

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère De L Enseignement Supérieur Et Recherche Scientifique.
Université Mentouri Constantine
Faculté Des Sciences De L'ingénieur
Département De Génie Mécanique.

N° .d'ordre : / /2010

Série: /GM/2010



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de magister
en Génie Mécanique

Option : **MÉCANIQUE AVANCÉE**
Conception Intégrée des Systèmes Mécanique et Application Industrielle

Intitule

**ANALYSE ET OPTIMISATION DES
PERFORMANCES
EN USINAGE A GRANDE VITESSE**

Par

AOUAD RAZIKA

Soutenue publiquement le **17/06/2010**

Devant le jury

Président	: Pr. Hamlaoui BOUGHOUAS	Prof.	Université Mentouri Constantine
Rapporteur	: Dr. Idriss AMARA	M.C.	Université Mentouri Constantine
Examineur	: Pr. Ahmed BELLAOUAR	Prof.	Université Mentouri Constantine
Examineur	: Pr. Salim BOUKEBBAB	Prof.	Université Mentouri Constantine

Constantine **2010**

Remerciements

Je tiens en premier à remercier vivement Dieu pour tous les bienfaits et l'aide qui nous apporte afin d'atteindre les buts visés.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et à remercier très chaleureusement mon Directeur de mémoire le Docteur ***Idriss AMARA***, Maître de Conférences à l'Université Mentouri Constantine pour les efforts et les conseils précieux et judicieux, qu'il n'a cessés de me prodiguer tout le long de ce modeste travail.

Je remercie Monsieur ***Hamlaoui BOUGHOUAS***, Professeur à l'Université Mentouri Constantine, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter et de présider mon jury de mémoire. Je lui exprime toute ma reconnaissance pour le temps et l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

Je remercie également Monsieur ***Ahmed BELLAOUAR***, Professeur à l'Université Mentouri Constantine pour avoir accepté de faire partie du jury de mon mémoire en tant qu'examineur. Je lui exprime toute ma reconnaissance pour le temps et l'intérêt qu'il a porté à ce travail, malgré son emploi du temps très chargé.

Je remercie Monsieur ***Salim BOUKEBBAB***, Professeur à l'Université Mentouri Constantine pour avoir accepté de faire partie du jury de mon mémoire en tant qu'examineur. Je lui exprime toute ma gratitude pour le temps et l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

Que tous mes amis et collègues de travail au Complexe Pelles et Grues (CPG) d'Aïn Smara trouvent toute ma gratitude. Je ne saurai comment les remercier pour leur dévouement et leur disponibilité à mon égard.

Je ne saurais terminer sans remercier les personnes qui, ont contribué de près ou de loin à l'avancement de ce travail.

Enfin, je remercie chaleureusement toute a famille et particulièrement mes parents pour leur soutien et leurs encouragements

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mon très Cher Père et à ma très Chère Mère

Qui sont sans cesse à mes côtés ;

Mon très Cher Frère et mes très Chères Sœurs qui m'ont toujours

soutenu ;

Mes Grands Parents ;

Toute ma Famille ;

Tout(e)s mes Ami(e)s.

Résumé :

Sous l'impulsion des entreprises de hautes technologies et de leurs exigences en matière de réduction des temps et des coûts, l'usinage à grande vitesse est devenu un moyen de mise en forme à la mode depuis une dizaine d'années. Ce procédé nécessite un développement quasi permanent des machines et outils.

L'usinage à grande vitesse est un procédé d'enlèvement de matière par une vitesse de coupe élevée (5 à 10 fois supérieures à usinage conventionnelle), grâce à la vitesse de coupe élevée nous permet d'obtenir un meilleur état de surface.

Mots-clés: *Usinage à grande vitesse, modélisation de coupe, machine outil, lubrification, usinage, règle d'usinage, stratégie d'usinage, utilisation d'UGV, état de surface*

Abstract:

At instigation of the companies of high technologies and their requirements in reduction of time and of the costs ,where it became a means of shaping the fashion for ten years. This process requires almost constant development of machines and tools.

The high-speed machining is a process for removing material with a high cutting speed (5 to 10 times higher than conventional machining), thanks to the high cutting speed allows us to obtain a better surface.

Keywords: *Machining high speed, modeling cutting, machine tool, lubrication, machining, Rule Machine, cutting strategy, quality of surface*

المخلص

تدافع المؤسسات ذات التكنولوجيا العالية و متطلباتها في ما يتعلق بتخفيض الوقت و التكلفة , أدى بظهور التصنيع بالسرعة الكبيرة, حيث أصبح وسيلة عصرية لعقد من الزمن, هذه التقنية تتطلب تطورا مفاجئا و مستمرا في الآلات و الأدوات.

لأجل هذا نقول على التصنيع بالسرعة الكبيرة هو أسلوب لإزالة المواد بالسرعة العالية (حوالي 5 إلى 10 أضعاف أعلى من التصنيع التقليدي) بفضل سرعة القطع العالية يسمح لنا بالحصول علي أحسن حالة للأسطح.

مفاتيح البحث: التصنيع بالسرعة الكبيرة, نموذج القطع , آلات القطع, التشحيم, التصنيع , قواعد التصنيع, إستراتيجية التصنيع, استخدام التصنيع بالسرعة الكبيرة , حالة السطح

La Nomenclature

Abréviations utilisées dans ce mémoire

CAO	Conception assistées par ordinateur
CBN	Nitride de bore cubique
CFAO	Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur.
CFO	Conception et fabrication par ordinateur
CPG	Complexe pelle et grue
CN	Commande Numérique
FAO	Fabrication assistées par ordinateur
HSK	Hohlsaftkegel
MMT	Machine à mesurer tridimensionnelle
MOCN	Machine outil à Commande Numérique
PCD	Diamant polycristalin
TiAlN	Nitride de titane alumine
UGV	Usinage a Grande Vitesse

L'insigne Désignation

ap	Profondeur de passe (mm)
D	Diamètre de l'outil (mm)
fz	Avance (mm/dent)
HB	Dureté brinell (N/mm ²)
L	longueur de la pièce (mm)
N	Vitesse de rotation (tr/min)
R	Résistance du rupteur (N/mm ²)
r	rayon de bec d'une plaquette
Ra	Rugosité arithmétique (μm)
Rt	Rugosité théorique (μm)
Tc	temps de coupe (min)
Vc	Vitesse de coupe (m/min)
Vf	Vitesse d'avance (mm/min)
Z	Nombre des dents de l'outil
α	Angle de dépouille
γ	Angle de coupe

Table des Matières

Remerciements	iii
Dédicaces.....	iv
Résumé :	v
Abstract:.....	vi
الملخص.....	vii
La Nomenclature	viii
Table des Matières.....	ix
Table des figures.....	xii
Introduction	1
I Chapitre I : Principaux procédés de coupe.....	4
I.1 Introduction:	5
I.2 Principaux procédés:	6
I.2.1 Procédés de coupe:	6
I.2.2 Procédés par abrasion:	7
I.2.3 Procédés physico-chimiques:.....	7
I.3 Usinage à Grande Vitesse:.....	7
II Chapitre II: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	8
II.1 Introduction :	9
II.2 Historique :	9
II.3 Procède d'usinage:	10
II.3.1 Le fraisage :	10
II.3.2 Le perçage:.....	10
II.3.3 Le tournage:	11
II.4 Paramètre de coupe:	11
II.4.1 Vitesse de coupe V_c :.....	11
II.4.2 L'avance V_f :.....	11
II.4.3 Profondeur de passe a_p :.....	12
II.5 Définition de l'Usinage à Grande vitesse:	13
II.5.1 L'usinage conventionnel :	13
II.5.2 L'usinage a Grande Vitesse (UGV):	13
II.5.2.1 Le principe:	13
II.5.2.2 Domaines d'application de l'UGV:.....	13

Table des matières

II.5.2.3	Les modes de coupe [22]:	14
II.5.2.3.1	Fraisage en bout ou de face (figure : II-3):	14
II.5.2.3.2	Fraisage de profil ou en roulant (figure : II-4) :.....	15
II.5.2.3.3	Sens de rotation pour le fraisage de profil ou en roulant :	15
II.6	Les facteurs économiques et techniques de l'UGV:.....	17
II.7	Les moyens:.....	18
II.7.1	Outil :	18
II.7.1.1	Matériaux de coupe:.....	19
II.7.1.2	Dispositifs de lubrification :	20
II.7.1.3	Coût:	21
II.7.1.4	Préréglages et équilibrages:	22
II.7.2	Machine Outil:	22
II.7.2.1	Définitions:	23
II.7.2.2	Les éléments des Machines Outils :.....	23
II.8	Environnement:	28
II.9	Conclusion:.....	28
III	Chapitre III : CARACTERISTIQUE DE L'UGV	30
III.1	Introduction:.....	31
III.2	Caractéristique de l'UGV:.....	31
III.2.1	Vitesse de Coupe V_c :.....	31
III.2.2	Phénomènes de copeau:	32
III.2.2.1	Discontinuité du copeau:	32
III.2.2.2	Type de copeaux :	32
III.2.3	Phénomènes thermiques :	33
III.2.4	Avantage de l'UGV:.....	34
III.2.4.1	Les avantages techniques :.....	34
III.2.4.2	Les avantages économiques :.....	35
III.2.5	Inconvénients de l'UGV:.....	36
III.3	Règle d'usage:.....	37
III.4	Conclusion :	38
IV	Chapitre IV : OPTIMISATIONS ET STRATEGIE D'USINAGE	39
IV.1	Introduction:.....	40
IV.2	PREMIERE PARTIE:.....	40
IV.2.1	les moyens de réalisation:	40

Table des matières

IV.2.2	Déterminations des paramètres de coupe :.....	43
IV.2.3	Présentation d'expérience:.....	45
IV.3	DEUXIEME PARTIE : Discussion des résultats	45
IV.3.1	Résultats:.....	45
IV.3.2	Discussion:.....	50
IV.4	TROISIEME PARTIE : Stratégie d'usinage	50
IV.4.1	Définition Stratégie d'usinage:	51
IV.4.2	Décomposition de la gamme d'usinage :.....	51
IV.4.3	Les modes d'usinage :.....	52
IV.5	Conclusion:	53
V	Conclusion générale	54
ANNEXES	56
ANNEXE A	: Comparaison des vitesses de coupe entre usinage conventionnelle et usinage a grande vitesse :	56
ANNEXE B	: paramètre de coupe en fraisage	57
ANNEXE C	: Critère de qualité	59
Bibliographie	62

Table des figures

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

Figure I-1: Principaux procédés de mise en forme des matériaux	5
--	---

CHAPITRE II: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure II-1 : Géométries des paramètres d'avance [14].	12
Figure II-2 : Profondeur de passe : a_p [14].	12
Figure II-3 : Fraisage en bout ou de face [23].	15
Figure II-4 : Fraisage de profil ou en roulant [23].	15
Figure II-5: Fraisage de profil ou en avalant [23].	16
Figure II-6 : Fraisage en opposition ou conventionnel [23].	17
Figure II-7 : Types de lubrification [26].	21
Figure II-8 : Glissière actionnée par des moteurs linéaires [31].	23
Figure II-9 : Bâti d'une machine UGV [32].	24
Figure II-10 : Les broches [32].	25
Figure II-11 : Images de cônes HSK en déformation sous sollicitations dynamiques [32].	26

Chapitre III : CARACTERISTIQUE DE L'UGV

Figure III-1 : Plages de vitesses de coupe pour différents matériaux [32].	31
Figure III-2 : Évolution des copeaux suivant la vitesse de coupe	33
Figure III-3 : Fraisage en avalant fraisage en opposition [42].	37

Chapitre IV : OPTIMISATIONS ET STRATEGIE D'USINAGE

Figure IV-1 : L'outil utilisé pour l'essai N.4.30105R 131 P25.	41
Figure IV-2 : Vue d'ensemble de la plaquette HERTEL.4.211003R 611.	41
Figure IV-3 : géomètre de la plaquette HERTEL.4.211003R 611.	41
Figure IV-4 : Éprouvette servant aux essais.	42
Figure IV-5 : Configurations d'usinage [44].	43
Figure IV-6: temps de coupe [23].	46
Figure IV-7 : Comparaison du temps de coupes	46
Figure IV-8 : Rugosimètre SURFTEST SJ 301.	47
Figure IV-9 : Allure de la variation de la surface par usinage classique	48
Figure IV-10 : Allure de la variation de la surface par usinage par fraiseuse à commande numérique pour l'usinage à fort débit.	49
Figure IV-11 : La variation de rugosité en fonction de la vitesse de coupe	49
Figure IV-12 : Les modes d'usinage (A -Mode de balayage ; B-l'usinage.	52

ANNEXE

Figure B - 1 : fiche industriel.	57
Figure B - 2: paramètres de coupe.	58
Figure C - 1 : paramètres des critères de rugosité.	59
Figure C - 2: choix du la rugosité	61

Introduction

L'usinage par enlèvement de matière à partir de bruts forgés, moulés est un procédé de fabrication très ancien... Différents développements réalisés depuis une trentaine d'années sur les outils coupants, les machines-outils, les matériaux usinés et les conditions de coupe permettent aujourd'hui de mettre en œuvre industriellement ce procédé avec des vitesses de coupe et d'avance beaucoup plus élevées que celles utilisées en usinage classique ce qui justifie l'appellation d'Usinage à Grande Vitesse (ou UGV).

Pour cela notre travail a été divisé en quatre chapitres avec une conclusion

Dans le premier chapitre nous présentons une introduction générale sur l'usinage et principaux procédés de mise en forme des matériaux métalliques

Dans le deuxième chapitre, sera une étude bibliographique portée les spécificités de l'UGV .On présente les différents paramètres comme la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe, les principaux facteurs économiques et technologiques. Nous présentons ensuite, les outils, les nouvelles technologies des Machines-Outils d'Usinage à Grande Vitesse, et les éléments des Machines outils (le bâti, les axes de déplacement, le porte-outil, la broche haute fréquence).

Dans le troisième chapitre, nous présentons les caractéristiques d'usinage à grande vitesse (vitesse de coupe, phénomènes de coupe, les avantages et quelques aspects négatifs liés à l'UGV).Enfin, nous présentons les règles d'usage de l'UGV.

Dans le quatrième chapitre, sera présente le développement détaillé de l'expérience mise au point, ainsi que la Seront discutés les résultats obtenus par l'expérience ainsi que la détermination de rugosité du l'état de surface.

Notre mémoire se termine par une conclusion et des perspectives.

Recherche bibliographique :

La revue bibliographique a pour objectif de présenter un aperçu compréhensif des travaux existants sur l'usinage conventionnelle et usinage à grande vitesse.

Par ailleurs, le procédé de fraisage, qu'il est nécessaire de mettre en œuvre pour usiner des formes complexes, est –avec des conditions de coupe discontinues très variables le long de la trajectoire de l'outil – beaucoup plus délicat à appréhender et beaucoup moins étudié que le tournage.

VIDAL jean-baptiste [4] Présente utilisation de l'UGV pour la fabrication des pièces mécaniques .technologies des composants de la cellule élémentaire d'usinage en UGV et la modélisation de la coupe en usinage à grande vitesse ,plus particulièrement les critères spécifiques à ce procédé à prendre en compte dans la définition du produit Après une présentation rapide des principales caractéristiques de l'UGV et des moyens associés, les critères de caractérisation du produit seront développés.

AZZAM. N [5] présente les spécificités de l'UGV vitesse par les avantages, les principaux facteurs économiques et technologiques. Ensuite les différents paramètres comme la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe. Nous présenterons également quelques aspects négatifs liés à l'UGV. En suit présente les spécificités de la machine-outil destinée à l'UGV. Nous présentons ensuite les nouvelles technologies des Machines-Outils d'Usinage à Grande Vitesse (moteur linéaire,...), et les éléments des Machines outils (le bâti, les axes de déplacement, le porte-outil, la broche haute fréquence. Enfin, présenter la classification des Machines-Outils.

WAKAOKA et al, [6] Au travers de leurs travaux, comparent l'opération de tréflage à grande vitesse et le fraisage classique de cavités profondes. Wakaoka utilise la formulation classique de R_t en fonction de l'avance f_z et du rayon de fraise R , soit : $R_t = 125 \times (f_z)^2 \times Z^2 / R$

BOULANOUAR L et al [7] réalisent une étude par comparaison de deux matériaux à outils de la nouvelle génération (Céramique Mixte CC650 et Nitrure de Bore Cubique CBN7020). dans cette étude est de mettre en exergue l'effet des conditions d'usinage ainsi que celui du matériau de l'outil sur la rugosité de la surface usinée.les résultats pour l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé avec le CBN7020 et la CC650 à $V_c=120$ m/min, $f=0,08$ mm/tr et $a_p=0,5$ mm a montré qu'en terme de durée de vie, le CBN7020 est 32 fois plus performant que la CC650. Au delà de 120 m/min les performances de ce matériau en termes de durée de vie et qualité d'état de surface sont encore plus significatives. Il permet également de réduire et simplifier les phases de fabrication, ce qui va influencer avantageusement sur le coût et la qualité de précision des pièces usinées.

PECHARD Pierre-Yves [8] Présente l'usinage de pièces de formes complexes avec proposition une méthode de stratégie d'usinage UGV. Cette méthode s'appuie sur un modèle de processus U.G.V. de finition et prend en compte un critère cinématique. En effet dans un contexte U.G.V. l'objectif du préparateur est de générer des séquences ralentissant le moins que possible la machine. L'intérêt de la méthode proposée est qu'elle apporte un gain de temps d'environ 40% entre la stratégie la moins performante et la stratégie trouvée. Pour améliorer cette méthode il faut intégrer d'autres types de critères tels que la qualité de la surface usinée. Le résultat de l'usinage dépend principalement du choix de la stratégie d'usinage puis de la méthode et des outils utilisés pour générer les trajets d'usinage.

EDOUARD riviere-lorphevre [9] Présente l'étude et simulation de procédés de fraisage grande vitesse : efforts de coupe, stabilité, états de surface.

AL-AHMAD M [10] Présente industrialisation de procédé : contribution à la maîtrise de l'opération de tréfilage ou fraisage vertical - approches analytique et expérimentale dans ce mémoire présente la comparaison entre fraisage vertical et usinage classique à partir l'état de surface et stratégie d'usinage. Les résultats de cette comparaison sont satisfaisants (erreurs inférieure à 11%). Le modèle d'efforts de coupe est applicable aux diverses configurations de tréfilage par grignotage latéral pour des engagements de fraises partiels ou complets. Ensuite présenté des trajectoires et stratégies de tréfilage utilisables pour effectuer des évidements de poche. Par une comparaison au fraisage conventionnel montré que le tréfilage est viable que pour des réalisations de cavités profondes.

Chapitre I : Principaux procédés de coupe

I	Chapitre I : Principaux procédés de coupe.....	4
I.1	Introduction:	5
I.2	Principaux procédés:	6
I.2.1	Procédés de coupe:	6
I.2.2	Procédés par abrasion:	7
I.2.3	Procédés physico-chimiques:.....	7
I.3	Usinage à Grande Vitesse:.....	7

I.1 Introduction:

La mise en œuvre des opérations d'usinage pour réaliser une pièce ou une famille de pièces est un problème complexe du fait de la multiplicité des procédés disponibles et de la grande variété des spécifications des pièces et des propriétés des matériaux constitutifs.

On appelle usinage toute opération de mise en forme par enlèvement de matière destinée à conférer à une pièce des dimensions et un état de surface (écart de forme et rugosité) situés dans une fourchette de tolérance donnée. D'un point de vue économique, le secteur industriel de l'usinage a une importance non négligeable puisqu'il produit environ 2,5 % du produit national brut d'un pays développé [1]

L'usinage concerne au premier chef les matériaux métalliques et la plupart des objets métalliques d'utilisation courante ont subi une ou plusieurs opérations d'usinage. Ces opérations s'insèrent dans la succession des opérations de mise en forme à deux niveaux principalement (figure : I-1) :

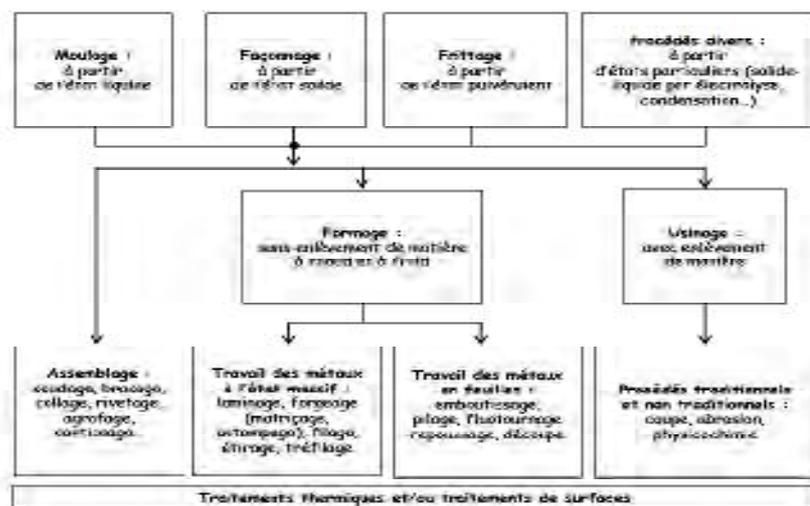


Figure I-1: Principaux procédés de mise en forme des matériaux métalliques [2]

- soit comme opérations de découpe d'une ébauche destinée à être laminée, forgée, filée, emboutie... ;
- soit comme opérations de mise à la cote de pièces préalablement moulées, frittées, filées, embouties, forgées ou assemblées par soudage ; elles peuvent alors précéder ou suivre des traitements thermiques et/ou de surface.

Il faut noter qu'une catégorie importante (d'un point de vue industriel et économique) de pièces usinées, avec très souvent de grandes difficultés techniques, est constituée des outillages de mise en forme.

La mise en forme par usinage concerne également, mais de manière moins conséquente en général, toutes les autres classes de matériaux (céramiques, polymères, bois et matériaux dérivés, matériaux composites, verres, semi-conducteurs...), selon des modalités spécifiques, dépendant des caractéristiques du procédé et du matériau. [1]

Les exigences techniques et commerciales de la production moderne sont très pointues. Les processus d'usinage doivent être en permanence adaptés et perfectionnés pour répondre aux nouveaux challenges. Les nouveaux processus comme, par exemple, l'usinage grande vitesse, sont étudiés en de nombreux points du globe dans des laboratoires spécialisés en vue de développer et de produire les moyens de fabrications requis. Dans la pratique, ces processus doivent être optimisés pour en parfaire sans cesse l'utilisation. Enfin, seul un contrôle qualité intégré peut permettre d'atteindre l'objectif ultime, à savoir permettre au client une fabrication reproductible, zéro défaut. [1]

I.2 Principaux procédés:

Les procédés d'usinage sont extrêmement variés. Le terme « usinage » employé par abus de langage est consacré par l'usage pour tous les procédés qui suivent. Il est utilisé pour les procédés sans présence d'outil, mais avec intervention d'un milieu agressif.

On distingue assez souvent les procédés d'usinage mécaniques dits traditionnels des procédés d'usinage non traditionnels ; cette dernière appellation désigne des procédés qui sont apparus après 1945 en grande partie pour usiner des matériaux se prêtant difficilement aux techniques d'usinage classiques. [2]

On peut également, schématiquement, classer les procédés d'usinage, selon les phénomènes physiques correspondants, en trois catégories principales :

I.2.1 Procédés de coupe:

L'enlèvement de matière se fait par *action mécanique* d'un *outil coupant* ; la force appliquée induit la formation, à l'échelle macroscopique, de un ou plusieurs copeaux.

Il existe un grand nombre de procédés, dont les principaux sont :

- les procédés à forte vitesse et grand débit de matière (fraisage, tournage, perçage) ;
- les procédés de vitesse plus faible (sciage, rabotage, mortaisage, brochage, taraudage et alésage...). [2]

I.2.2 Procédés par abrasion:

L'enlèvement de matière est dû à l'*action mécanique* d'un grand nombre de *grains d'abrasifs* de petite taille et de haute dureté. Ces grains agissent selon deux modalités différentes ; ils sont :

- soit liés à un support solide (abrasion à deux corps) : rectification, meulage ;
- soit transportés par un milieu fluide (abrasion à trois corps) : rodage et polissage à la pâte abrasive, usinage par ultrason, par un jet de fluide abrasif, ces deux derniers procédés étant classés parmi les procédés non traditionnels. [2]

I.2.3 Procédés physico-chimiques:

Ils sont tous qualifiés de non traditionnels. L'enlèvement de matière est réalisé (à l'exception de l'impact d'un jet d'eau) par des actions non mécaniques: [2]

- action thermo-électrique d'un arc électrique (électro-érosion), d'un plasma ou d'un faisceau de lumière cohérente (laser) ou d'électrons ;
- action thermo-chimique de la flamme d'un chalumeau (oxycoupage) ;
- réaction électrochimique dans un électrolyte (usinage électrochimique) ;
- réaction chimique avec un liquide (usinage chimique).

I.3 Usinage à Grande Vitesse:

L'Usinage à Grande Vitesse (UGV) est devenu depuis le début des années 90 un des procédés de fabrication à la mode, qu'il faut absolument mettre en œuvre et connaître pour pouvoir briller en société. Outre les aspects marketing qui ont permis de revitaliser le tissu économique de la fabrication mécanique, l'UGV possède des caractéristiques très intéressantes dans le cadre de la réalisation de pièce mécanique de qualité comme dans les domaines de l'aéronautique et du moulage (fonderie). [3]

Le passage à l'UGV, permet de diminuer le temps de fabrication et en rend économique sa production. Toutefois, il est vrai que cette technologie nécessite un investissement plus lourd que pour une machine outil à commande numérique (MOCN) traditionnelle, que ses coûts de fonctionnement sont aussi plus importants, mais avec une bonne utilisation de la machine des gains significatifs seront réalisés. [3]

Chapitre II: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

II	Chapitre II: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	8
II.1	Introduction :	9
II.2	Historique :	9
II.3	Procède d'usinage:.....	10
II.3.1	Le fraisage :	10
II.3.2	Le perçage:	10
II.3.3	Le tournage:.....	11
II.4	Paramètre de coupe:	11
II.4.1	Vitesse de coupe V_c :	11
II.4.2	L'avance V_f :.....	11
II.4.3	Profondeur de passe a_p :	12
II.5	Définition de l'Usinage à Grande vitesse:.....	13
II.5.1	L'usinage conventionnel :	13
II.5.2	L'usinage a Grande Vitesse (UGV):.....	13
II.6	Les facteurs économiques et techniques de l'UGV:	17
II.7	Les moyens:.....	18
II.7.1	Outil :.....	18
II.7.2	Machine Outil:.....	22
II.8	Environnement:	28
II.9	Conclusion:	28

II.1 Introduction :

Il est admis depuis plusieurs générations maintenant que la supériorité de l'homme sur l'animal vient de la main qui a permis le développement du cerveau et a favorisé l'évolution de l'homme et de l'humanité. De la réflexion est né l'outil. L'outil qui a permis à l'homme de dominer la nature et la matière.

Depuis le début du 19^{ième} 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 (injection, moulage, forge, etc...)
- ❖ 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).

II.2 Historique :

L'usinage à grande vitesse (UGV) est l'un des procédés de mise en forme des métaux qui est en constante évolution depuis plus d'une vingtaine d'années. C'est une extension simple de l'usinage dit "conventionnel" qui est devenu un nouveau procédé, bien que des questions demeurent autour de la technique dite UGV. [11]

L'usinage à grande vitesse (UGV) n'est pas une technologie tellement récente comme l'on pourrait s'imaginer. Bien que ses réelles applications industrielles remontent seulement à la fin des années 80 et que l'UGV a acquis une véritable importance industrielle seulement dans les années 90, ses racines se trouvent dans les travaux de recherche conduites par un chercheur allemand déjà dans les années 20. [12]

M. Salomon (1931) montra qu'à partir d'une vitesse donnée (qui dépend du matériel) on peut avoir des avantages dans l'usinage. Il a examiné les effets spécialement à très haute vitesse: $V_c = 16 \cdot 500$ [m/min]. En utilisant des scies circulaires il mesura les températures et montra qu'elles augmentent dans un premier temps pour baisser après. Cette constatation est mise en doute maintenant [1], mais M. Salomon donna une première description des avantages possible en utilisant l'UGV. Il obtint aussi un brevet qui, par contre, n'était pas vraiment exploitable à l'époque à cause des nécessités de développements dans d'autres secteurs technologiques concernés avec l'UGV (outils broches et machines). [12]

Autres recherches:

- ❖ Kustnezov (1947 - 50,000 m/min)
- ❖ Kronenberg (1958 - 72,000 m/min)
- ❖ Arndt (1972 - 132,000 m/min)
- ❖ Schulz (PTW Darmstadt, 1980 - 2000, industrialisation de l'UGV).

Dans le domaine du fraisage une vraie révolution se déclencha dans les années: 1992 - 1993. Pendant la crise industrielle qui frappa le monde (et en particulier l'Europe) dans ces années, plusieurs sociétés ont fait faillite et surtout celles qui n'avaient pas des modèles de machines pour l'UGV. [13]

II.3 Procède d'usinage:

II.3.1 Le fraisage :

Cette opération est réalisée à l'aide de fraises qui permettent d'enlever de la matière en combinant un mouvement double composé d'une rotation et d'un déplacement vertical (ou horizontal). [14]

II.3.2 Le perçage:

Pendant le perçage la pièce est fixe tandis que l'outil est animé de deux mouvements continus simultanés le mouvement de coupe et le mouvement d'avance suivant l'axe de l'outil. Le perçage s'effectue sur des machines à percer appelées perceuses. [15]

II.3.3 Le tournage:

Pendant le tournage la pièce tourne autour de son axe tandis que l'outil s'engage dans sa surface à une profondeur déterminée l'outil est animé d'un mouvement d'avance continu parallèle ou perpendiculaire à l'axe de la pièce. Le tournage s'effectue sur machine tour. [15]

II.4 Paramètre de coupe:

II.4.1 Vitesse de coupe V_c :

La vitesse de coupe ($700 < V_c < 3000 \text{ m/min}$) est un paramètre fondamental pour la formation du copeau. Elle dépend de la configuration d'usinage, du procédé et du couple outil/matière. La définition de la vitesse de coupe est très importante car elle détermine la vitesse de rotation de la pièce.

La vitesse de rotation de la pièce est définie par l'équation suivante [16]:

$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D} \dots \dots \dots \text{Equation 1}$$

Où :

- ❖ D : Diamètre de la pièce en millimètre (mm),
- ❖ N : La vitesse de rotation en tour par minutes (tr/min),
- ❖ V_c : La vitesse de coupe en mètre par minutes. (m/min)

II.4.2 L'avance V_f :

C'est le déplacement de l'arête tranchante principale de l'outil par rapport à la surface usinée en unité de temps [17] Figure : II-1; elle est exprimée en mm/min.

Elle découle de la formule suivante [16] :

$$V_f = f_z \times Z_n \times n \dots \dots \dots \text{Equation 2}$$

Où :

- ❖ V_f = vitesse d'avance mm/min.
- ❖ f_z = avance en mm/dent (selon tablelle).

- ❖ Zn = nombre de dents de la fraise.
- ❖ n = fréquence de rotation de la fraise en tr/min.

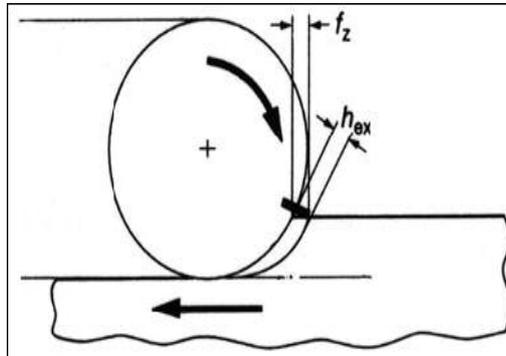


Figure II-1 : Géométries des paramètres d'avance [14].

II.4.3 Profondeur de passe a_p :

La profondeur de passe est le déplacement de l'outil déterminant la quantité de matière à enlever sur la pièce. Elle est désignée par a_p et est exprimée en millimètre (mm) (figure : II-2).

Il vaut mieux enlever les surépaisseurs d'usinage sans faire beaucoup de passes. Pourtant, quand on prend une profondeur de passe très grande, la précision d'usinage diminue à cause de la présence des efforts de coupe très élevés. D'habitude, on choisit la profondeur de passe en dépendance des surépaisseurs d'usinage et de la rugosité superficielle demandée.

La profondeur de passe et l'avance vont influencer aussi la formation du copeau car elles modifient la section du copeau et donc l'énergie nécessaire au cisaillement de la matière.

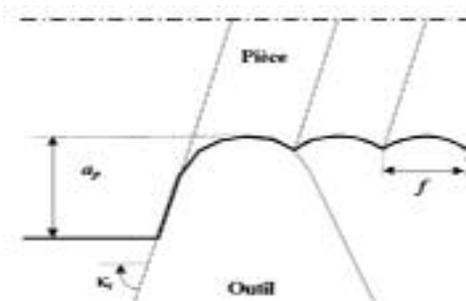


Figure II-2 Profondeur de passe : a_p [14].

II.5 Définition de l'Usinage à Grande vitesse:

II.5.1 L'usinage conventionnel :

C'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 ...).

En usinage, il existe plusieurs configurations utilisables selon le procédé de coupe (le fraisage, le rabotage, le tournage ...). Durant notre étude, nous nous intéresserons plus précisément à la technique d'enlèvement de matière par fraisage. De nouvelles techniques de fabrication, issues de l'usinage à haute vitesse [18].

II.5.2 L'usinage a Grande Vitesse (UGV):

C'est une technique qui permet d'obtenir un meilleur état de surface grâce à une vitesse de coupe élevée (5 à 10 fois supérieure aux vitesses d'usinage conventionnel et de rotation de l'outil (de 10000 à 100000 tr \ min) de manière à privilégier l'enlèvement de matière par de fortes avances et des profondeurs de coupe plus faibles. L'UGV s'effectue généralement en deux phases "ébauche / semi finition" puis "finition" ou "ébauche" puis "semi-finition". De ce fait cette technique améliore les performances techniques et économiques de l'usinage [19].

II.5.2.1 Le principe:

Le principe de l'usinage à grande vitesse c'est l'augmentation des vitesses de coupes. Dans l'usinage à grande vitesse, la chaleur engendrée par le cisaillement n'a pas le temps de se propager à la pièce [20].

II.5.2.2 Domaines d'application de l'UGV:

L'UGV est particulièrement utilisé dans les domaines [13]:

- ❖ Production de moules de grandes et moyennes dimensions.
- ❖ Industrie aérospatiale.
- ❖ Production d'automobiles.

Le mode d'usinage le plus utilisé dans l'UGV est le fraisage.

Le fraisage est, dans son principe, un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) faisant intervenir, en coordination, le mouvement de rotation d'un outil à plusieurs arêtes (mouvement de coupe) et l'avance rectiligne d'une pièce (dit mouvement d'avance). L'outil de fraisage, la fraise, comporte plusieurs arêtes de coupe dont chacune enlève une certaine quantité de métal sous forme de copeaux [21].

Les avantages du fraisage sont un rendement élevé, un bon fini de surface et une haute précision, ainsi qu'une grande souplesse au niveau de la génération de différentes formes. Le plus souvent, le fraisage est utilisé pour produire des surfaces planes, des épaulements et des gorges, mais son efficacité en contournage va croissante grâce à l'utilisation des techniques CNC (Computerized Numerical Control) [21].

Le fraisage est en passe de devenir une méthode d'usinage de plus en plus universelle, disposant d'une gamme toujours plus étendue de machines, de systèmes de commande et d'outils de coupe. Par exemple, les centres d'usinage utilisent largement le fraisage et ont donc besoin, dans ce domaine, d'une grande diversité d'outils.

Le but du fraisage est de produire des pièces dont leur forme est :

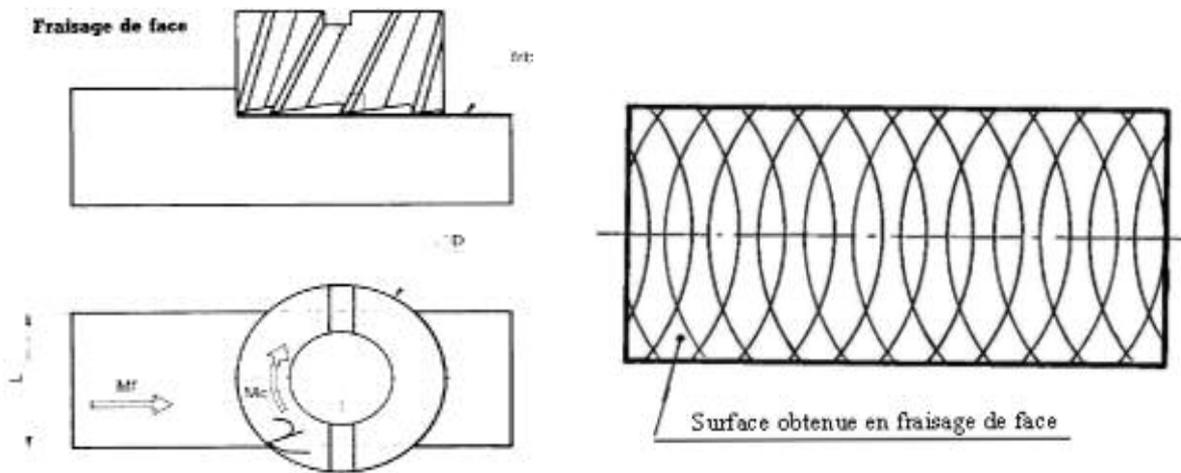
- ❖ à directrices rectilignes (plans, prismatiques, ...).
- ❖ circulaires (intérieures ou extérieures).
- ❖ quelconques.

II.5.2.3 Les modes de coupe [22]:

Il existe deux modes de coupe, selon le sens de rotation de la fraise et la direction du déplacement de la pièce à usiner.

II.5.2.3.1 Fraisage en bout ou de face (figure : II-3):

Le fraisage en bout ou de face est le mode de fraisage où l'axe de la fraise (l'outil) est perpendiculaire au plan fraisé « frb » (ou à usiner) (figure : II-3 « a »).



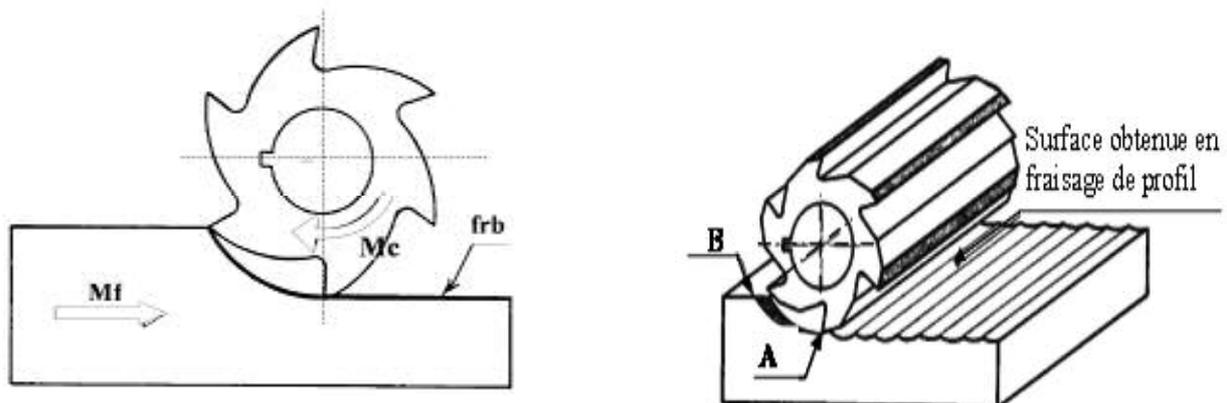
« a » Fraisage de face

« b » Etat de surface

Figure II-3 : Fraisage en bout ou de face [23].

II.5.2.3.2 Fraisage de profil ou en roulant (figure : II-4) :

Le fraisage de profil ou en roulant est le mode où l'axe de la fraise (l'outil) est parallèle au plan fraisé « frf » (figure : II-4 « a »).



« a » Fraisage de profil

« b » Etat de surface

Figure II-4 : Fraisage de profil ou en roulant [23].

Ces deux façons de fraiser donnent un état de surface particulier : des ondulations en forme de vagues apparaissent (figures : II-3 et : II-4 « b »). Ces vagues correspondent au marquage de la pièce par les dents en rotation (mouvement de coupe) et par la translation simultanée du chariot (mouvement d'avance).

II.5.2.3.3 Sens de rotation pour le fraisage de profil ou en roulant :

La fraise effectue un mouvement de rotation tandis que la pièce avance dans sa direction. La coupe est donc ainsi définie par les paramètres impliqués. Il existe deux manières de

procéder, selon le sens de rotation de l'outil par rapport à la pièce. Cette différence joue un rôle fondamental et affecte le processus de fraisage sous divers aspects. La pièce peut avancer, selon le cas, dans le sens de la rotation ou dans le sens opposé, ce qui a tout spécialement son importance en début et en fin de coupe [23].

a) Fraisage en avalant ou en concordance (figure : II-5) :

Les deux mouvements (coupe et avance) convergent dans la même direction.

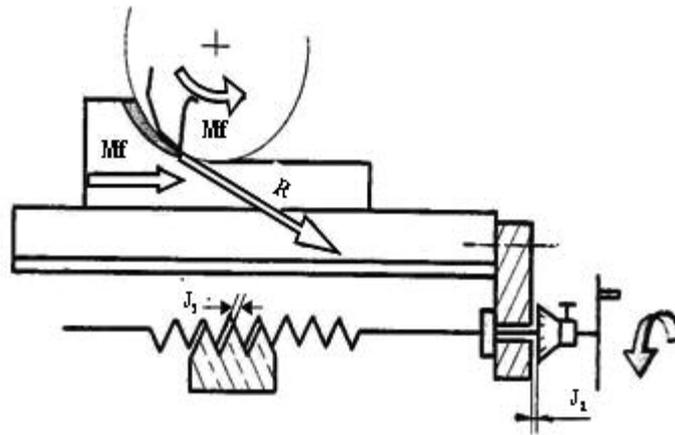


Figure II-5: Fraisage de profil ou en avalant [23].

- L'épaisseur du copeau est maximale à l'attaque (travail par choc donc avance réduite), puis diminue constamment pour devenir nulle en fin de trajectoire de la dent : bonnes conditions de coupe, meilleur état de surface.
- La résultante R des efforts de coupe est dirigée dans le même sens que le M_f . Elle tend à faire plaquer la pièce sur la table, mais également à entraîner celle-ci en raison des jeux fonctionnels du système vis-écrou, ce qui est négatif.
- Ce procédé ne peut être utilisé que sur des fraiseuses spéciales, munies d'un dispositif de compensation des jeux du système vis-écrou, afin d'éviter que la table ne se déplace par à-coups.

b) Fraisage en opposition (figure : II-6):

Les deux mouvements (coupe et avance) s'opposent au point d'attaque de chaque dent dans la matière.

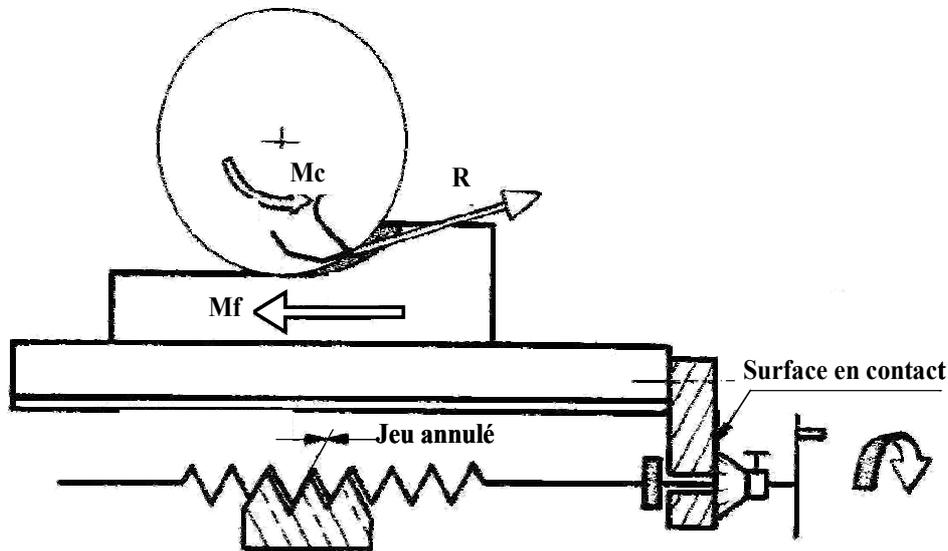


Figure II-6 : Fraisage en opposition ou conventionnel [23].

- L'épaisseur du copeau est faible à l'attaque, puis maximale en fin de trajectoire de la dent.
- La résultante R des efforts de coupe est dirigée dans le sens opposé au Mf . Elle tend à faire soulever la pièce et à faire plaquer la vis contre le flanc de l'écrou avec lequel elle est déjà en contact.

II.6 Les facteurs économiques et techniques de l'UGV:

- ❖ **La concurrence** : La concurrence toujours plus vive sur le marché ne cesse de faire évoluer les normes de qualité [24].
- ❖ **Matières à usiner** : Le développement de nouvelles matières, plus difficiles à usiner, a mis en évidence la nécessité de trouver de nouvelles méthodes d'usinage. L'industrie aéronautique travaille de nombreux alliages d'aciers inoxydables et matériaux réfractaires. L'industrie des moules et matrices doit, quant à elle, résoudre le problème de l'usinage des aciers à outils fortement trempés, de l'ébauche à la finition [24].
- ❖ **Qualité** : La demande pour une qualité de pièces toujours plus élevée [24].
- ❖ **Produit complexes**: Les pièces comportent de plus en plus de surfaces multifonctions. L'évolution aussi des moyens de conception (notamment **CAO**) produit des pièces de géométrie de plus en plus complexes [24].

II.7 Les moyens:

Les phénomènes spécifiques qui apparaissent en UGV et les niveaux atteints tant en vitesse angulaire de la broche qu'en niveaux d'accélération imposent l'utilisation de moyens spécialement dédiés pour l'UGV. Les éléments qui seront étudiés sont :

- ❖ les outils
- ❖ bâti, cinématique
- ❖ la broche
- ❖ les porte-outils
- ❖ les porte-pièces
- ❖ la commande FAO

II.7.1 Outil :

Le corps de l'outil est relativement fin pour minimiser les masses en mouvements. En conséquence, les sollicitations mécaniques du couple outil/matière et les effets dynamiques accrus engendrent des déformations à prendre en compte dans les stratégies d'usinage. En ce qui concerne la pointe des outils, il ne faut pas perdre de vue le couple « outil/matière » pour le choix, mais il faut aussi tenir compte des spécificités de l'UGV. On usine avec une faible épaisseur de coupe (une section de copeaux réduite) ce qui nécessite un affûtage précis garanti par l'emploi de grain de carbure fin, outil cher à l'achat [20].

La température de coupe élevée engendre une usure prépondérante par diffusion et abrasion ; les carburiers proposent des produits nombreux et de plus en plus pointus, répondant à des applications quasi spécifiques pour chaque usineur. On trouve des outils dans les matériaux suivants [20]:

- ❖ En carbure
- ❖ En céramique
- ❖ Revêtu TiN, TiAlN, TiCN
- ❖ En nitrure de bore cubique (CBN)
- ❖ En diamant polycristalin (PCD)

II.7.1.1 Matériaux de coupe:

➤ Les carbures :

Les outils de carbures (à base de carbure de tungstène WC) sont aujourd'hui très utilisés. Ils sont constitués essentiellement de carbure de tungstène (phase α), et de carbure de titane, de tantale ou de niobium (phase γ). Le rôle de l'addition de carbure de titane, tantale ou niobium est d'augmenter les propriétés à haute température (vitesse de coupe élevée) en réduisant le frottement. C'est aussi de diminuer l'usure de la face de coupe en réduisant la diffusion du carbure de tungstène entre l'outil et le copeau [22].

➤ Les céramiques :

La contribution des outils en céramiques au développement de la productivité s'est pendant principalement fait sentir pour l'usinage des matériaux comme les fontes, les aciers trempés et les alliages réfractaires [22].

➤ Les cermets :

Les CERMETS (CÉRAMIQUE MÉTAL), constitués principalement de TiC ou de TiC/N, possèdent par rapport aux métaux durs conventionnels une densité beaucoup plus faible mais une dureté et une résistance à l'usure plus élevées.

Les cermets sont utilisés pour la finition et l'usinage de précision demandant de grandes vitesses de coupe et des avances faibles. Ils se rapprochent ainsi du domaine d'utilisation des céramiques en étant toutefois résistants. Leur emploi diminue ou supprime le collage des copeaux, évitant ainsi les arrachements sur les matériaux malléables (inox, aciers doux) et conduit à une durée de vie accrue [22].

➤ Les nitrures de bore cubique (CBN) :

Après le diamant, le CBN est le matériau le plus dur connu de l'homme. Toutefois, le diamant offre l'inconvénient de s'oxyder sous les températures élevées habituellement générées lors de l'usinage des matériaux ferreux, voisines de 700°C pour les aciers durs. C'est pourquoi son emploi est limité à l'usinage des matériaux non ferreux.

Par contre, la coupe des aciers traités s'avère possible avec le CBN car il présente des caractéristiques intéressantes :

- ❖ Une dureté élevée,
- ❖ Une bonne ténacité.

Il présente également une mauvaise conductibilité thermique mais on observe que la chaleur de coupe est évacuée par le copeau dans une forte proportion (90 % environ). L'outil **CBN** s'échauffe assez peu.

Il a été observé que l'utilisation du **CBN** donne, en particulier en relation avec les aciers durs ayant une teneur en ferrite réduite ou nulle, des augmentations extrêmement importantes de la durée de vie de l'outil.

La résistance aux chocs est importante parce qu'elle indique la capacité de l'outil à supporter des efforts de coupe élevés. Les propriétés chimiques et thermiques caractérisent respectivement la résistance à l'usure chimique (diffusion et dissolution) [22].

➤ **Diamants :**

Les diamants sont les matériaux les plus durs. Mais aussi le plus cher, mais il est quand même nettement moins cher que le diamant mono cristallin. Il possède une résistance à l'usure que les autres matériaux d'outils n'ont pas, en particulier pour les matières fortement abrasives. Néanmoins, le diamant poly cristallin ne peut supporter des températures supérieures à 850°C, aussi il ne pourra pas être utilisé pour usiner des aciers ou des fontes [22].

II.7.1.2 Dispositifs de lubrification :

La lubrification ou le graissage est un ensemble de techniques permettant de réduire le frottement, l'usure entre deux pièces en contact et, en mouvement l'une par rapport à l'autre.

Elle permet souvent d'évacuer une partie de l'énergie thermique engendrée par ce frottement, ainsi que d'éviter la corrosion. [25].

Il y a 4 principaux types de lubrification (figure : II-7):

- ❖ l'air comprimé à 6 bars fournit une parfaite évacuation des copeaux. Il faut que le flux d'air soit bien orienté sur la zone de coupe, l'idéal est d'avoir un soufflage à travers la broche, par contre le pouvoir de refroidissement est faible (figure : II-7 « a »).

❖ l'arrosage par buses périphériques est la plus mauvaise solution, l'évacuation des copeaux y est aléatoire. Le refroidissement de la zone de coupe n'est assuré que épisodiquement ce qui conduit à des chocs thermiques importants (figure : II-7 « b »).

❖ la micro-pulvérisation d'huiles entières permet en plus d'une bonne évacuation des copeaux, favorise leur glissement. Elle est recommandée pour l'usinage des matériaux collants (figure : II-7 « c »).

❖ la lubrification haute pression par le centre outil est le meilleur choix, il permet une bonne évacuation des copeaux, surtout dans les poches profondes, il est indispensable pour la réalisation de perçages profonds ou avec forets à plaquettes. Cette lubrification a un grand pouvoir réfrigérant par contre cela peut provoquer des chocs thermiques (figure : II-7 « d »).

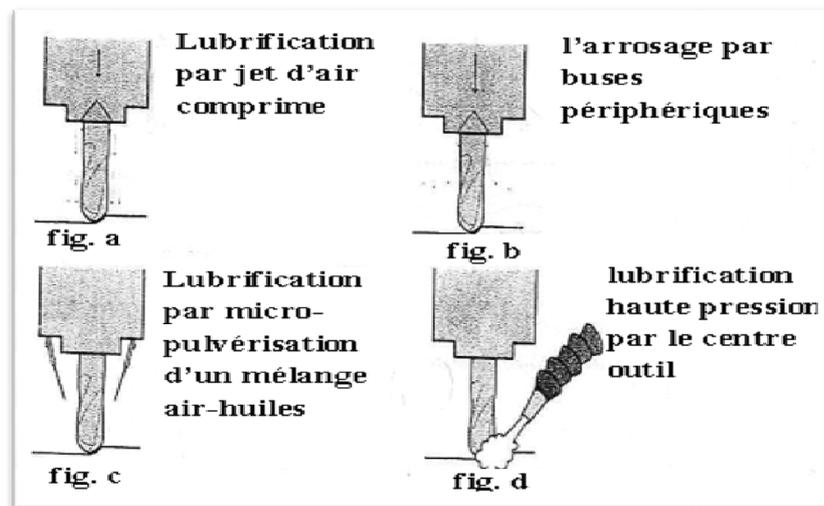


Figure II-7 : Types de lubrification [26].

II.7.1.3 Coût:

De manière générale, le “coût outil” dépend essentiellement de l'application envisagée. En effet, suivant le matériau de l'outil, sa géométrie, le type de lubrification envisagé et les méthodes de production (préréglages hors sites ou non, type de machine, etc.), les coûts peuvent être très différents. Par exemple, si l'utilisation d'outils poly cristallins est souvent recommandée, leur prix est beaucoup plus élevé par rapport aux autres matériaux d'outils : un outil PCBN coûte encore de 5 à 10 fois plus cher que le même outil en céramique. Le coût dépend également beaucoup de la gestion des temps improductifs qui reste importante en UGV, malgré la nette amélioration de la productivité. Enfin, on a vu que les constructeurs cherchent à répondre au problème de dévissage des plaquettes en développant des nouvelles technologies de fixation. Ceci illustre donc le fait que l'on cherche toujours à diminuer le coût outil en proposant

des outils combinés. En effet, ceux-ci permettent un changement d'arête de coupe peu coûteux par rapport à l'affûtage d'un outil monobloc [27].

Après avoir étudié les évolutions des outils dédiés à l'UGV, nous allons maintenant nous intéresser aux porte-outils et aux broches hautes fréquences qui transmettent à l'outil le mouvement de coupe [27].

II.7.1.4 Préréglages et équilibrages:

Comme nous l'avons vu précédemment, les réglages et équilibrages des outils sont indispensables à grande vitesse de coupe. Généralement, au-dessus de 2500 tr/min, l'équilibrage de l'ensemble outil/ porte-outil est nécessaire [27].

Pour ce, les sociétés spécialisées utilisent des systèmes permettant à la fois préréglage, équilibrage et transmission des données [28]. L'outil est monté sur une broche verticale de haute précision. La chaîne de mesure se charge alors de la correction électronique des adaptations de broche, des défauts de coaxialité outil/porte-outil, voire même de l'indication par pointeur laser de la position angulaire du balourd mesuré. Par la suite, l'équilibrage doit être effectué manuellement. Il est maintenant facilité par l'existence de porte-outils avec bague d'équilibrage. Comme on peut le trouver en usinage conventionnel, les jauges des outils sont mesurées sur projecteur de profil sans contact. Enfin, les données sont ensuite transmises à un PC ou une imprimante [27].

II.7.2 Machine Outil:

L'idée même de l'usinage à grande vitesse n'est pas neuve. En Allemagne, déjà vers 1925, Salomon avait pris un brevet sur l'idée. Les Américains et les Russes ont effectué, en 1960, plusieurs tests d'usinage à grande vitesse. Cependant, Il s'agissait toujours de tests balistiques : l'outil de coupe était envoyé le long du matériau à usiner au moyen d'un fusil, d'un canon ou d'une fusée [29].

Ce n'est qu'à partir de la moitié des années 80, avec le développement des électro broches, qu'on a pu effectuer des essais dans un environnement industriel réel, c.à.d. d. sur une machine-outil. Il a cependant fallu attendre le début des années 90, avant de trouver les premières machines à grande vitesse sur le marché [29].

II.7.2.1 Définitions:

Une machine outil a pour but de réaliser physiquement les mouvements de coupe nécessaires à l'obtention d'une surface par enlèvement de matière. Elle réalise le mouvement de coupe et le mouvement d'avance de l'outil par rapport à la pièce. De plus, elle doit permettre l'obtention de pièces en respectant les spécifications fonctionnelles [30].

II.7.2.2 Les éléments des Machines Outils :

Le développement de la technologie grande vitesse a donc impliqué celui des organes de la cellule élémentaire d'usinage (outils, porte-outils, machines, porte-pièces, pièces,...).

➤ La cinématique et le bâti :

✓ La cinématique

Les déplacements des éléments mobiles de la machine doivent permettre de grandes vitesses et accélérations. Pour réduire les temps d'usinage, des stratégies avec peu de variations de vitesses sont privilégiées [31].

Traditionnellement, des systèmes vis à billes assurent la mise en mouvement des éléments mobiles. Les nouvelles générations de vis à billes donnent des vitesses de près de 60 m/min (figure : II-8). Toutefois, l'introduction de moteurs linéaires a permis de coupler des accélérations de 2 à 3g avec des vitesses de près de 90 m/min [31].



Figure II-8: Glissière actionnée par des moteurs linéaires [31].

Dans ces conditions il est nécessaire d'avoir des parties mobiles relativement légères afin de minimiser les effets d'inertie. Ces éléments mobiles ne sont donc pas capables de supporter des efforts aussi importants que certaines machines d'usinages. Deux types de structure de machine-outil cohabitent aujourd'hui: des machines à structure transversale et des machines à structure parallèle [31].

Plusieurs constructeurs proposent des machines à structure parallèle hexapodes qui sont adaptées à l'UGV par leur qualité structurelle: elles présentent une grande rigidité, de faibles masses en mouvement, et permettent donc de fortes accélérations et de grandes vitesses de déplacement. Ces machines sont cependant encore en phase de recherche et de développement, et leur champ d'application est encore à confirmer [31].

✓ Le bâti

Pour obtenir des pièces usinées de grande qualité, la structure de la machine UGV doit être rigide (figure : II-9).

En effet, les accélérations pour atteindre les vitesses de déplacement de 60 à 90m/mn sont importantes et les efforts transmis à la structure de la machine par les masses en mouvement sont conséquents, ce qui amènera des déformations et donc des imprécisions au niveau de la géométrie de la pièce si le bâti n'est pas assez rigide. On réalise souvent les bâtis en béton de synthèse précontraint renforcé de fibres et de matériaux spéciaux. Les bâtis sont également dimensionnés sur des critères vibratoires. La broche tourne à des vitesses angulaires de 20000 à 50000 tr/mn et il est important de prendre en compte les modes vibratoires de l'ensemble de la machine: ils auront une influence sur la géométrie de la pièce usinée [32].



Figure II-9: Bâti d'une machine UGV [32].

➤ **Broche:**

La broche est l'élément principal réalisant la mise en rotation de l'ensemble outil/porte-outil. La broche doit fournir de hautes vitesses de rotation tout en garantissant un couple compatible avec la coupe des métaux. On cherche des broches permettant d'atteindre de hautes vitesses de rotation (couramment de 10000 à 50000 tr/min) avec une puissance de 20 à 50 KW. La technologie des broches a dû s'adapter pour garantir à la fois rigidité mécanique et résistance thermique. Pour cela, les roulements classiques sont remplacés par d'autres technologies moins sensibles aux effets dynamiques prépondérants à ces vitesses, tels que : roulements à billes céramiques; paliers magnétiques et paliers hydrostatiques [32].

De même, la broche doit à la fois atteindre de grandes vitesses de rotation et un couple suffisant à bas régime pour les opérations d'ébauche. Les progrès technologiques permettent aujourd'hui l'utilisation d'électro-broches aux performances suffisantes sans nécessité d'une chaîne de transmission de puissance.



a) Broche IBAG (suisse)

b) : Broche sur paliers à roulements. (Doc. Fischer)

Figure II-10 : Les broches [32].

Les paliers à roulements utilisent la solution de roulements à billes (ou à rouleaux) à contact oblique pour la rigidité et la précision de guidage de ce type de montage. Le montage de roulements est précontraint hydrauliquement ou par ressort afin d'éliminer tout jeu dans le guidage de l'arbre de broche (figure : II-10). Les billes sont en acier ou en céramique. Ces dernières présentent par rapport aux billes en acier les avantages suivants :

- ❖ Usure plus faible (car leur frottement avec les bagues est plus faible),
- ❖ Meilleure régularité de marche,

- ❖ Décalage axial de l'arbre moindre,
- ❖ Vitesse maximale plus élevée.

A haute vitesse, toutes les broches à roulements sont soumises à une forte augmentation de la température au niveau des paliers. Les constructeurs de broches y intègrent donc un système de refroidissement par le stator et prévoient la dilatation vers l'arrière de la broche [28].

➤ Porte Outil :

Cet élément réalise la liaison entre l'outil et la machine. Dans le cas du fraisage, traditionnellement, on utilise un cône normalisé (dit cône ISO). Le passage à de hautes vitesses de rotation entraîne la nécessité d'un comportement dynamique excellent, or, les efforts générés désolidarisent le cône male du cône femelle avec des porte-outils classiques. La liaison outil porte-outil est donc reconçue en UGV [4].

Un cône de mise en position est conservé mais un système de tirage axial lui est ajouté. Par ailleurs une surface plane perpendiculaire à l'axe permet de maîtriser la position axiale de l'outil. Par exemple, on utilise aujourd'hui des cônes HSK(Hohlshaftkegel) (figure : II-11), qui réalisent une liaison avec un appui plan prépondérant garantissant un effort de serrage suffisant, une stabilité face aux vibrations, une grande rigidité et une meilleure répartition des efforts de coupe: ils sont équilibrés pour des conditions de coupe correspondant à l'UGV. Le cône se déforme à hautes vitesses pour venir épouser les formes de la liaison [32].

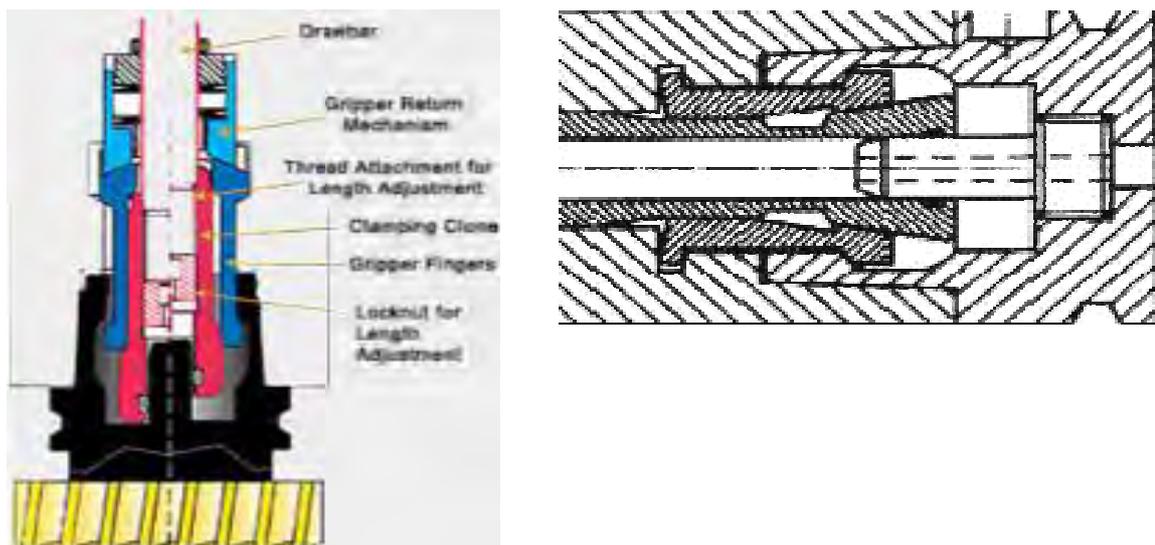


Figure II-11 : Images de cônes HSK en déformation sous sollicitations dynamiques [32].

Sur la figure animée ci-dessus, on voit le cône de ce type de porte-outil. Il est court et il se déforme car sa paroi est mince. La face axiale du porte-outil vient aussi en contact avec la broche ce qui n'est jamais le cas pour le porte-outil de type ISO traditionnel. Lorsque les forces centrifuges augmentent, le mécanisme de serrage axial vient également assurer une force radiale, ce qui assure le contact même à haute vitesse [32].

✓ Coût

Le creux HSK est moins coûteux que le cône ISO. Mais généralement, les industries Possèdent déjà des cônes porte-outils ISO. L'achat de cônes HSK est donc un coût supplémentaire. Ainsi, il est indispensable de bien définir le cahier des charges d'un attachement d'outil afin de ne pas créer un coût de sur qualité [27].

Par contre, les électro broches d'UGV coût environ 5 fois plus cher que les broches traditionnelles. Et ceci s'accroît d'avantage avec la puissance de la broche ou avec une broche à contrôle vectoriel. Là encore, il est donc important de bien cibler les objectifs [27].

➤ **Porte pièce:**

Les efforts étant faibles, les porte-pièces peuvent être plus fins qu'en usinage conventionnel [32].

➤ **Commande FAO:**

La commande numérique en UGV pilote les principaux organes de la machine décrits précédemment [31]. L'usinage de formes complexes en 3D à des vitesses de coupe et de déplacement élevées engendre des calculs beaucoup plus lourds qu'en usinage conventionnel [30]. De nombreuses études ont été menées pour améliorer les algorithmes mathématiques, les trajectoires d'outils à utiliser pour minimiser le temps de calcul tout en garantissant au final un état de surface optimal[32].

Les stratégies employées en UGV diffèrent de celles employées en Usinage Conventionnel principalement à cause des effets dynamiques: les changements brusques de trajectoire d'outil, les variations brusques de la section de copeau (lors de l'entrée dans la matière par exemple) amènent des variations de sollicitations mécaniques importantes, et ont des conséquences sur la qualité et la sécurité de l'usinage. Des sollicitations mécaniques constantes permettent de garantir une déformation constante de l'outil et un meilleur contrôle de la surface usinée. Le risque de bris

d'outil est ainsi également maîtrisé. Les stratégies d'usinage doivent également prendre en compte les phénomènes thermiques, en évitant la formation d'un amas de copeaux au contact de l'outil ou de la pièce pour éviter un échauffement négatif dans les deux cas (usure supérieure pour l'outil, caractéristiques mécaniques superficielles de la pièce modifiées localement) [4].

L'UGV impose donc une augmentation des performances des algorithmes de calcul. Le choix du logiciel de FAO est essentiel car l'utilisation d'un logiciel non adapté peut amener des défauts sur la pièce fabriquée. Un logiciel adapté à l'UGV doit permettre de calculer les trajectoires sur une machine 5-axes en prenant en compte les effets dynamiques, et permettre le choix des stratégies d'usinage adaptées à l'UGV [32].

II.8 Environnement:

➤ **Sécurité**

Les conditions d'utilisation de l'UGV nécessitent un regard particulier sur la sécurité. En effet, le moindre copeau, bris d'outil qui s'échappe de manière imprévue à ces vitesses de coupe représente l'équivalent d'une balle de fusil. Les carters sont donc blindés [4].

➤ **Thermique**

Comme en usinage conventionnel, il est nécessaire d'atteindre la température de fonctionnement stabilisée pour éviter des dilatations des éléments de la machine et des dispersions géométriques conséquentes: la précision de l'UGV étant meilleure qu'en usinage conventionnel, l'influence relative de cet effet est plus importante [4].

II.9 Conclusion:

Grâce à l'apparition de l'UGV les procédés d'usinage se sont développés et ont permis d'avoir un gain de temps très important lors de la fabrication des pièces. Nous avons présenté aperçu général sur l'usinage des métaux ainsi que les principales procédures d'usinage et les paramètres de coupe ; donné leur définition et leur domaines d'application.

On a aussi donné les modes de coupe utilisé en fraisage, les différents types d'usinage selon le sens de rotation de la fraise et la direction du déplacement de la pièce à usiner.

Nous avons montré les différentes évolutions des outils destinés à l'UGV, et les différents types de matériaux d'outil, ainsi que les différents types de lubrification ou d'arrosage rencontrés en UGV.

Enfin, nous avons présenté les spécificités de la machine-outil destinée à l'UGV, les nouvelles technologies des Machines-Outils d'Usinage à Grande Vitesse (moteur linéaire,...), les éléments des Machines outils (le bâti, les axes de déplacement, le porte-outil, la broche haute fréquence), et l'environnement.

Chapitre III :

CARACTERISTIQUE

DE L'UGV

III Chapitre III : CARACTERISTIQUE DE L'UGV	30
III.1 Introduction:.....	31
III.2 Caractéristique de l'UGV:.....	31
III.2.1 Vitesse de Coupe V_c :	31
III.2.2 Phénomènes de copeau:.....	32
III.2.2.1 Discontinuité du copeau:.....	32
III.2.2.2 Type de copeaux :	32
III.2.3 Phénomènes thermiques :	33
III.2.4 Avantage de l'UGV:.....	34
III.2.4.1 Les avantages techniques :	34
III.2.4.2 Les avantages économiques :	35
III.2.5 Inconvénients de l'UGV:	36
III.3 Règle d'usage:	37
III.4 Conclusion :	38

III.1 Introduction:

La mise en place d'opérations d'usinage à grande vitesse dans un processus de fabrication de pièces mécaniques n'est pas une action simple et doit répondre dans la plupart du temps à un besoin économique fort. Ces grandes vitesses engendrent un phénomène de coupe spécifique.

III.2 Caractéristique de l'UGV:

III.2.1 Vitesse de Coupe V_c :

Il est aujourd'hui possible d'usiner des pièces mécaniques sur de larges plages de vitesses de coupe. Selon le matériau utilisé, ces plages varient, mais il est toujours possible de distinguer trois zones de vitesses de coupe distinctes [32]:

- ❖ une zone de vitesse correspondant aux vitesses de coupe de "Usinage Conventionnel".
- ❖ une zone de vitesses de coupe inexploitable conditions de coupe dégradées.
- ❖ une zone de vitesses de coupe correspondant à "l'Usinage Grande Vitesse".

Par exemple, lors d'usinage d'acier à des vitesses de coupe de 30 à 200 m/min, on parle d'usinage conventionnel, alors que des vitesses de coupe de 500 à 2000 m/min correspondent au domaine de l'UGV (figure : III-1).

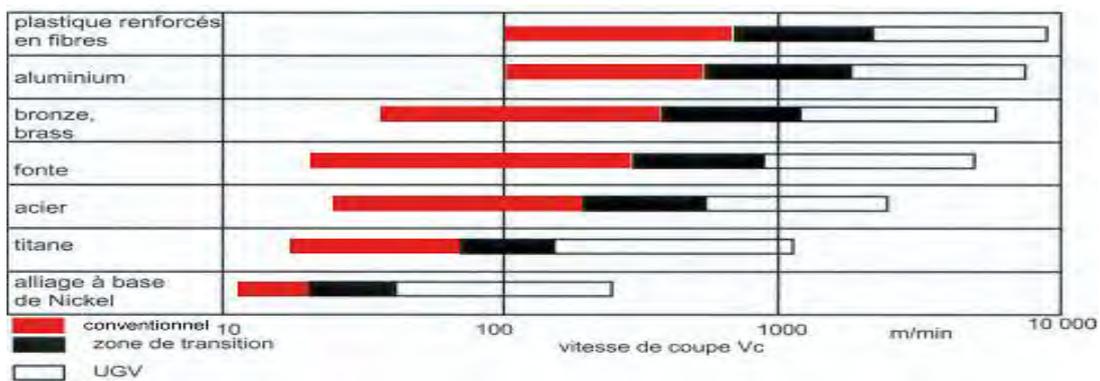


Figure III-1 : Plages de vitesses de coupe pour différents matériaux [32].

En augmentant V_c au delà des limites de vitesse de l'usinage conventionnel, on commence par traverser une zone de vitesses inexploitable appelée « Vallée de la mort » dans laquelle les conditions de coupe sont dégradées (usure rapide de l'outil, mauvais état de surface...), puis on arrive dans le domaine de l'UGV où les conditions de coupe sont excellentes. La limite entre les zones est arbitraire [20].

La plage de vitesses de coupe caractéristique de l'UGV dépend également de l'opération effectuée (Fraisage, Tournage, Perçage) [20].

III.2.2 Phénomènes de copeau:

Les bons résultats de l'UGV s'expliquent par les phénomènes de formation du copeau.

III.2.2.1 Discontinuité du copeau:

Le respect des trois critères *coût, qualité, et délai* imposent l'utilisation de moyens de production plus performants et plus flexibles [33].

La formation du copeau en usinage à grande vitesse est un phénomène micro-géométrique influant sur plusieurs grandeurs macro-géométriques à surveiller sur un centre d'usinage. Sa maîtrise contribue à :

- ❖ Fiabiliser le processus d'usinage,
- ❖ Garantir la qualité géométrique des surfaces usinées (l'état de surface et précision dimensionnelle),
- ❖ Assurer la productivité.

Si on augmente la vitesse de coupe dans un premier temps, les points de contact augmentent et la force spécifique augmente. La force nécessaire à la déformation plastique augmente aussi avec la vitesse, mais baisse avec la température [34].

III.2.2.2 Type de copeaux :

Pour les métaux, le processus de formation du copeau est principalement basé sur des déformations plastiques (figure : III-2). Selon les conditions de coupe, on rencontre trois familles de copeaux : [33 ;35].

- ❖ **Le copeau continu,**
- ❖ **Le copeau segmenté,**
- ❖ **Le copeau dentelé.**



Figure III-2 : Évolution des copeaux suivant la vitesse de coupe (A: copeau continu B; copeau segmenté C: copeau dentelé)[35].

a) Copeau continu :

La continuité du matériau y est préservée, et les déformations plastiques dans les zones de cisaillement sont quasi stationnaires.

b) Copeau segmenté :

Il est composé d'éléments plus ou moins connectés entre eux, résultant de variations périodiques de la couche superficielle ; ce qui conduit à des zones alternées de déformations locales très peu cisillées.

c) Copeau dentelé :

Il est en majorité formé d'éléments séparés, dus plutôt à une rupture du matériau qu'à un cisaillement de celui-ci qui permet d'étudier un copeau en cours de formation pour trois vitesses de coupe différentes.

III.2.3 Phénomènes thermiques :

Les sollicitations thermiques sont générées lors de la coupe par l'auto-échauffement au sein du matériau de la pièce et par les frottements à l'interface outil/pièce [18].

En usinage conventionnel, l'énergie calorifique s'évacue dans les copeaux mais également dans la pièce et l'outil dans des proportions non négligeables. Ainsi, le matériau subit un traitement thermique local (trempe superficielle) qui modifie les caractéristiques de la pièce finie.

En UGV, la nature de la formation du copeau est différente et l'énergie de la coupe s'évacue à plus de 80% dans les copeaux. Bien que des énergies plus importantes soient mises en

jeu, les échanges thermiques entre le copeau et la pièce n'ont plus le temps d'avoir lieu: celle-ci reste pratiquement à température ambiante. Cette dissipation de l'énergie de coupe a une influence sur la température de l'outil. Une simulation thermique de la coupe montre la formation d'un point chaud en Usinage Conventionnel et en UGV situé à la pointe de l'outil [18].

La température de ce point varie de 500°C en Usinage Conventionnel à 1000 °C en UGV. La localisation du point chaud à la pointe de l'outil permet de faciliter la coupe pour les matériaux ductiles car le matériau usiné a tendance à se ramollir à son contact [18].

❖ Efforts de coupe:

Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc des élévations de température qui se produisent au cours de la coupe. Pour toutes autres conditions de coupe égales, l'augmentation de la vitesse de coupe ne s'accompagne pas d'une variation notable des efforts de coupe (10% de baisse environ), alors que l'augmentation de la vitesse d'avance entraîne une augmentation de la valeur de l'effort tangentiel (relation linéaire: l'effort double environ quand la vitesse d'avance double) [20].

La puissance des broches des machines UGV a des limites: l'augmentation des vitesses de rotation de la broche impose une réduction des efforts de coupe pour ne pas changer de gamme de puissance. Les stratégies privilégiées pour augmenter le débit copeau sont donc d'associer des profondeurs de passe plus faibles (pour diminuer les efforts) avec des vitesses d'avance élevées (pour augmenter le débit copeaux). Sous certaines conditions, le débit copeaux est augmenté avec une réduction nette des efforts de coupe [20].

III.2.4 Avantage de l'UGV:

L'UGV améliore les performances techniques et économiques de l'usinage [36].

III.2.4.1 Les avantages techniques :

a) La conservation des propriétés des matériaux usinés :

L'UGV apporte une solution au problème posé par l'usinage conventionnel qui peut modifier les caractéristiques mécaniques des matériaux usinés. En effet, on observe un durcissement de la surface par l'écrouissage du métal pendant la formation du copeau et le transfert de chaleur occasionné par l'effort de coupe peut engendrer des modifications structurales superficielles.

En UGV, la chaleur produite par le cisaillement du copeau est évacuée presque intégralement par un copeau court et fortement fragmenté qui est rapidement évacué de l'arête de coupe et de la zone d'usinage. Il n'occasionne donc pas de transfert de chaleur et la surface usinée reste froide. [36,37, 38].

b) Une meilleure qualité de surface :

Avec l'UGV, la qualité des surfaces usinées est améliorée. Les efforts de coupe, plus faible qu'en conventionnel du fait de la limitation de la profondeur de passe, permettent une réduction voire l'élimination de la déformation des pièces même celles de faible épaisseur donc l'usinage de parois minces, une réduction des flexions des outils donc l'amélioration de la durée de vie des outils et un bridage plus faible des pièces. [37, 38].

Avec l'UGV, on obtient une rectitude des parois, des angles parfaitement vifs sans aucune trace de bavure, car la hauteur des crêtes est diminuée par le nombre de passes plus élevé, sans trace d'accords. [38, 39]. Le temps de polissage manuel est réduit voire supprimé. [37]

c) Une meilleure précision dimensionnelle :

L'UGV offre une précision dimensionnelle plus grande et une fois la gamme d'usinage fiabilisée une meilleure répétitivité sur la série. Les pièces sont alors toutes produites conformément au cahier des charges.

d) L'usinage de nouveaux matériaux :

L'UGV facilite l'usinage à moindre coût des matériaux à haute résistance mécanique et permet d'usiner les matériaux comme les composites très abrasifs. [37, 38]

e) L'usinage de formes complexes :

L'UGV permet de réaliser des formes quasi impossibles à réaliser économiquement en usinage conventionnel : fonds de poches, raidisseurs de faibles épaisseurs [36, 37].

III.2.4.2 Les avantages économiques :

a) La réduction des délais :

L'UGV apporte une réduction des délais de fabrication en apportant une simplification du processus de fabrication. [37]

b) La réduction des coûts de production :

L'UGV permet de bénéficier d'une réduction des coûts de production grâce à l'importante diminution des temps de coupe. Elle peut atteindre 25 % dans le cas de pièces uniques, 35 à 40 % dans le cas de petites séries et 50 % pour les grandes séries. [40, 41]

c) La réduction des coûts d'investissement :

La réduction du nombre de machines, la suppression de certaines opérations d'usinage (exemple : demi finition), la réduction du nombre des outils et l'accroissement de leur durée de vie procurent un gain sur les coûts d'investissements. [37, 38]

d) La flexibilité de la capacité de production :

La polyvalence de certaines machines UGV permet une plus grande flexibilité que les machines conventionnelles. La machine doit être capable d'usiner des pièces non connues lors de sa spécification initiale et capable de se convertir en fonction des besoins et de surcroît d'accepter les changements de cadences. Les machines UGV s'adaptent par simples modifications du logiciel et peuvent passer de 1000 boîtes de vitesses par jour à 600 ou 1200. [41]

III.2.5 Inconvénients de l'UGV:

- ❖ Les outils plus chers,
- ❖ Difficultés pour trouver et recruter du personnel qualifié,
- ❖ Très longue période de mise au point du processus,
- ❖ Les erreurs humaines, de matériel ou de logiciels peuvent avoir de très graves conséquences.
- ❖ Nécessité d'une bonne planification du processus d'usinage,
- ❖ Mesures de sécurité indispensables,
- ❖ Préparation Conception et fabrication assistées par ordinateur (CFAO) importante.

III.3 Règle d'usage:

Importance du fraisage en avalant [42]:

Un autre paramètre d'usinage important consiste à utiliser dans la mesure du possible du fraisage en avalant. Dans la grande majorité des cas, cette méthode est préférable au fraisage en opposition (figure : III-3).

En fraisage en avalant, lorsque l'arête de coupe entre dans la matière, l'épaisseur copeaux est à sa valeur maximum alors qu'en fraisage en opposition, elle est à sa valeur minimum. La durée de vie d'outil est généralement plus courte en fraisage en opposition qu'en fraisage en avalant du fait de la chaleur nettement plus importante générée par cette opération. Lorsque, en fraisage en opposition, l'épaisseur copeaux augmente de zéro à sa valeur maximum, l'arête de coupe est exposée à plus de frottements, ce qui entraîne cet échauffement.

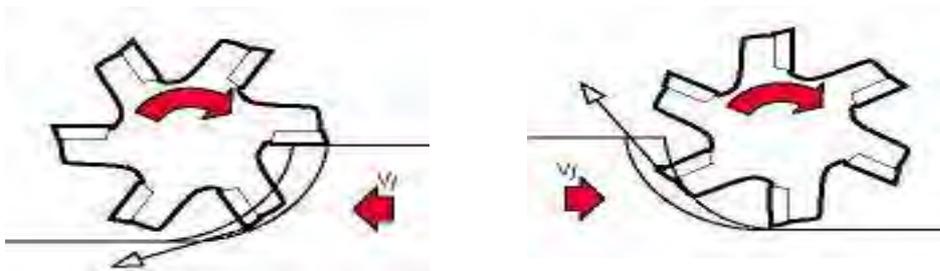


Figure III-3 : Fraisage en avalant fraisage en opposition [42].

Les forces radiales sont également considérablement plus élevées en fraisage en opposition, ce qui a une influence négative sur les paliers de broches.

En fraisage en avalant, l'arête de coupe est principalement exposée à des contraintes de compression, qui sont nettement moins défavorables aux propriétés des carbures que ne le sont les contraintes de traction qui se développent en fraisage en opposition.

Par contre en fraisage latéral de finition avec du carbure monobloc, le fraisage en opposition sera choisi en priorité, en particulier dans les matières trempées. Il est alors plus aisé d'avoir une bonne tolérance. Le défaut de recouvrement entre les différentes passes axiales sera également moins important.

Le fraisage en opposition peut être favorable lorsqu'on possède d'anciennes fraiseuses manuelles avec un jeu important de la tige filetée, car une « contre-pression » se crée qui stabilise l'usinage.

La meilleure façon de faire du fraisage en avalant lors du fraisage de cavité consiste à faire du contournage. Le contournage avec la périphérie de la fraise (par exemple une fraise à bout sphérique) permet souvent une meilleure productivité, du fait d'un plus grand nombre de dents effectivement en coupe.

Il est également important que les trajectoires des outils soient les plus fluides possibles. On évitera au maximum les changements de direction brusques. Ceci aura pour effet d'améliorer l'état de surface, de diminuer l'usure des outils et de ménager la mécanique de la machine.

III.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques du l'UGV, (vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe). Cette technologie consiste à augmenter notablement les vitesses de coupe (de 5 à 10 fois supérieure aux valeurs traditionnelles).

Ainsi, nous présentons les processus de formation du copeau divisée en trois familles de copeaux (Le copeau continu, Le copeau segmenté, Le copeau dentelé), et les avantages et les inconvénients de l'UGV.

Enfin, nous présentons les règles d'usage de l'UGV et l'importance du fraisage en avalant.

Chapitre IV : *OPTIMISATIONS ET* *STRATEGIE* *D'USINAGE*

IV Chapitre IV : OPTIMISATIONS ET STRATEGIE D'USINAGE	39
IV.1 Introduction:.....	40
IV.2 PREMIERE PARTIE:.....	40
IV.2.1 Les moyens de réalisation:.....	40
IV.2.2 Déterminations des paramètres de coupe :	43
IV.2.3 Présentation d'expérience:.....	45
IV.3 DEUXIEME PARTIE : Discussion des résultats	45
IV.3.1 Résultats:	50
IV.3.2 Discussion:.....	50
IV.4 TROISIEME PARTIE : Stratégie d'usinage.....	50
IV.4.1 Définition Stratégie d'usinage:.....	51
IV.4.2 Décomposition de la gamme d'usinage :	51
IV.4.3 Les modes d'usinage :	52
IV.5 Conclusion:	53

IV.1 Introduction:

La réalisation des pièces de formes complexes passe par la génération de trajectoires d'usinage, basée sur un modèle CAO, une stratégie d'usinage et une machine outil à commande numérique donnée. Afin d'assurer les meilleures performances possibles en terme de qualité et de productivité [43].

Bien que l'optimisation des conditions de coupe (vitesse de coupe et d'avance, géométrie de l'outil, **état de surface**, etc.) soit importante pour améliorer la durée de vie des outils, la connaissance de leur nature et de leurs propriétés est nécessaire dans la prédiction de leur comportement lors du procédé d'usinage

Pour faire face à la concurrence, il est essentiel d'obtenir toujours plus de compétitivité et donc de se positionner judicieusement dans le triangle "coûts\ qualité\ délais".

Ce chapitre est structuré en trois parties :

- ❖ **La première partie** : présente les moyens de réalisation : la matière utilisée, les paramètres de coupe et présentation d'expérience
- ❖ **La deuxième partie** : elle présente la discussion des résultats
- ❖ **La troisième partie** : elle présente la stratégie d'usinage.

IV.2 PREMIERE PARTIE:

IV.2.1 les moyens de réalisation:

➤ **Les machines outils utilisées lors des essais sont :**

- ✓ une fraiseuse plane universelle conventionnelle.
- ✓ une fraiseuse à commande numérique pour l'usinage à fort débit.

➤ **Outils de coupe:**

L'outil utilisé pour les essais est une fraise en carbure dont les caractéristiques sont les suivantes :

- ✓ **Référence de la plaquette** : HERTEL.4.211003R 611.
- ✓ **D=63**(mm), diamètre de l'outil de fraisage.
- ✓ **Z=4** Nombre des dents de l'outil.



Figure IV-1 : L'outil utilisé pour l'essai N.4.30105R 131 P25.

Les plaquettes utilisées lors de nos essais ont été choisies en fonction des recommandations de nos partenaires industriels. Dans des conditions «normales» d'usinage, (matériaux tendre et lubrification), une géométrie fine (forme W) et un rayon de plaquette faible ($r = 0,4$ mm), référence : HERTEL.4.211003R 611. (Figure n°IV-2 et IV-3).

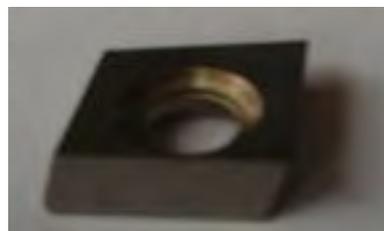


Figure IV-2 : Vue d'ensemble de la plaquette HERTEL.4.211003R 611.

Dimensions [mm] :

- ✓ **IC** = 13,2mm
- ✓ **Epaisseur (t)** = 4,8mm
- ✓ **rayon de plaquette** : $r = 0,4$ mm

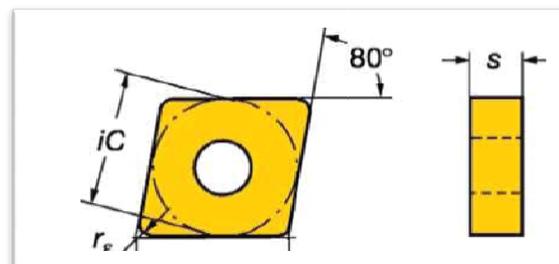


Figure IV-3 : géomètre de la plaquette HERTEL.4.211003R 611.

➤ **Matière usinée:**

C'est un acier faiblement allié trempé avec des grains fins fréquemment utilisé dans l'industrie. Cet alliage permet donc de se placer dans des conditions d'usinage représentatives de la réalité industrielle. Leurs propriétés en usinage sont les suivantes :

❖ **les compositions chimiques :**

Matériau Testé	Composition Chimique (% en masse)										
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	S	P	Al	Ti
27 Mn Cr 5	0,242	0,24	1,239	0,195	1,161	0,034	0,213	0,033	0,011	0,023	0,0016

Tableau 1 : Composition chimique de matériau testé.

❖ **les caractéristiques mécaniques :**

- ✓ Dureté Brinell HB = 200 Da N/mm².
- ✓ Résistance du rupteur R = 400 N/mm².

Une éprouvette de forme rectangulaire a été utilisée durant ces essais (figure : IV-4). Elle avait pour dimensions :

- ✓ Longueur : 200 [mm].
- ✓ Largeur = 160 [mm].
- ✓ Hauteur = 50 [mm].

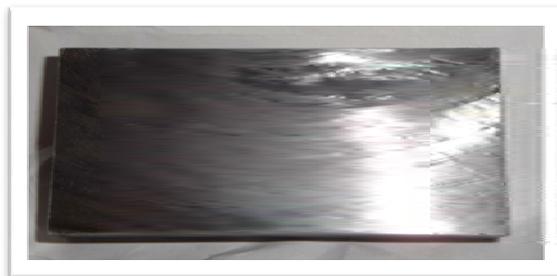


Figure IV-4 : Éprouvette servant aux essais.

On utilise l'opération de surfaçage :

Le surfaçage est une opération de coupe combinée avec plusieurs arêtes, essentiellement celles situées à la périphérie et, dans une certaine mesure, seulement dans la partie centrale de l'outil.

La fraise au contact de la pièce tourne perpendiculairement à la direction de l'avance radiale.

IV.2.2 Déterminations des paramètres de coupe :

Une lame d'outil pénètre dans la matière et enlève un copeau. L'outil suit une trajectoire par rapport à la pièce à usiner. Ces mouvements sont assurés par les éléments constitutifs de la machine outil. Pour obtenir un travail satisfaisant (bon état de la surface usinée, rapidité de l'usinage, usure modérée de l'outil, ...) on doit régler les paramètres de la coupe.

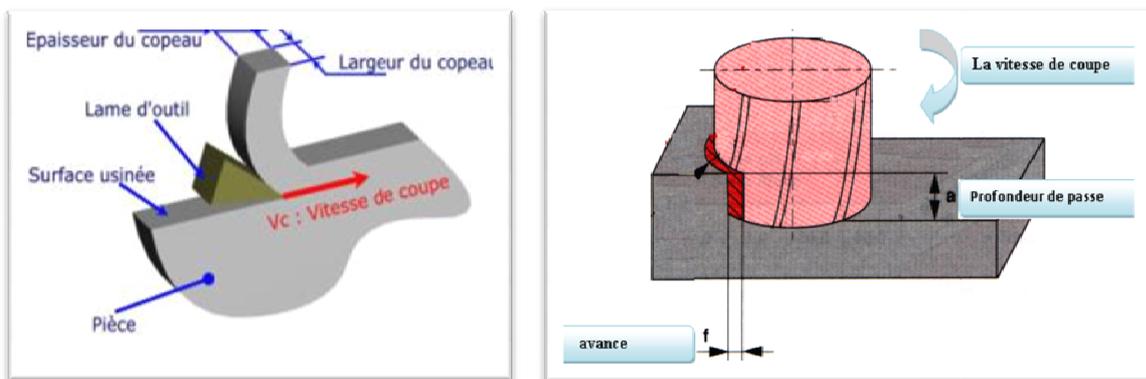


Figure IV-5 : Configurations d'usinage [44].

Il faut définir les paramètres d'usinage, afin de ne pas se placer d'entrée dans les conditions de dégradation des arêtes de coupe trop rapides. Pour régler les paramètres de l'opération de fraisage on a choisi :

❖ La vitesse de coupe:

La vitesse de broche, le diamètre de l'outil et la vitesse de coupe sont naturellement liés par les formules suivantes [16]:

$$n = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D} \text{ [tr/min]} \dots \dots \dots \text{Équation 1}$$

Avec :

- ✓ Même diamètre de l'outil en carbure $D = 63[\text{mm}]$.
- ✓ vitesse de broche :
 - pour l'usinage conventionnelle $n = 900[\text{tr}/\text{min}]$.
 - pour l'usinage à fort débit $n = 2000[\text{tr}/\text{min}]$.

Pour ces données, on trouve la vitesse de coupe :

- pour l'usinage conventionnelle $V_c = 180 [\text{m}/\text{min}]$.
- pour l'usinage à fort débit $V_c = 400 [\text{m}/\text{min}]$.

❖ L'avance par minute ou vitesse d'avance:

L'avance influence non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la matière dont il se brise [16]. On parle également ici d'avance de table, suivant :

$$V_f = f_z \times n \times z \dots \dots \dots \text{Équation 2}$$

Avec :

- ✓ l'avance voir annexe 2 :
 - pour l'usinage conventionnelle $f_z = 0.01805 [\text{mm}/\text{dent}]$.
 - pour l'usinage à fort débit $f_z = 0.025[\text{mm}/\text{dent}]$.
- ✓ Même nombre des dents de l'outil : $Z = 4$.

Après calcul, on trouve la vitesse d'avance :

- pour l'usinage conventionnelle $V_f = 65[\text{mm}/\text{min}]$.
- pour l'usinage à fort débit $V_f = 200[\text{mm}/\text{min}]$.

❖ Profondeur de passe:

La profondeur de passe est le déplacement de l'outil déterminant la quantité de matière à enlevée sur la pièce, on prend la même profondeur de passe :

$$a_p = 1[\text{mm}]$$

IV.2.3 Présentation d'expérience:

Pour réaliser cette expérience deux phases ont été faits :

- 1 La première phase est un usinage par enlèvement de matière réalisée au niveau d'atelier de complexe pelles et grues CPG à Ain Smara Constantine, L'usinage se fait sur une fraiseuse horizontale.
- 2 La deuxième phase est un usinage par enlèvement de matière à grande vitesse sur une fraiseuse à commande numérique pour l'usinage à fort débit.
- 3 La troisième phase est une phase de mesure réalisée à l'aide d'un rugosimètre.

IV.3 DEUXIEME PARTIE : Discussion des résultats

IV.3.1 Résultats:

❖ Temps de coupe :

Le temps de coupe T_c correspondant pour l'effectuer est déterminé par la relation :

$$T_c = \frac{L}{V_f} [\text{min}] \dots\dots\dots \text{Équation 3}$$

Avec :

- ✓ T_c : temps de coupe en minutes.
- ✓ $V_f = (65 \text{ mm/min} ; 200 \text{ mm/min})$: avance de la pièce.
- ✓ $L=l+D$: représenté la longueur de la passe en mm (longueur de la pièce $l=200\text{mm}$; diamètre de l'outil $D= 63 \text{ mm}$).

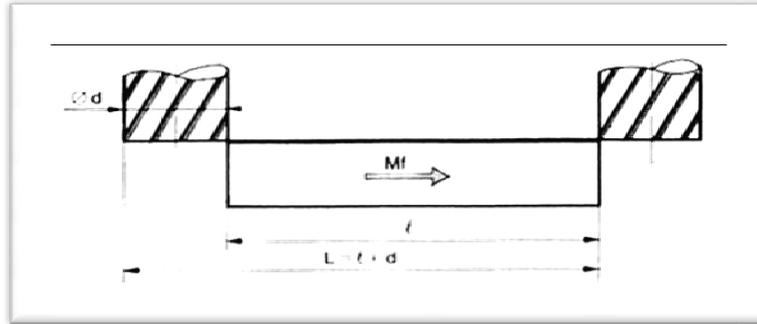


Figure IV-6: temps de coupe [23].

Temps de coupe :

- Pour l'usinage conventionnel **T= 4min 10sec.**
- pour l'usinage à fort débit **T = 1min 40sec.**

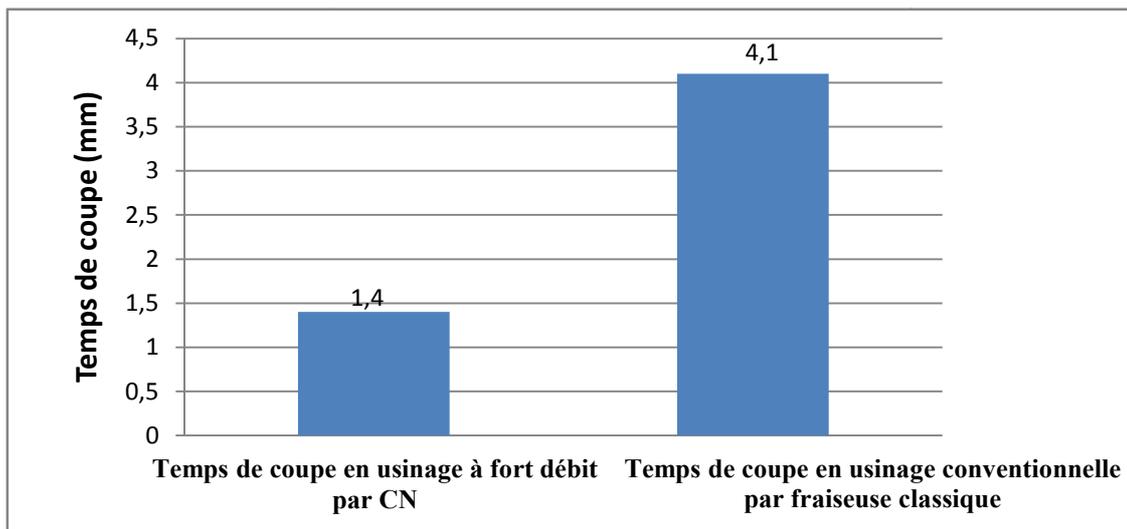


Figure IV-7 : Comparaison du temps de coupes

❖ **Mesure la rugosité de pièce :**

La procédure mise en place est basée sur l'utilisation d'un rugosimètre (figure : IV-8); cet appareil permet l'enregistrement de la rugosité théorique **Rt** et de la rugosité arithmétique **Ra**.



Figure IV-8 : Rugosimètre SURFTEST SJ 301.

C'est un modèle à patin, avec imprimante rapide intégrée à large écran tactile.

- ✓ Affichage graphique des profils.
- ✓ Touches ergonomiques et écran LCD tactile.
- ✓ 25 paramètres disponibles.
- ✓ Fonctions statistiques.
- ✓ Fonction Bon / Mauvais.
- ✓ Etalonnage automatique

Après les mesures de l'état de surface par rugosimètre en trouve :

- L'état de surface mesuré en usinage conventionnel : $R_a = 3.2\mu m$
- L'état de surface mesuré en usinage par fraiseuse à commande numérique pour l'usinage à fort débit : $R_a = 0.6\mu m$

Suite l'étude bibliographique nous avons proposé l'utilisation usinage à grande vitesse pour optimiser l'état de surface avec des conditions de coupe très élevées.

Nous avons choisi :

- ✓ Vitesse de broche $n = 8000$ tr/min, correspondent la vitesse de coupe $V_c = 1582$ mm/min
- ✓ Vitesse d'avance $V_f = 4500$ m/min correspondent l'avance $f_z = 0.14$ mm/dent
- ✓ Profondeur de passe = 0.5 mm.

On applique la formule suivante pour les cas suivants [45]:

$$Rt = \frac{(fz)^2 * Z^2}{R} \dots\dots\dots \text{Équation 4}$$

$$Rt = 1.25 \mu\text{m}$$

L'état de surface désiré est **Ra = 0.2 μm**

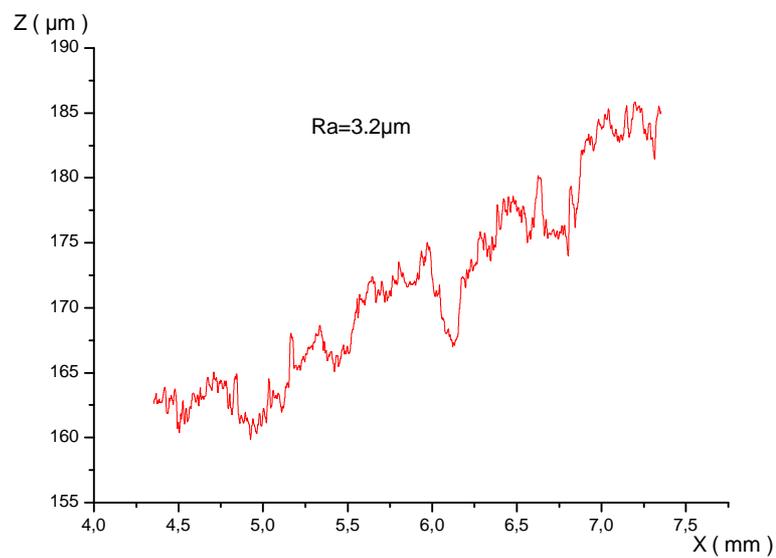


Figure IV-9 : Allure de la variation de la surface par usinage classique

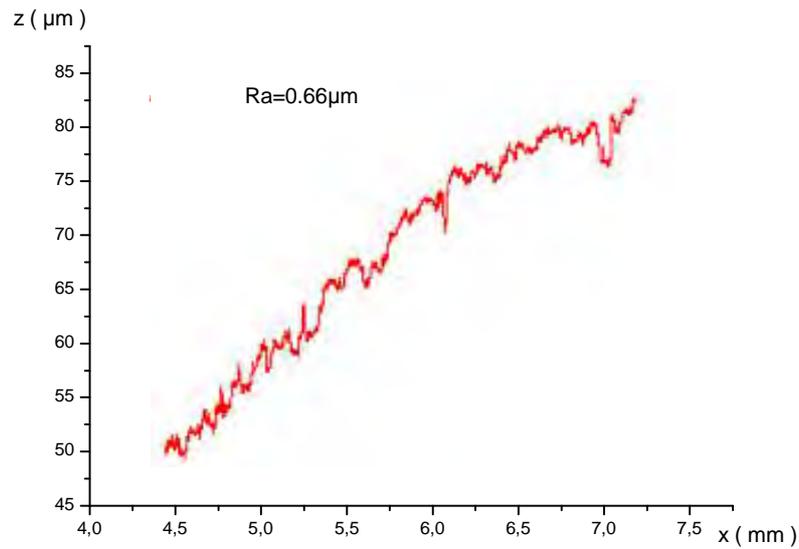


Figure IV-10 : Allure de la variation de la surface par usinage par fraiseuse à commande numérique pour l'usinage à fort débit.

vitesse de coupe [m /min]	rugosité R_a [μm]
180	3.2
300	0.66
1582	0.2

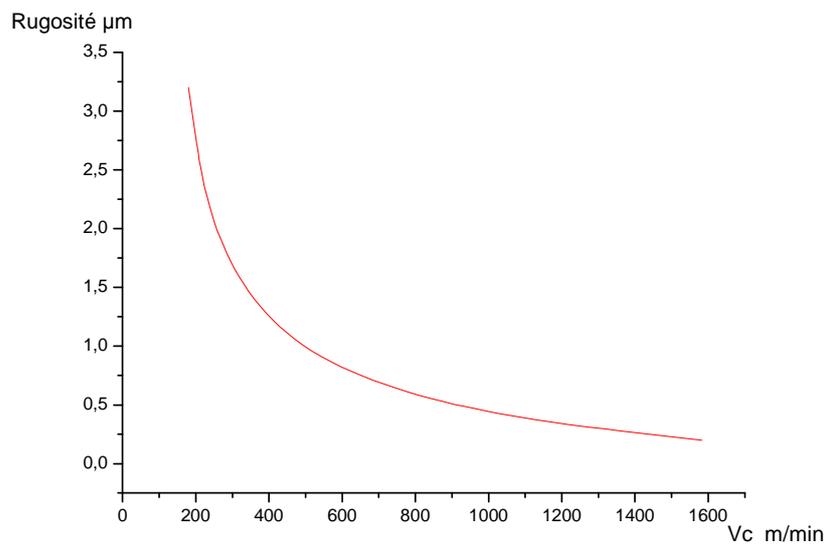


Figure IV-11 : La variation de rugosité en fonction de la vitesse de coupe

IV.3.2 Discussion:

D'après les calculs des temps (figure IV-7) nous a vous remarqué le temps de coupe pour l'usinage conventionnelle par fraiseuse classique plus long que l'usinage a fort débit par fraiseuse a commende numérique.

Les figures IV-9 et IV-10 présentent les résultats d'une expertise faite sur une fraiseuse horizontale d'une opération de surfacage pour comparer l'état de surface entre les deux opérations, selon les graphes nous constatons une différence dans la forme de la trajectoire l'état de surface, et l'amplitude environ 195 μm et 155 μm dans le graphe de la figure IV-9, environ 84 μm et 47 μm dans le graphe de la figure IV-10.

D'après ces résultats mesurables (fraisage conventionnel $R_a = 3.2\mu\text{m}$ et le fraisage à fort débit $R_a = 0.66\mu\text{m}$) nous avons choisi usinage par fraisage à fort débit vu le meilleur état de surface.

Aujourd'hui avec l'apparition des nouveaux procédés d'usinage à grande vitesse, on voit également apparaître un nouveau procédé appelé rectification grande vitesse, où on peut avoir et atteindre des $R_a = 0.2\mu\text{m}$

Nous avons présente la variation de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe figure : IV-11 que l'usinage de l'acier à vitesses réduites ou à des vitesses élevées maintient Ra à des valeurs faibles.

Généralement, les vitesses élevées permettent d'améliorer aussi bien la qualité que la quantité de production par unité de temps [40].

Les conditions de coupe qui favorisent dans la majorité des cas un bon état de surface sont : une vitesse de coupe élevée et une faible vitesse d'avance [40].

IV.4 TROISIEME PARTIE : Stratégie d'usinage

Chaque logiciel propose ses stratégies d'usinage. Il est donc difficile de dégager une généralité applicable à tous les systèmes. Pour la suite ; nous nous contenterons de présenter ce qui devrait être utilisé pour l'usinage UGV.

Nous rappelons que la stratégie d'usinage est le choix des mouvements de l'outil nécessaires à la réalisation de la forme attendue. Très simple, quand il s'agit d'une opération de

surfaçage en usinage conventionnel, la stratégie d'usinage peut être plus compliquée dans le cas de l'usinage d'une poche ou d'une pièce 3D en UGV.

Principalement, l'attention se focalise sur le mouvement de l'outil en contact avec la pièce, pour réaliser la forme attendue, et sur les modes d'entrée et de sortie de la matière.

IV.4.1 Définition Stratégie d'usinage:

Une stratégie d'usinage est une méthodologie utilisée pour générer une série d'opérations, dans le but de réaliser une forme donnée.

Elle permet d'associer un processus d'usinage à une entité d'usinage, c'est-à-dire un ensemble d'opérations comprenant la définition des outils, des conditions de coupe et des trajets d'usinage.

Afin de préciser l'ensemble des paramètres intervenant dans l'application d'une stratégie d'usinage, nous développons maintenant la notion de stratégie d'usinage de finition des pièces de formes complexes.

Une stratégie d'usinage de finition est une méthodologie utilisée pour générer une opération dans le but de réaliser une entité géométrique dans sa forme finale.

Le choix d'une stratégie d'usinage de finition est un problème sous contraintes associés au défaut de forme et à l'état de surface [46].

Entres et sorties en UGV

Il est important en usinage grande vitesse de garantir le plus souvent possible une continuité de l'usinage pour assurer une continuité des sollicitations mécaniques appliquées à l'outil.

IV.4.2 Décomposition de la gamme d'usinage :

L'UGV s'effectue généralement en deux phases successives et variables : soit une phase «ébauche/semi finition», suivie d'une phase «finition » ; soit une phase «ébauche», suivie d'une phase «semi finition».

Les opérations d'usinages vont donc se décomposer en 4 phases distinctes visant à respecter ces prescriptions :

- ❖ **Ebauche** : dans cette étape on va chercher un maximum de matière en un minimum de temps, tout en assurant une charge constante sur L'outil.
- ❖ **Semi Finition** : cette étape est certainement la plus délicate du processus. Car elle doit permettre d'amener les parties usinées à une surépaisseur la plus constante de matière. Ceci afin d'assurer un usinage de la finition réalisé dans les meilleures conditions possibles. Les difficultés de ces opérations résident dans le fait que les opérations d'ébauches et de reprise d'ébauches ont laissé une quantité de matière non constante sur la pièce.
- ❖ **Finition** : étape de finition permettant d'amener les surfaces usinées à la côte nominale.
- ❖ **Reprise** : étape permettant principalement avec des outils de type boule de petits diamètre d'enlever les dernières parties résiduelles de matière.

IV.4.3 Les modes d'usinage :

Les principales stratégies permettant d'optimiser les trajectoires d'outils en UGV sont présentées en encadré et illustrées par [47] :

- ❖ **Mode du contournage :**

Est une opération de fraisage 2 axes et utilisée pour créer des passes de finition sur les surfaces. C'est ce que l'on appelle aussi l'usinage de finition à Z constant (figure : IV-12).(42)[42].

- ❖ **Mode de balayage :**

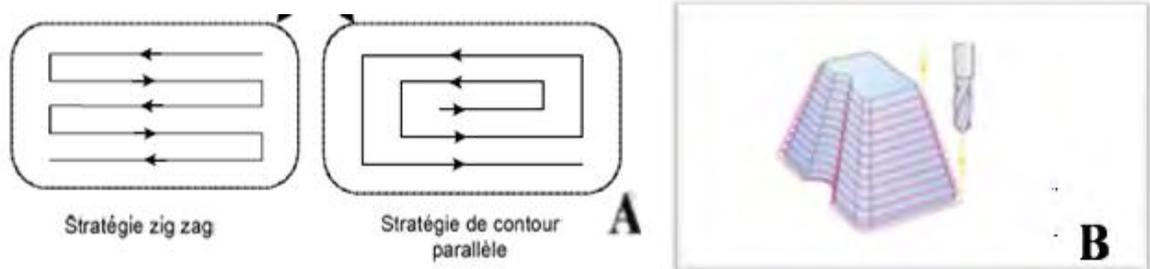


Figure IV-12 : Les modes d'usinage (A -Mode de balayage ; B-l'usinage à Z constant) [10] ;(doc. DELCAM).

- **De type zigzag** : où le déplacement de l'outil suit une seule direction parallèle à la surface usinée.
- **De type spirale** : où la direction de déplacement de l'outil correspond à une opération d'usinage homothétique au contour de la poche. L'outil peut parcourir la poche de l'intérieur à l'extérieur ou inversement.
- **De type spirale - contour parallèle** : où la direction de déplacement de l'outil correspond au type « spirale » d'une partie en suivant un « contour parallèle ».
- **De type contour parallèle** : où la direction de déplacement de l'outil correspond à des contours parallèles homothétiques au contour de la poche. On utilise les contours de la poche pour construire des trajectoires décalées les unes à l'intérieur des autres. Ces morceaux de trajectoires sont ensuite reliés entre elles par des trajectoires d'entrée en matière.

IV.5 Conclusion:

L'optimisation des procédés d'usinage a porté d'une part sur la productivité des opérations utilisant des outils à géométrie définie et d'autre part sur la qualité des surfaces fonctionnelles utilisant de nouveaux procédés d'usinage c'est UGV.

L'UGV nécessite l'emploi de machines-outils spécifiques. Il est également tout aussi important de disposer de logiciels et de commandes numériques présentant des caractéristiques et options spécifiques permettant la programmation de trajectoires d'outils optimales.

La condition de coupe (vitesse de coupe ; vitesse d'avance ; profondeur de coupe) joueront un rôle très important sur la qualité de la surface usinée. L'influence majeure est réservée à la vitesse de coupe qui prendra un meilleur état de surface.

Conclusion générale

L'Usinage Grande Vitesses (UGV) permet d'usiner environ dix fois plus vite qu'en usinage conventionnel. Mais cela impose des exigences particulières : aux matériaux, aux géométries, en matière de rigidités statiques, dynamiques et de stabilité thermique.

Ce procédé permet de diminuer les coûts de production et les délais tout en améliorant la qualité par rapport à l'usinage conventionnel, en conservant la même précision sur chaque produit. Donc le débit augmente et la précision reste inchangée. L'UGV ayant pour but d'augmenter le taux d'enlèvement du métal et réduire les efforts de coupe, il peut être une solution pour satisfaire l'amélioration nécessaire du processus de fabrication en coûts, délais et qualité.

La qualité des pièces devient constante et dépend principalement de la précision de la machine et du degré de sophistication des automatismes. Dans les machines outils à l'UGV on trouve les contraintes dynamiques supplémentaires qui s'appliquent aux machines. Bien entendu, les rigidités mécanique et thermique de celle-ci doivent toujours être assurées. Mais surtout, elles doivent présenter une stabilité dynamique plus élevée que les machines conventionnelles puisque l'on travaille à des vitesses engendrant d'avantage d'inertie, de vibrations, avec des accélérations et des décélérations plus élevées. Tous les éléments de la machine sont donc importants. Cependant, la validité de cette remarque dépend de la vitesse de travail par rapport à la taille et au poids de la pièce usinée. De plus, travaillant à grande vitesse, la machine se doit de réagir rapidement à un ordre.

Les grands domaines d'application possible de l'UGV des pièces de forme complexe incluent la fabrication des structures aéronautiques, des moteurs d'avion, des composants de l'industrie automobile et de la mécanique générale ainsi que la fabrication des outillages de mise en forme par déformation plastique (des métaux) et des moules d'injection (des polymères) ou de soufflage (des verres).

Les matériaux métalliques constituant ces structures sont des alliages d'aluminium, de titane, de nickel ou des aciers aux caractéristiques mécaniques de mieux en mieux contrôlées et de plus en plus élevées.

Le présent travail a fait l'objet d'étude de la qualité et de la quantité de production en fraisage de l'acier **27 Mn Cr 5**, acier faiblement allié trempé en phase de finition avec une profondeur de passe de 1 mm sur le rayon sur le bec de l'outil et dans la gamme des vitesses de coupe de 180 à 400 m/min et d'avance de 0,018 à 0,02 mm par tour. Pour des vitesses de coupe faibles, il se produit des adhérences de copeaux, le détachement se produit de façon irrégulière et diminue la qualité de la surface obtenue. Dans le cas des vitesses de coupe importantes, on constate soit une stagnation, soit une légère diminution, soit une amélioration des qualités de surface selon la vitesse d'avance considérée. Généralement, les vitesses élevées permettent d'améliorer aussi bien la qualité que la quantité de production par unité de temps. Les conditions de coupe qui favorisent dans la majorité des cas un bon état de surface sont : une vitesse de coupe élevée et une faible vitesse d'avance. La qualité de la surface dépend du processus de formation du copeau, particulièrement au niveau de l'arête de coupe rapportée.

En perspective, notre travail reste toujours un domaine à enrichir ce qui nous permet de proposer les recommandations suivantes :

- l'UGV est une réalité industrielle et non pas une curiosité de laboratoire.
- Lors de la qualification, trois tests successifs sont mis en œuvre. Ils ont pour objectif d'identifier d'éventuelles erreurs sur la géométrie de la machine. L'interprétation des résultats de ces tests conduits à des pistes de corrections numériques ou physiques.
- Notre résultat ouvre la porte à une autre perspectives : la maintenance prédictive de ces machines car la maintenance dit classique n'est pas des plus efficace dans le domaine.

ANNEXES

ANNEXE A : Comparaison des vitesses de coupe entre usinage conventionnelle et usinage a grande vitesse :

Matériaux	usinage conventionnelle V_C (m/mn)	UGV V_C (m/mn)
Matériaux non métalliques		
Matières plastiques renforcées de fibres	100 à 300	2000 à 8000
Matériaux composites	100 à 300	800 à 4000
Alliages légers		
Aluminium, alliages d'aluminium	Vitesse non précisée dans les documents consultés	2000 à 9000
Alliages cuivreux	100 à 400	1000 à 4500
Alliages non ferreux		
Fontes	100 à 800	800 à 4000
Aciers (recuits ou trempés)	80 à 700	700 à 3000
Aciers et fontes très durs	Quasiment in usinables avec les outils carbure	100 à 200
Alliages réfractaires		
Alliages de titane	30 à 100	100 à 500
Superalliages (base nickel)	20 à 90	90 à 2000

Tableaux A - 1:différente vitesse de coupe entre usinage conventionnelle et UGV

ANNEXE B : paramètre de coupe en fraisage

❖ Fiche industriel pour outil de fraisage

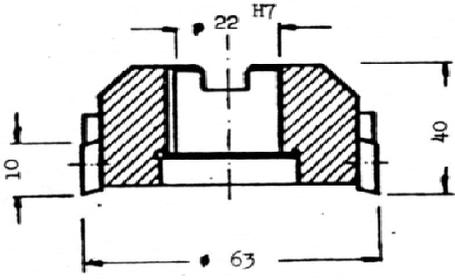
	Fiche récapitulative pour outils de fraisage Karteiblatt für Friswerkzeuge		Plan No. 06 19877 80
			06 11638 81
Agent méthodes Wi/ag Préparé le 17.01.81	Désignation Fraise à surfacer d'angle Eckmesserkopf		
Corps de fraise Geundkörper	HERTEL.4.211003R 611		
Remarque Bemerkung	Nombre de dents Z = 4 Anzahl der Schneiden		
	Stahl/Acier		Guß/Fonte
Matière Schneidstoff	P 23	CX	IM 1
Chanfrein Droite/Rechts Fase 0			
 Plaquette finition Schlichtplatte	1	06 11655 81	06 12444 81
	11		
	13		
27.04.82 Sp.			
			
Pièces de rechange Ersatz-Teile	Axe de serrage Spannbolzen	06 11619 81	112 244
	Vis de serrage Spannschraube	06 11703 81	121 610

Figure B - 1 : fiche industriel

❖ Déterminer les paramètres de coupe en fraisage:

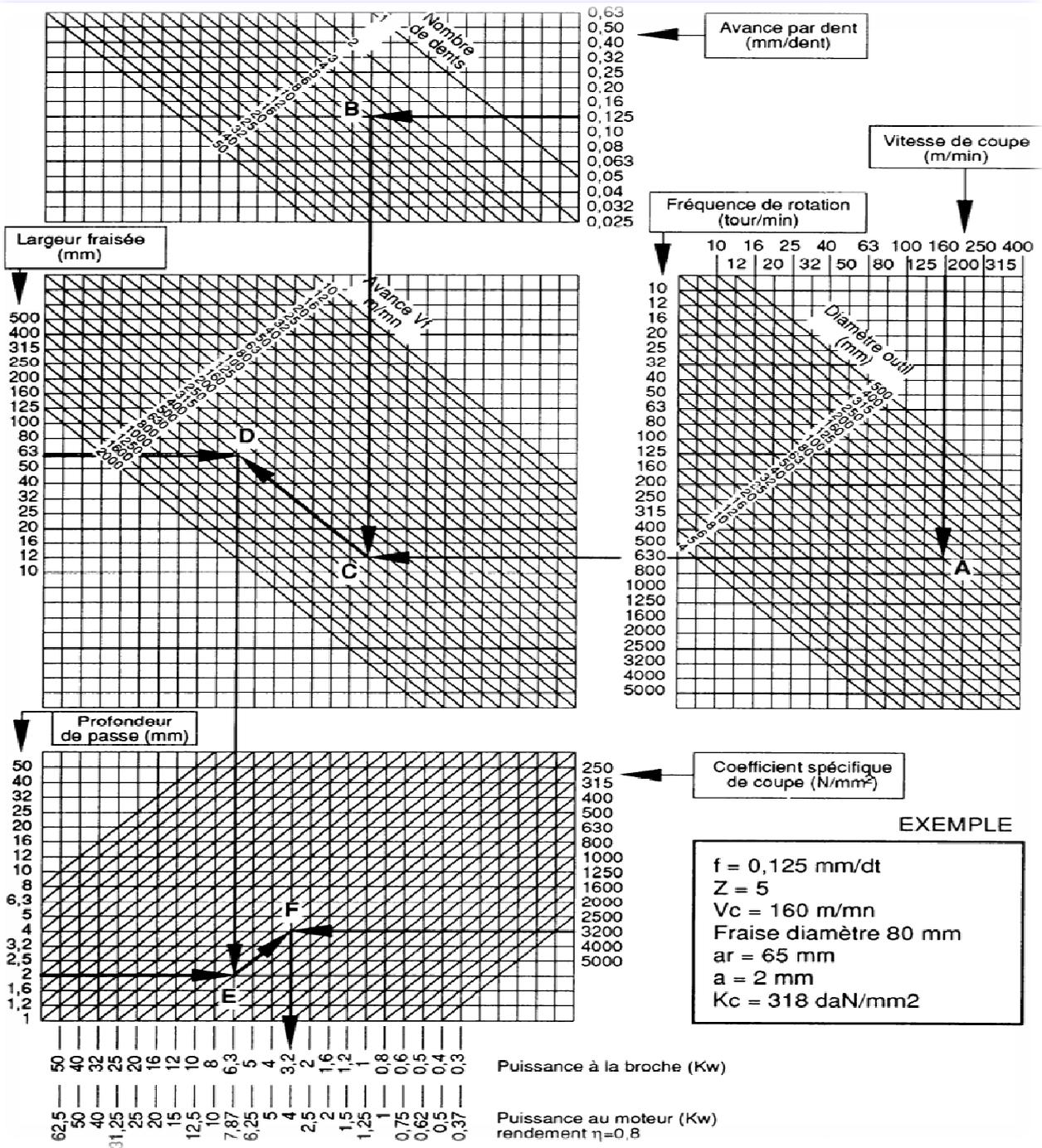


Figure B - 2: paramètres de coupe

ANNEXE C : 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.
- ✓ Rugosité : irrégularités géométriques telles que la distance entre deux pics soit comprise entre 0 et 0,5mm.

Le schéma de la figure 1 montre certains paramètres permettant la caractérisation de la rugosité d'une surface.

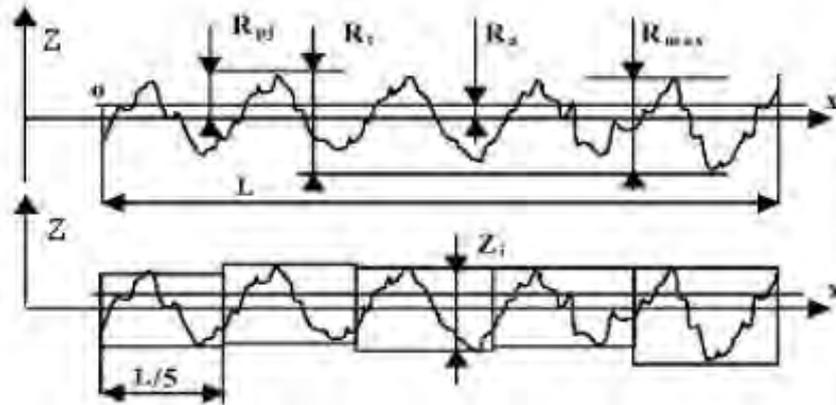


Figure C - 1 : paramètres des critères de rugosité.

La ligne moyenne Ox est définie telle que :

$$\int_0^L z \times dx = 0 \dots \dots \dots \text{Équation 5}$$

Le critère de qualité choisi est la 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 6. Cette rugosité moyenne arithmétique est aussi dite C.L.A (Center Line Average).

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \dots \dots \dots \text{Équation 6}$$

La rugosité Rz est la moyenne sur cinq longueurs de base, figure C - 1, relation 7 :

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Z_i \dots \dots \dots \text{Équation 7}$$

On ne traitera pas ici ni la micro rugosité ni la structure cristallographique qui sont visibles au moyen du microscope électronique.

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

On considérera les modèles théoriques suivants :

$$R_t = (f_z)^2 / 8R \dots\dots\dots \text{Équation 8}$$

$$R_t = (f_z)^2 / 32R \dots\dots\dots \text{Équation 9}$$

❖ **La rugosité théorique en fonction de la vitesse de coupe :**

$$R_t = \frac{(fz)^2 * Z^2}{R} \dots\dots\dots (1)$$

$$n = \frac{1000 * V_c}{\pi * D} [\text{tr/min}] \dots\dots\dots (2)$$

Dans l'équation 1 on trouve :

$$D = \frac{1000 * V_c}{\pi * n} [\text{mm}] \dots\dots\dots (3)$$

Remplacée l'équation 3 dans l'équation 1 on trouve :

$$R_t = \frac{(fz)^2 * Z^2 * \pi * n}{500 * V_c} \dots\dots\dots (4)$$

$$R_t = f(V_c)$$

❖ Etats de surface

2.2. CHOIX DU TYPE DE TRAVAIL EN FONCTION DE L'ETAT DE SURFACE		Qualité	13	12	11	10	9	8	7	6	6	5
Valeurs usuelles		Signe de façonnage	▼			▼▼		▼▼▼			▼▼▼▼	
		Rt µm	50		30		16		9		4,5	
		Ra µm	12,5		6,3		3,2		1,6		0,8	
ÉBAUCHE	Monobloc A.R.S, carbure	de profil	[Bar chart showing Ra values for profile]									
		en bout	[Bar chart showing Ra values for end face]									
FINITION	Fraises à plaquettes	de profil	[Bar chart showing Ra values for profile]									
		en bout	[Bar chart showing Ra values for end face]									
FINITION	Monobloc A.R.S, carbure	de profil	[Bar chart showing Ra values for profile]									
		en bout	[Bar chart showing Ra values for end face]									
FINITION	Fraises à plaquettes	de profil	[Bar chart showing Ra values for profile]									
		en bout	[Bar chart showing Ra values for end face]									
Finition racleuse		(en bout)	[Bar chart showing Ra values for end face]									
Usinage UGV		En bout	[Bar chart showing Ra values for end face]									

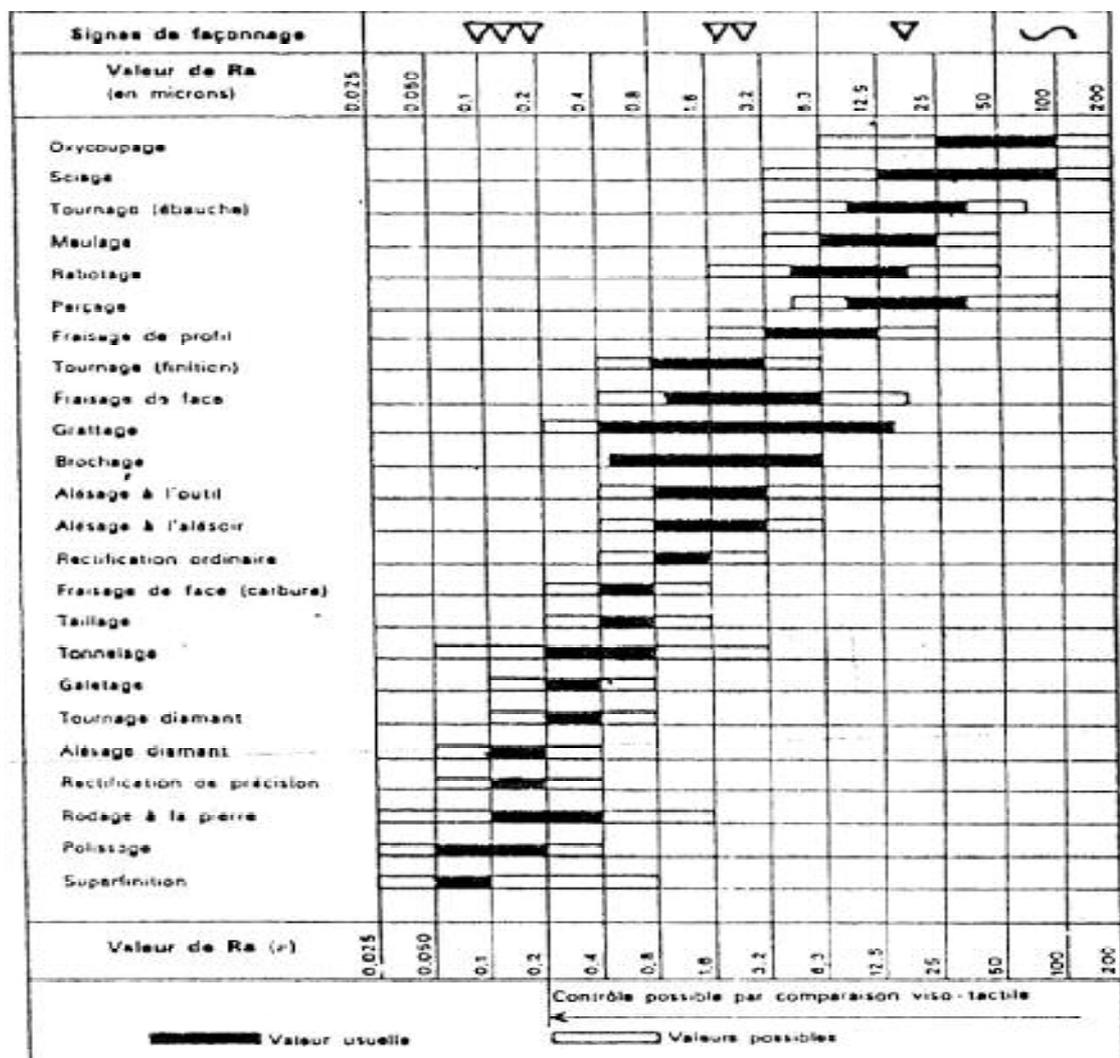


Figure C - 2: choix du la rugosité

Bibliographie

- [1].FELDER ÉRIC. Procèdes d'usinage-techniques-ingénieur. Référence bm7000, 10 avr2008.
- [2].FELDER É .Usinage-par-abrasion et principes-généraux -techniques-ingénieur. Référence bm7052 ,2009 .
- [3].GEISKOPF François, LANDON Yann, DUC Emmanuel. Usinage a grande vitesse : lurpa, décembre 1999.
- [4].http://www.si.enscachan.fr/accueil_V2.php?page=search_advanced&author=Jan-Baptiste+VIDAL,2005.
- [5].AZZAM N. Usinage a grande vitesse. Université Mentouri Constantine, 2008.
- [6].WAKAOKA S, YAMANE Y, SEKIYA K, NARUTAKI N .High-speed and high high-speed and highaccuracy Processing Technology, Vol. 127, pp. 246–250, 2002.
- [7].BOULANOUAR L, ATHMAN M, CHAOUI K. effet du matériau à outil et des conditions d'usinage sur la qualité de surface de l'acier 100cr6 trempé, symposium international : qualité et maintenance au service de l'entreprise qualima01 – Tlemcen, 2004.
- [8].PECHARD Pierre-Yves. Usinage de pièces de formes complexes: méthode de choix de stratégie d'usinage U.G.V .Mémoire de recherche, travail effectué au Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée (LURPA), l'Université Pierre et Marie Curie, le 23 juin 2006.
- [9].EDOUARD riviere-lorphevre. Étude et simulation de procédé de fraisage grande vitesse : efforts de coupe, stabilité, états de surface .Thèse de doctorat ,faculté polytechnique de mons ,académie universitaire wallonie - bruxelles, 2007.
- [10].AL-AHMAD Mohamad. Industrialisation de procédé : contribution a la maitrise de l'opération de treilage ou fraisage vertical - approches analytique et expérimentale. Thèse de doctorat l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Paris ,2008.
- [11] TRAMETAL. Outils, 2006.
- [12] KAUFELD M. Der lange Weg zur Hochgeschwindigkeits-Bearbeitung - Werkstatt und Betrieb 9/96. Sonderteil HSC- C. Hanser Verlag, München. 1996.

- [13].ZAQUINI leonello .Fraisage à grande vitesse : bases technologiques et applications pratiques, P 1 - 18, Journée organisé par FSRM, Neuchâtel le Mercredi 18 octobre 2005
- [14].BELMOKHTAR Sana. Lignes d'usinage avec équipements standard : modélisation, configuration et optimisation – Thèse de doctorat l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2006.
- [15].BENTALEB Fayçal. Impact du phénomène de coupe sur géométrie des outils de coupe. Université Mentouri Constantine, 2007.
- [16].Guide méthodique Micro mécanicien. Fraisage sur petite fraiseuse, chapitre 8, convention patronale de l'industrie horlogère suisse.édition, 2007.
- [17].Boukebbab S ,cours de fabrication mécanique .Université Mentouri Constantine, 2004.
- [18].L'usinage haut performance. Toulouse, France ,2006.
- [19].SCIENCES INDUSTRIELLES POUR L'INGÉNIEUR II, Filière TSI. Présentation de la fraiseuse DMU ev50. S.I. Concours Centrale-Supélec 2004.
- [20].<http://pagespersoorange.fr/michel.baehrel/TS1CPI/Expose/Exposes%202006%202007/UGV.pdf>, 2007.
- [21].SOCIETE SANDVIK-COROMANT,. fraisage. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique . Reference : BM 7 082 , BM 7 083 , BM 7 084 ,P 1-58
- [22].REMADNA Mehdi. Le comportement du système usinage en tournage dur application au cas d'un acier trempe usiné avec des plaquettes CBN (nitrure de bore cubique). Préparée au laboratoire de conception et analyse de systèmes mécaniques (C.A.S.M) de l'INSA de Lyon ,2001.
- [23].FLOREA FLORIAN. Résumé théorique&guide de travaux pratiques, MODULE 3 : réalisation d'opérations de base en fraisage. Office de la formation professionnelle et de la promotion du travail ,p. 2/102. Royaume du Maroc, 2000.
- [24].DEFRETIN, Alain-L. usinage à grande vitesse -Le Monde de l'Usinage-techniques-ingénieur Référence BM7180, 1999.
- [25].www.Lubrification - Wikipédia.mht. [6 mai 2010].

- [26].IDRISSE Amara .Coure d'usinage non conventionnel. Université Mentouri Constantine, 2008.
- [27].GEISKOPF f. Technologies des composants de la cellule élémentaire d'usinage en UGV. 1999.
- [28].In : Machines Production L'UGV en aéronautique N° 699, p. 27 à 29. 15 juin 1998.
- [29].Mery B. Machines à commande numérique. Hermès Paris. ,1997.
- [30].Mara S. Commande prédictive hiérarchisée pour le positionnement des axes de machine-outil à architecture ouverte N° d'ordre : 7993,2005.
- [31].E. Duc E. Machines-outils à commande numérique structure, modélisation et réglage, préparation à l'agrégation de génie mécanique, 23 Juillet 1999.
- [32]. Vidal Jean-Baptiste. Science de l'ingénieur - L'Usinage à Grande Vitesse: principes, conséquences sur la conception des pièces. 01-02-2007.
- [33].GEISKOPF F, LANDON Y. Usinage a grande vitesse Modélisation de la coupe en Usinage à Grande Vitesse .LURPA, 1999.
- [34].TÖNSHOFF H.K, KARPUSCHEWSKI B., LAPP C, ANDRAE P. New lachine techniques for High-Speed Machining. Proceedings of the Int. Seminar on Improving Machine Tool Performance – vol. n°1, p.65-76, July, 1998.
- [35].LE CALVEZ C .Etude des aspects thermiques et métallurgiques de la coupe orthogonale d'un acier au carbone – Thèse de doctorat de l'ENSAM Paris, 1995.
- [36].OBERMOSSER bernard. L'usinge a grande vitesse et tres grande vitesse -Texte du videogramme,schemas,lexique,references bibliographiques rouen . 1996.
- [37].CRAPART (J.C). L'usinage a grande vitesse,centre techniques des industries mecaniques .in : actes de conferences micronora 96 ,congres de besancon ,p .4 à 54 , 24- 27 septembre. 1996.
- [38].LOISY michel, CRUAZ alain. usinage tres grande vitesse : usiner vite et bien,p 37 à 47 ,nombreux schemas ,tableaux .In : Technologie , N°80,fevrier. 1996.

- [39].Usinage à grande vitesse. In : Production en mouvement. Lettre d'information thématique destinée aux PMI de la région des pays de la Loire, N°7, 4 p.,janvier . 1998.
- [40].Les techniques d'Usinage à Grande Vitesse sortent enfin de l'anonymat. In : Instantanés Techniques, N°0, p. 3 à 5, graphiques, décembre . 1997.
- [41].SCHERER Mirel. Passez à l'usinage grande vitesse. In : Industries et Techniques, N°782,p. 74 à 78, mai. 1997.
- [42].www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/dm_articles/fr/HSM_Art5.pdf, [20 juin 2007].
- [43].CHRISTOPHE Tournier, Sylvain Lavernhe, Claire Lartigue. Optimisation en fraisage 5 axes grande vitesse. Casablanca, Morocco, 2005.
- [44].Martinez Y. CM CFAO ,2001.
- [45].AKOURRI Omar, ELAYACHI Ilham et MARCOS BARCENA Mariano. Conditions de coupe et état de surface dans le tournage d'un alliage d'aluminium, Volume X – n° 9/2007, pages 1 à 14, 2007.
- [46].QUINSAT Yann, SABOURIN Laurent, GOGU Grigore. Aide au Choix des Stratégies d'Usinage Etude de l'état de surface, volume x – n° x/2001, pages 1 à x, LaRAMA. Université Blaise Pascal/IFMA ,France ,2001.
- [47].DEFRETIN Alain-L. ; LEVAILLANT Gérard. Usinage à grande vitesse. Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique, vol. BT2, noBM7180, pp. BM7180.1-BM7180.26 l'ENSAM de Lille, FRANCE ,1999
- [48].BRAHMI sadek. Etude de l'Influence de l'Intégrité de surface sur la résistance à la fatigue des pièces usinées. Universite m'hamed bougara- boumerdes, 2009.