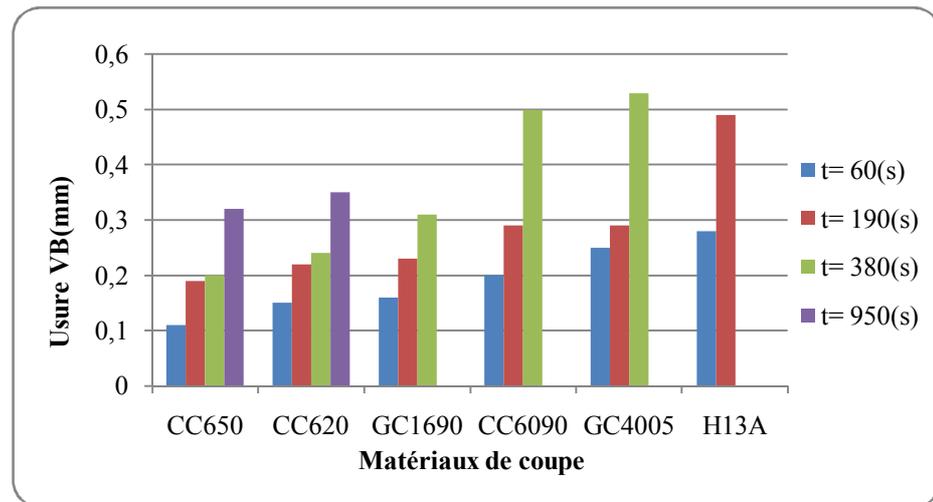


b)  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.5\text{mm}$  et vitesse de coupe  $600\text{ m/min}$ .

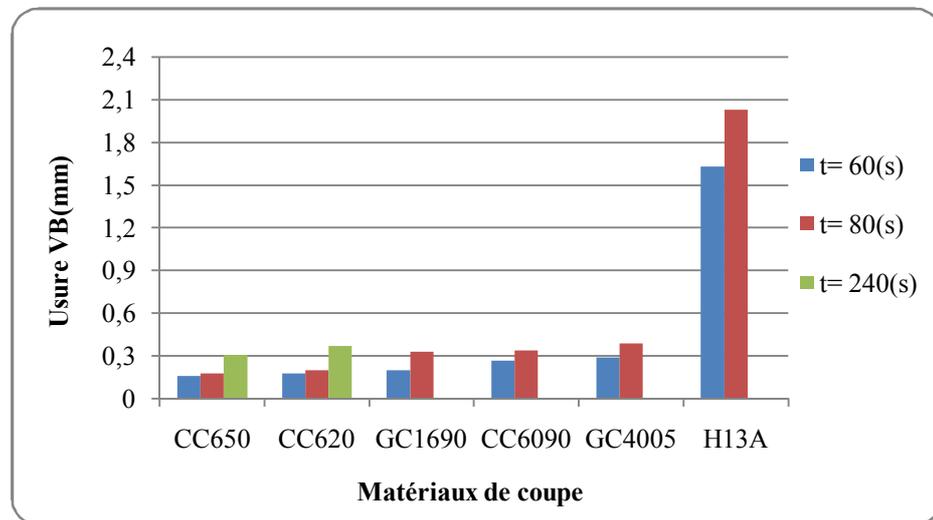
**Figure III-30** Evolution de l'usure VB en fonction du temps lors de l'usinage de la fonte Ft25 avec différents matériaux de coupe,  $f = 0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 0.5\text{mm}$ .

La figures III-31 (a et b) montre la comparaison entre l'usure (VB) pour différents temps d'usinage lors de l'usinage de la fonte Ft25 avec les outils en céramique mixte CC650, la céramique blanche CC620, la céramique revêtue GC1690, la céramique non revêtue CC6090, le carbure revêtu GC4005 et le carbure non revêtu H13A. La première constatation montre que la nuance CC650 et la nuance CC620 résistent mieux à l'usure par rapport aux autres nuances de coupe. La deuxième constatation concerne l'influence de la couche du revêtement sur la résistance à l'usure du carbure revêtu GC4005. Ce revêtement freine la progression de l'usure et augmente la durée de vie de la plaquette GC4005.

Nous avons remarqué que les outils qui contiennent un revêtement donnent une meilleure résistance à l'usure. Les cinq plaquettes de coupe sont bien adaptées à l'usinage de fonte grise Ft25, par contre la nuance H13A (carbure non revêtu) n'est pas adaptée pour usiner cette fonte aux vitesses de coupe supérieures à  $300\text{ m/min}$ , à cause de l'usure accélérée de ce matériau de coupe.



a) L'usure VB en fonction du temps pour  $V_c = 300$  m/min.



b) L'usure VB en fonction du temps pour  $V_c = 600$  m/min.

**Figure III-31** Comparaison entre l'usure (VB) enregistrés pour les six nuances de coupe  $V_c = 300$  et  $600$  m/min,  $f = 0.08$  mm/tr,  $a_p = 0.5$  mm.

Les photos III-1 et III-2 exposent les différentes étapes de propagation de l'usure en dépouille VB de la céramique blanche CC620, la céramique noire CC650, la céramique revêtu GC 1690, la céramique non revêtu CC6090, le carbure revêtu GC 4005 et le carbure revêtu H13A, à la vitesse de coupe  $V_c = 300$  et  $600$  m/min,  $f = 0.08$  mm/tr et  $a_p = 0.5$  mm. A la vitesse  $V_c = 300$  m/min (Figure III-31(a)), l'usure se développe et se manifeste par une bande régulière sur la surface en dépouille de l'outil.

La tenue de la Céramique blanche CC620 est de 854 (s), de 903 (s) pour la céramique mixte CC650, de 357 (s) pour la nuance GC1690, de 190 (s) pour la nuance CC6090, de 180 (s) pour le carbure revêtu GC4005 et de 63 (s) pour la nuance H13A et cela une usure admissible de  $[VB]= 0.3 \text{ mm}$  (Photos III-1).



VB= 0.15mm

t= 60 s



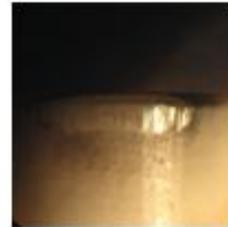
VB= 0.22mm

t=190 s



VB= 0.25mm

t=570 s



VB= 0.35mm

t= 950 s

**a) Céramique blanche CC620.**



VB= 0.11mm

t = 60 s



VB= 0.19mm

t=190 s



VB= 0.22mm

t = s 570



VB= 0.32mm

t = 950 s

**b) céramique mixte CC650.**



VB= 0.14mm

t= 30 s



VB= 0.16mm

t=60 s



VB= 0.23mm

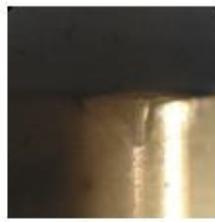
t= 190 s



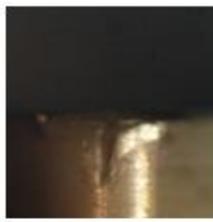
VB= 0.31mm

t= 380s

**c) céramique revêtu GC1690.**



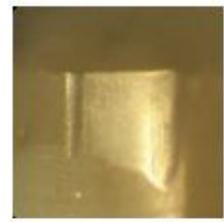
VB= 0.14mm  
t= 30 s



VB= 0.2mm  
t= 60 s



VB= 0.29mm  
t= 190 s



VB= 0.5mm  
t= 360 s

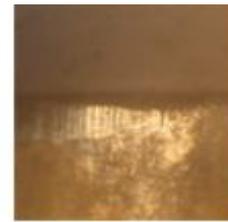
#### d) Céramique non revêtue CC6090.



VB= 0.25mm  
t= 60 s



VB= 0.29mm  
t= 180 s



VB= 0.35mm  
t= 360 s

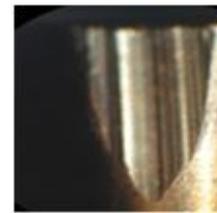
#### e) Carbure revêtu GC 4005



VB= 0.2mm  
t=30 s



VB= 0.28mm  
t= 60 s

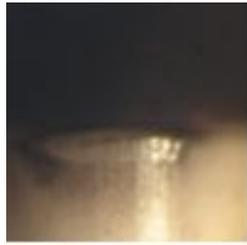


VB= 0.49mm  
t= 80 s

#### f) Carbure non revêtu H13A.

**Photos III-1** Evolution de l'usure (VB) à  $V_c = 300\text{m/min}$ ,  $f = 0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p = 0.5\text{mm}$ .

A la vitesse de  $600\text{ m/min}$  et pour une avance de  $0.08\text{ mm/tr}$ , l'usure se manifeste toujours par une bande régulière sur la surface en dépouille des l'outils céramique CC620 et CC 620. Par contre l'usure pour les trois matériaux restant et irrégulière surtout pour le carbure H13A (Photos III-2). Cette usure a pour effet d'augmenter la rugosité de la surface usinée et influe aussi sur la précision dimensionnelle et en dernier sur la formation du copeau. La tenue de la Céramique blanche CC620 est de  $190\text{ (s)}$ , de  $230\text{ (s)}$  pour la céramique noire CC650, de  $75\text{ (s)}$  pour la nuance GC1690, de  $68\text{ (s)}$  pour la nuance CC6090 et pour le carbure revêtu GC4005 est d'environ  $63\text{ min}$  pour  $VB = 0.3\text{mm}$  (Photos III-2).



VB= 0.15mm  
t = 80 s

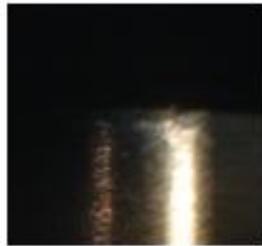


VB= 0.28mm  
t=160 s



VB= 0.37mm  
t=240 s

**a) céramique blanche CC620**



VB= 0.18mm  
t = 80 s



VB= 0.21mm  
t = 160 s



VB= 0.31mm  
t = 240 s

**b) céramique mixte CC650**



VB= 0.17mm  
t = 30 s



VB= 0.0.2mm  
t = 60 s



VB= 0.33mm  
t = 80 s

**c) Céramique revêtue GC1690.**



VB= 0.23mm  
t= 30 s

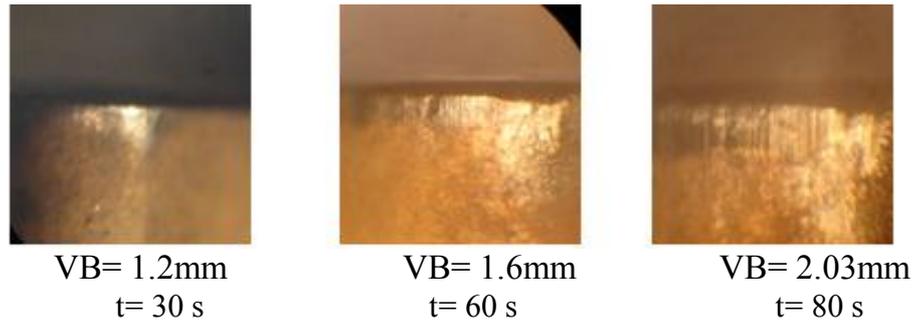


VB= 0.29mm  
t = 60 s

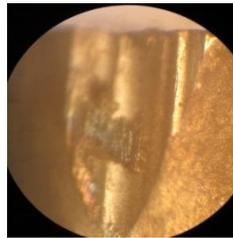


VB= 0.39mm  
t = 80 s

**c) Céramique non revêtue CC6090.**



e) Carbure revêtu GC 4005



VB= 0.22mm  
t = 30 s

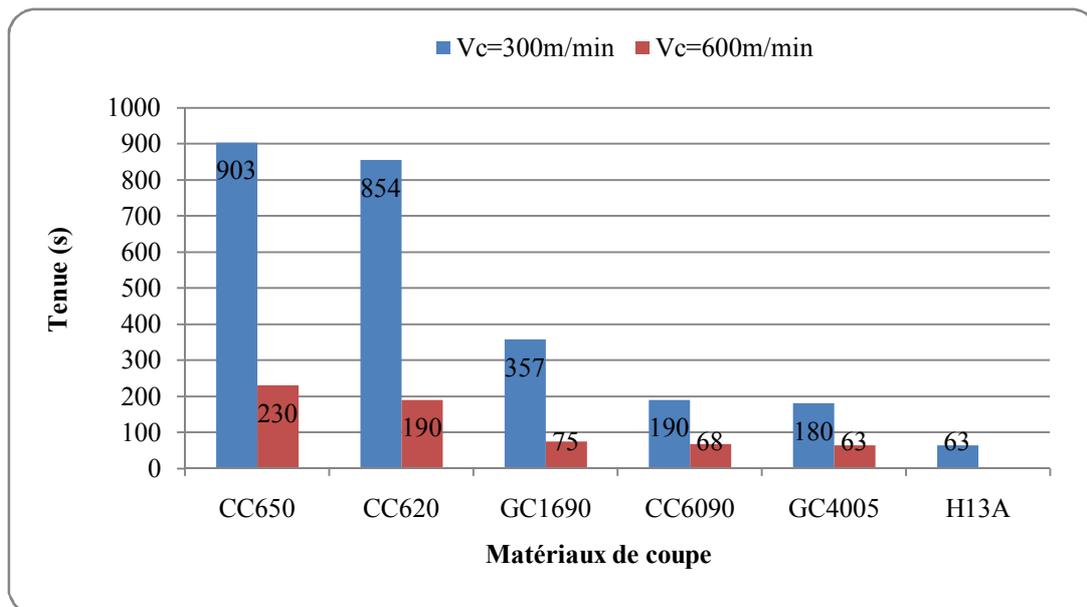
f) Carbure non revêtu H13A.

**Photos III-2** Evolution de l'usure (VB) à  $V_c = 600\text{m/min}$ ,  
 $f = 0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p = 0.5\text{mm}$

#### III-9-4 Tenues des outils

En général, la tenue d'un outil de coupe est influencée par une série de facteurs notamment le temps et la vitesse de coupe. Le critère d'usure recommandé par ISO et adopté dans cette étude est celui de l'usure en dépouille  $[VB] = 0,3\text{mm}$ .

Les histogrammes exposés dans la figure III-32 indiquent les tenues des différentes nuances de coupe pour une usure admissible  $[VB]=0.3\text{mm}$ . D'après les résultats obtenus, on remarque que les deux céramiques (CC650, CC620) sont plus performantes par rapport aux autres matériaux de coupe testés en termes de résistance à l'usure. Concernant le carbure revêtu GC4005 et le céramique CC6090, aux deux vitesses de coupe (300 et 600m/min), on a enregistré des tenues presque les mêmes pour les deux plaquettes. On a remarque que les outils qui contiennent revêtement donnent une bonne résistance à l'usure et par conséquent la tenue de l'outil devient plus grande. L'analyse des résultats montre que la durée de vie est très sensible à la variation de la vitesse de coupe.



**Figure III-32** Tenues des différents nuances de plaquettes de coupe pour une usure admissible [VB]=0.3mm, f=0.08mm/tr et ap=0.5mm.

**Tableau III-1** Effets des plages des vitesses de coupe sur la durée de vie du CC650, CC620 et GC1690 pour [VB] = 0,3mm.

Nuances de coupe	Rapport d'augmentation successive des vitesses de coupe		Rapport des tenues		Plage de variation de la vitesse (m/min)
	V <sub>2</sub> /V <sub>1</sub>		T <sub>2</sub> /T <sub>1</sub>		
CC650	V <sub>2</sub> /V <sub>1</sub>	2	T <sub>2</sub> /T <sub>1</sub>	0.25	V <sub>c</sub> = [300 – 600]
CC620	V <sub>2</sub> /V <sub>1</sub>	2	T <sub>2</sub> /T <sub>1</sub>	0.22	V <sub>c</sub> = [300 – 600]
GC1690	V <sub>2</sub> /V <sub>1</sub>	2	T <sub>2</sub> /T <sub>1</sub>	0.21	V <sub>c</sub> = [300 – 600]

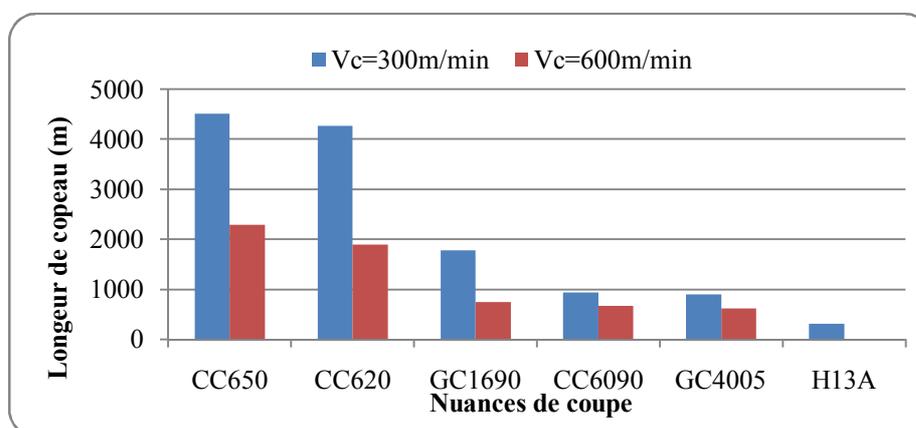
L'analyse des résultats (figure III-32) et (tableau III-1), montre que pour les vitesses de coupe [300 à 600] m/min et quand le rapport des vitesses est égal à 2, la durée de vie de L'outil CC650 chute de 75 %, pour l'outil CC620 elle chute de 78 % et pour l'outil GC1690 elle chute de 79 %. Il ressort de cette analyse que l'effet de la vitesse de coupe sur la durée de vie est plus marqué pour les plages de vitesses élevées. L'influence de la vitesse de coupe sur la productivité, exprimée en longueur de copeau enlevé est illustrée dans la figure III-28 et le tableau III-2 Le temps durant lequel est produite cette longueur de copeau (L) est égal à la durée de vie (T) correspondante à chaque vitesse de coupe (V<sub>c</sub>) testée. Elle est calculée d'après l'expression suivante :

$$L = V_c T \tag{III-1}$$

En comparant la longueur du copeau usiné par les différents matériaux de coupe à deux vitesses de coupe (tableaux III-2), il ressort que dans ces conditions la production de copeaux est maximale à 300m/min pour toute la nuance de coupe.

**Tableau III-2** Comparaison entre la longueur du copeau enlevé par les six matériaux de coupe.

Nuances	Vc=300m/min		Vc=600m/min	
	T (min)	L (m)	T (min)	L (m)
CC650	15.05	4515	3.83	2298
CC620	14.23	4269	3.16	1896
GC1690	5.95	1785	1.25	750
CC6090	3.16	948	1.13	678
GC4005	3	900	1.05	630
H13A	1.05	315	-	-



**Figure III-33** Comparaison entre la longueur de copeau enlevé par différents matériaux de coupe.

Il ressort de ces résultats qu'à la vitesse 300 m/min la céramique CC650 produit 4515mètres de copeau, la céramique CC620 produit 4269mètres, la céramique revêtue GC1690 produit 1785mètres, la céramique non revêtue CC6090 produit 948mètres, le carbure revêtu GC4005 produit 900 mètres, alors que le carbure H13A n'arrive à enlever que 315mètres. A la vitesse de 600m/min la céramique CC650 produit 2298mètres de copeau, la céramique CC620 ne produit que 1896mètres, la céramique GC1690 produit 750mètres de copeau, la céramique CC6090 produit 678mètres, alors que le carbure GC4005, produit 630m de copeau. De ce fait, il découle que la céramique CC650 est nettement plus productive que les autres nuances.

### **III-10 Conclusion**

Les essais de coupe pratiqués sur la fonte grise Ft 25, usiné en tournage à sec par les matériaux de coupe suivants : la céramique noire CC650, la céramique blanche CC620,

La céramique revêtue GC1690, la céramique non revêtue CC6090, le carbure non revêtu H13A et le carbure revêtu GC4005, nous ont permis d'évaluer les performances de ces outils de coupe en termes de résistance à l'usure, de terme d'efforts de coupe et de rugosité des surfaces usinées.

- L'analyse des courbes de l'évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse coupe montre que les valeurs des efforts obtenues par les six nuances sont presque du même ordre et la différence qui existe est due au type de matériau de coupe, de couches de revêtement et de la géométrie de brise-copeau.
- Les résultats de l'évolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe montrent que la nuance du céramique revêtu GC 1690 donne un bon état de surface. Nous justifions ici par l'influence de la couche du revêtement. Il a prouvé que les outils qui contiennent le revêtement donnent un bon état de surface.
- Les résultats de l'évolution de la rugosité en fonction du temps montrent que l'usure des outils influe sur l'évolution des différents critères de la rugosité. L'augmentation de l'usure VB engendre une dégradation de l'état de surface.
- L'analyse des résultats de l'usure illustre que le carbure H13A est moins résistant à l'usure et il a donné des durées de vie très limitées.
- On remarque que la durée de vie de la céramique noire CC650 est largement supérieure à celles des autres outils et par conséquent elle est la plus performante en termes d'usure.

# **Chapitre IV**

## **Modélisation de la rugosité et des efforts de coupe**

### IV-1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons déterminer les modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) et les paramètres étudiés (efforts de coupe et rugosité). Pour faire une analyse de variance et pour déterminer les constantes des modèles mathématiques et le coefficient de corrélation de chaque modèle ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse, nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé « MINITAB ». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur la rugosité et sur les efforts de coupe. Nous rappelons que l'usinage est réalisé par la céramique mixte CC 650.

### IV-2 Modèles de l'effort de coupe en fonction des paramètres de coupe

N°	$V_c$ (m/min)	$f$ (mm/tr)	$a_p$ (mm)	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_z$ (N)
1	300	0.08	0.4	33.97	49.58	65.16
2	300	0.08	0.8	92.16	74.63	144.52
3	300	0.08	1.2	130.18	94.3	199.57
4	300	0.16	0.4	46.84	72.24	113.16
5	300	0.16	0.8	121.68	107.8	244.5
6	300	0.16	1.2	168.35	130	315.72
7	300	0.24	0.4	56	97.27	156.75
8	300	0.24	0.8	145.81	136.49	327.53
9	300	0.24	1.2	196.69	159.69	422.16
10	400	0.08	0.4	33.49	48.09	62.4
11	400	0.08	0.8	86.59	71.58	137.15
12	400	0.08	1.2	122.47	85.18	177.19
13	400	0.16	0.4	45.97	70.13	111.3
14	400	0.16	0.8	120.63	108.33	241.57
15	400	0.16	1.2	161.51	126.32	305.94
16	400	0.24	0.4	55.86	89.15	155.55
17	400	0.24	0.8	143.72	132.51	305.08
18	400	0.24	1.2	186.42	153.05	403.75
19	600	0.08	0.4	33.3	47.1	57.03
20	600	0.08	0.8	76.94	69.21	122.95
21	600	0.08	1.2	115.88	84.75	120
22	600	0.16	0.4	43.58	68.55	104.61
23	600	0.16	0.8	118.49	104.05	230.4
24	600	0.16	1.2	157.8	122.25	292.57
25	600	0.24	0.4	51.82	87.64	148.63
26	600	0.24	0.8	138.65	130.07	304.23
27	600	0.24	1.2	181.64	149.08	376.73

Tableau IV-1 Résultats des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe (plan complet ( $N=3^3$ )).

Pour étudier l'impact des différents paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) sur la rugosité de la surface et les efforts de coupe, nous avons dressé un plan factoriel de 3 facteurs, chaque facteur à trois niveaux. Le traitement des résultats expérimentaux obtenus aux tableaux IV-1 nous a permis de déterminer des modèles mathématiques statistiques, exprimant la relation entre (les différentes Composantes de l'effort de coupe et les critères de rugosité) et les paramètres du régime de coupe.

#### IV-2-1 Modélisation de l'effort axial $F_x$

Les résultats présentés dans le tableau IV-2 sont analysés par le logiciel MINITAB. En appliquant l'analyse de la variance (ANOVA), nous considérons un intervalle de confiance de 95% ( $\alpha=0.05$ ), on constate que tous les paramètres avec les interactions entre eux ont un impact significatif sur l'effort axial, sauf le terme  $V_c \times f$ , puisque sa valeur de la probabilité P est supérieure à 0.05. On a remarqué que la profondeur de passe est le facteur le plus influant car sa contribution est de 82.36%.

Source	DF	SS	MS	F	P	contribution%
$V_c$	2	301,0	150,5	34,52	0,000	0,41
$f$	2	10494,0	5247,0	1203,58	0,000	14,61
$a_p$	2	59138,3	29569,1	6782,69	0,000	82,36
$V_c * f$	4	15,7	3,9	0,90	0,508	0,02
$V_c * a_p$	4	94,7	23,7	5,43	0,021	0,13
$f * a_p$	4	1722,8	430,7	98,80	0,000	2,39
Error	8	34,9	4,4			
Total	26	71801,3				

**Tableau IV-2** Résultats de l'analyse de variance pour  $F_x$

##### A/ Modèle généralisé

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

$$F_x = -11,421 + V_c 0,002 + f 10,595 + a_p 103,631 + V_c * f 0,026 - V_c * a_p 0,040 + f * a_p 347,1$$

(IV-1)  
 $R^2 = 97,51\%$

##### B/ Modèle réduit

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

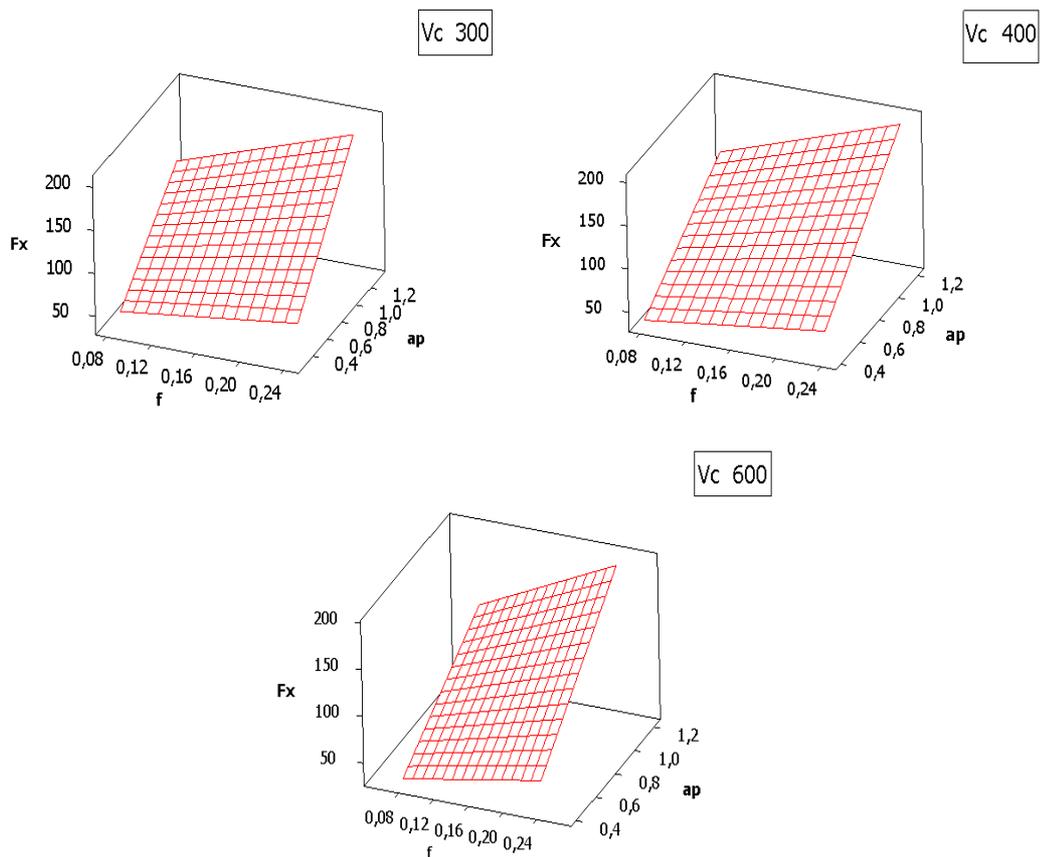
$$F_x = -13,251 + V_c 0,006 + f 22,035 + a_p 103,631 - V_c * a_p 0,040 + f * a_p 347,135$$

(IV-2)  
 $R^2 = 97,50\%$

**C/ Diagramme de surface pour  $F_x$  en fonction de  $V_c$ ,  $a_p$ , et  $f$ .**

La surface de réponse de la composante de l'effort de coupe  $F_x$  en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur figure IV-1. Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur l'effort  $F_x$

La présentation en 3D (figure IV-1) montre que la pente de la profondeur de passe est supérieure par rapport aux autres facteurs, ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l'effort axial suivi par l'avance et en dernier lieu par la vitesse de coupe qui a un effet contraire par rapport aux autres facteurs.



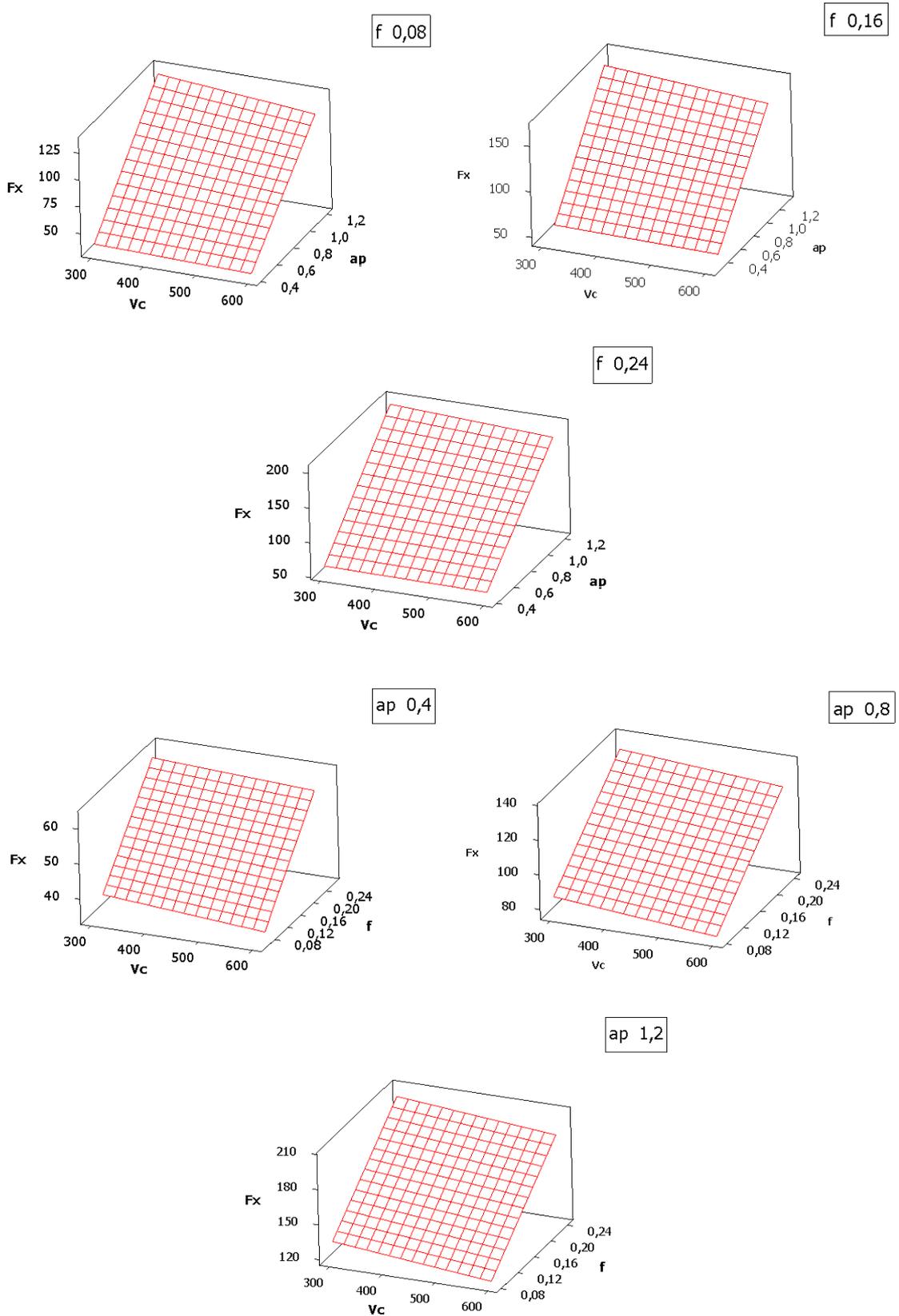


Figure IV-1 Diagramme de surface pour  $F_x$  en fonction de  $V_c$ ,  $ap$  et  $f$ .

**D/ Graphique des effets principaux pour Fx**

La figure IV-2 illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur l'effort axial. On a remarqué que l'augmentation de la vitesse de coupe minimise Fx. L'effort axial s'élève légèrement avec l'augmentation de l'avance. La profondeur de passe est plus prépondérante car sa pente est plus grande.

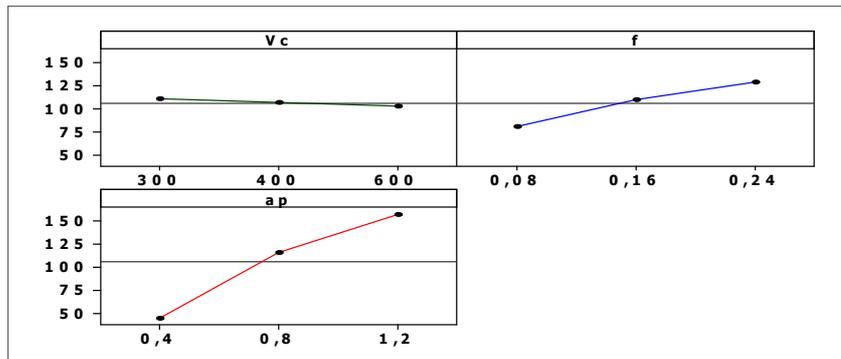
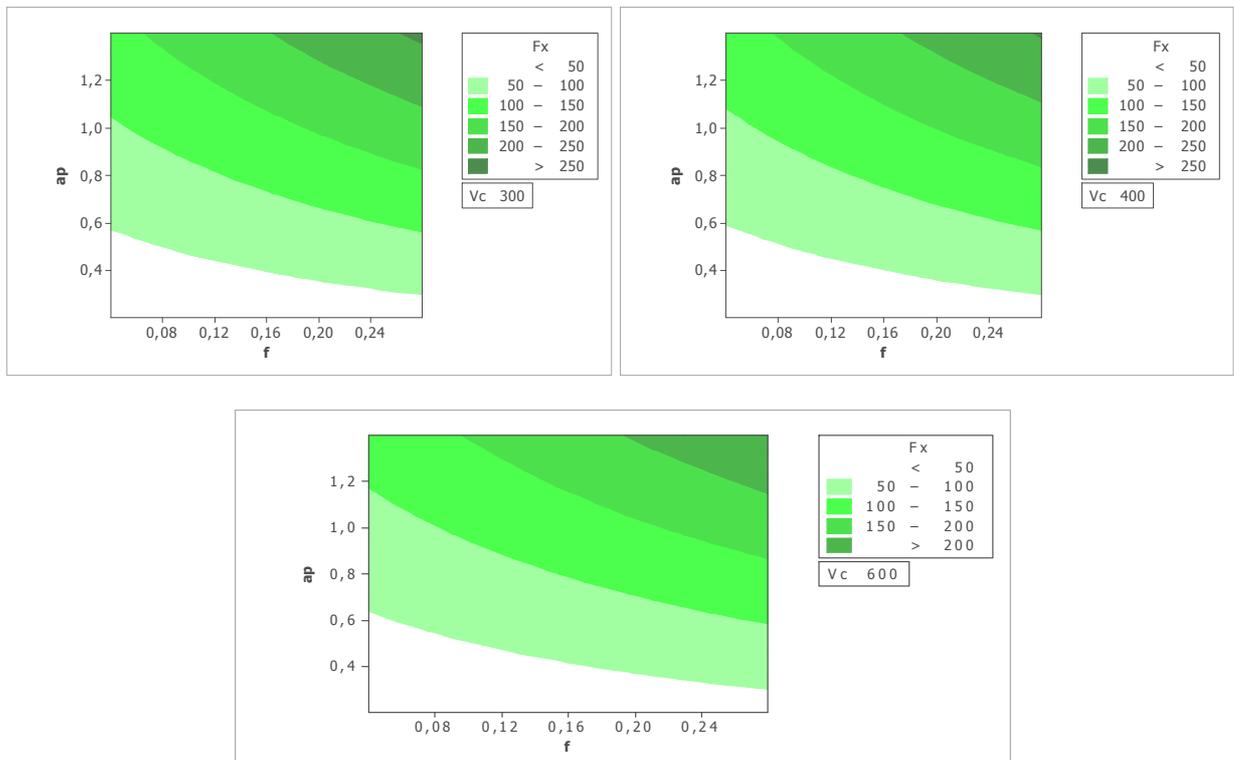


Figure IV-2 Graphes des effets de Vc, f et ap sur Fx

**E/ Graphique de contour de Fx**

La figure IV-3 montre le domaine d'influence des paramètres de régime de coupe sur l'effort de coupe Fx. Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse (Fx), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.



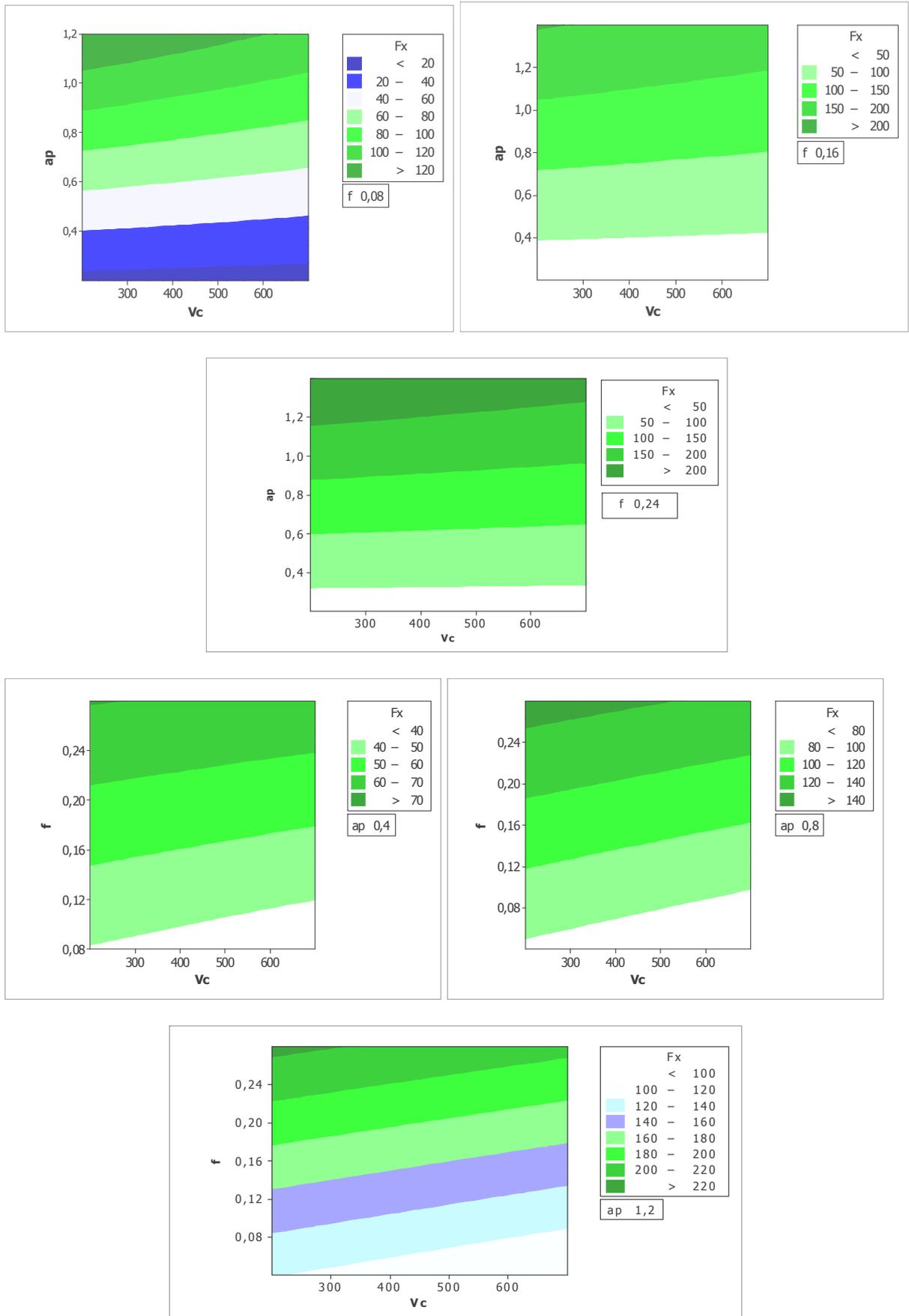


Figure IV-3 Graphique de contours de  $F_x$

### IV-2-2 Modélisation de l'effort radial $F_y$

Le tableau (V-3) présente l'analyse de la variance ANOVA pour la composante radiale ( $F_y$ ). On remarque que seuls les termes principaux ont un impact significatif. Par contre les différentes interactions n'ont pas un effet significatif sur l'effort radial, sauf le terme  $f^*ap$ , puisque sa valeur de la probabilité  $P$  inférieure 0.05. On a remarqué que la vitesse d'avance est le facteur le plus influant car sa contribution est de 51,72%, suivie par la profondeur de passe avec une contribution de 45%.

Source	DF	SS	MS	F	P	contribution%
Vc	2	200,2	100,1	62,27	0,000	0,710
f	2	14552,0	7276,0	4525,81	0,000	51,720
ap	2	12870,4	6435,2	4002,83	0,000	45,740
Vc*f	4	20,8	5,2	3,23	0,074	0,073
Vc*ap	4	22,2	5,5	3,45	0,064	0,078
f*ap	4	457,5	114,4	71,15	0,000	1,620
Error	8	12,9	1,6			
Total	26	28135,9				

**Tableau IV-3** Résultats de l'analyse de variance pour  $F_y$

#### A/ Modèle généralisé

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

$$F_y = 11,280 + Vc 0,002 + f 238,970 + ap 44,371 - Vc * f 0,061 - Vc * ap 0,016 + f * ap 177,630 \quad (IV-3)$$

$$R^2 = 98,10 \%$$

#### B/ Modèle réduit

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

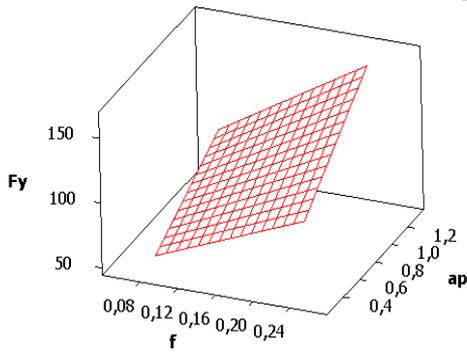
$$F_y = 20,977 - Vc 0,021 + f 212,493 + ap 37,546 + f * ap 177,630 \quad (IV-4)$$

$$R^2 = 98,03 \%$$

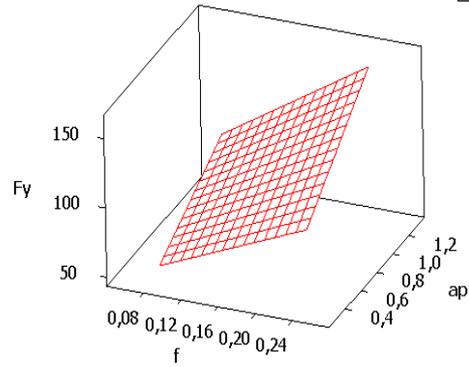
#### C/ Diagramme de surface et le graphe des effets moyens pour $F_y$ en fonction de Vc, ap, et f.

La surface de réponse présentée sur la figure IV-4 ainsi que les graphes des effets moyens sur la figure IV-5, montrent que l'effort radial est inversement proportionnel avec la vitesse de coupe. L'effort  $F_y$  est plus affecté par l'augmentation de la profondeur de passe et la vitesse d'avance.

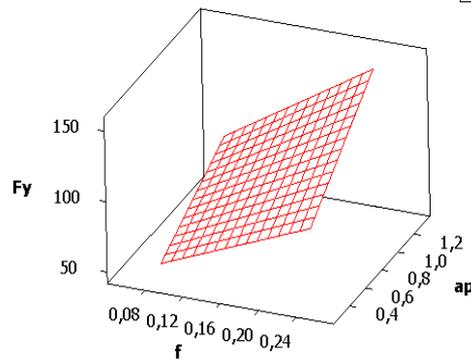
Vc 300



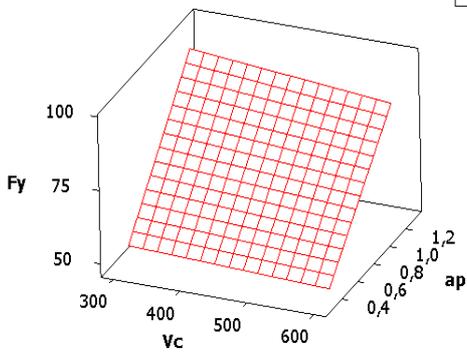
Vc 400



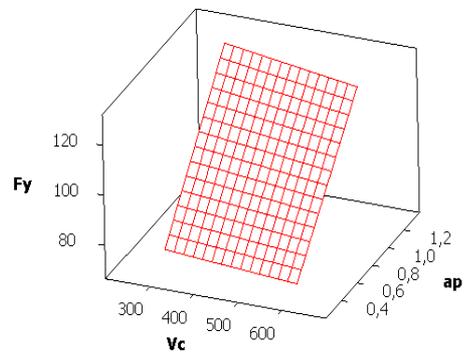
Vc 600



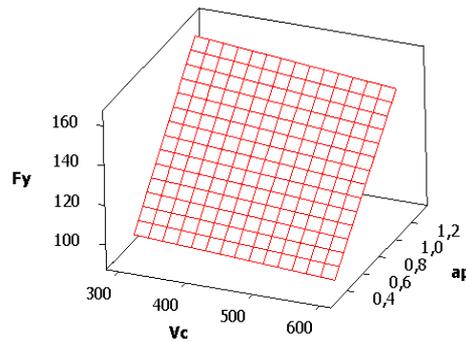
f 0,08



f 0,16



f 0,24



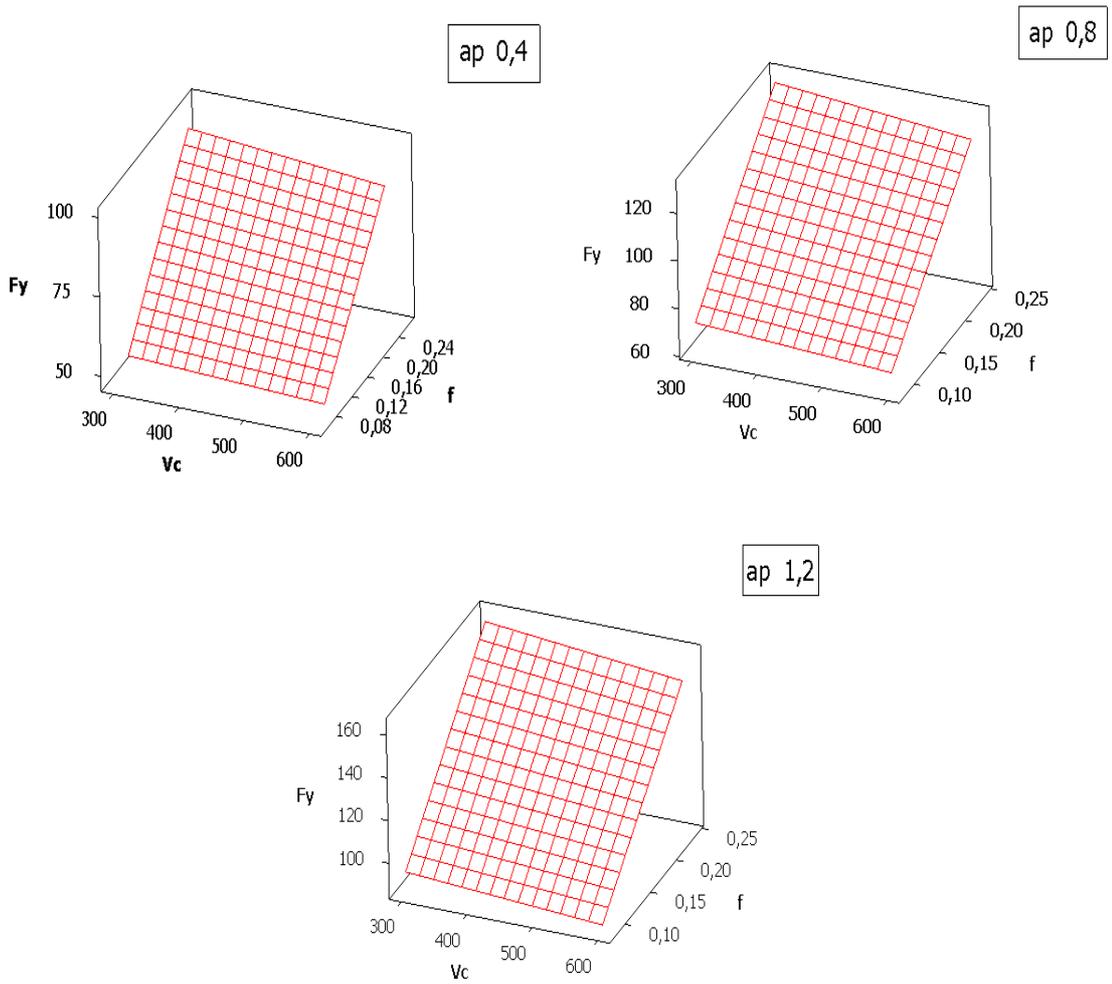


Figure IV-4 Diagramme de surface pour  $F_y$  en fonction de  $V_c$ ,  $ap$ , et  $f$ .

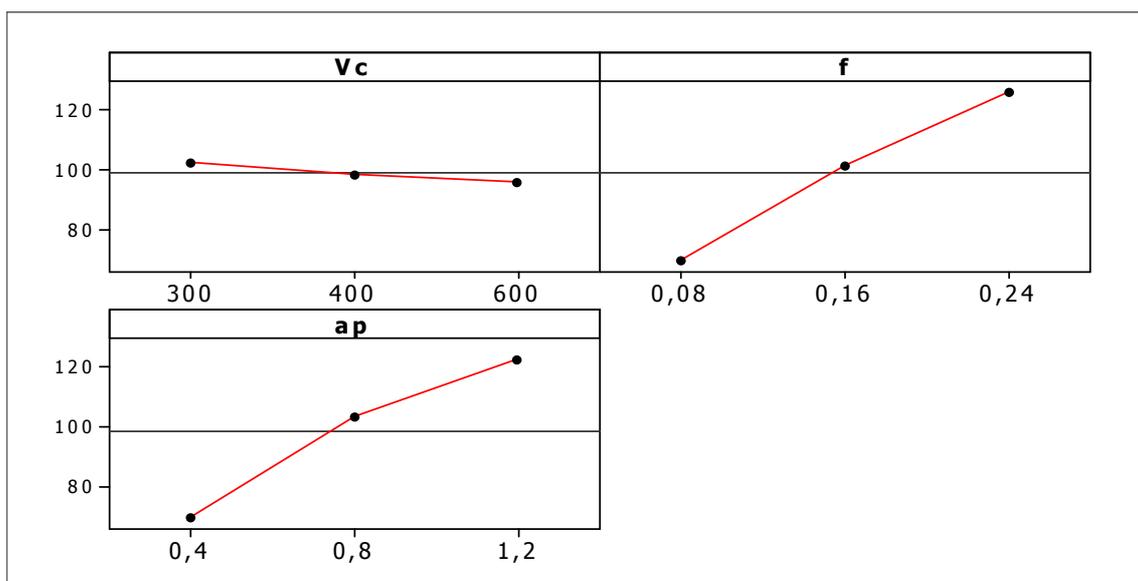
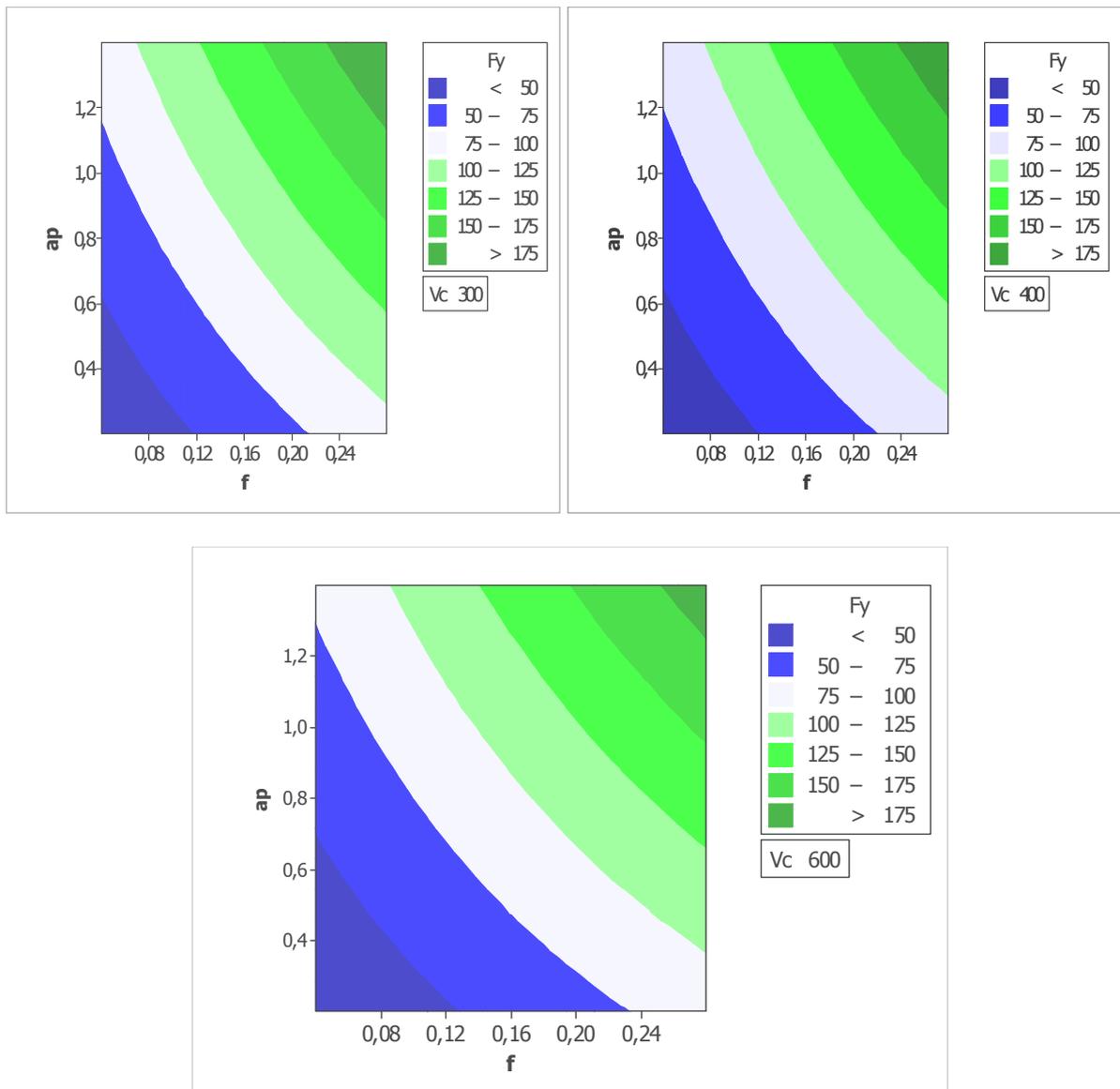


Figure IV-5 Graphes des effets de  $V_c$ ,  $f$  et  $ap$  sur  $F_y$ .

### D/ Graphique de contour de $F_y$

La figure IV-6 montre le domaine d'influence de la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe sur l'effort de coupe  $F_y$ . On remarque dans cette figure que la zone bleue foncée indique les valeurs les plus faibles de l'effort radial  $F_y$ . Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse ( $F_y$ ), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.



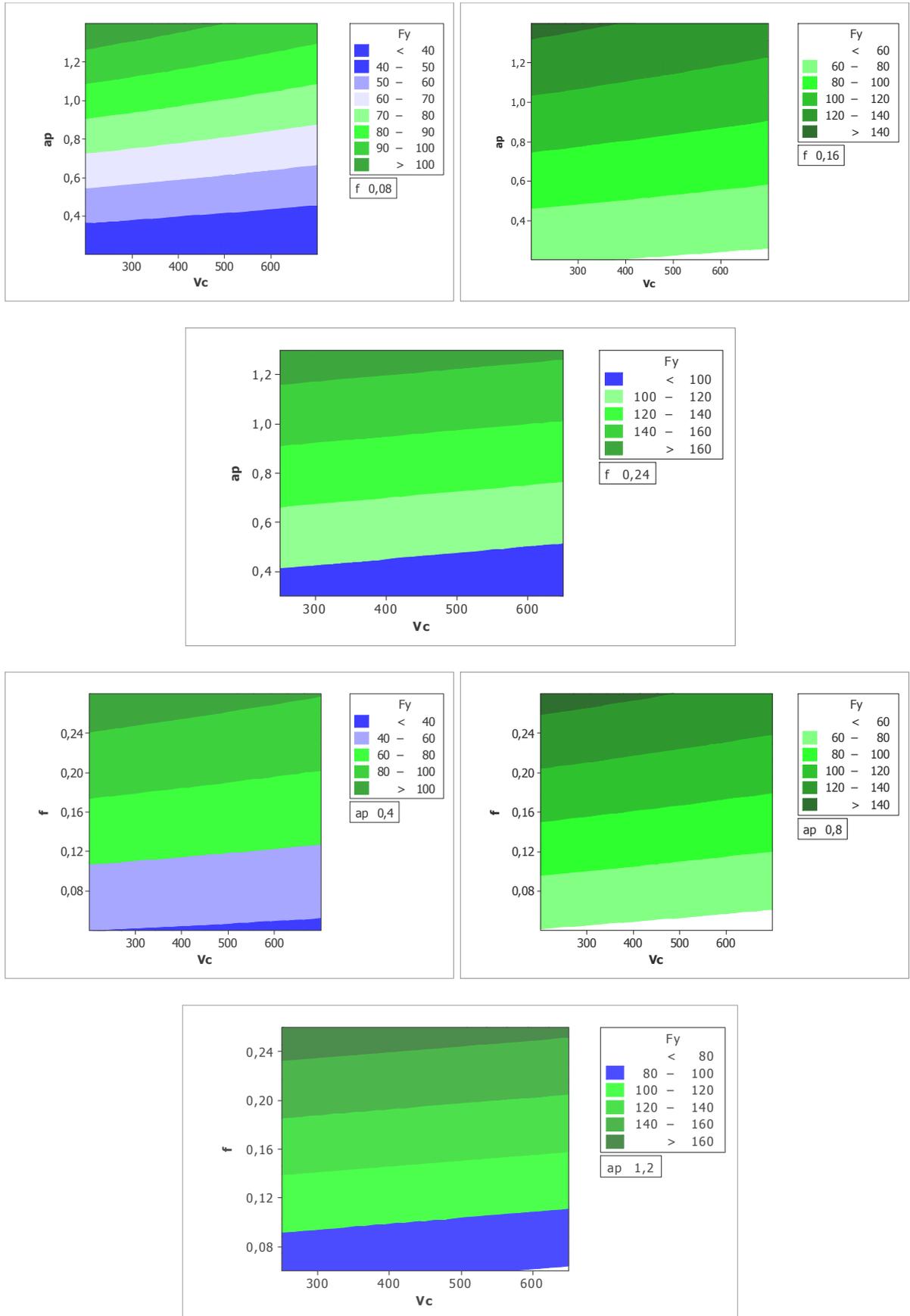


Figure IV-6 Graphique de contour de  $F_y$ .

### IV-2-3 Modélisation de l'effort tangentiel Fz

Le tableau (IV-4) présente l'analyse de variance ANOVA pour la composante tangentielle (Fz). On constate que tous les paramètres avec les interactions entre eux ont un impact significatif sur l'effort tangentiel, sauf le terme Vc\*f, puisque sa valeur de la probabilité P est supérieure à 0.05. La profondeur de passe est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est de 50,74%, suivie par l'avance de 42,20%. L'analyse montre aussi que la vitesse a une influence négligeable puisque le pourcentage de contribution de Vc est de 0.99 %.

Source	DF	SS	MS	F	P	contribution%
Vc	2	3041	1521	19,91	0,001	0,99
f	2	128425	64212	840,89	0,000	42,20
ap	2	154403	77201	1010,98	0,000	50,74
Vc*f	4	410	102	1,34	0,335	0,13
Vc*ap	4	1433	358	4,69	0,030	0,47
f*ap	4	15956	3989	52,24	0,000	5,24
Error	8	611	76			
Total	26	304279				

**Tableau IV-4** Résultats de l'analyse de variance pour Fz

#### A/ Modèle généralisé

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

$$Fz = -2,58 + Vc0,01 + f46,13 + ap122,44 + Vc*f0,26 - Vc*ap0,17 + f*ap1118,59 \quad (IV-5)$$

$$R^2 = 97,44\%$$

#### B/ Modèle réduit

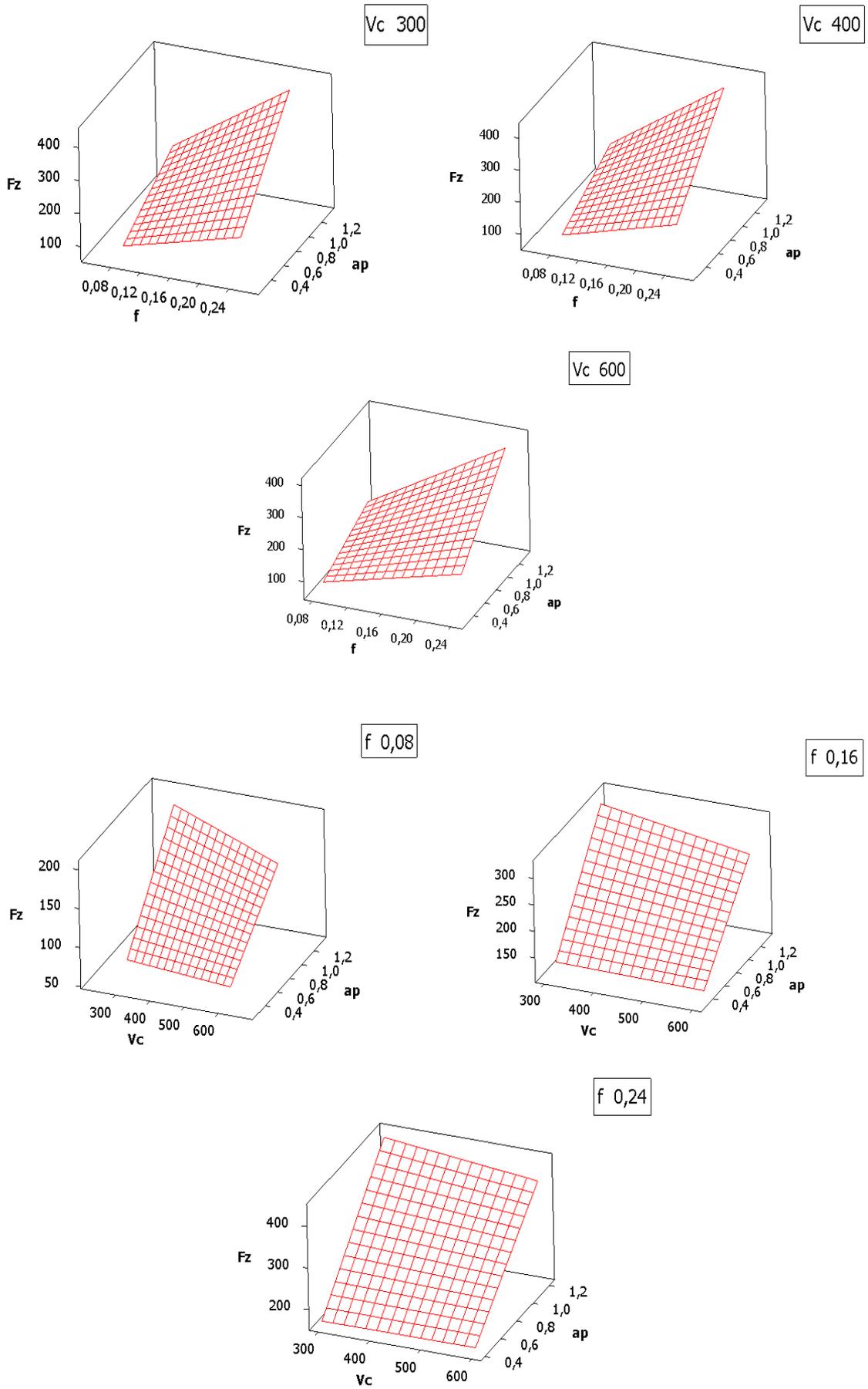
Le modèle qui décrit la variation de Fy en fonction des facteurs et interactions significatif peut être défini de la façon suivante :

$$Fz = -20,29 + Vc0,05 + f156,82 + ap122,44 - Vc*ap0,17 + f*ap1118,59 \quad (IV-6)$$

$$R^2 = 97,40\%$$

#### C/ Diagramme de surface pour Fz en fonction de Vc, ap, et f.

L'évolution de l'effort tangentiel en fonction de (Vc, f et ap) figure IV-7 illustre que ce dernier est affecté par la profondeur de passe et l'avance.



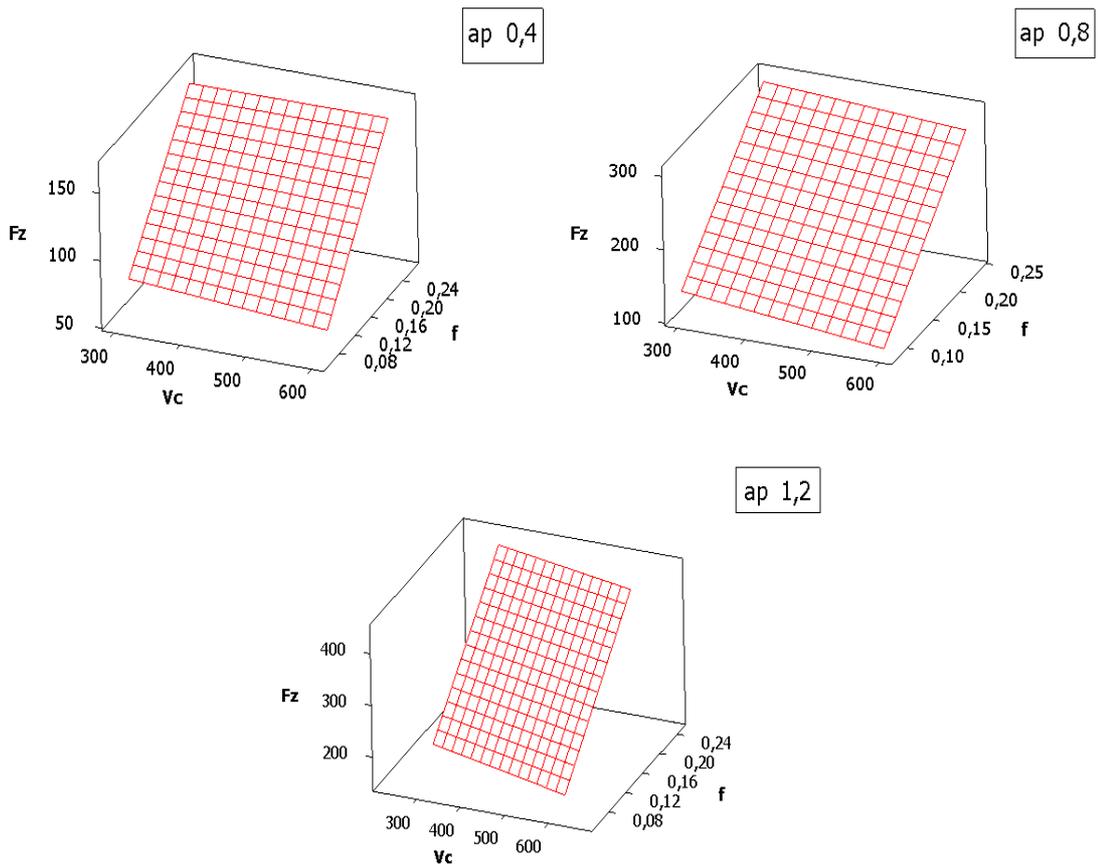


Figure IV-7 Diagramme de surface pour  $F_z$  en fonction de  $V_c$ ,  $a_p$  et  $f$ .

**D/ Graphique des effets principaux pour  $F_z$**

La figure IV-8 illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur l'effort tangentielle. On remarque que l'augmentation de la vitesse de coupe minimise  $F_z$ . L'effort tangentiel s'élève avec l'augmentation de l'avance. La profondeur de passe est plus prépondérante car sa pente est plus grande (contribution est de 50,74%).

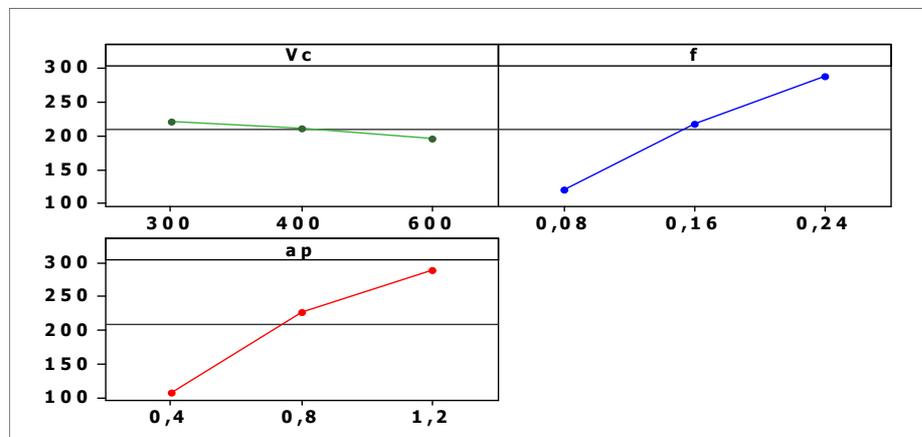
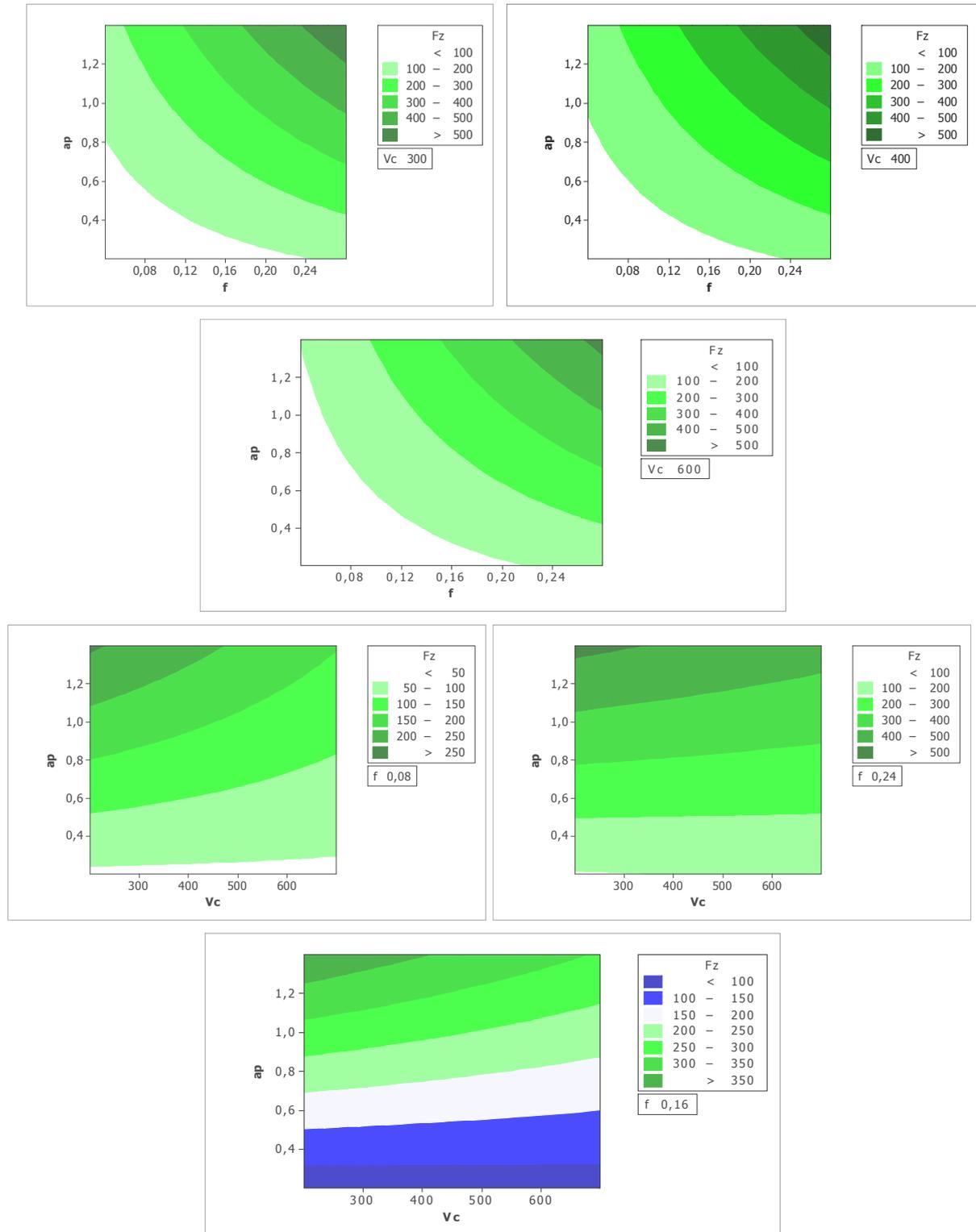
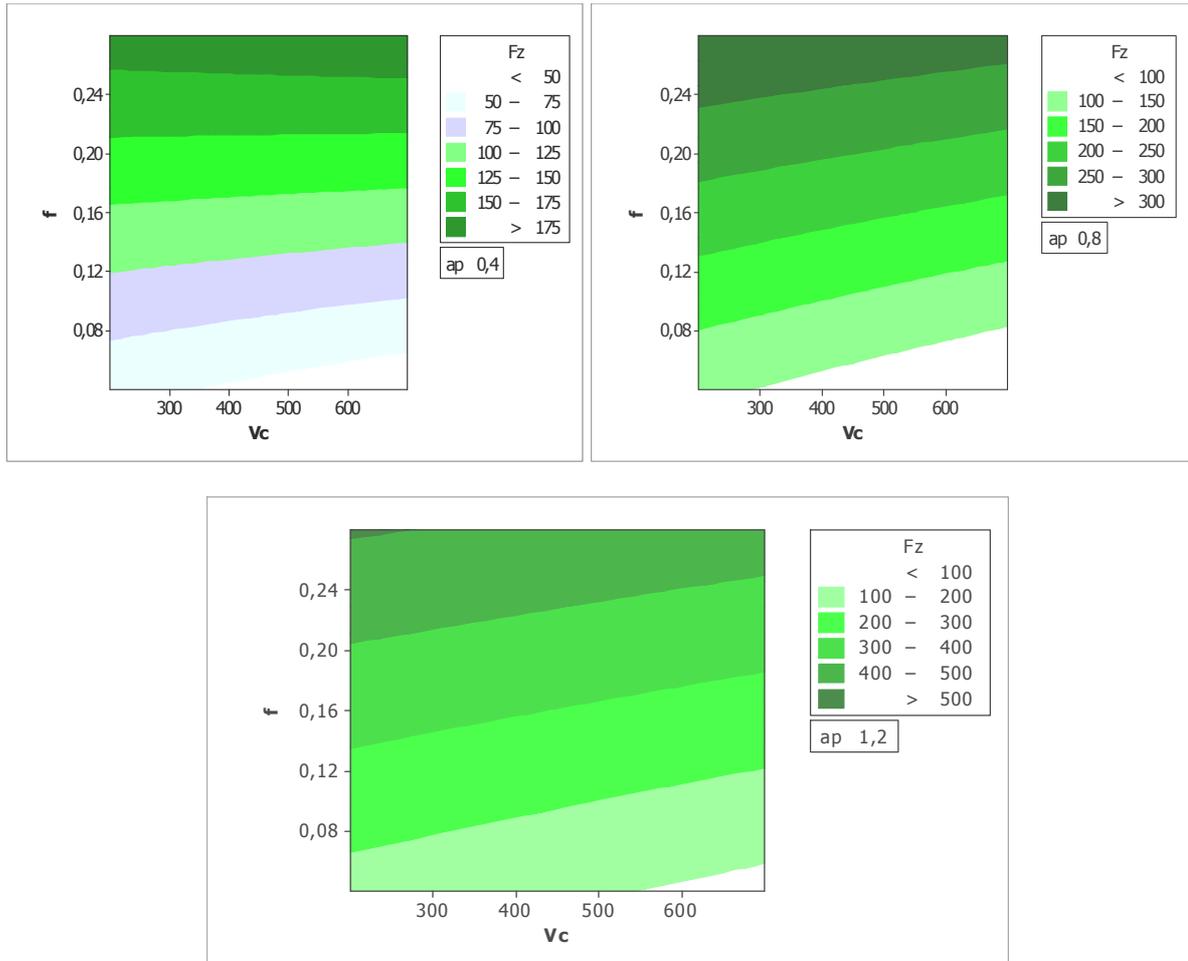


Figure IV-8 Graphes des effets de  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$  sur  $F_z$ .

**E/ Graphique de contour de Fz**

La figure IV-9 montre le domaine d'influence de la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe sur l'effort de coupe Fz. Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse (Fz), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.





**Figure IV-9** Graphique de contours de  $F_z$ .

### IV-3 Modèles de la rugosité en fonction des paramètres de coupe

Les valeurs des critères de rugosité présentées dans le tableau IV-5, ont été obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe (matrice de planification des expériences pour un plan  $3^3$ ), lors de l'usinage de la fonte grise Ft25 avec un outil en céramique CC650.

Pour étudier l'impact des différents paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) sur la rugosité de la surface, nous avons dressé un plan factoriel de 3 facteurs, chaque facteur à trois niveaux. Le traitement des résultats expérimentaux obtenus aux tableaux IV-5 nous a permis de déterminer des modèles mathématiques statistiques, exprimant la relation entre (les différents critères de rugosité) et les paramètres du régime de coupe.

N°	Vc(m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )
1	300	0.08	0.4	0.81	6.32
2	300	0.08	0.8	0.88	6.63
3	300	0.08	1.2	0.99	7.04
4	300	0.16	0.4	1.44	9.42
5	300	0.16	0.8	1.62	10.15
6	300	0.16	1.2	1.77	11.23
7	300	0.24	0.4	2.63	13.48
8	300	0.24	0.8	2.73	13.79
9	300	0.24	1.2	2.92	14.49
10	400	0.08	0.4	0.69	4.98
11	400	0.08	0.8	0.70	5.84
12	400	0.08	1.2	0.86	6.43
13	400	0.16	0.4	1.36	8.36
14	400	0.16	0.8	1.44	8.84
15	400	0.16	1.2	1.72	9.35
16	400	0.24	0.4	2.55	13.32
17	400	0.24	0.8	2.71	13.49
18	400	0.24	1.2	2.82	14.39
19	600	0.08	0.4	0.61	4.66
20	600	0.08	0.8	0.64	4.8
21	600	0.08	1.2	0.7	5.86
22	600	0.16	0.4	1.27	6.89
23	600	0.16	0.8	1.32	7.48
24	600	0.16	1.2	1.46	8.16
25	600	0.24	0.4	2.07	12.12
26	600	0.24	0.8	2.61	13.09
27	600	0.24	1.2	2.69	13.29

**Tableau IV-5** Résultats de la rugosité en fonction des paramètres du régime de coupe

**IV-3-1 Modélisation de la rugosité Ra** Le tableau IV-6 présente l'analyse de variance pour Ra. On remarque que seuls les termes principaux ont un impact significatif. Par contre les différentes interactions n'ont pas une signification sur le critère Ra puisque la valeur de probabilité P est supérieure à 0.05. La vitesse d'avance est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est de 95,08 %.

Source	DF	SS	MS	F	P	contribution%
Vc	2	0,33076	0,16538	19,06	0,001	1,95
f	2	16,04229	8,02114	924,63	0,000	95,08
ap	2	0,34729	0,17364	20,02	0,001	2,01
Vc*f	4	0,01429	0,00357	0,41	0,796	0,08
Vc*ap	4	0,01302	0,00326	0,38	0,820	0,07
f*ap	4	0,06236	0,01559	1,80	0,223	0,36
Error	8	0,06940	0,00868			
Total	26	16,87940				

**Tableau IV-6** Résultats de l'analyse de variance pour Ra

### A/ Modèle généralisé

L'équation (IV-7) exprime le modèle de la rugosité Ra avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

$$Ra = 0,0455 - Vc \cdot 0,0007 + f \cdot 10,8884 - ap \cdot 0,0256 - Vc \cdot f \cdot 0,0017 + Vc \cdot ap \cdot 0,0001 + f \cdot ap \cdot 1,9271 \quad (IV-7)$$

$$R^2 = 97,76 \%$$

### B/ Modèle réduit

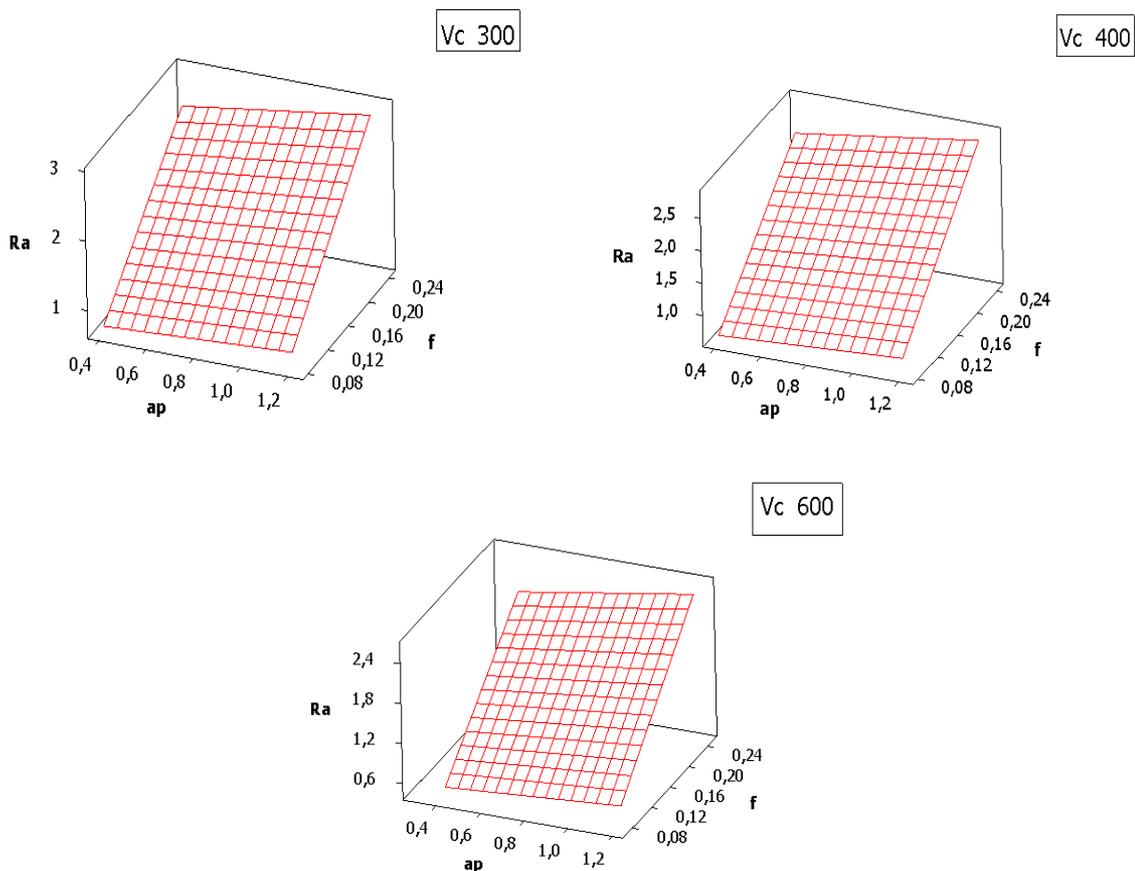
En introduisant seulement les termes significatifs dans le modèle, nous obtenons l'équation de régression suivante :

$$Ra = -0,1362 - Vc \cdot 0,0009 + f \cdot 11,7014 + ap \cdot 0,3472 \quad (IV-8)$$

$$R^2 = 97,46 \%$$

### C/ Diagramme de surface pour Ra en fonction de Vc, ap, et f.

La figure IV-10 montre que la rugosité Ra est très affectée par l'avance. On remarque que Ra diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe.



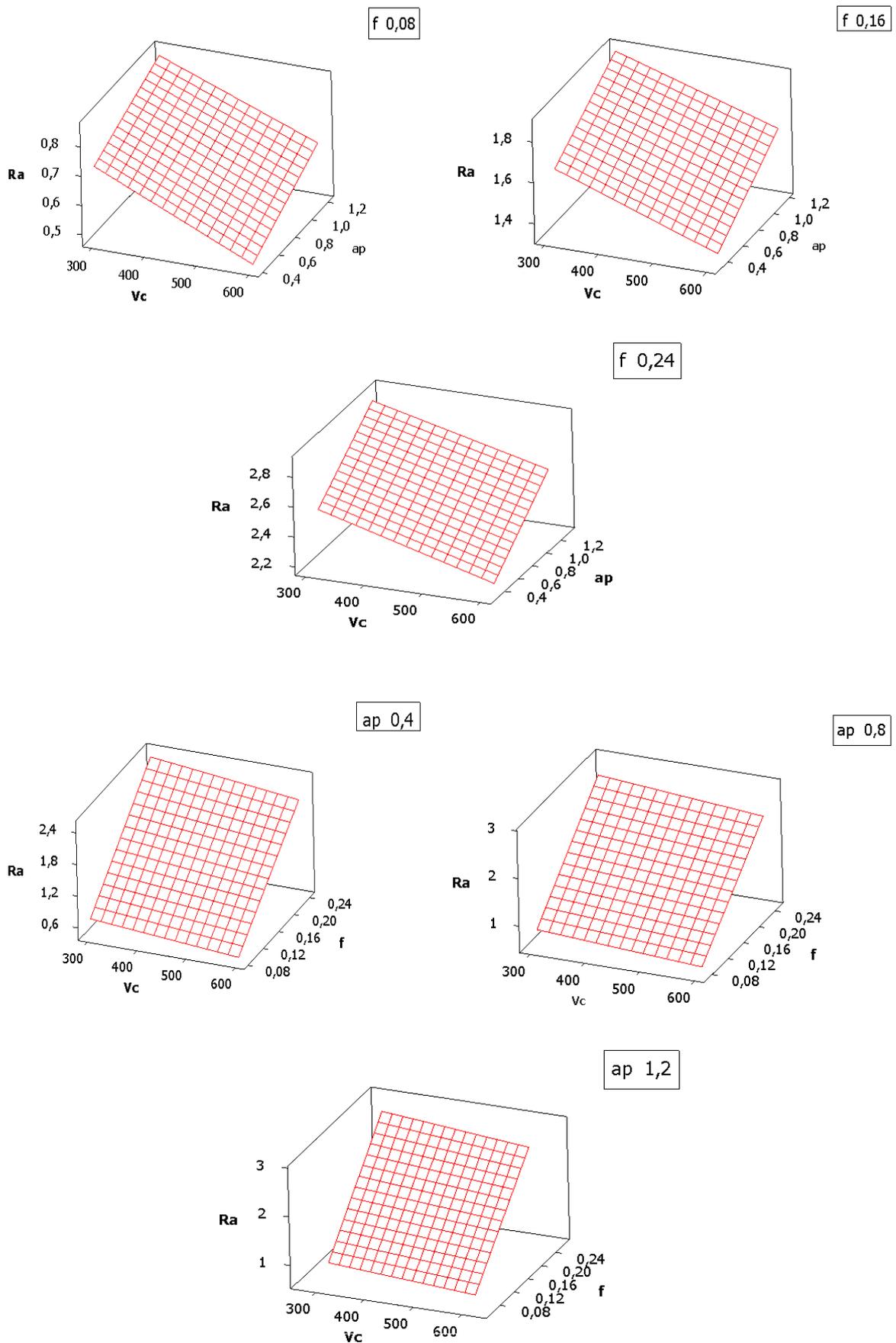
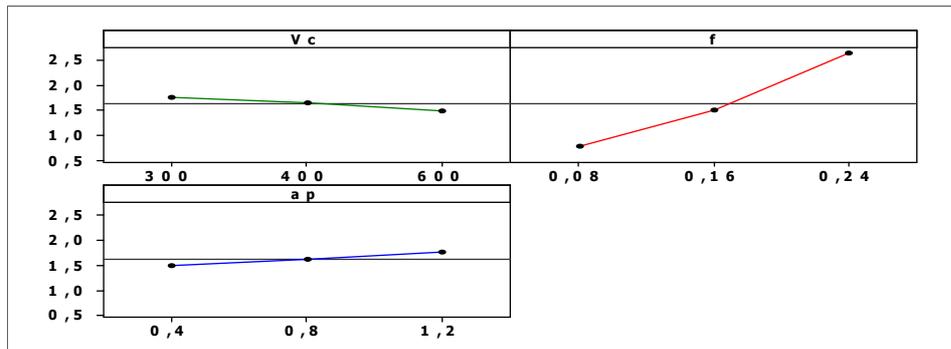


Figure IV-10 Surface de réponse de la rugosité ( $R_a$ ) en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ .

**D/ Graphique des effets principaux pour Ra**

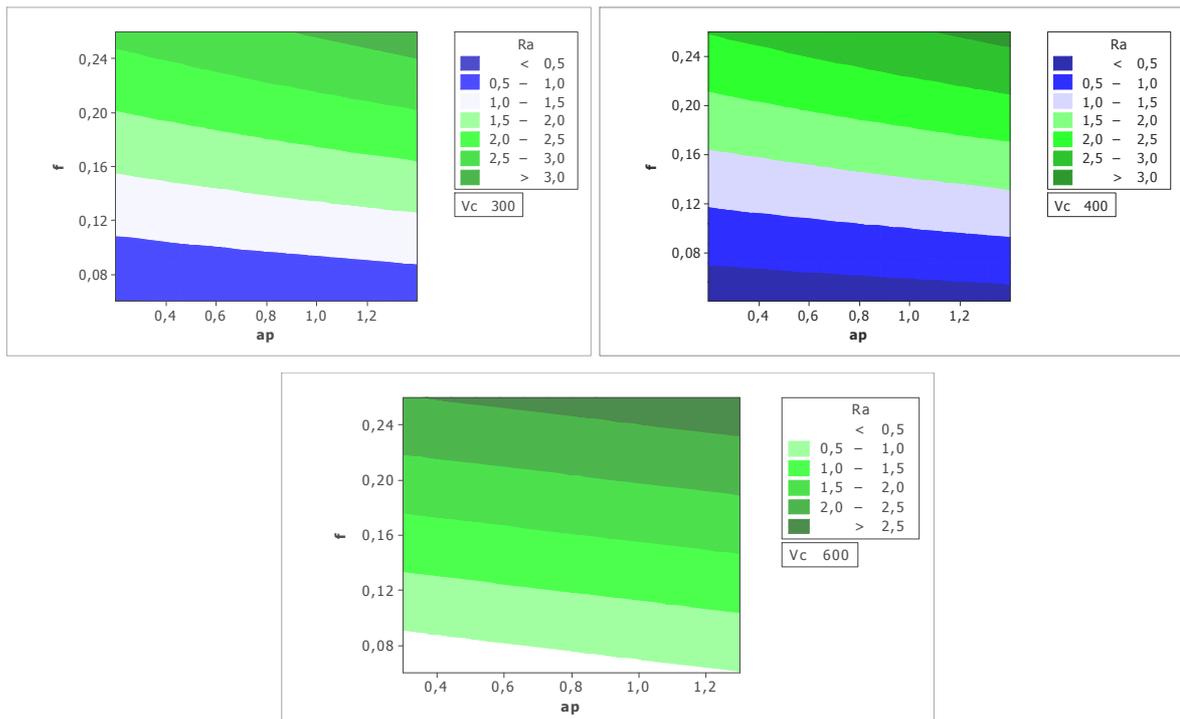
La figure IV-11 illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur la rugosité Ra. On a remarqué que l'augmentation de la vitesse de coupe minimise Ra. La rugosité Ra s'élève légèrement avec l'augmentation de la profondeur de passe. L'avance est plus prépondérante car sa pente est plus grande (contribution est de 95.08 %).



**Figure IV-11** Graphes des effets de Vc, f et ap sur Ra.

**E/ Graphique de contour de Ra**

La figure IV-12 montre le domaine d'influence de la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe sur la rugosité Ra. Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse (Ra), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.



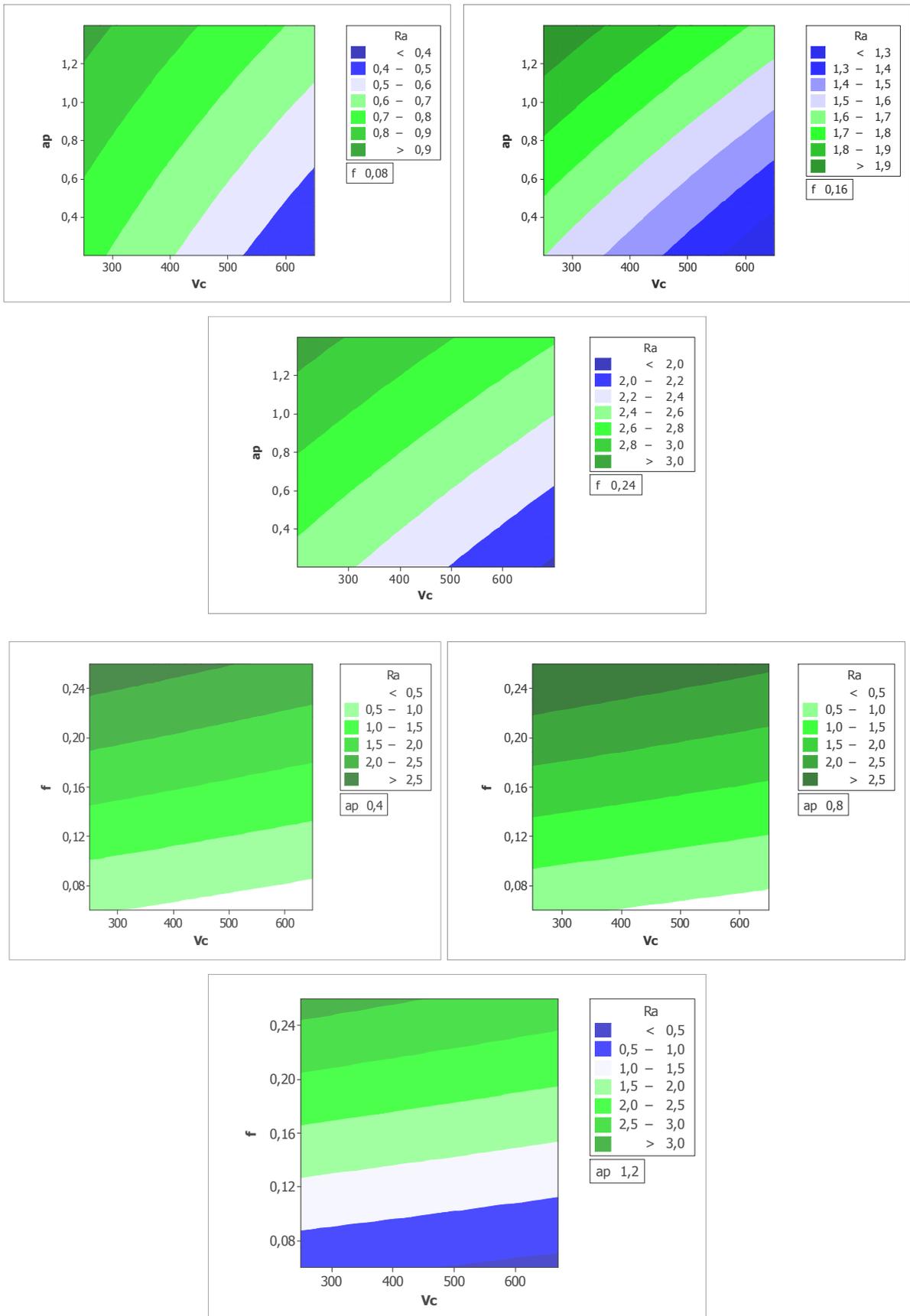


Figure IV-12 Graphique de contours de Ra.

### IV-3-2 Modélisation de la rugosité Rt

Le tableau IV-7 présente l'analyse de variance pour Rt. On remarque dans le tableau IV-7 que seule l'avance a une influence importante sur la rugosité Rt ( $P < 0.05$ ) avec une contribution de 91.69 %. Par contre, les interactions Vc\*ap et f\*ap n'ont pas un effet significatif.

Source	DF	SS	MS	F	P
Vc	2	14,602	7,301	90,46	0,000
f	2	267,500	133,750	1657,07	0,000
ap	2	6,394	3,197	39,61	0,000
Vc*f	4	2,496	0,624	7,73	0,007
Vc*ap	4	0,012	0,003	0,04	0,997
f*ap	4	0,070	0,018	0,22	0,922
Error	8	0,646	0,081		
Total	26	291,720			

**Tableau IV-7** Résultats de l'analyse de variance pour Rt

#### A/ Modèle généralisé

L'équation (V-7) exprime le modèle de la rugosité Rt avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

$$Rt = 3,6036 - Vc 0,0071 + f 44,9568 + ap 1,4664 + Vc*f 0,0072 + Vc*ap 0,0002 - f*ap 0,3125 \quad (IV-9)$$

$$R^2 = 97,51\%$$

#### B/ Modèle réduit

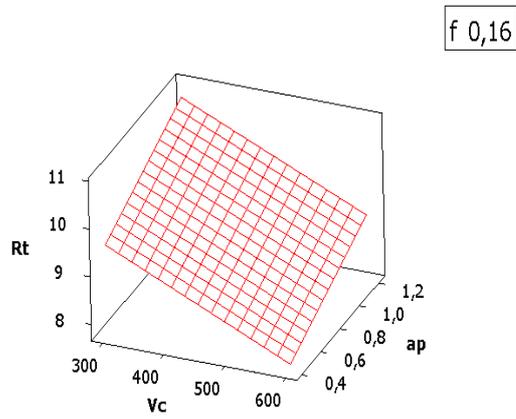
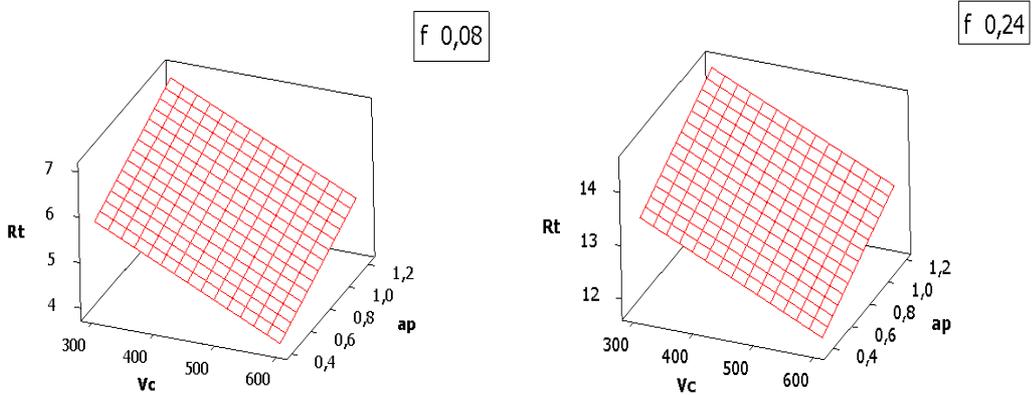
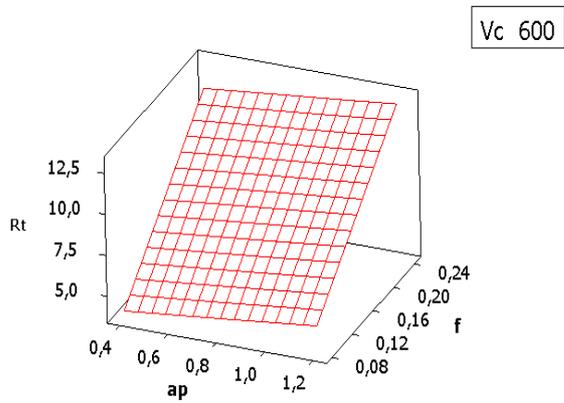
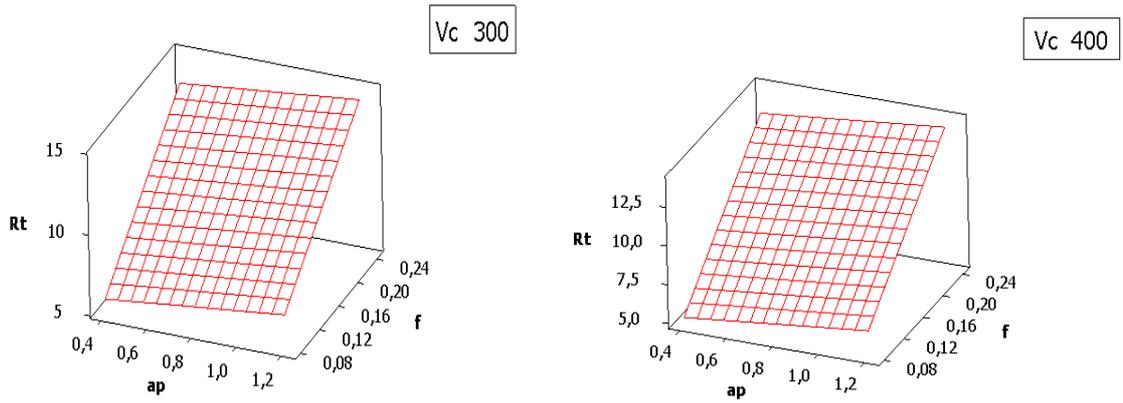
En introduisant seulement les termes significatifs dans le modèle, nous obtenons l'équation de régression suivante :

$$Rt = 3,5889 - Vc 0,0070 + f 44,7068 + ap 1,4847 + Vc*f 0,0072 \quad (IV-10)$$

$$R^2 = 97,51\%$$

#### C/ Diagramme de surface pour Rt en fonction de Vc, ap et f

La surface de la réponse de la rugosité Rt en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur le graphique (figure IV-13). Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur Rt et. Pour trois vitesses de coupe (300, 400 et 600), trois vitesses d'avance (0.08, 0.16 et 0.24) et pour trois profondeur de passe (0.4, 0.8 et 1.2).



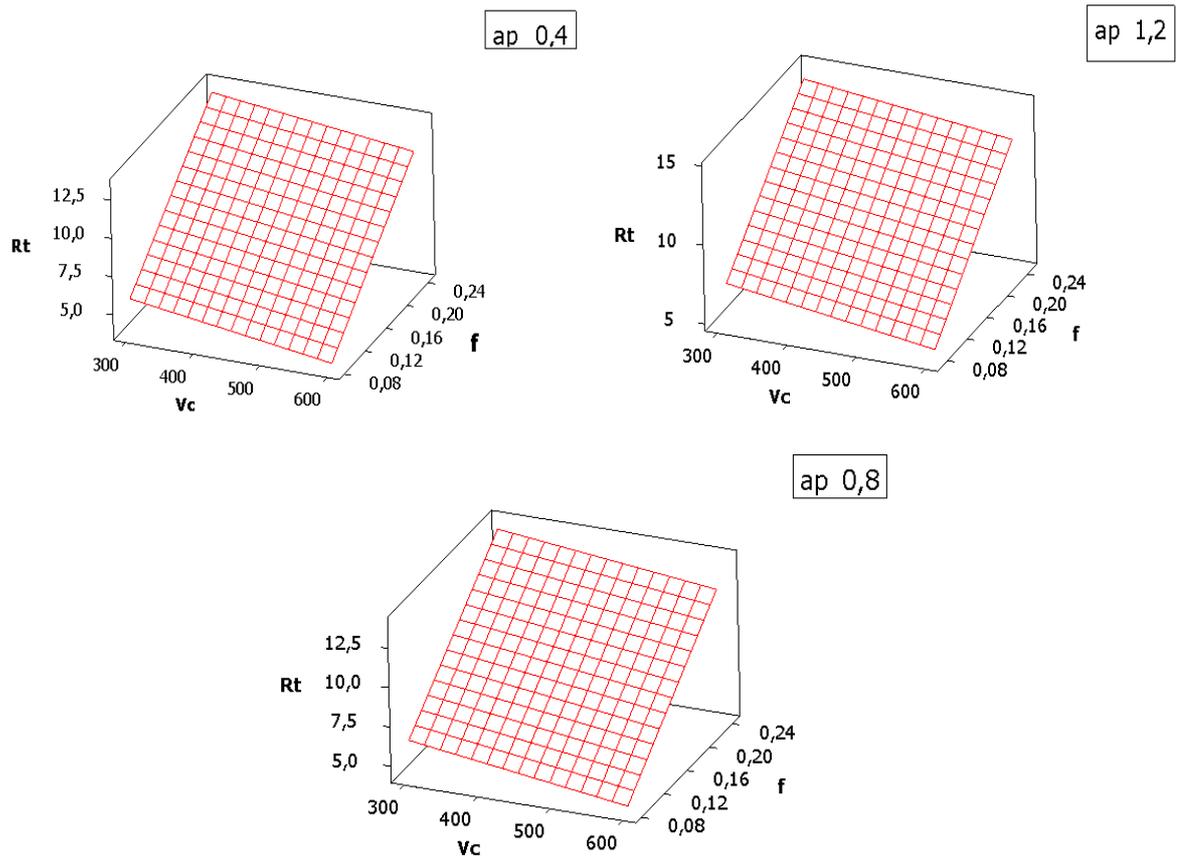


Figure IV-13 Surface de réponse de la rugosité (Rt) en fonction de Vc, f et ap.

**D/ Graphique des effets principaux pour Rt**

Les effets moyens figure (IV-14) montre que le critère de rugosité Rt est plus affecté par l'augmentation de l'avance, ceci est clair car sa pente est supérieure à celle de la profondeur de passe.

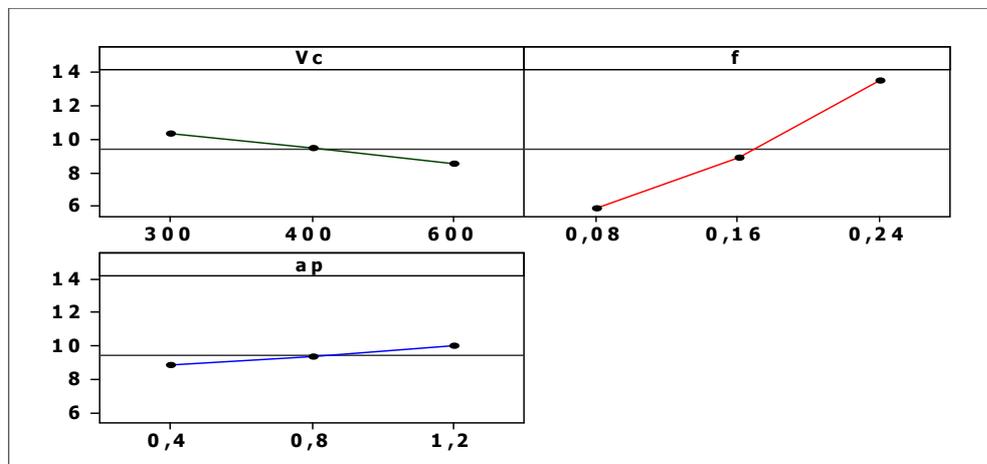
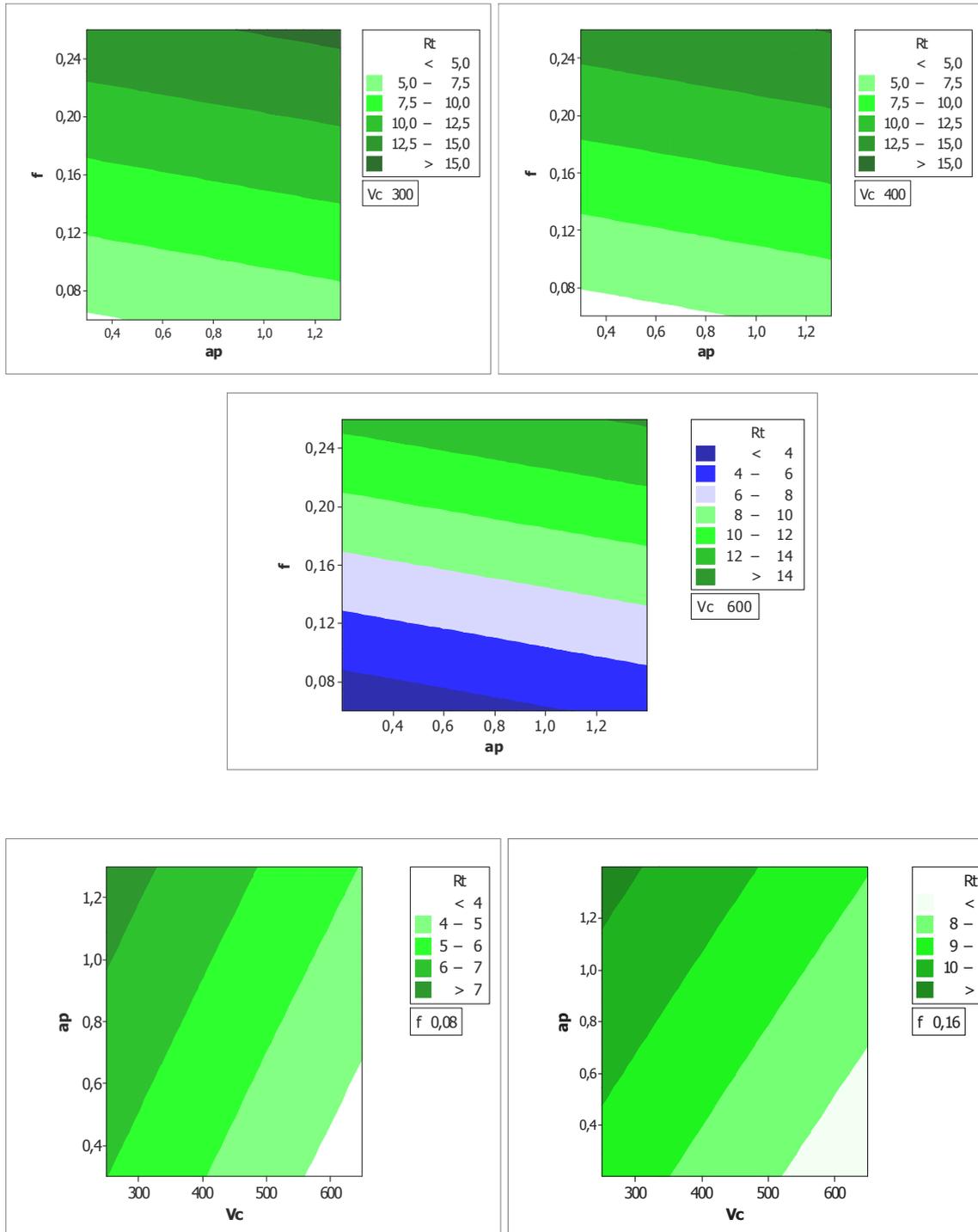


Figure IV-14 Graphes des effets de Vc, f et ap sur Rt

**E/ Graphique de contour de Rt**

La figure IV-15 montre le domaine d'influence de la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe sur la rugosité Rt. Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse (Rt), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.



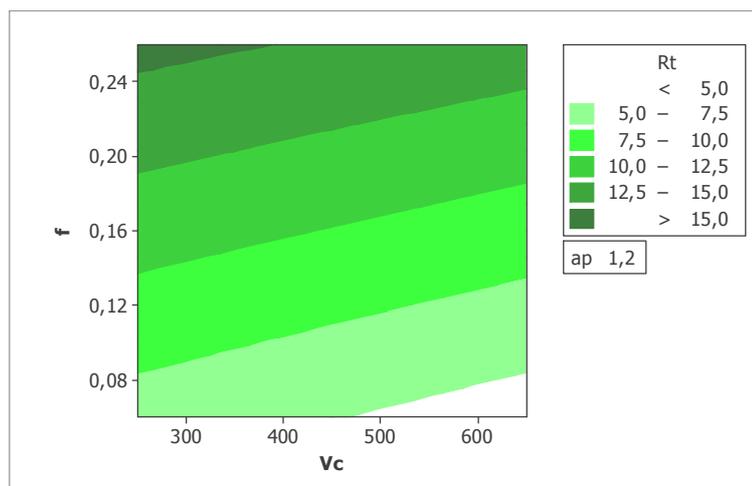
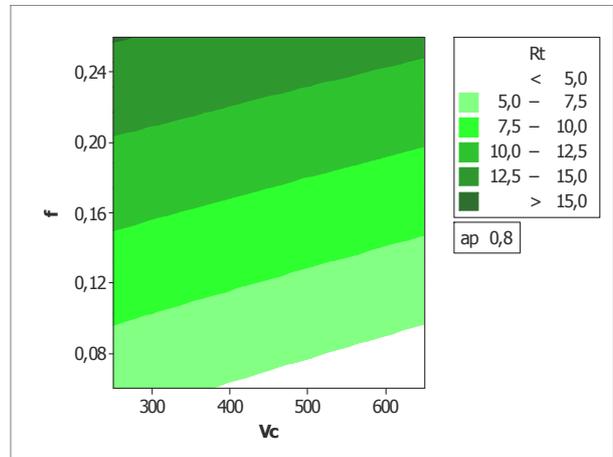
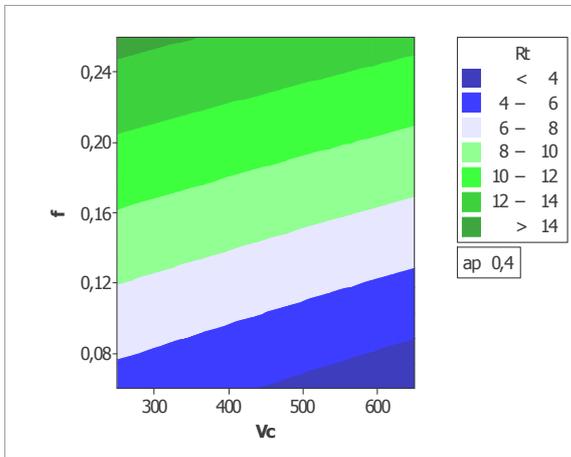
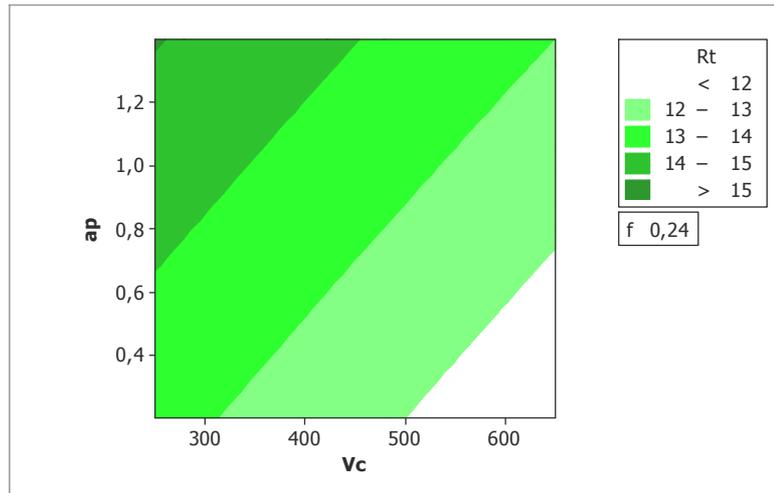


Figure IV-15 Graphique de contour de  $R_t$ .

#### IV-4 Conclusions

Ce chapitre nous a permis de comprendre et d'exprimer la relation entre les phénomènes de la coupe tels que (efforts de coupe, rugosité) et les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe) lors de l'usinage de la fonte grise Ft 25 pour un outil en céramique CC650. Les résultats de ce chapitre nous ont conduit aux conclusions suivantes :

- \* Pour les modèles des différentes composantes de l'effort de coupe, la vitesse de coupe n'a pas une influence significative sur les efforts de coupe.
- \* Les efforts de coupe sont très affectés par la profondeur de passe suivi de l'avance.
- \* On a noté que les différents critères de la rugosité sont influencés considérablement par l'avance, la contribution de ce dernier est de  $\approx 95\%$  sur le critère  $R_a$ , et de  $\approx 91\%$  sur le critère  $R_t$ .
- \* La détermination des coefficients de corrélation et des constantes des modèles mathématiques déduits permet de définir le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe sur les efforts de coupe, la rugosité des surfaces.
- \* La majorité des coefficients de détermination  $R^2$  des différents modèles mathématiques sont élevés, ce qui prouve la bonne corrélation avec les résultats expérimentaux.
- \* La connaissance de ces modèles représente un intérêt économique et industriel très importants car elle précise les plages des conditions d'usinage pour optimiser le processus de coupe et faire les prédictions qui lui sont primordiales.

# Conclusion générale

L'étude expérimentale du comportement des matériaux de coupe lors du tournage de la fonte grise Ft25 nous a permis d'étudier l'usinabilité de cette fonte en se basant sur les critères suivants : efforts et les pressions de coupe, la rugosité des surfaces usinées et l'usure de l'outil de coupe.

- Les faibles valeurs des efforts de coupe obtenues par la nuance de céramique mixte CC650 suivie par la céramique blanche CC620 montrent que ces deux nuances sont les plus performantes par rapport aux autres nuances utilisées.
- Les meilleurs états de surface sont enregistrés par la céramique revêtue GC1690 suivie par la céramique mixte CC650 et la céramique blanche CC620. Les résultats prouvent que les outils qui contiennent un revêtement donnent une meilleure résistance à l'usure et donne un bon état de surface.
- Chaque matériau de coupe utilisé présente un comportement à l'usure qui est fonction de sa composition chimique et de ses caractéristiques physico-mécaniques. Le meilleur comportement à l'usure est celui de la céramique mixte CC650, suivi par la céramique blanche CC620 et en dernier lieu la céramique revêtue GC1690.
- L'analyse des résultats de l'usure en fonction du temps illustre que le carbure non revêtu H13A est moins résistant à l'usure et il a donné des durées de vie très limitées, c'est pour cela qui est non approprié pour l'usinage de fonte grise.
- L'augmentation de l'usure du matériau de coupe induit une augmentation des efforts de coupe et cela pour les différentes vitesses testées, ce qui indique que ces deux phénomènes sont corrélés entre eux.
- Les résultats obtenus ont abouti à la détermination des modèles mathématiques. Ces derniers ont montré le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe sur les paramètres technologiques étudiés.
- Les modèles mathématiques de l'effort de coupe montrent que la profondeur de passe est le paramètre le plus influent, sa contribution dépasse 82.36% pour  $F_x$ , 45.74% pour  $F_y$ , 50.74% pour  $F_z$ .
- Les différents modèles de la rugosité indiquent que l'avance est le facteur qui influe plus sur différents critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_t$ ), sa contribution dépasse 95% pour  $R_a$ , 91% pour  $R_t$ .

## Nomenclature

$V_c$ :	Vitesse de coupe (m/min).
$a_p$ :	Profondeur de passe (mm).
$f$ :	Avance par tour (mm/tr).
$F_{Ré}$ :	Effort de coupe résultant (N).
$F_x (F_a)$ :	Effort de coupe axial (N).
$F_y (F_r)$ :	Effort de coupe radial (N).
$F_z (F_v)$ :	Effort de coupe tangentiel (N).
$K_c$	Effort spécifique (Pression de coupe) [MPA]
$R_a$ :	Rugosité moyenne arithmétique ( $\mu\text{m}$ ).
$R_t$ :	Rugosité totale ( $\mu\text{m}$ ).
$R_z$ :	Profondeur moyenne de la rugosité ( $\mu\text{m}$ ).
$VB$ :	Usure en dépouille (mm).
$\alpha$ :	Angle de dépouille principal (degré).
$\gamma$ :	Angle d'attaque (degré).
$\lambda$ :	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante (degré).
$\chi$ :	Angle de direction principal (degré).
$r_\epsilon$ :	Rayon de bec de l'outil (mm).
CC650	Céramique mixte.
CC620	Céramique blanche.
GC1690	Céramique revêtue (Nitrure de Silicium).
CC6090	Céramique non revêtue.
GC4005	Carbure revêtu.
H13A	Carbure non revêtu.

## Références bibliographiques

- [1]: **CHRISTIAN PAGÈS**, Comportement de revêtements céramique sur outil en tournage a sec de finition. Thèse de doctorat, École centrale. 2003.
- [2]: **MALEK HABAK**, Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier a roulement 100Cr6. Thèse de doctorat L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. 2006.
- [3]: **M. REMADANA**, Le comportement du système usinant en tournage dur, Application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN. Thèse de doctorat, INSA-LYON, 2001.
- [4]: **PIERRE GILORMINI**, Modélisation de la coupe des métaux. Technique de l'ingénieur. Laboratoire de Mécanique et Technologie de l'École Normale Supérieure de Cachan.
- [5]: **P. MATHON**, Usinabilité des aciers 16 NCr6 des structures différentes traitement thermique. Thèse de doctorat Paris. 1968.
- [6]: **ALAIN PASSERON**, Tournage. Technique de l'ingénieur. L'École nationale supérieure de Cachan.
- [7]: **F. BAGUR**, Matériaux pour outils de coupe. Technique de l'ingénieur. La société Tools.
- [8] : **YALLESE MOHAMED ATHMANE**, Etude de comportement a l'usure des matériaux des coupes modernes en tournage dur. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar-Annaba. 2005.
- [9]: **M. TAHMI RAOUF**, Conception d'un réseau de neurones pour la surveillance en ligne de l'usure des outils coupants. Mémoire de Magister. Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES, septembre 2006.
- [10]: **FRANCOIS LEROY**, Endommagement des outils de coupe, Technique de l'ingénieur. , Laboratoire d'Usinabilité et de Mise en Forme d'ASCOMETAL.
- [11]:**KANNAMETAL**.2007.
- [12]: World Academy of Science, Engineering and Technology 53 2009.
- [13]: **CHRISTIAN PAGÈS**, Comportement de revêtements céramique sur outil en tournage a sec de finition. Thèse de doctorat, École centrale. 2003.
- [14]: **TARAMETAL**, Plaquettes de coupe. Mars 2006. (www.trametal.com Code: MQF62)

[15] : **Omar Akourri, Ilham Elayachi, et Mariano Marcos Bárcena**, Conditions de coupe et état de surface dans le tournage d'un alliage d'aluminium. Université Abdelmalek Essaâdi.

[16] : **Gautier LIST**, Etude des mécanique d'endommagement des outils carbure WC-CO par la caractérisation de l'interface outil-copeau application a l'usinage a sec de l'alliage d'aluminium aéronautique. Thèse de doctorat. L'école nationale supérieure D'ARTS ET METIERS. 13 décembre 2004

[17] : **PLANSEE TIZIT**, Outils de coupe pour l'usinage de l'aluminium, internet.

[18] : **Gérard POULACHON**, Usinabilité des matériaux difficiles, Technique de l'ingénieur École Nationale supérieure des Arts et Métiers de Cluny.

[19] : [www.garant-tools.com](http://www.garant-tools.com)

[20] : **Jacques JAULT**, Fontes à graphite sphéroïdal, Technique de l'ingénieur, l'École supérieure de fonderie