

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Année 2007

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT D'ETAT

**Etude des nouveaux matériaux de coupe et
Leur aptitude à l'usinage**

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Productique

Par

Slimane MEKHILEF

DIRECTEUR DE THESE : M. LABAIZ Professeur Université d'Annaba

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : B. MERZOUG Professeur Université d'Annaba

EXAMINATEURS : A. BOUCHOUCHA Professeur Université de Constantine

L. LAOUAR M.C Université d'Annaba

A. BOUCHELAGHEM M.C Université d'Annaba

Résumé

Actuellement on voit apparaître des associations de matériaux de coupe de base et de revêtements donnant les meilleurs résultats avec des accroissements de rendement. Ces matériaux vont du carbure de tungstène aux céramiques de nuances diverses bénéficiant généralement de revêtements physiques effectués en phase vapeur (PVD),

Les céramiques mixtes revêtues à substrat micro grain jouent en usinage dur un rôle important offrant un plus grand nombre d'arêtes coupantes à meilleur prix et conduisant à éliminer les opérations finales coûteuses de rectification, elles peuvent représenter un intéressant succès dans des domaines d'usinage nouveaux en offrant une durée d'utilisation prolongée lors de l'usinage à sec.

Dans ce travail des essais expérimentaux nous ont permis de déterminer avec la plus grande exactitude les différents mécanismes fondamentaux comme l'abrasion, la température, les chocs mécaniques et l'interaction chimique qui mettent hors d'usage notre outil de coupe. D'après les résultats nous concluons que certains types d'usure orientent la recherche vers certaines causes, fournissant une bonne indication de la manière dont l'outil et/ou le processus lui-même d'usinage peuvent être modifiés pour améliorer non seulement l'outil mais aussi la performance de coupe.

Mots clés : tournage, usure, rugosité, céramiques, carbures de tungstène substrat, revêtement

Abstract

Currently are emerging associations of cutting and coatings materials giving the best results with higher efficiency. These cutting materials can be made from tungsten carbide or from ceramic of various shades getting benefits from physical coating carried out during vapor phase (PVD).

The ceramic substrates coated with mixed grain play an important role in providing a greater number of cutting edges at the best price and suppress the costly final operation of correction, they may represent an interesting success in areas of machining offering a new prolonged period of use during dry machining.

In this work the experimental tests are conducted to determine with accuracy the different mechanisms such as abrasion, temperature, mechanical shock and chemical interactions that lead cutting tool to be out of service. From the obtained results, it is clear that certain types of wear can provide a good indication of how tool and / or machining process can be modified to improve not only the tool but also the cutting performance.

Keywords: turning, wear, roughness, ceramics, tungsten carbide substrate, coating

Sommaire

CHAPTRE I : ETUDE ET ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1	Définition de la coupe des métaux.....	1
1.1.1	Définition de l'aptitude à l'usinage.....	1
1.1.2	Géométrie des outils.....	2
1.1.3	Description de la racine du copeau.....	3
1.1.4	Carte de température.....	4
1.1.5	Géométrie du copeau.....	5
1.2	Endommagement des outils de coupe.....	7
1.2.1	Influence des paramètres de coupe sur l'usure.....	8
1.2.2	Méthodes de mesure des endommagements.....	9
1.2.3	Méthode d'examen et d'analyse de la surface des outils et des pièces usinées.....	9
1.2.4	Méthodes de mesures des efforts et des puissances de coupe	9
1.2.4.1	Influence des composants de l'effort de coupe.....	9
1.2.4.2	Influence des propriétés mécaniques de la matière à usiner.....	9
1.2.4.3	Influence de la géométrie de l'outil.....	10
1.2.4.4	Influence du liquide de lubrification et de refroidissement.....	11
1.3	Lois d'usure d'outil mesuré par des essais d'usinabilités.....	11
1.3.1	Choix des conditions de coupe en tournage (ISO3685).....	12
1.4	Notion de couple outil/ matière.....	13
1.4.1	Condition d'utilisation d'un outil.....	13
1.4.2	Essais en laboratoire sur la capacité de coupe.....	13
1.5	Matériaux de coupe.....	14
1.5.1	Carbures métalliques.....	14
1.5.2	Carbures métalliques sans revêtement.....	15
1.5.3	Carbures métalliques avec revêtement.....	15
1.5.4	Céramiques.....	16
1.5.5	Les cermets.....	17
1.5.6	Diamants.....	18
1.5.7	Nitrure de bore cubique.....	19
1.6	Sélection des matériaux et vitesse de coupe.....	20
1.6.1	Utilisation des matériaux.....	21
1.6.2	Methodologie du choix d'un matériau de coupe.....	22
1.6.3	Évolution des matériaux des outils de coupe.....	23
1.6.4	Texture des outils de coupe modernes.....	24
1.6.5	Les revêtements.....	27
1.7	Rôle de l'outil.....	28
1.8	Evolution des outils de coupes.....	28
1.9	Formation du copeau.....	28
1.9.1	Formation du copeau : méthode analytique.....	29
1.9.2	Formation du copeau : model numérique.....	30
1.10	Usure des outils.....	31
1.10.1	Mécanisme d'usure.....	33
1.10.2	Usure visible sur l'outil.....	37
1.11	Lubrification.....	37
1.12	Etat de surface des pièces usinées.....	37

CHAPTRE II : METHODOLOGIE DERECHERCHEET PREPARATION DES EXPERIENCES

2.1 Essais préliminaires.....	39
2.1.1 Moyens de réalisation.....	39
2.1.2 Choix de la méthode.....	39
2.1.3 Plan d'expériences.....	40
2.2 Méthodologie de recherche.....	42
2.2.1 Méthode uni factorielle.....	42
2.2.2 Méthode multifactorielle.....	42
2.3 Préparation des expériences et équipements utilisés.....	44
2.3.1 Essais de longue durée (essais d'usure).....	44
2.3.2 Essais de rugosité.....	45
2.3.3 Machine outil utilisée.....	45
2.3.4 Matériaux à usiner.....	45
2.3.5 Outil de coupe utilisé.....	46
2.3.6 Conditions de coupe.....	47
2.3.6.1 Données expérimentales.....	48
2.3.6.2 Appareil de mesure des efforts de coupe.....	48
2.4 Mesure des efforts de coupe.....	48
2.4.1 Données expérimentales.....	48
2.4.2 Forme et dimensions des ébauches.....	48
2.4.3 Plaquettes d'outils utilisées.....	48
2.4.4 Appareils de mesure des efforts de coupe.....	48

CHAPTRE III : RESULTATS DES EXPERIENCES TRAITEMENT ET ANALYSE

3. Résultats des essais d'usure et de la rugosité des surfaces	49
3.1 Résultats des essais d'usure des outils céramiques et de la rugosité des surfaces.....	50
3.1.1 Résultats des essais d'usure des outils céramiques	50
3.1.1.1 Résultats des essais d'usure des outils céramiques obtenues par la méthode uni Factorielle.....	51
3.1.1.2 Traitement des Résultats des essais d'usure des outils céramiques obtenues par la méthode uni factorielle.....	51
3.1.1.3 Détermination des durées de vie des différentes nuances de céramique.....	56
3.1.2 Résultats des essais d'usure des outils céramiques obtenus par la méthode Multifactorielle.....	57
3.1.2.1 Traitements des résultats d'usure VB des outils céramiques.....	57
3.1.2.2 Analyses de l'évolution de l'usure.....	65
3.1.2.3 Déterminations des durées de vie des deux nuances céramiques.....	66
3.1.2.4 Model mathématique des tenus au travail.....	68
3.1.2.5 Analyse des Model mathématique des tenus au travail.....	69
3.1.3 Résultat des essais de rugosité.....	69
3.1.3.1 Analyse de l'évolution du critère d'état de surface Ra.....	71
3.1.3.2 Model mathématique des rugosités.....	72
3.1.3.3 Analyse des modèles de rugosités.....	72

3.2	Résultat des essais d'usure de l'outil en carbure P35 et de la rugosité des surfaces de la pièce en Acier 30CD12.....	73
3.2.1	Résultat des essais de l'usure et de la rugosité.....	73
3.2.2	Traitement des résultats d'usure des outils en carbure.....	73
3.2.2.1	Evolutions de l'usure VB des plaquettes P35 en fonction du temps....	73
3.2.2.2	Analyses de l'évolution de l'usure.....	75
3.2.2.3	analyse des résultats des durés de vie obtenues par différents régimes de coupe.....	75
3.2.2.4	Histogramme des durées de vie obtenues par différents régimes de coupe pour P35 sur l'acier 30CD12.....	76
3.2.2.5	Histogramme des rugosités Ra obtenues par différents régimes de coupe pour P35 sur l'acier 30CD12.....	76
3.3	Calcul et modélisation des efforts de coupe.....	78
3.3.1	Résultat expérimentaux.....	78
3.3.2	Mesure des efforts de coupe obtenue par lecture directe.....	78
3.3.3	Lecture des efforts de coupe sur ordinateur.....	80
3.3.4	Analyse des signaux reconstitués.....	87
3.3.5	Modélisation des efforts de coupe.....	87
3.3.6	Logiciel développé pour le calcul mathématique des efforts de coupe....	89
3.3.7	Analyse de l'influence d'un paramètre (graphe 2D).....	92

CHAPTRE IV : TENDANCE ACTUELLE DANS LA RECHERCHE DES MATERIAUX DE COUPE

4	Objectif recherchés.....	90
4.1	Présentation des données.....	90
4.1.1	Matériaux proposés et leurs performances.....	90
4.1.2	Environnement des expériences.....	91
4.1.3	Conception préliminaire des plaquettes.....	91
4.2	Modélisation proposée à l'effort de coupe.....	92
4.2 .1	Efforts du à l'action de coupe.....	92
4.2 .2	Action réciproque de la pièce et de l'outil.....	92
4.2 .3	Etude simplifié de la formation du copeau.....	93
4.2 .4	Détermination de l'effort de coupe Fc et l'effort d'avance Ff.....	96
4.2 .5	Modélisations de la température.....	97
4.2 .6	Résolution du problème.....	99
4.2 .7	Organisation du calcul.....	100
4.2 .8	Programme de calcul en annexe.....	100
	Conclusion générale et perspectives.....	104
	Bibliographie.....	107
	Annexes	
	Annexes 1	111
	Annexes 2	113
	Annexes 3.....	119
	Annexes 4.....	121
	Annexes 5.....	129

Liste des abréviations

a_p : Profondeur de passe [mm]
C: Chaleur spécifique du matériau [J/Kg°K]
COM : Couple Outil Matière
CVD: Chemical Vapor Deposition
f :Avance par tour [mm/tr]
 F_c : Effort de coupe : composante dans la direction de coupe
 F_f : Effort de coupe : composante dans la direction d'avance
 F_p : Effort de coupe : composante dans la direction de profondeur de passe
 h_u : Hauteur d'usure sur la face de dépouille de l'outil
Hv : Dureté en échelle Vickers
HRc : Dureté en échelle Rockwell cône
Kc : Effort spécifique de coupe
Kcu : Indice de résilience du matériau [J/cm²]
 K_B : Largeur du cratère
 K_M : Distance du centre du cratère / pointe initiale de l'outil
 K_t : Conductivité thermique
 K_T : Profondeur d'un cratère
L : Longueur d'usinage (passe) [mm]
MEF : Méthode des éléments finis
 N_p : Nombre de passes
 P_r : Puissance de coupe
PVD: Power Vapor Deposition
r : Source volumique interne de chaleur
Ra : Rugosité (μm)
 S_u : Surface d'usure sur la face de dépouille de l'outil
 S_v : Profondeur entre l'arête initiale et la pointe de l'outil usée
Tu : Temps d'usinage entre deux points de mesure d'usure plaquette [s]
UGV : Usinage grande vitesse
 V_B : Hauteur de l'usure en dépouille
 V_{BC} : Profondeur entre l'arête initiale et la zone usée
 V_c : Vitesse linéaire de coupe [m/min]
 V_f : Vitesse d'avance linéaire [m/min]
 V_u : Volume usiné (copeau) entre deux points de mesure d'usure plaquette [mm³]
 α : Angle de déviation (éjection copeau)
 θ : Angle d'incidence (éjection copeau)
 ρ : Masse Volumique [Kg/m³]
 γ_c : Angle de cratérisation

CHAPITRE I : ETUDE ET ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Définition de la coupe des métaux :

La coupe des métaux, procédés d'usinage dont l'origine est très ancienne, a connu une grande expansion avec la mécanisation de plus en plus poussée des ateliers de fabrication. Malgré l'apparition de nouvelles techniques au cours des dernières années, elle reste à l'heure actuelle l'un des procédés les plus largement utilisés.

Afin de mieux situer les techniques, on peut dire que la coupe des métaux intervient dans un ensemble de procédés d'élaboration de pièces, par enlèvement de matière en quantités pouvant représenter une proportion notable du matériau brut. Cet enlèvement est alors réalisé par l'action d'un outil possédant un ou plusieurs tranchants animé d'un mouvement relatif à la pièce appropriée. Une machine outil fournit à la fois la puissance mécanique nécessaire et réalise le contrôle du mouvement relatif (outil-pièce), cet ensemble constitue un système qui doit être considéré de plusieurs points de vue (cinématique, commande ... etc.).

Dans ce premier chapitre, nous considérons d'abord le phénomène central de la coupe. Le processus de coupe peut être utilisé à l'état pur comme c'est ordinairement le cas, ou bien avec l'assistance de techniques auxiliaires (par exemple excitations vibratoires, effets thermiques, ... etc.) pour améliorer certaines performances. La mise en œuvre rationnelle de ces techniques passe en effet par une connaissance approfondie du processus de coupe et une maîtrise des paramètres qui le contrôlent.

Les outils de coupe sont habituellement identifiés par leurs formes, adaptées à une opération d'usinage, et leur matière. La partie active, le plus souvent amovible (alors appelée plaquette) est maintenue sur le corps d'outil par un moyen de fixation approprié.

En résumé, l'usinage par enlèvement de copeaux désigne l'ensemble des techniques qui permettent d'obtenir une surface par enlèvement de matière à l'aide d'un outil tranchant, Cette technique ancienne est souvent appelée coupe onéreuse dans la mesure où la mise en forme de la pièce entraîne une transformation de matière noble en déchets (Copeaux). Cependant, elle reste une technique de fabrication importante et répandue dans la mise en forme des métaux par la coupe, le procédé de tournage, objet de notre étude, représente à lui seul 33% du domaine de l'usinage par enlèvement de copeaux. [1]

1.1.1 Définitions de l'aptitude à l'usinage :

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

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

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

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

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

Les mesures des cotes macro et micro géométriques et des efforts de coupe sont des mesures instantanées. Elles demandent un matériel adapté qui est très rarement mis en œuvre en permanence dans le cadre d'une production continue. En ce qui concerne les mesures relatives à

la durée des outils, elles sont délicates et demandent un temps considérable lorsqu'elles sont faites dans des conditions de production industrielles.

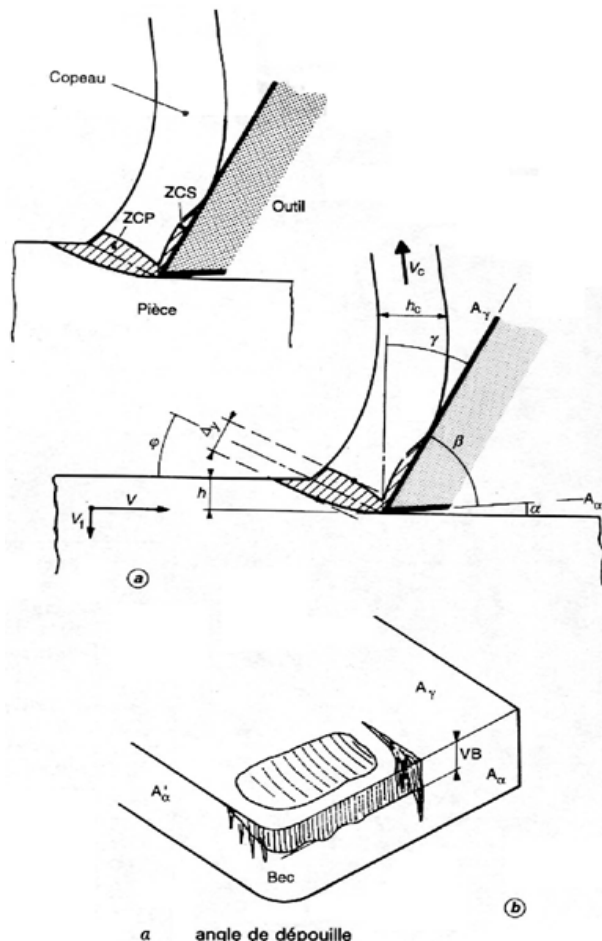
En pratique, les variations d'usinabilité sont telles que, malgré l'utilisation de notions telles que celles de vitesse de coupe minimale ou d'avance minimale, il arrive d'obtenir des temps de tenues d'outils pratiquement nuls ou même des casses d'outils, ce qui est particulièrement coûteux. Les avantages industriels du maintien dans les limites aussi étroites que possible de l'usinabilité sont donc certains. Ceci est valable quelque soit le facteur d'aptitude à l'usage considéré, cependant l'usage fait apparaître que le facteur qui concerne la tenue des outils a une importance majeure. [1]

1.1.2 Géométrie des outils

L'outil de tournage a généralement la géométrie la plus simple, définie par la face de dépouille $A\alpha$, la face de coupe $A\gamma$ et une arête d'intersection (une seule zone tranchante active). Les techniques de frittage des matériaux des outils modernes permettent d'obtenir des faces de coupe ayant des courbures complexes étudiées pour contrôler la géométrie des copeaux ; les performances des machines d'affûtage permettent de réaliser des faces $A\alpha$ et $A\gamma$ non planes ainsi que des arêtes non rectilignes. En règle générale, l'outil est en contact avec la pièce sur la face de dépouille principale $A\alpha$, sur la face de dépouille secondaire $A'\alpha$ et sur la partie arrondie intermédiaire appelée bec (figure 1.1).

Il existe :

-des zones de guidage du copeau pour faciliter son évacuation et des zones assurant la résistance mécanique de l'outil, la fonction de coupe est assurée essentiellement par l'arête, la surface de la face de coupe et une très faible partie de la face de dépouille en contact avec la pièce. L'angle α est toujours choisi le plus faible possible (quelques degrés) ; son choix dépend du matériau usiné. L'angle β entre les faces $A\alpha$ et $A\gamma$ est déterminé par des critères de résistance. Il est très souvent voisin de 90° .



- α : angle de dépouille
- β : angle de taillant
- γ : angle de coupe
- φ : angle du plan de cisaillement
- h : épaisseur de coupe
- h_c : épaisseur du copeau
- v : vitesse de coupe
- v_c : vitesse du copeau
- v_f : vitesse d'avance
- VB : usure frontale
- ZCP : zone de cisaillement primaire
- ZCS : zone de cisaillement secondaire
- $A\alpha$: face de dépouille principale
- $A'\alpha$: face de dépouille secondaire
- $A\gamma$: face de coupe
- ΔY : épaisseur moyenne de la ZCP

Figure 1 -1 - Formation du copeau (a) et usure de l'outil (b)

On appelle γ angle de coupe tel que :

$$\gamma = 90^\circ - \alpha - \beta$$

Un angle de coupe γ positif assure l'action tranchante la plus efficace. Il est généralement compris entre 0 et 10° pour les matériaux ferreux. On peut travailler avec un angle γ allant jusqu'à 20° si le matériau usiné est mou, collant (aluminium par exemple) et si le matériau usinant résiste bien aux chocs. Le principal avantage d'une géométrie d'outil avec angle de coupe négatif est la robustesse de l'arête. Au-delà des zones tranchantes, l'outil est soumis soit à un effort extérieur s'il travaille par translation (plaquette de tournage, broche, etc.), soit à un couple extérieur et à un effort de pénétration axial s'il est en rotation autour d'un axe Z et en translation suivant Z (foret de perçage, alésoir, etc.), soit à un couple et à un effort extérieur si sa cinématique est plus complexe (fraise, etc.).

Le travail fourni sert à **créer le copeau** : par la déformation du matériau usiné et pour vaincre les frottements à haute température au voisinage de l'arête de coupe, à géométrie constante de l'outil, ce travail dépend beaucoup des matériaux usinés et usinant.

1.1.3 -Description de la racine du copeau

L'outil est soumis à un effort et animé d'un mouvement relatif par rapport au matériau usiné. Il enlève un copeau en créant deux surfaces vierges : la face interne du copeau et la surface usinée.

La formation du copeau s'effectue par un cisaillement du métal dans une zone en amont de l'arête de l'outil, située de part et d'autre d'un plan faisant un angle φ (figure 1.1) avec la surface usinée (cette zone appelée zone de cisaillement primaire (ZCP))

Soit h l'épaisseur du copeau non déformée (figures 1-1 et 1-2). L'avance par tour f est le déplacement relatif de la pièce par rapport à l'outil pour une rotation d'un tour de la pièce ou de l'outil, h peut être relié à f par une relation trigonométrique simple, comme on peut le voir sur la figure 2 qui illustre le cas d'une opération de tournage. L'épaisseur du copeau déformé est h_c .

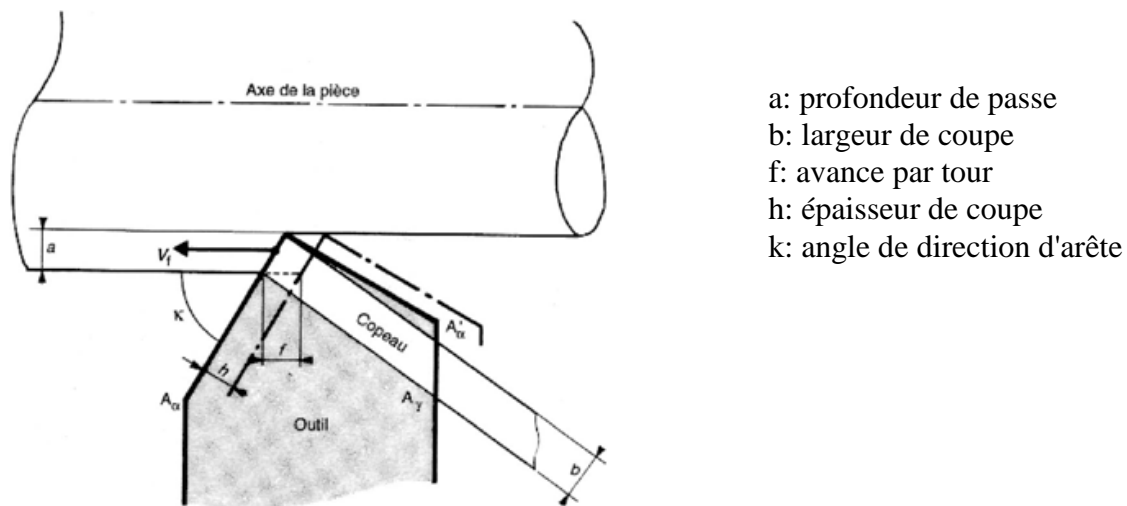


Figure 1-2 - Paramètres de coupe rapportés à la pièce (cas d'un tournage)

Plusieurs remarques doivent être faites pour situer la spécificité de l'usinage en tant que technique de mise en forme.

- Amplitude des déformations : dans une représentation simplifiée de type Merchant, le cisaillement Γ est égal à :

$$\Gamma = \cos \gamma / \sin \varphi \cdot \cos (\varphi - \gamma) \quad (1-1)$$

Lorsque l'on utilise un outil tel que γ soit égal à $+10^\circ$ et si, par hypothèse, le matériau usiné se cisaille sous un angle ϕ de 25° , on atteint dans la ZCP un cisaillement de 2,4, amplitude de déformation nettement supérieure à celles imposées au cours des principales opérations de mise en forme sans copeaux.

Paramètres liés à la vitesse d'usinage : la vitesse de coupe V est un paramètre technologique choisi par l'usineur soit sur la base de son expérience, soit à partir de calculs d'optimisation. Les ordres de grandeur usuels de V (usinages conventionnels) sont les suivants :

- Alliages légers 150 à 1 000 m/min
- Fontes 100 à 700 m/min
- Aciers de construction 70 à 500 m/min
- Alliages de titane 20 à 100 m/min

La vitesse du copeau V_c (figure 1) se déduit directement de la vitesse de coupe V et du rapport entre les épaisseurs de copeau non déformé et déformé :

$$V_c = V h / h_c \quad (1-2)$$

V_c est du même ordre de grandeur que V (en général voisin de sa moitié).

La vitesse de cisaillement $\dot{\Gamma}$ n'est calculable qu'en choisissant une modélisation, en restant dans le cas simplifié type Merchant, on peut montrer que :

$$\dot{\Gamma} = V \cos \gamma / \Delta y \cos (\phi - \gamma) \quad (1-3)$$

Avec Δy : épaisseur moyenne de la zone de cisaillement primaire

1.1.4 Cartes de températures

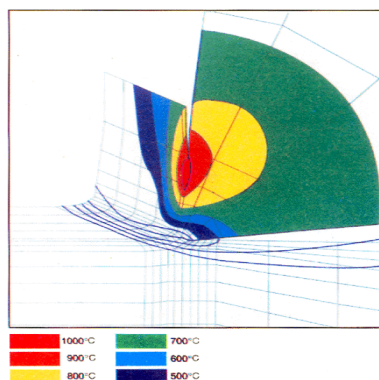


Figure 1.3 - Carte de températures dans un copeau et dans l'outil obtenue par modélisation thermomécanique [2]

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

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

Il est difficile de déterminer avec précision la carte des températures à la racine d'un copeau. On mesure facilement les températures d'une pièce et de la face externe d'un copeau. Il est plus difficile de mesurer les températures à l'interface copeau outil. Malgré ce handicap, les modélisations thermomécaniques de l'écoulement de la matière usinée sur un outil ont fait suffisamment de progrès pour permettre le tracé de réseaux vraisemblables d'isothermes. Ainsi la figure 1.3 , obtenue par G. Bittes [2] en utilisant le code **Sysweld**, correspond au cas de

l'usinage à 100 m/min d'un acier mi-dur avec outil en carbure de tungstène. On observe que le cisaillement primaire est globalement responsable d'une température de 350 ° C à la racine du copeau. Le cisaillement secondaire provoque sur la face interne du copeau un échauffement jusqu'à 1 100 ° C. L'outil est soumis à un fort gradient de température. La peau de la pièce, quant à elle, atteint 200 ° C pendant un court instant.

1.1.5 -Géométrie des copeaux

Tribologie des contacts copeau-outil et pièce-outil

La formation du copeau implique le triple frottement sec de deux corps pressés l'un contre l'autre (figure 1-1) :

Le système C-O : copeau outil côté face $A\gamma$;

Le système P-O : pièce-outil côté face $A\alpha$;

Le système P-O : pièce-outil côté face $A'\alpha$.

Ces trois types de contact ne sont pas équivalents : le premier se produit à haute température en condition de confinement, le deuxième à température modérée en condition de semi confinement et le troisième à température modérée en condition de non- confinement. Si l'on met à part les ruines d'outils par écaillages et micro écaillages, on peut observer que les systèmes C-O ($A\gamma$), P-O($A\alpha$) et P-O($A'\alpha$) donnent lieu plus ou moins rapidement à trois faciès d'endommagements macroscopiques (figure 1.1) :

-une plage d'usure plane sur la face $A\alpha$ en dépouille principale, dont la hauteur moyenne est couramment désignée par le symbole VB. Quand VB croît, l'arête de coupe recule et les cotes s'écartent de la valeur visée ;

-le creusement d'un cratère sur la face de coupe $A\gamma$, dont la profondeur maximale est couramment désignée par le symbole KT. La résistance mécanique de l'outil décroît lorsque KT augmente ;

-le creusement d'un sillon sur la face $A\alpha$ en limite de zone de coupe et d'une multitude de petits sillons sur la face $A'\alpha$. L'état de la surface usinée est d'autant plus détérioré que ces sillons sont plus développés [3] .

Il est nécessaire de se préoccuper de l'évolution des trois systèmes ci-dessus dont dépendent la productivité et la qualité des usinages. Le frottement sec de deux corps sous une pression de contact élevée conduit fréquemment à la constitution d'un troisième corps plus ou moins stable entre les deux premiers. Passons en revue les paramètres spécifiques de chacun des trois corps A, B et C qui déterminent l'évolution de ce système frottant C-O.

Corps A : le copeau

Pour une approche approfondie des interférences entre l'endommagement de l'outil par le copeau et les caractéristiques structurales de tel ou tel matériau usiné. On trouvera seulement ci-après une liste type des paramètres du corps A qu'il est très souhaitable de prendre en compte.

- Le copeau se différencie du matériau usiné par l'intense déformation et par le cycle thermique subi. Ainsi, dans le cas d'un acier qui a une structure cubique centrée à température ambiante, la face interne du copeau a très souvent une structure cubique face centrée.

- Le copeau est rarement monphasé ; les mécanismes endommageant vont dépendre de chaque famille de phases, et notamment :

-de leur quantité respective et de leur dureté à chaud après écrouissage ;

-de leur répartition et notamment de leur homogénéité et de leur isotropie ;

-de leur histoire thermomécanique et notamment des étapes de la mise en forme des pièces, qui précèdent l'usinage. C'est ainsi qu'il peut souvent y avoir des écarts d'usinabilité entre une barre laminée et une pièce forgée à chaud à partir de cette même barre.

- Le copeau peut contenir des particules incluses dans ses phases : les *inclusions*. On distingue couramment entre :

-les particules qui ont une grande dureté dans la ZCS (à la température du contact copeau outil). Ce sont des phases réfractaires telles que des oxydes, des nitrures ou des carbures. Généralement leur existence est une conséquence du processus d'élaboration du matériau usiné. Pour évaluer leurs effets endommageant pour l'outil, il faut tenir compte de leur composition, de leur taille, de leur morphologie et de leur nombre.

-les particules visqueuses à la température de coupe dans la ZCS. Fréquemment, elles contribuent à constituer le corps C et ralentissent l'endommagement. Souvent leur existence est volontairement provoquée par celui qui fabrique le matériau usiné. Leur efficacité peut dépendre de leur composition, de leur forme, de leur taille et de leur nombre. Il faut noter que ces deux derniers paramètres sont dépendants de l'histoire thermomécanique de la pièce avant usinage.

Corps B : l'outil

Pour les mêmes raisons que dans le cas du corps A, il n'est pas possible de décrire ici les particularités de chaque matériau utilisé pour réaliser un outil. On trouvera seulement ci-après une liste type des paramètres du corps B qu'il est possible de prendre en compte pour analyser son comportement.

- L'outil est soumis à un gradient thermique important. Il peut travailler en subissant des cycles thermiques fréquents soit parce que la coupe est discontinue (type fraisage), soit parce que l'efficacité de l'arrosage dépend de sa position (cas du perçage : le foret est plus refroidi hors du trou qu'au fond du trou). Des phénomènes tels que la fatigue thermique vont dépendre de la conductivité du matériau de l'outil, de son coefficient de dilatation, de son module d'élasticité E , etc.

- L'outil est soumis à des sollicitations mécaniques qui dépendent des conditions de coupe, de la rigidité du contact pièce-outil, de la technique d'usinage. Des endommagements, tels que la fatigue mécanique, l'écaillage, l'attrition, dépendent de la dureté du matériau de l'outil, de sa compacité, de sa ténacité, etc.

- L'outil est en contact intime avec le copeau à haute température. à chaque dégagement, sa face de coupe est exposée au contact de l'air ambiant. Il faut donc considérer la réactivité chimique entre le matériau de l'outil et :

-soit l'élément principal du matériau usiné.

-soit telle ou telle phase incluse du matériau usiné.

-soit un constituant de réaction du matériau usiné avec l'air ambiant.

-soit l'air ambiant (résistance à l'oxydation de l'outil).

- L'outil est endommagé par les phases dures ou les inclusions abrasives du matériau usiné. Sa résistance dépend de sa dureté à chaud, de sa compacité, etc.

- Très souvent, la surface de l'outil est revêtue ou traitée. Le concept de deuxième corps doit intégrer le caractère composite ou à gradient de composition des parties superficielles des outils.

Corps C

Les dépôts macroscopiques, qui sont constitués de particules issues du corps A et stabilisées sur le corps B.

Les dépôts microscopiques qui peuvent être constitués de particules issues du corps A, avec ou sans réactivité chimique entre celles-ci et le corps B ; les débris, qui peuvent être des particules abrasives préalablement incluses dans le corps A, des produits de réaction du corps B avec l'atmosphère, des morceaux du corps A arrachés, des morceaux du corps B déstabilisés, etc.

Les dépôts macroscopiques constitués à température modeste provoquent essentiellement un endommagement mécanique (régime vibratoire de travail de l'outil conduisant à fissuration et rupture).

Les dépôts microscopiques constitués à température élevée donnent lieu à des altérations de l'outil : endommagement chimique.

Les débris de toute nature sont cause d'une abrasion de la surface des outils : endommagement physique.

1.2 Endommagement des outils de coupe :

Le choix des meilleures conditions d'usinage vis-à-vis de l'usure, que ce soit avec des vitesses conventionnelles ou à grande vitesse, consiste à trouver les conditions de coupe en tournage, en établissant un compromis entre la vitesse de coupe et la durée de vie des outils.

La durée d'utilisation de l'outil étant limitée par son degré d'usure, il en résulte que les temps d'usinage sont en rapport direct avec l'usure. Le coût de l'usinage, qui intéresse en définitive l'entreprise, est une conséquence de la tenue des outils à l'usure. Les méthodes pour la recherche des conditions opératoires d'un Couple Outil Matière mettent en évidence la nécessité d'établir la capacité d'usinabilité avant tout autre mesure de ces caractéristiques.

La qualité du travail d'un outil dans le processus d'usinage dépend de son degré d'usure. L'importance de cette usure a une influence directe sur :

- La qualité et la précision dimensionnelle de la surface obtenue
- La tenue de l'outil dans le temps.
- La puissance nécessaire à la coupe.

La définition de la durée de vie **T** d'un outil selon la norme **ISO 3685** :

« C'est le temps de coupe total d'un outil nécessaire pour atteindre un critère de durée de vie spécifique ».

Il faudra donc maîtriser cette durée de vie ainsi que son évolution par rapport aux paramètres d'usinage. Dans la pratique, on pourra ramener cette durée de vie à des éléments plus concrets sur le poste de travail comme :

- Un volume de copeau produit entre deux changements d'arête.
- Un nombre de pièces usinées entre deux changements d'arêtes.
- Une longueur d'usinage entre deux changements d'arêtes.

L'analyse du mécanisme de la coupe montre l'importance des phénomènes de déformation plastique et de fissuration au sein du matériau usiné, mais aussi celle des phénomènes inter faciaux qui déterminent les actions réciproques de l'outil et du copeau.

Dans l'usinage des métaux, on constate que la forme géométrique et l'état physique de l'outil sont modifiés par l'action combinée des forces de coupe et par la température atteinte par le tranchant. Ces modifications qui augmentent progressivement avec la durée d'usinage, sont couramment regroupées sous le terme usure de l'outil. (fig1.4).

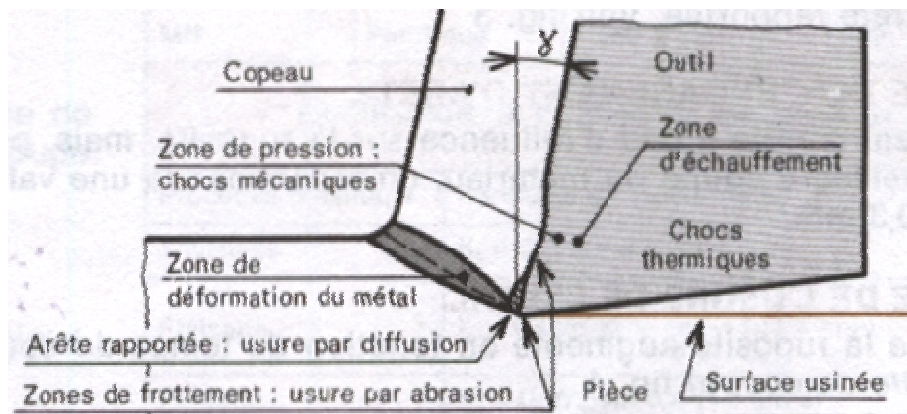


Fig. 1.4. Zone de coupe [4]

L'usure de l'outil découle des sollicitations sévères que subit le tranchant à l'interface outil-copeau. Celles-ci sont d'abord de natures mécaniques. Il s'agit de contraintes permanentes ou cycliques et d'actions de frottement en surface. Ceci exige pour l'outil des qualités de dureté et de ténacité remarquables.

Les phénomènes physiques qui provoquent la dégradation progressive du tranchant et, corrélativement, des qualités géométriques et mécaniques de la surface usinée, se traduisent par des modifications d'aspect visibles à l'oeil nu ou à l'aide d'un microscope. Ces manifestations macroscopiques permettent d'apprécier objectivement l'évolution de l'usure en fonction de divers paramètres géométriques mesurables. Cette usure se manifeste sous plusieurs formes, dont les principales sont:

L'usure en dépouille, l'usure en cratère et la fissuration de l'arête coupante suivie par la chute partielle ou totale de l'arête même. Le travail mécanique fourni pour créer un copeau est presque intégralement transformé en chaleur. L'élévation de température qui en résulte est l'une des causes majeures de l'endommagement de l'outil. La (Fig.1.5) illustre le type distribution de température que l'on peut observer sur l'outil, TRENT montre que le gradient thermique d'un outil peut atteindre 200°C/mm et que les températures maximales sont très localisées. [1]

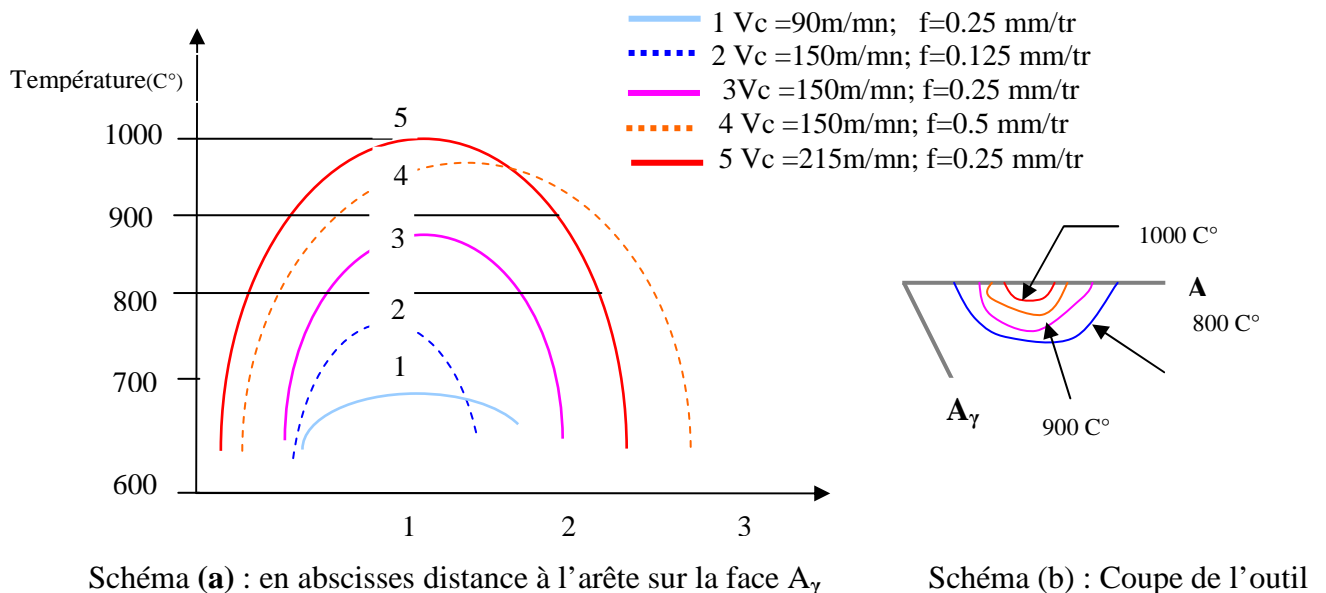


Fig.1.5 : carte des températures atteintes D'après [5]

1.2.1 Influence des paramètres de coupe sur l'usure :

On peut observer deux grands groupes de paramètres dans le processus de coupe.

Le premier est formé par la matière usinée et les conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, lubrification) :

- Vitesse de coupe : la température de coupe étant croissante avec la vitesse de coupe, ce paramètre aura une très grande influence sur l'usure.
- Avance de coupe : Les grandes avances font augmenter l'intensité des efforts de coupe et diminuent la durée de vie de l'outil.
- Profondeur de passe : La variation de la profondeur de passe modifie légèrement l'écoulement de la chaleur de long de l'arête tranchante et son influence reste modeste sur l'usure.
- Matériau usiné : Son influence sur l'usure dépend de ses propriétés physiques (conductibilité thermique), de ses propriétés mécaniques (pression spécifique de coupe) et de ses propriétés chimiques (% de ces certains éléments d'addition).

-
- Lubrification : Son influence permet une amélioration de 25% sur la durée de vie.

1.2.2 Méthodes de mesure des endommagements

Réduire l'usure des outils de coupe, soit par un choix optimisé des conditions de coupe, soit par la sélection du matériau d'outil le mieux adapté, soit par l'emploi d'un matériau usiné moins endommageant, répond à un double souci :

- Quantitatif : réduire le coût des pièces usinées.
- Qualitatif : obtenir des surfaces ayant des géométries et micro géométries optimales.

Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire :

-Au minimum de pouvoir faire des bilans, c'est-à-dire de pouvoir mesurer, dans des bonnes conditions de précision et de reproductibilité, les conséquences de toute action concernant le trinôme matière usinée-outil-machine.

-Au mieux d'identifier les mécanismes d'endommagement et d'en déduire des innovations.

-Quelle que soit la voie d'étude retenue, de capitaliser les résultats, de les organiser et de les utiliser en production avec l'assistance de l'outil informatique.

1.2.3 Méthodes d'examen et d'analyse de la surface des outils et des pièces usinées

Ces méthodes très diverses peuvent être plus ou moins longues, coûteuses, avec des équipements d'ateliers ou de laboratoires très spécialisés. L'examen d'un outil avec une bonne loupe devrait être une pratique courante d'atelier. On peut ainsi assez souvent identifier le ou les mécanismes endommageant. De même, l'examen sommaire du copeau ne doit pas être négligé : la micro géométrie de la surface qui a glissé sur l'outil, de la surface externe, leur couleur, la dureté du copeau, sa fragilité, son épaisseur (comparée à l'avance) sont autant d'indications quasi gratuites. L'examen de la micro géométrie des surfaces usinées et la comparaison des paramètres de description de celle-ci au profil théorique nécessite des équipements courants de métrologie. Il peut être utile d'identifier aussi l'écrouissage superficiel et de mesurer par rayons X les contraintes résiduelles. La quantification des paramètres macroscopiques d'usure, tels que le VB sur la face $A\alpha$ ou le KT sur la face $A\gamma$ peut être faite en atelier avec des équipements d'optique et de métrologie conventionnels.

L'identification de la nature du corps B nécessite les équipements lourds d'un laboratoire compétent en matériaux. Les analyses fines doivent être faites avec une microsonde sur des outils peu usés. La microscopie électronique à balayage permet d'examiner des outils très usés.

L'identification du corps B n'est pas toujours possible à partir de sa seule composition chimique (d'autant que selon la nature du corps A, on ne peut pas toujours faire un bilan complet de tous les éléments utiles). Certains auteurs utilisent les rayons X pour avoir une information sur la cristallographie des phases observées.

1.2.4 Méthodes de mesure des efforts et des puissances de coupe

Ces mesures sont nécessaires pour un choix optimisé des conditions de coupe valorisant les puissances installées. Elles sont précieuses pour une description mécanique du système tribologique outil-pièce-copeau.

Les mesures de puissance ne posent pas de difficultés particulières tant que les courants et tensions sont sinusoïdaux (ce qui n'est pas toujours le cas, en particulier avec des électro broches utilisant des variateurs de fréquence).

Les techniques employées pour mesurer les efforts de coupe ne doivent pas modifier la rigidité du contact outil-pièce. L'usage est quasi généralisé de n'utiliser que des capteurs contenant des quartz piézoélectriques qui ont une excellente sensibilité, une très grande rigidité et une fréquence propre très élevée. Pour les signaux correspondant à des opérations de coupe discontinue, il est nécessaire de bien définir une politique d'échantillonnage (combien

d'informations veut-on pendant une rotation de l'outil, combien d'informations peut-on stocker, quelle est la fréquence d'acquisition, etc.).

Poste d'essai d'usinabilité instrumenté: un poste d'essai d'usinage, qu'il soit en atelier ou en laboratoire, est choisi avec un très grand soin. La machine-outil utilisée doit être de conception moderne, bien entretenue et utilisée en deçà des maxima de sa puissance et de sa vitesse de broche. Des équipements de mesures physiques adaptés doivent y être installés : mesure de puissance, capteur des composantes de l'effort de coupe, éventuellement lunette pyrométrique, accéléromètre, etc. Ces appareils sont reliés à une électronique performante (amplificateurs, filtres). Les mesures sont mémorisées sur ordinateur puis traitées, affichées sur écran et éditées sur table traçante ou imprimante. Un soin tout particulier est apporté à l'archivage des données dont le volume nécessite un stockage approprié, à l'étalonnage des appareils de mesure et à la maintenance de la machine d'essai.

Dans la coupe orthogonale l'outil exerce sur la pièce une force de coupe ou bien « Efforts de coupe ». Dans la pratique, on considère que ces efforts se répartissent suivant les deux directions principales définies par la direction de coupe et la direction d'avance. On répétera identiquement l'usinage pour que les lectures successives de flèches soient cohérentes pour le même outil, on fera varier successivement la nature de la matière façonnée sans toucher à la section du copeau, puis la section du copeau sans changer de matière façonnée. On en déduira que les efforts varient dans le même sens que la section du copeau et la ténacité de la matière ainsi que sa résistance.

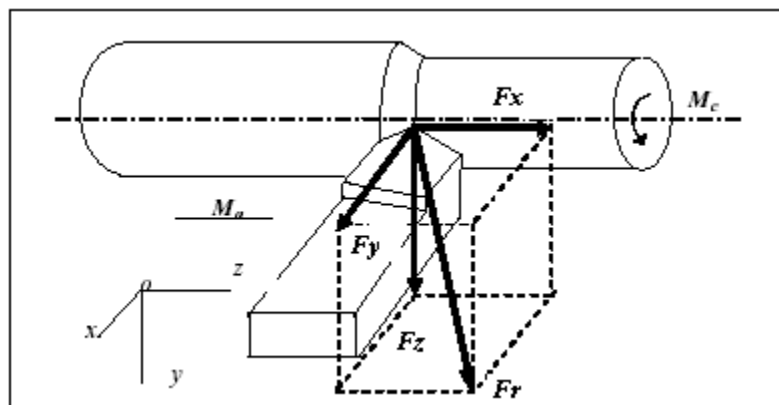


Fig. 1.6 schéma des composantes des efforts de coupe

L'expérience met en évidence les trois actions de la matière sur l'outil

Composante axiale F_a : de même direction que le mouvement d'avance (F_x), elle est égale à la résistance du métal à usiner dans la direction de l'avance et des forces de frottement, sa détermination est nécessaire dans le calcul de la rigidité de l'appui du mandrin et du mécanisme des avances de la machine-outil.

Composante radiale F_r : de même direction que le mouvement de profondeur (F_y), elle est la cause du fléchissement de l'ébauche sur le plan horizontal, diminue la pression d'usinage des ébauches longues et provoque les vibrations, non souhaitées.

Composante tangentielle F_t ; même direction que le mouvement de coupe (F_z), elle est la principale et la plus importante. Elle est la somme des actions des forces de résistance du métal : rupture, déformation du copeau, Frottement... etc.

La force résultante F_r est :

$$F_r = \sqrt{F_z^2 + F_y^2 + F_x^2} \quad (1.4)$$

I.2.4.1- Influence des composantes de l'effort de coupe :

1) F_z : sert à dimensionner les éléments de la machine (boite des vitesses et ses composantes, broches,...), déterminer la puissance de coupe qui est nécessaire pour calculer la puissance de la machine ($P_m = p_c / \rho$).

2) F_x : sert à déterminer les éléments de la boîte d'avance (chariot, vis mère,...).

3) F_y : sert à calculer les éléments du bâti de la machine, notamment les glissières.

La problématique de la force de coupe réside dans l'étude des facteurs influents sur ses composantes. Les facteurs les plus en vue sont :

I.2.4.2-Influence des propriétés mécaniques de la matière à usiner [6]: plus la résistance à la rupture du métal à couper est grande, plus la force de coupe devient importante (figure ci après).

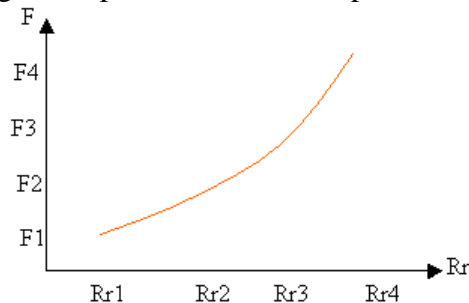


Fig. 1.7 schémas de l'influence de la vitesse de coupe sur les efforts [6]:

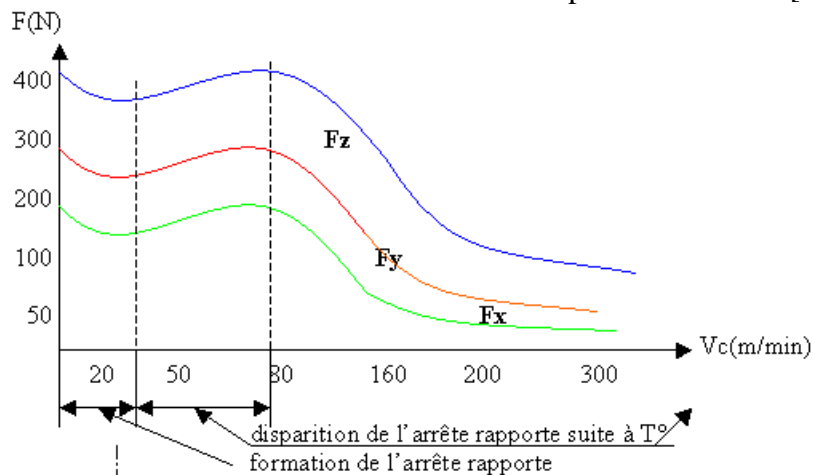


Fig. 1.8 schéma de l'influence de la géométrie de l'outil

I.2.4.3-Influence de la géométrie de l'outil [6] :

L'augmentation de l'angle du tranchant β rend difficile l'engagement de l'outil dans la matière ce qui rend la déformation plastique et élastique plus difficile, cette augmentation entraîne l'accroissement de la force de coupe, surtout ses composantes F_x et F_y . L'augmentation de l'angle γ diminue l'effort de coupe. D'autre part, avec l'augmentation de l'angle de direction principale χ_r , F_y diminue, F_x augmente et F_z diminue dans l'intervalle (30 à 60°), par la suite, F_z augmente dans l'intervalle (60 à 90°).

I.2.3.4-Influence du liquide de lubrification et de refroidissement [6]:

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

Remarque : L'usure en surface d'attaque a très peu d'influence sur les relations entre composantes de la force de coupe. Par contre, l'usure en surface de dépouille a une influence remarquable sur les composantes horizontales F_x et F_y .

1.3 Lois d'usure d'outil mesuré par des essais d'usinabilité

Les lois d'usure d'un couple outil-matériau usiné sont des photographies des effets cumulés de tous les endommagements actifs au cours d'une opération d'usinage bien définie. Elles sont déterminées au moyen d'essais qui peuvent se faire en atelier ou en laboratoire [6].

On a vu que plusieurs paramètres (usure frontale VB, cratérisation KT, etc.) permettent de suivre globalement l'évolution de la géométrie de l'outil. On peut utiliser des valeurs maximales admissibles de ceux-ci (ou d'autres indicateurs en relation avec la qualité de la surface usinée, par exemple) pour définir de façon conventionnelle la durée de vie T d'un outil pour une condition de coupe donnée (c'est-à-dire une valeur V , de f , un diamètre d d'outil ou une profondeur de passe a_p , etc.) et une technologie d'usinage. Pour les usinages discontinus, T est le cumul des temps de coupe effectifs et non le temps d'essai. Aussi peut-on substituer à la notion de temps celle de longueur usinée L .

Pour un type de machine-outil, la loi d'usure d'un couple outil-matière usinée est de la forme :

$$T = T(V, f, d) \dots \dots \dots (1-5)$$

Où

$$T = T(V, f, a_p) \dots \dots \dots (1-6)$$

Où

$$L = L(V, f, d) \dots \dots \dots (1-7)$$

Assez souvent la loi d'usure est du type loi généralisée de Taylor :

$$V = K \cdot T^n \cdot f^p \cdot a^q \dots \dots \dots (1-8)$$

Avec K coefficient dépendant de la valeur limite du critère géométrique d'usure d'outil.

En tournage, on peut montrer que :

$$K = K_0 \cdot VB^m \dots \dots \dots (1-9)$$

Cinq paramètres sont donc nécessaires pour décrire le système outil/matière usinée/machine-outil. Toutefois q est généralement très petit, m varie peu d'un matériau usiné à un autre (pour une famille de matériaux). Le plan d'expériences permettant de déterminer les seuls trois paramètres K , n et p reste de taille raisonnable.

Quand on compare entre eux des matériaux dans des conditions d'essai bien définies, en général on ne fait pas varier l'avance f_0 ni la profondeur de passe a_{p0} ; on choisit une valeur limite du critère d'usure de l'outil (par exemple VB_0) et le temps T_0 au bout duquel l'outil aura subi cette usure. Chaque matériau est alors caractérisé par la vitesse V_0 correspondante. Des essais conformes à la norme ISO 3685 sont le plus souvent réalisés dans des conditions telles que : $T_0 = 20$ min, $a_0 = 2$ mm, $f_0 = 0,4$ mm/tr et $VB_0 = 0,3$ mm.

I.3.1-Choix des conditions de coupe en tournage (ISO 3685)

Tableau 1.1 choix des conditions de coupes en tournage d'après ISO 3685

Rayon de bec de l'outil	0,4	0,8	1,2
Avance f_0 (mm/tr)	$< 0,32$	$< 0,64$	$< 0,95$
Profondeur de passe a_{p0} (mm)	$> 0,8 < 10 f_0$	$> 1,6 < 10 f_0$	$> 2,4 < 10 f_0$

Critères d'usure d'outil utilisés pour arrêter un essai (norme ISO 3685) : il convient de se rapporter à la norme qui définit les divers critères d'usure qui peuvent être choisis, leurs valeurs maximales prises en compte pour arrêter un essai et surtout les précautions à prendre pour faire les mesures.

Les valeurs ci-dessous situent les valeurs maximales des critères le plus souvent pris en compte.

- Outil en acier rapide : $VB_0 = 0,3$ mm, Pas de critère de cratérisation
- Outil en carbure : $VB_0 = 0,3$ mm, $KT_0 = 0,06 + 0,3 f_0$ (en mm)
- Outil en céramique : $VB_0 = 0,3$ mm, Pas de critère de cratérisation

1.4 Notions du couple outil/matière

Pour qu'un outil fonctionne dans des conditions correctes, il faut que l'épaisseur de copeau générée soit comprise dans une certaine gamme.

-La valeur minimale est appelée copeau minimal et notée h_{min} . Cette épaisseur minimale varie de quelques centièmes (2 à 3) jusqu'à quelques millimètres (de 1,5 à 2) et est influencée principalement par : la finesse de l'arête (valeur de la préparation d'arête différente d'un type d'outil à un autre), de la matière usinée, de la rigidité et de l'orientation de l'arête. Le fait d'usiner à grande vitesse de rotation (supérieure à 14 000 tr/mn en général) provoque un décalage de cette épaisseur minimale vers le bas.

- La résistance mécanique et thermique de l'arête de coupe, la génération de vibrations par efforts de coupe trop importants impliquent la prise en compte d'une valeur maximale de l'épaisseur de copeau.

- De plus, la vitesse de coupe agit directement sur le mode de formation du copeau.

- Le non respect d'une vitesse de coupe minimale, notée V_c min entraîne inévitablement la formation d'un copeau adhérent (portion du copeau qui se colle sur la face de coupe de l'outil). Ce copeau adhérent provoque une « arête rapportée » sur l'outil générant des vibrations de coupe.

- Le respect d'une durée de vie d'outil technico-économiquement viable entraîne la prise en compte d'une vitesse de coupe maximale à respecter. La dimension économique est très importante.

En ce qui concerne l'usinage à grande vitesse, la notion de couple outil/matière ne suffit plus. Plus exactement, la broche (montée sur le bâti machine) intervient d'une manière si prépondérante pour le bon déroulement de l'usinage que la notion de triplet outil/matière/environnement est couramment employée (environnement désigne ici l'environnement du couple outil matière, principalement la broche).

Il apparaît donc que le bon déroulement d'un usinage dépend de plusieurs paramètres (liés à l'outil, la matière usinée, la pièce, la machine...). La prise en compte de tous ces paramètres est indispensable dans la détermination des conditions d'utilisation d'un outil.

1.4.1 Conditions d'utilisation d'un outil

Dans le but de déterminer les conditions optimales, Taylor [7] le premier et depuis de nombreux expérimentateurs ont cherché à établir les lois de la coupe, en particulier la relation entre la durée de vie de l'outil et la vitesse de coupe quand sont stabilisées un certain nombre de variables : dimensions de la section du copeau, matière de la pièce et de l'outil, géométrie de ce dernier. Ils sont parvenus, pour la plupart, à des formules semblables, mais les coefficients de celles-ci présentent une dispersion importante pour plusieurs raisons :

- deux matériaux de même composition chimique et de même dureté peuvent avoir des usinabilités différentes.

- outils géométriquement différents.

- essais n'ayant pas porté sur le même champ des variables ci-dessus (en particulier vitesses de coupe).

- impossibilité d'éviter des erreurs de mesure dont l'effet cumulatif peut être important.

- durée de vie de l'outil dépendant d'autres variables méconnues telles que : état de surface des arêtes de coupe, finesse de l'arête, machines-outils elles-mêmes, mode de fixation de l'outil et de la pièce, forme et dimension de cette dernière, section d'outil, refroidissement, etc.

1.4.2 Essais en laboratoire sur la capacité de coupe

La seule méthode fiable de comparaison de performances des matériaux de coupe est la méthode couple outil/matière, une comparaison ne sera efficace que si elle est réalisée avec des données comparables. Par exemple, un des paramètres du COM est V_c m/min c'est-à-dire la vitesse de coupe ($m \cdot \min^{-1}$) en dessous de laquelle il ne faut pas descendre sous peine d'un mauvais fonctionnement de l'outil. L'expérience montre que ce V_c min dépend, entre autres, du couple nuance outil de coupe-matière usinée. Ce qui veut dire que deux nuances de carbure ou de céramique n'auront pas la même V_c min dans la même matière usinée. La comparaison de ces deux nuances ne pourra donc s'effectuer qu'aux vitesses de coupe supérieures à la plus grande des deux vitesses minimales de coupe.

Il est donc impératif, avant d'effectuer des essais comparatifs de deux nuances de coupe, de s'assurer que les comparaisons seront réalisées dans des zones communes à l'emploi des deux nuances.

1.5 Matériaux de coupe

1.5.1 Carbures métalliques

La famille des carbures métallique est née en 1923, ce sont des alliages frittés à base de carbure de tungstène (WC) des carbures de titane (TiC), de carbure de tantale (TaC) lié par le cobalt (Co).

Ils permettent une vitesse de coupe dans l'acier jusqu'à 300m/mn, leur dureté varie au voisinage de 9HRC. [8].

Dès 1930 de nouveaux matériaux de type (Ti, Mo) C-Ni/Co/C ; Ta C-Ni ; (Ti, Ta)C-Co ;

TiC-Vc-Ni/Fe ; ont été développés mais n'ont jamais pu concurrencer les carbures classiques à base de (WC). [9]

Les premiers carbures revêtus sont apparus sur le marché en 1969, le revêtement consiste en une couche mince (quelques microns d'épaisseur) de TiC obtenu par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) et permet d'accroître la résistance à l'usure en dépouille de l'outil. Au début de l'année 1970 apparut le revêtement TiN qui permettait de combattre l'usure en cratère d'où le développement aussitôt du revêtement bicouches (TiC + TiN), puis le revêtement de Ti(C, N), une troisième couche d'alumine (Al₂O₃) est apparue qui s'est montrée efficace comme barrière à la diffusion du fer vers l'outil .et enfin d'autres types de revêtement ont été développés (salions ZrO₂, SiC). [10,11]

Les premières applications des carbures de coupe se sont faites sous forme de plaquettes à braser sur des corps d'outils en acier ordinaire, la partie active de ces outils étant réaffûtée au fur et à mesure de son usure.

Vers 1958 ont été créés les outils à plaquettes amovibles (figure 1-6). Ce type d'outil a été rapidement adopté car les avantages des plaquettes amovibles sont nombreux :

- suppression de l'affûtage.
- absence de brasure, donc une nuance plus dure peut souvent être utilisée (risque de crique éliminé).
- conditions de coupe plus sévères.
- indexage (repérage mécanique) de la plaquette pour remplacer une arête usée ou un changement de nuance plus rapide que le changement d'un outil brasé.
- affilage d'arête recommandé dans le tournage de l'acier, exécuté d'une façon automatique par le fabricant de plaquettes alors que, pour l'outil brasé, il est réalisé à la main par l'opérateur.

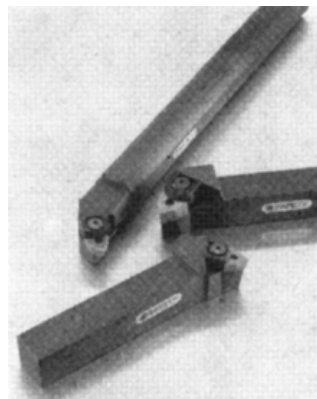


Figure 1.9 - Outils à plaquette amovible (document Safety)

1.5.2 Carbures métalliques sans revêtement

La dureté des carbures métalliques (environ 1 500 à 2 500 HV), très supérieure à celle des aciers rapides surcarburés (HRC 66 soit environ 865 HV), jointe à une résistance importante (résistance à la flexion de 800 à 2 200 MPa), ils sont les plus utilisés. Leur dureté à chaud permet l'usinage jusqu'à une température de 1 000° C.

La symbolisation des carbures a fait l'objet de la recommandation NF E 66-304 (ISO 513), les nuances y sont divisées en trois grandes catégories :

P : métaux ferreux à copeaux longs ;

M : métaux ferreux à copeaux longs, à copeaux courts et métaux non ferreux ;

K : métaux ferreux à copeaux courts, métaux non ferreux et matières non métalliques.

Dans chaque catégorie, un nombre allant de 01 à 50 indique la ténacité croissante et la diminution de la résistance à l'usure.

Les nuances modernes de carbures étant de plus en plus polyvalentes et performantes, il devient difficile de les classer ainsi. Cela implique des difficultés croissantes pour établir des équivalences directes entre fabricants. La notion COM est là encore indispensable pour classer et comparer les performances des différents carbures.

Il est important de noter que l'emploi de nuances de carbures non revêtus a quasiment disparu pour certaines technologies telles que les plaquettes amovibles de tournage.

Par contre, les carbures métalliques non revêtus sont de plus en plus employés pour certains types d'outils en remplacement de l'acier rapide. On peut citer : foret en carbure

monobloc, foret à insert rapporté en carbure, alésoir à plaquettes, alésoir monobloc, taraud, insert brasé pour les outils de décolletage.

1.5.3 Carbures métalliques avec revêtement

À partir de 1969 apparaît un nouveau type de matériau de coupe : le carbure revêtu constitué par une plaquette en carbure métallique recouvert par un film mince (3 à 10 μm) d'un matériau plus dur.

Les couches les plus usuelles sont le carbure de titane, le nitrure de titane, le carbonitrure de titane et l'alumine (tableau 1-2). Chacune de ces couches apporte à l'outil une amélioration dans un domaine particulier (résistance à l'usure, à l'oxydation, au frottement, etc.). Aussi des dépôts multicouches ont-ils été réalisés afin de combiner leurs différents avantages. Des revêtements à base de nitrure de hafnium et de carbure de chrome ont été également commercialisés.

Tableau 1.2 - Comparaison des propriétés de certains revêtements [12]

Matériau de revêtement	Résistance à l'usure	Résistance chimique	Résistance thermique	Résistance au frottement
TiC	*****	*	*	***
TiN	***	***	***	*****
Ti (C, N)	**	**	**	****
Al ₂ O ₃	****	*****	*****	**
HfN	***	****	****	****
* indique la valeur la plus faible et ***** indique la valeur la plus forte.				

Tableau 1.3 Céramiques utilisées pour les outils de coupe

Céramiques oxydées	Céramiques mixtes		Céramiques non oxydées
Céramiques blanches	Céramiques mixtes noires	Céramiques renforcées vertes (whiskers)	Sialons gris
Au début : Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ -TiC (30%)		base Si ₃ N ₄
Actuellement : Al ₂ O ₃ + ZrO ₂	Al ₂ O ₃ -TiN-TiC	Al ₂ O ₃ -fibres SiC	
	Al ₂ O ₃ -WC, TaC		
Ténacité →			
← Dureté			

Ces couches sont obtenues généralement par CVD dans des fours entre 800 et 1100° C, ce qui permet d'obtenir des dépôts de très bonne adhérence.

Pour certaines applications comme le fraisage, ces dépôts sont parfois réalisés à basse température par PVD afin de fragiliser le moins possible le substrat carbure.

Les nouvelles générations de plaquettes amovibles en carbure revêtu sont généralement très complexes. Le substrat est dit enrichi au cobalt, ce qui signifie que le taux de cobalt est différent au cœur et en périphérie de la plaquette. Cela permet d'améliorer la résistance à l'usure d'où une meilleure résistance aux fortes vitesses de coupe tout en conservant une ténacité acceptable. Ensuite, le substrat est revêtu. Le nombre de couches varie d'un fabricant à l'autre. Il peut aller de deux à dix en moyenne, généralement réalisées par procédé CVD ou MTVD. Contrairement aux premiers carbures, il est maintenant impossible de dissocier le substrat du

revêtement. Les substrats sont en effet conçus pour recevoir certains types de revêtements, ou au contraire, pour être non revêtus.

1.5.4 Céramiques

Les céramiques sont des matériaux frittés sans liant métallique. Ils sont très durs et donc sensibles aux chocs thermiques et mécaniques. Les céramiques couramment utilisées pour les outils de coupe sont réunies dans le tableau 1.2 .

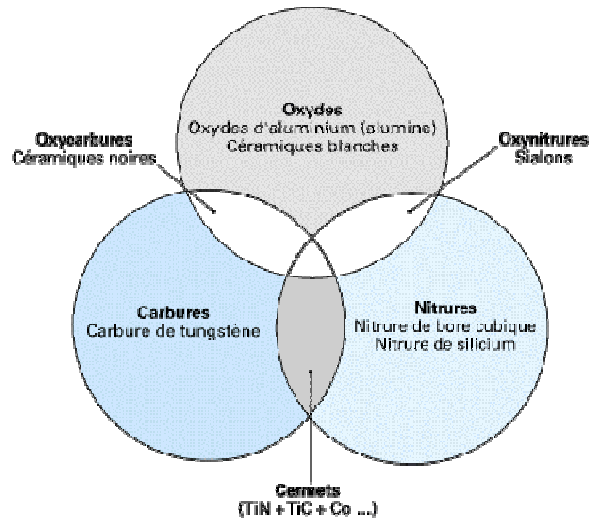


Figure 1.10 Céramiques

La céramique la plus courante est l'oxyde d'aluminium ou alumine Al_2O_3 . L'apparition de ce matériau sur le marché remonte aux années 1960. Dès l'origine, il s'est révélé intéressant pour la finition des fontes, à condition de disposer de machines robustes et à grandes vitesses.

Le tableau 1.1 et le diagramme de la figure 1.5 donnent quelques propriétés physiques de ce matériau et leur comparaison avec celles des aciers rapides et des carbures métalliques.

Jusqu'aux années 1980, l'alumine a été utilisée pour l'usinage de fontes dont la dureté ne dépassait pas 250 HB, mais il est possible maintenant d'usiner de l'acier jusqu'à HRC 60 (environ 700 HV) ; c'est le matériau de coupe qui résiste le mieux à la craterisation.

D'autres céramiques sont également employées.

Les céramiques noires sont des mélanges d' Al_2O_3 et de carbure métallique (TiC ou WC) ou de zircon (ZrO₂). Elles sont beaucoup moins sensibles que les céramiques Al_2O_3 aux brusques changements de température et permettent l'emploi de liquides de coupe.

Le nitrure de silicium Si_3N_4 permet dans certains matériaux des vitesses de coupe une fois et demi à deux fois supérieures à celles des autres céramiques, ce qui impose des machines plus performantes (plus puissantes, plus rigides...). Il s'emploie à sec.

Les céramiques renforcées par des whiskers (bâtonnets de fibres monocristallines de carbure de silicium entrelacées) qui leur confèrent une plus grande ténacité, permettent un travail au choc ou dans les matériaux réfractaires.

Les céramiques sont employées avec des machines rigides et puissantes. Un arrosage continu est nécessaire. Les surfaces doivent être préparées (chanfrein en début de passe).

Les outils en céramique peuvent être revêtus. Le revêtement le plus utilisé est le nitrure de titane TiN.

1.5.5 Cermets

Cermet est un terme formé de deux syllabes : (**cer**) vient de céramique et (**met**) de métal. Ce sont des matériaux élaborés par la métallurgie des poudres, constitués par des particules de composés métalliques durs (carbures, nitrures, carbonitrures) liées par un métal (généralement du nickel). Actuellement, les cermets sont composés de TiC, TiN, TiCN, Mo₂C, WC, VC, TaC, NbC, Ni et Co (tableau 1.1).

Les propriétés d'utilisation des cermets dépendent pour une grande part des proportions des différents composants cités ci-dessus, notamment des teneurs en TiC, TiN et TiCN et du rapport N/(C + N) qui, dans la dernière génération de cermets, est supérieur à 0,3. Le tableau 1.3 montre l'influence du rapport N/(C + N) sur les propriétés des cermets.

Tableau 1-4 - Comparaison des propriétés physiques et du ratio N/(C + N) des cermets et des carbures de coupe [3]

Propriétés	Teneur en azote N/(C + N)	Conductivité thermique à 20 C	Résistance à la flexion	Coefficient de dilatation	Module d'élasticité	Résistance relative aux chocs thermiques
		(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	(MPa)	(10 ⁻⁶ · K ⁻¹)	(GPa)	
Cermets	2 ^e génération	0	8	1 500	7,0	390
	3 ^e génération	0,22	11	1 650	7,2	400
	4 ^e génération	0,44	18	2 000	7,4	390
Carbures	P 10		35	1 500	6,0	550
	M 10		39	2 000	4,7	600

La taille des particules dures a également une grande influence sur les propriétés des cermets. Des grains fins améliorent la ténacité et la résistance aux chocs thermiques.

Les cermets présentent en outre une grande inertie chimique réduisant les phénomènes de cratérisation et d'arête rapportée. Leur bonne résistance à l'usure et leur grande ténacité permettent de travailler en coupe positive, d'où de moindres efforts de coupe, de bons états de surface et une grande précision dimensionnelle des pièces usinées.

Les cermets ne nécessitent pas obligatoirement de lubrification, elle est réalisée uniquement lorsque la précision de la finition l'exige.

Les cermets sont une classe de matériaux comprenant le système oxyde métal ; carbure-métal ; nitrure métal ; borure métal et même des systèmes composés non métallique (SiC, Si₃N₄, BN, B₄C.)-métal. L'effort le plus important est dirigé sur les cermets à base de TiC et plus particulièrement sur les cermets à base de Ti(C, N). Les cermets à base de TiC sont du type TiC-Mo₂C-Ni/Mo et de la fonte ductile ou ils ont l'avantage de s'user moins vite que les carbures et donc d'avoir une plus longue durée de vie. [13].

Au début des années 70 un grand nombre de nuances des cermets à base de Ti(C, N) ont été proposées par exemple. [14]

Ti(C, N)-Ni	TiC-TiN-Ni/Mo/ (W)
Ti(C, N)-Ni /Mo	TiC-TiN-Mo ₂ C-Ni
(Ti, Mo)(C, N)-Ni/Mo	TiC-TiN-WC-Mo ₂ C-Ni/Co
(Ti, Ta)(C, N)-Ni /Fe (Mo)	WC-TiN-Co
Ti(C, N)-(W-Ti)C-Co	WC-TiC-TiN-Co

1.5.6 Diamant

Diamant naturel

Le diamant naturel est issu de la transformation, il y a 100 millions d'années, du carbone sous très haute pression (environ 7 GPa) et à température élevée (environ 2 000° C). Sa haute dureté et sa faible réactivité chimique expliquent qu'il ait pu se conserver à travers les siècles. On le trouve dans des zones géographiques : Afrique du Sud, Zaïre, Russie, Brésil, Australie, etc. Les plus beaux diamants (les plus grands et exempts de défauts) sont destinés à la joaillerie.

En 1977, la production mondiale a été de 8 t dont 26 % pour la joaillerie, le reste étant destiné à l'industrie.

Les propriétés remarquables du diamant naturel en tant qu'outil de coupe (tableau 1.1) sont les suivantes :

- c'est le plus dur des matériaux connus.
- sa résistance à la compression est très supérieure à celles des autres matériaux.
- son coefficient de dilatation thermique ($3,1 \times 10^{-6} \cdot K^{-1}$), plus faible que celui des autres matériaux d'outils, lui confère une excellente résistance aux chocs thermiques.
- sa conductivité thermique, la plus élevée de tous les matériaux $600 \text{ à } 2\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ facilite l'évacuation de la chaleur de la zone de coupe si bien qu'un diamant qui vient d'usiner paraît froid au toucher.

Par contre, sa résilience est faible, ce qui le rend très sensible aux chocs mécaniques. Sa haute dureté, liée à sa structure atomique particulière, n'est pas la même dans tous les plans. Il se clive suivant quatre directions, ce qui le rend fragile.

Diamant synthétique

Les premiers furent réalisés en Suède en 1953 par von Platen, puis en 1954 par Hall aux États-Unis, en soumettant du graphite à des températures et pressions très élevées. Les cristaux obtenus étaient petits (< 0,5 mm) et servaient à la fabrication de meules en diamant synthétique.

La production est actuellement forte : de 22 t/an en 1986, elle a peu évolué jusqu'en 1995, date à laquelle la production semble s'être accélérée.

Utilisation dans l'usinage

À base de carbone, les diamants (naturels et synthétiques) ont de ce fait une forte affinité pour les matériaux ferreux et sont donc généralement exclus pour leur usinage. On les utilise particulièrement pour les métaux tendres : aluminium, cuivre, magnésium, zinc et leurs alliages, ainsi que pour les matériaux antifriction.

Le diamant sert aussi à l'usinage des métaux précieux (or, platine), des matières plastiques chargées ou non, du bois.

1.5.7 Nitrure de bore cubique

Propriétés

Contrairement au diamant, il ne se trouve pas dans la nature. On l'élabore donc par synthèse (première synthèse en 1957 aux États-Unis).

Suivant les conditions, on obtient deux formes :

- nitrure de bore à structure cubique (CBN) qui est la forme la plus dure (même structure que le diamant).

Utilisations

Les CBN sont particulièrement adaptés aux usinages de matériaux durs (dureté HRC 55, soit environ 595 HV) tels que les aciers traités, fontes alliées (au chrome, molybdène, etc.), alliages de revêtement dur, stellites, aciers à outils, etc. Ils permettent aussi l'usinage de matériaux conventionnels (fontes ordinaires par exemple) à des vitesses de coupe élevées ($> 1\,000\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) aussi bien en tournage qu'en fraisage.

Dans l'industrie automobile, on utilise maintenant le CBN pour le fraisage finition des faces de carter cylindre en fonte dure ($V_c = 850\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) et l'alésage finition des cylindres ($V_c = 500\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$).

L'aptitude du CBN à usiner les aciers traités et la qualité des surfaces obtenues permettent d'envisager dans certains cas le remplacement de la technique d'usinage par rectification, par celle du tournage dur (disques de freins, pignons de boîtes de vitesses, etc.).

La géométrie de ces outils (finition d'arête) a une influence notable sur la tenue en service. L'assise de l'outil doit être excellente, la machine très rigide et l'arête de coupe doit être chargée progressivement.

L'usinage au CBN permet de travailler sans liquide de coupe, la chaleur engendrée à l'interface pièce-outil passant dans le copeau.

Les performances observées des CBN sont supérieures à celles des céramiques ou sialons. Le choix d'utiliser un outil CBN dépendra du contexte économique de l'usinage, l'outil CBN étant encore 5 à 10 fois plus coûteux à l'achat que les outils en céramique.

1.6 Sélections des matériaux et vitesse de coupe

La très grande diversité des matériaux de coupe offerts actuellement oblige à opérer des choix. L'importance du couple outil/matière a été démontrée par de nombreuses études récentes. [7] [8] [9]

En règle générale, l'usineur a peu de possibilités d'agir sur la matière de la pièce usinée. C'est donc sur l'outil, et par conséquent sur le matériau de coupe, que devra porter toute son attention.

Avant de décider des conditions de coupe, l'usineur devra vérifier l'aptitude (ou la qualification) du matériau de coupe à usiner la matière de la pièce. Pour cette première étape, l'aide du fabricant d'outils est généralement indispensable et utile. En effet, la plupart des matériaux de coupe sont vendus sous des dénominations commerciales : la connaissance exacte du matériau de coupe (y compris des revêtements s'il y a lieu) est donc parfois délicate à obtenir.

Une fois l'étape de qualification et d'aptitude assurée, il faut valider techniquement le matériau de coupe, c'est-à-dire à lui associer des valeurs numériques (vitesse de coupe et avance généralement) de fonctionnement. Ces valeurs numériques sont également liées au type d'outil sur lequel est monté le matériau de coupe.

Ces deux étapes sont entièrement prises en compte par le couple outil/matière. La norme NF E 66-520 donne la méthodologie d'essais à réaliser pour aboutir au bon fonctionnement de l'outil. Les normes type NF E 66-505 (essais normalisés qui permettent de classer les matériaux de coupe dans des conditions de fonctionnement bien définies) ont montré leurs limites et ne sont plus utilisées dans l'industrie.

Les petites et moyennes entreprises ne sont pas équipées pour réaliser des essais d'usinage. Quant aux grandes entreprises, la tendance actuelle est de réduire très fortement (voire supprimer) les services destinés aux méthodes usinage. Les usineurs doivent donc avoir accès directement à des informations techniques fiables concernant le domaine d'emploi des matériaux de coupe. La diversité des références commerciales des fabricants d'outils est telle que cette tâche est pratiquement impossible à réaliser sans l'aide de logiciels Cette même méthode COM

sert également à caractériser l'usinabilité de la matière usinée. , Figure 1.11 montre l'influence de la vitesse de coupe et de l'avance sur l'usure de l'outil, d'après [10]

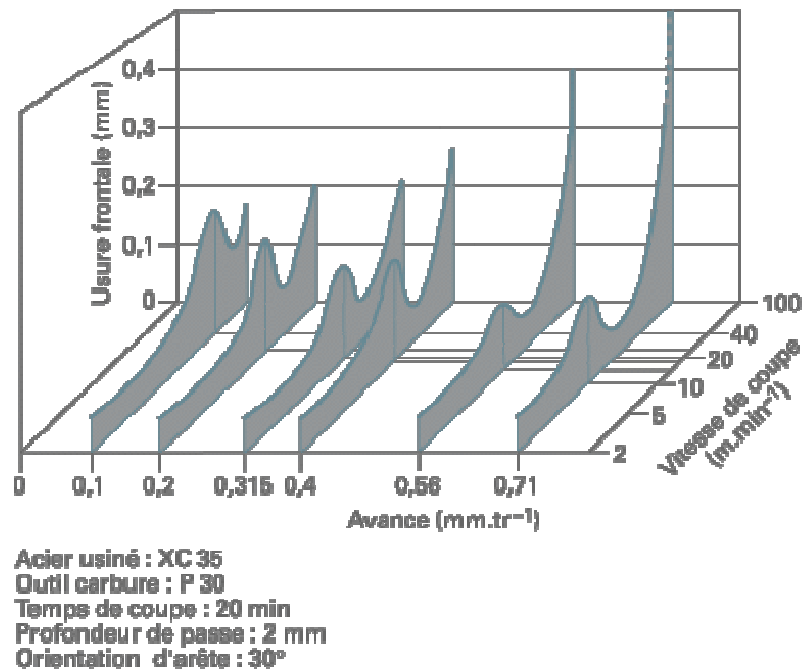


Figure 1.11 sélection des matériaux de coupes

1.6.1 Utilisation des matériaux

Le rendement économique des machines-outils dépend essentiellement des performances des outils de coupe. En plus des conditions d'utilisation de l'outil, celles-ci sont fonction des propriétés du matériau qui constitue l'arête de coupe : ténacité et résistance à l'abrasion.

D'une manière générale, un matériau est d'autant plus tenace que les contraintes, statiques ou dynamiques (chocs), provoquant sa rupture sont plus élevées. Plus précisément, on caractérise cet aspect des matériaux de coupe par leur ténacité K_{Ic} , facteur critique d'intensité de contrainte, provoquant la propagation de fissure en mode I leur contrainte de rupture en flexion σ_{rf} ou leur résilience (rupture par chocs) (tableau 1.1).

L'industrie sidérurgique est devenue très innovante, elle offre à ses clients plus de 50% de matériaux nouveaux tous les 5 ans. L'industrie a ainsi fait évoluer les matériaux d'usinage. Deux pistes ont été et sont toujours explorées :

- matériaux assurant une autolubrification des arêtes de coupe avec des éléments chimiques (Mn, Si, Cr) qui s'oxydent facilement et s'agglomèrent sur ces dernières. [5]
- matériaux, avec inclusions de métaux (plomb, bismuth, calcium) ou de sulfures, favorisant la fragmentation des copeaux.

Plusieurs travaux mettent en évidence l'amélioration apportée par ces matériaux [6] même si les phénomènes physiques ne sont pas encore totalement compris. On constate leur influence notable sur le cisaillement primaire et secondaire dans le cas de la formation de copeaux continus, ce qui permet ainsi une transition plus facile vers la segmentation des copeaux [7,8] Les sulfures sont très étudiés, car ils engendrent des amorces de rupture qui facilitent la fragmentation des copeaux. On peut noter que cette influence dépend aussi de la vitesse de coupe [9].

Les inclusions qui posent des problèmes dans la formation du copeau et dans la modification du champ de contraintes, au sein de la pièce usinée, ont été aussi largement étudiées, dans le but de

comprendre les phénomènes physiques qu'elles génèrent et leurs influences dans les opérations d'usinage [10, 11,12].

1.6.2 Méthodologie du choix d'un matériau de coupe

Selon [11], la méthodologie du choix d'un outil de coupe en vue de l'usinage d'une pièce donnée s'articule sur :

- dureté à chaud.
- Ténacité (résistance mécanique).
- stabilité chimique vis avis de la pièce à usiner
- Régularité.
- la disponibilité et le coût des matériaux constituant l'outil.

Toutes ces propriétés dépendent :

- du matériau usiné (dur, tendre, abrasif).
- des conditions de coupe (grande vitesse ou faible vitesse).
- Du type d'opération de coupe (dégrossissage ou finition).
- Des exigences.

I-6-3 Evolution des matériaux des outils de coupe

L'évolution des matériaux constituant les outils de coupe a été une source de gain de productivité très importante pour l'industrie. Elle a entraîné, au cours du XX^{ième} siècle, un doublement de la productivité tous les dix ans [15] , figure 1.12 et 1.13

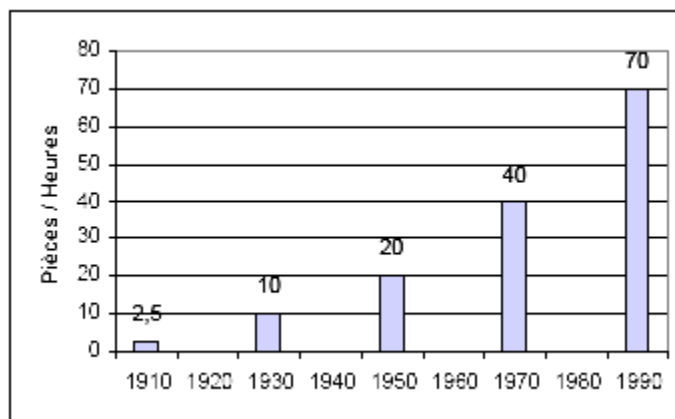


Figure 1.12: Augmentation de la productivité en usinage Acier

Cette amélioration de la productivité résulte d'un accroissement important des vitesses de coupe permises, grâce à l'amélioration des performances des matériaux des outils [16]. Elle résulte aussi des études et travaux à la fois techniques et fondamentaux portant sur les propriétés suivantes des matériaux [17] :

- la dureté : pour combattre l'usure.
- la résistance mécanique à chaud pour supporter les échauffements à grande vitesse.
- la ténacité pour encaisser les chocs dus aux interruptions d'usinages ou aux vibrations.
- l'inertie chimique pour éviter les dégradations de l'outil par diffusion d'impuretés en provenance de la pièce usinée.

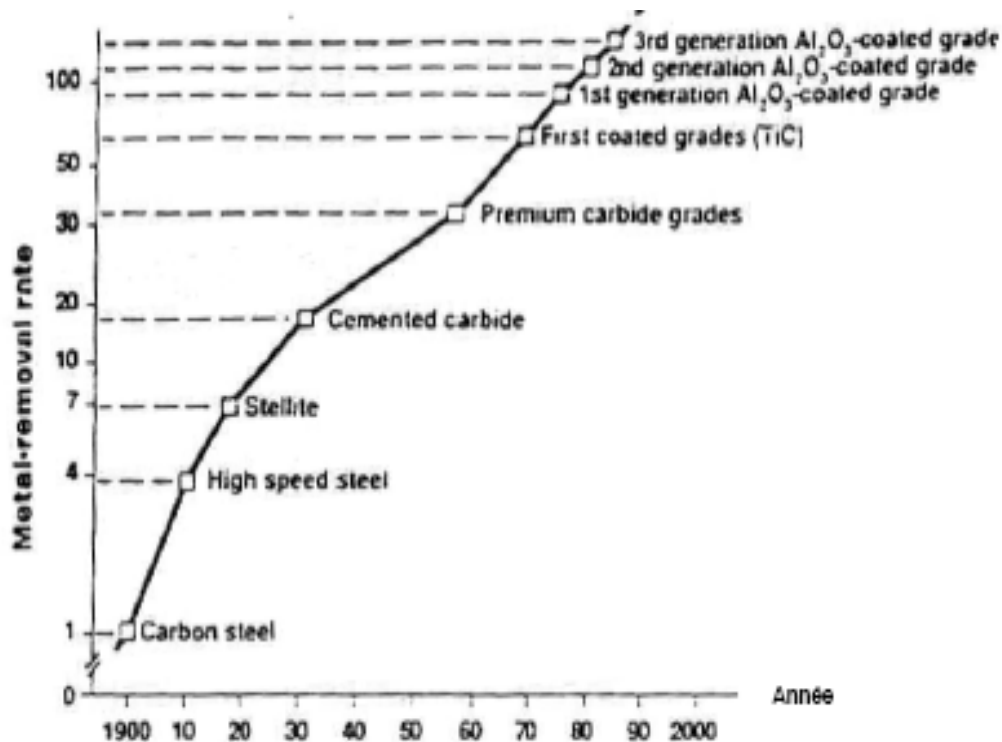


Figure 1.13 Augmentation de la productivité due à l'évolution des matériaux D'outils de coupe [18]

Répartition des matériaux utilisés comme matériaux de coupe :

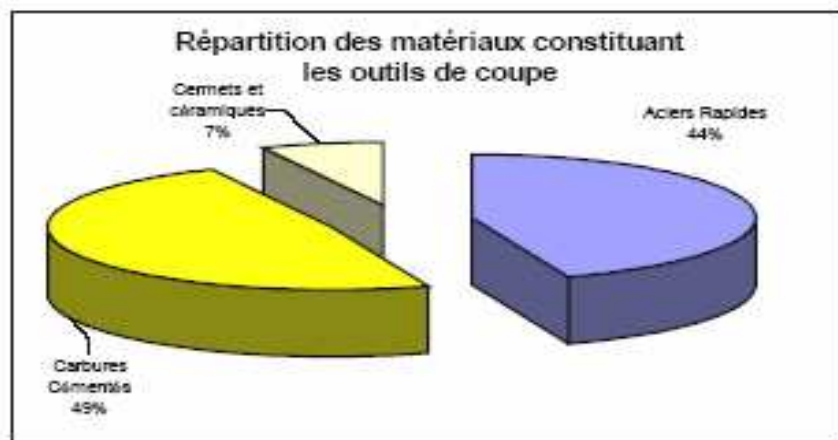


Figure 1.14 répartition des matériaux constituant les outils de coupe [18]

- Carbures Cémentés 49%
- Aciers Rapides 44%
- Cermets et céramiques 7%

1.6.4 Texture des outils de coupe modernes

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

- un substrat : qui a pour rôle d'encaisser les efforts mécaniques et les contraintes thermiques de l'usinage (haute résistance à la pression et à la flexion et ténacité suffisante).
- un revêtement qui a pour fonction d'améliorer la résistance à l'usure, l'inertie chimique et thermique, ainsi que le glissement du copeau sur l'outil pour son évacuation.

Les substrats actuels appartiennent à des familles de matériaux très diverses :

-les aciers rapides : substrats obtenus par frittage de poudres métalliques avec une prédominance du fer. Ces poudres sont fortement chargées en carbone 0,7 à 1,6 % mais aussi en éléments tels que le Tungstène (12 à 20 % pour le type T) ou le Molybdène (3,5 à 10% pour le type M) qui caractérisent des familles différentes possédant des propriétés différentes (Type T : arête de coupe résistante à l'abrasion ou Type M : grande résistance à la chaleur). D'autres éléments en additifs viennent renforcer les propriétés de ces matériaux (Chrome, Vanadium ou Cobalt par exemple). On obtient avec ces matériaux des duretés de l'ordre de 740 à 1000 Hv. Ils sont beaucoup utilisés [28] pour :

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

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

-Les cermets : sont des carbures, des nitrures, des carbonitrures ou des borures liés par un métal ou un alliage ferreux. Les liants sont donc de plusieurs types (cobalt, nickel, nickel-fer, nickel-chrome, etc.). La dénomination de cermets est peu utilisée dans l'industrie car souvent ils sont assimilés à des carbures cémentés. On obtient avec ces matériaux des outils pouvant avoir des duretés de l'ordre de 1500 à 2000 HV. Leur dureté à chaud permet de faire des usinages dans des conditions extrêmes : 1000°C. Les cermets ont des applications très diverses (tournage, fraisage, etc.), et ont une très bonne résistance mécanique [18], une faible conductivité thermique et une bonne résistance à la diffusion et à l'usure. Ils sont donc souvent utilisés en tournage de semi-finition ou de finition des aciers.

-Les céramiques : sont des matériaux frittés à base de céramiques : alumines, nitrures de siliciums, etc. Ce sont des matériaux qui ont une très grande dureté et une très grande résistance à l'usure. En contre partie, ce sont les outils les plus fragiles. Les céramiques sont très utilisées pour l'usinage des fontes par exemple. On choisit les substrats en fonction de leurs propriétés mais aussi en référence au rapport prix / rentabilité d'usinage / qualité d'usinage.

1.6.5 Les revêtements :

Le rôle principal attribué aux revêtements est de protéger l'outil durant l'usinage. Il est incontestable que les revêtements permettent d'améliorer la durée de vie des outils [61]. Cependant peu de littérature existe pour expliquer le processus de protection du revêtement. Les revêtements sont depuis quelques années un nouvel axe de recherche dans le monde industriel afin d'améliorer les conditions de coupe et la productivité. Ils prennent une place de plus en plus importante dans le monde de l'usinage, puisque en 2001, 90% des outils carbures fabriqués sont revêtus [19].

Le principe consiste à recouvrir d'un film mince (jusqu'à 10 µm d'épaisseur) les outils en matériaux ayant des propriétés particulières comme par exemple une très grande dureté (2000 à 3200 HV) ou des coefficients de frottements faibles.

Comme nous pouvons le voir sur la figure I-5, le rôle recherché pour le revêtement est complexe. Il doit à la fois protéger le substrat de l'usure (adhésion, abrasion, oxydation, diffusion), faire office de barrière thermique, résister à la fissuration et tout ceci grâce à un dépôt d'épaisseur très faible [20].

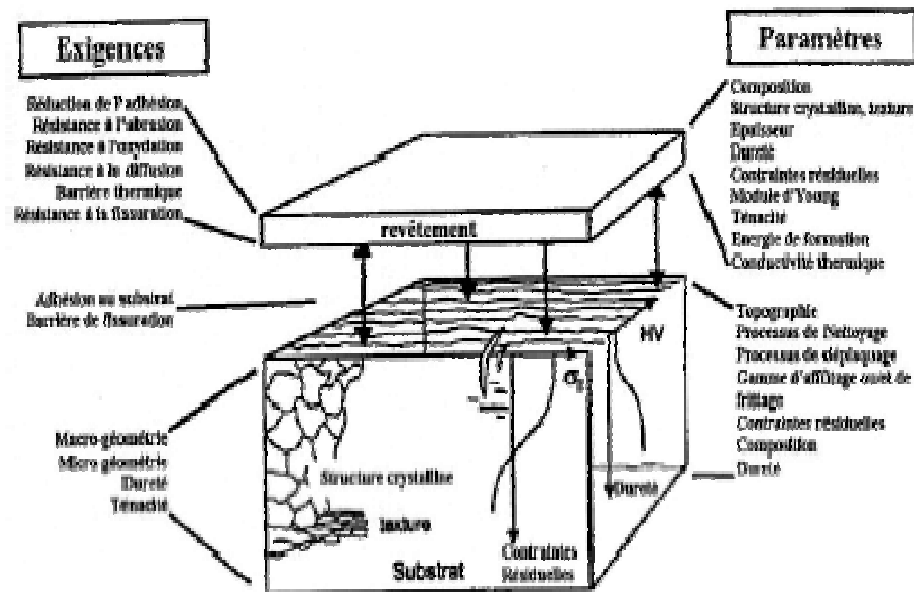


Figure 1.15: représentation des exigences envers les revêtements et des paramètres à maîtriser pour répondre aux exigences

Actuellement, les revêtements les plus couramment utilisés sont les carbures de titane (TiC), les nitrures de titane (TiN), les carbonitrures de titane (TiCN) ou l'alumine (Al₂O₃). Le dépôt choisi dépend du but recherché : résistance à l'usure et/ou à l'oxydation, tenue à la température, réduction du frottement, etc. (tableau 1.2) La combinaison de plusieurs de ces objectifs oriente les tendances actuelles et futures

Des dépôts plus durs sont désormais utilisés, comme les nitrures de bore cubique (CBN) ou les dépôts diamants. Dans ces cas là, c'est la dureté qui est recherchée afin de faciliter la résistance à l'usure. Le dépôt peut être monocouche ou multicouche. L'intérêt du multicouche est de pouvoir cumuler les propriétés de chaque dépôt et d'avoir une meilleure résistance à la fissuration [21].

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

De nombreux revêtements sont mis au point, car l'évolution des outils de coupe est, aujourd'hui, davantage basée sur l'évolution des revêtements que sur celle des substrats. L'évolution des revêtements est devenue très rapide, alors qu'elle était quasiment inexistante il y a 20 ans. Cela est dû en grande partie à l'évolution de l'usinage à grande vitesse et à sec [22].

Actuellement, environ 90% des outils carbure en vente sont désormais revêtus [23]. Les outils complexes comme les forêts sont revêtus par le procédé CVD (Chemical Vapor Deposition) et les outils de type plaquette carbure sont plutôt revêtus par le procédé PVD (Physical Vapor Deposition).

Les coûts de revient des revêtements ont beaucoup baissé et sont désormais assez faibles par rapport aux autres facteurs intervenant dans l'usinage [24].

Procédés de fabrication des revêtements

Les revêtements utilisés industriellement pour l'usinage se partagent en deux familles principales qui se différencient par le mode de déposition (CVD ou PVD) du revêtement sur le substrat [25]. Les propriétés qui en découlent sont différentes : dureté, adhésion, cristallisation,

comportement mécanique, etc. [26]. Quelque soit le mode de déposition, il est nécessaire de suivre scrupuleusement le processus suivant [27,28] :

- 1. Le substrat doit être parfaitement décapé, afin de faire disparaître toute trace de graisse, hydrocarbure ou dépôt organique. La première étape consiste donc en une opération de nettoyage dans des bains successifs de solvants organiques : trichloréthylène, acétone, alcool.
- 2. Le substrat ne doit pas être pollué en surface par des éléments métalliques. En effet ces derniers pourraient créer localement des hétérogénéités néfastes à la bonne résistance et à l'adhérence du dépôt. La deuxième étape consiste alors en un bain oxydant (acide sulfurique), puis un bain réducteur (acide fluorhydrique et enfin un bain permettant un dépôt d'oxyde natif protecteur pour éviter toute re- contamination (acide chlorhydrique)
- 3. Par précaution un troisième nettoyage sous argon sera réalisé dans l'enceinte même du four de déposition.
- 4. Dans l'enceinte du four sous vide, une vaporisation du revêtement à déposer est réalisée. Cette vaporisation va bien sûr dépendre du procédé (évaporation, pulvérisation, plasma, etc.)
- 5. Le dépôt du revêtement sur le substrat se déroule par croissance continue de la couche déposée (coalescence). Le mode d'adhésion du revêtement sur le substrat dépend de la nature de l'interface : mécanique, de diffusion, de pseudo-diffusion ou chimique.

Le choix du mode de déposition doit se faire en fonction des caractéristiques du dépôt et du mode de déposition. La Société Française du Vide a établi un tableau comparatif des modes de dépôt [29] (tableau I-IV).

Tableau 1.5 : tableau comparatif des modes de dépôt sous vide

caractéristiques	Mode de production	Vitesse de dépôt	Type de dépôt	Dépôt sur formes complexes	Dépôt sur formes poreuses	perturbation à l'interface de croissance	Chauffage du substrat par moyens externes
Dépôt CVD	Réaction chimique	200à 2500 A/mn	atomes	Bon résultat	Résultat moyen et limité	oui	oui
Dépôt PVD	Energie thermique	Jusqu'à 75um/mm	Atomes et ions	Peu recommandé	Résultat médiocre	non	oui

Le dépôt CVD

Le dépôt de type CVD est apparu dès les années 1960, mais il est réservé aux substrats de type carbure résistants aux hautes températures. En effet, le procédé impose un revenu élevé au substrat. Les dépôts CVD permettent des épaisseurs de l'ordre de quelques microns (5 à 12 en moyenne).

Les éléments déposés en CVD sont généralement des revêtements :

- de la famille du Titane : TiN, TiC, Ti(C, N)
- de type céramique : Al₂O₃, ZrO₂, Si₃N₄
- de type diamant : Diamant, DLC (Diamant Like Carbon).

Les dépôts CVD sont basés sur l'obtention d'un dépôt par vaporisation à haute température à l'intérieur du four sous vide. Ce procédé comporte des avantages et des inconvénients :

- grande dureté des dépôts
- grande variété des matériaux déposés
- forte épaisseur (12 µm) qui permet d'obtenir une durée de vie importante, mais qui peut modifier la géométrie des outils (acuité d'arête)
- possibilité de dépôt sur des pièces complexes
- bonne adhérence (en particulier sur substrat de type carbure)
- température de dépôt élevée ce qui peut provoquer une modification de l'état du substrat (structure métallurgique et état des contraintes).

Le dépôt PVD

Industrialisé depuis 1978, cette technique présente les avantages suivants :

- dépôt d'une grande variété de matériaux inorganiques (métaux, alliages, etc.) à cause de son extrême versatilité,
- faible température du dépôt qui permet de garder l'intégrité physique du substrat
- possibilité de faire des revêtements multicouches,
- possibilité de faire varier la température du substrat dans de très larges limites, depuis des températures inférieures à 0°C, jusqu'à de très hautes températures,
- très haute dureté des dépôts,
- faible épaisseur des dépôts, ce qui permet d'assurer la constance de la géométrie des outils,
- excellente liaison avec le substrat.

Comme tout procédé industriel, il a aussi ses inconvénients :

- vitesse de dépôt faible, nécessité de revêtir des formes simples.

Rôle des revêtements

Le rôle recherché dans l'application de revêtements sur les outils est de limiter l'usure des outils durant l'opération d'usinage. Le dépôt étant d'épaisseur très faible (quelques microns), on ne peut envisager que le revêtement :

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

L'apport du revêtement doit avoir un rôle plus subtil. Les propriétés recherchées sont de type protection thermique [30]; (formation du copeau, frottement du copeau) ou de barrière chimique [31,32] ; (oxydation ou affinité chimique). De fait actuellement les fabricants spécialisés ont tendance à rechercher les caractéristiques suivantes [33] :

- bonne adhésion au substrat,
- propriétés mécaniques permettant de résister aux pressions superficielles importantes,
- faible conductivité thermique (barrière thermique),
- faible affinité chimique avec les éléments constitutifs du matériau usiné,
- bonne résistance à l'oxydation à haute température,
- bon coefficient de frottement pour éviter l'usure par le frottement du copeau.

Les revêtements nouveaux sont à base de :

- carbure (titane, hafnium, zirconium, niobium, etc.)
- nitrure (bore, aluminium, chrome, titane, etc.)
- titane (bore, carbone, etc.)
- diamant

Ils permettent d'atteindre les caractéristiques physiques suivantes [34] :

- dureté comprise entre 1800 à 4500 Hv
- conductibilité thermique de l'ordre de 11 à 35 W m⁻¹K⁻¹
- module d'Young compris entre 300 et 600 daN/mm²

1.7 Rôle de l'outil

L'outil est au centre du système puisqu'il assure la création du copeau. Il influe sur l'usinage et la formation du copeau par ses caractéristiques (rigidité, résistance mécanique, comportement à l'élévation de température, coefficient de frottement, etc.).

Si on remonte aux premières études importantes faites sur la mécanique de formation du copeau, nous devons nous intéresser aux travaux de FIELD et MERCHANT [35] dans les années 60 qui ont présenté un modèle simple explicité figure I-16:

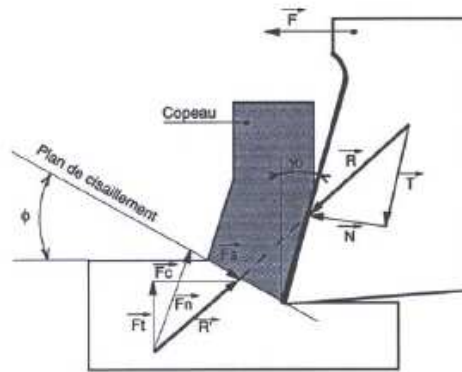


Figure 1.16: Modélisation de MERCHANT pour la formation du copeau en coupe orthogonale

- F_t et F_c = Effort de coupe exercé par l'outil
- F_n et F_s = composantes de l'action du copeau sur la pièce
- R = résultante de l'action de la pièce sur l'outil
- T et N = composante de l'action de la pièce sur l'outil
- β = frottement copeau-outil
- γ_0 = géométrie de l'outil
- ϕ = déformation du matériau

Dans ce modèle, le copeau est représentatif des conditions d'usinage. Il dépend de l'intensité des contraintes qui se créent dans la zone du plan formé par l'arête de coupe et la position où la surface extérieure du métal usiné prend la direction de la face d'attaque de l'outil. En conséquence, la coupe dépend directement des actions mécaniques de l'outil mais aussi de sa géométrie et de l'évolution de cette géométrie par usure.

1.8 Evolution des outils de coupe

L'outil est le point faible de l'usinage. Il est fragile car sensible aux efforts et sa durée de vie est courte.

Les outils ont connu une évolution importante. L'industrie est passée de l'outil monobloc en acier rapide à l'outil à plaquettes carbures rapportées évitant ainsi les ré-affutages nombreux et coûteux. Aujourd'hui, ce sont les plaquettes carbures revêtues qui se développent.

Le marché des outils de coupe est important et a beaucoup évolué :

- d'un point de vue économique : a atteints 18,3 M€ en France en 2005 [36],
- d'un point de vue technique : les matériaux utilisés sont très divers allant de l'acier rapide aux céramiques en passant par les cermets et les CBN.

1.9 Formation du copeau

1.9.1 Formation du copeau : modèle analytique

Dans le modèle de MERCHANT (figure I-16), le mouvement relatif outil-matière provoque une compression entre la face de coupe de l'outil et la pièce usinée, au voisinage de l'arête de coupe, pour encaisser cette compression, quelque part, en avant de l'outil, la matière s'étire jusqu'à sa rupture, d'où la naissance du copeau.

D'autres études et modèles ont permis de discuter et de faire évoluer le modèle de MERCHANT. Entre autres celles de COOK, FINNIE et SHAW [37] quelques années plus tard et, plus

récemment de SHAW [38], LEMAIRE [39], KOMANDURI [40], pour ne citer que les plus connues. Ont été ainsi introduits, dans la réflexion et l'analyse :

- les caractéristiques métallurgiques des matériaux,
- les conditions de coupe,
- la composition chimique des matériaux,
- les structures particulières des phases en présence,
- le comportement thermique des phases du matériau,
- les phénomènes thermodynamiques (apparitions des couches blanches),
- les phénomènes de cisaillement,
- les conditions de frottement.

Certaines de ces études ont été faites avec des aciers doux (KOMANDURI déjà cité), des alliages mi-durs (MATSUMOTO [41]) et des alliages durs (KONIG [42]).

Il ressort de ces études que les modes de formation du copeau sont très différents suivant les conditions d'usinage mais aussi les caractéristiques des matériaux usinés :

- dureté du matériau
- conditions de coupe : vitesse, avance et profondeur de coupe
- efforts résultants des conditions de coupe
- comportement dynamique du matériau à l'effort
- géométrie de l'outil

Le copeau créé a plusieurs formes possibles (figure 1.17) qui sont classées en familles non normalisées à ce jour.

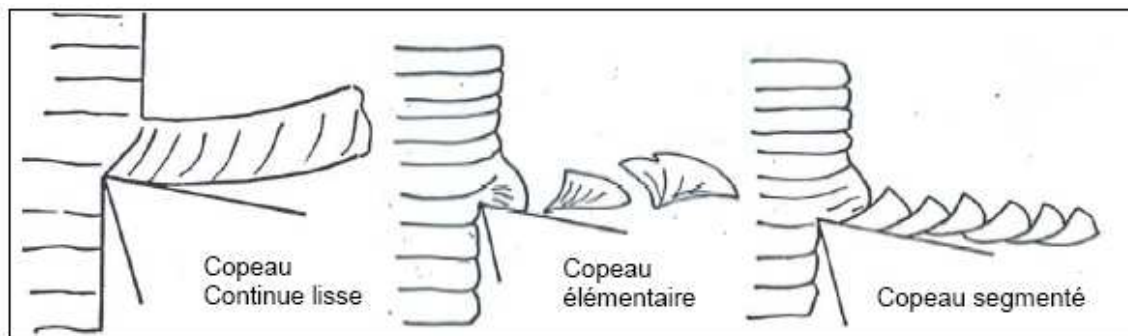


Figure 1.17: Exemple de 3 formes différentes de copeau

De nombreuses études analytiques ont été faites pour décrire la formation des copeaux comme celles menées par KOMANDURI [39], KONIG [43], NAKAYAMA [44], SCHULTZ [45] et WINKLER [46] pour ne citer que les plus connues. Elles se limitent toutes au cas de la coupe orthogonale. On peut donc affirmer que la formation du copeau implique la compréhension de phénomènes se rattachant à plusieurs disciplines (thermodynamique, métallurgie, tribologie, physique de la matière condensée) ce qui complique leur analyse. Peu d'études ont été faites sur la détermination des champs de températures dans le copeau et l'outil. Nous pouvons citer BOOTHROYD [47] et WRIGHT [48] qui, dans leurs travaux, proposent l'idée que l'élévation de température est la conséquence de la dissipation de la puissance mécanique au cours du cisaillement. OXLEY [49] met au point un modèle qui reprend les travaux de BOOTHROYD [46] en tenant compte de la vitesse de déformation. Ce dernier modèle est souvent pris comme référence pour les modèles numériques.

1.9.2 Formation du copeau : modèle numérique

A partir des années 1970 et parallèlement aux études analytiques, de nombreux essais ont été effectués pour modéliser numériquement la formation des copeaux. La modélisation numérique de la formation du copeau a été développée pour mettre en évidence et évaluer des grandeurs inaccessibles par les analyses conventionnelles de températures, de déformations et de contraintes. Elle est basée sur la Méthode des Eléments Finis (MEF) et vise à élaborer des modèles fiabilisés par confrontation à l'expérience.

Selon BACARIA [50] les axes de recherche pour le développement de ces modèles peuvent être classés en trois catégories :

- les modèles Eulériens qui traitent du cas de la coupe continue en régime stationnaire comme ceux d'IWATA [52], de CARROLL et STRENKOWSKI [53], de RAKOTOMALALA, JOYOT, PANTALE et TOURATIER [51, 52,53] par exemple

- les modèles Lagrangiens qui simulent de manière plus précise la formation du copeau comme ceux de CARROLL et STRENKOWSKI [49], de YANG [54] et OBIKAWA et SASAHARA [55] par exemple

- les modèles Comportementaux, plus récents, qui intègrent le comportement du matériau lors de la pénétration de l'outil ainsi que la formation du copeau quelque soit son type (continue ou fragmenté) comme ceux de MARUSICH et ORTIZ [56], de MADHAVAN et CHANDRASEKAR [57] et BACARIA [49] par exemple

Des progrès importants ont été apportés par ces modèles dans la compréhension des phénomènes mécaniques et thermodynamiques de la coupe car ils rendent bien compte des résultats des expériences. Cependant l'ensemble se limite à la formation du copeau en coupe orthogonale et se fonde sur des théories d'endommagement ou de déformation plastique à grande vitesse de la matière.

En ce qui concerne la détermination des champs de température, les hypothèses généralement retenues sont celles issues du modèle analytique de BOOTHROYD [44] qui avance l'idée que l'élévation de température est liée aux processus de plastification de la matière dans les phases de cisaillement.

1.10 Usure des outils

L'usure de l'outil est due aux contraintes qu'on lui fait subir lors de l'usinage. En effet, la coupe des métaux est une opération de déformation plastique qui doit obtenir la rupture de la matière. Les sollicitations mécaniques et thermiques subies par l'outil sont donc très importantes. Il s'ensuit une usure de l'outil qui peut être d'origine thermomécanique ou chimique. Cette usure est provoquée par la concentration de contraintes en divers endroits de l'outil qui dépend des paramètres de l'usinage, mais aussi :

- de la géométrie de la plaquette : angle de coupe, présence de brise copeau, etc.
- du revêtement et de son comportement mécanique et thermique

Il en résulte une usure apparente schématisée par la figure I-18

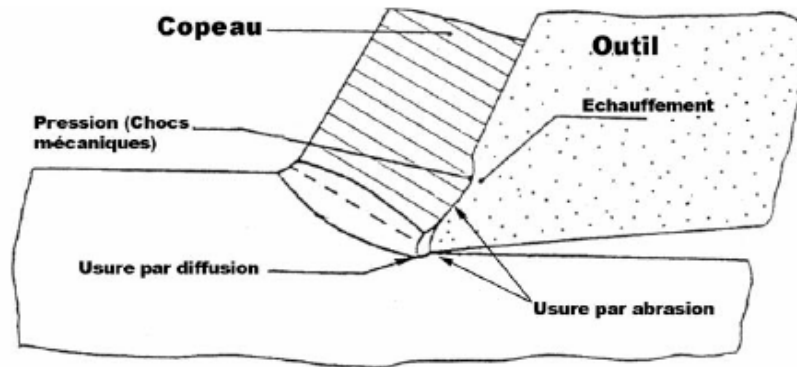


Figure I-18: Représentation des différentes zones d'usures de l'outil durant la phase de formation du copeau

1.10.1 Mécanisme d'usure

L'usure des outils est la conséquence de divers mécanismes décrits ci-dessous.

Processus d'abrasion (mécanique)

Lors de l'usinage, la matière (pièce usinée et copeau) frotte avec des pressions de contacts importantes sur l'outil. Suivant la constitution physico-chimique (nombre, nature, composition et proportion des phases) et la structure (répartition et agencement des composants de l'alliage : forme, dimension, arrangement) la matière est plus ou moins abrasive par rapport à l'outil (figure I-19). Si la matière comporte des constituants durs (écrouissage, aluminate, nitrure, carbure, oxyde par exemple) et que ces derniers sont plus durs que l'outil, il y aura usure par abrasion de l'outil.

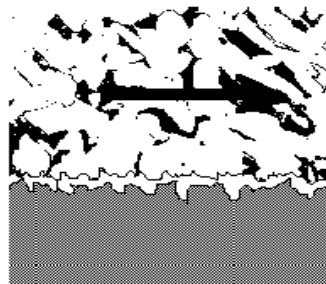


Figure I-19: Processus d'usure par abrasion

Cette usure pourra être : - homogène : dans le cas d'une matière où les constituants sont homogènement répartis localisée : dans le cas de conditions de coupe particulières : écrouissage, apparition d'oxyde lors de l'usinage.

Processus d'adhésion (mécanique)

Cette usure est due aux états de surface du copeau, de la pièce et de l'outil. En effet lors de l'usinage, ces entités frottent les unes contre les autres. Or les rugosités et micro-rugosités de ces surfaces, par contact et sous l'influence des fortes pressions engendrées par l'usinage, vont générer des microsoudures (figure I-20).

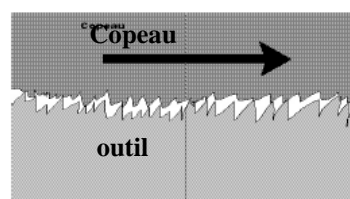


Figure I-20: Processus d'usure par adhésion mécanique

Ces microsoudures se créent et se rompent très rapidement au cours de l'usinage. Ce processus continu génère

- l'apparition d'arêtes rapportées si les microsoudures sur l'outil sont plus résistantes que celles du copeau

- l'usure de l'outil si la microsoudure sur le copeau est plus résistante que celle de l'outil. Cette usure est très faible et généralement négligeable

Processus de fissuration (mécanique)

Lors de l'usinage, l'outil est soumis à de très importantes contraintes thermiques et mécaniques. Les contraintes thermiques à l'interface copeau / outil peuvent atteindre le millier de degré. De plus, la déformation plastique du matériau engendre, par réaction, des contraintes qui provoquent flexions et vibrations de l'outil. En effet, les matériaux usinés sont, par nature, rarement homogènes (phase). Il y a donc variation rapide des contraintes. La combinaison des hautes températures (choc thermique en début d'usinage) et des vibrations peut provoquer des fissures au sein de l'outil.

Processus de déformation plastique (mécanique)

Si l'on caractérise un usinage en prenant comme paramètres la température (interface outil/copeau) et la pression exercée sur l'outil, on obtient un domaine de fonctionnement.

Les pressions sont très importantes (de l'ordre de 70 à 80 daN/mm² pour un matériau mi-dur par exemple) et les températures à l'interface outil/copeau ou outil/pièce de l'ordre de 1000°C.

Prenons le cas d'une plaquette en WC (grande majorité des plaquettes) : pour ces températures et pour ces pressions, on se trouve dans le domaine de déformation plastique du WC [58]. Il y a donc transformation plastique d'une partie de l'outil (arête de coupe).

Processus de diffusion (physico-chimique)

La diffusion de matière de l'outil vers le copeau est un phénomène d'usure qui ne peut se produire qu'à des températures élevées. Ces zones de températures élevées se situent à l'endroit du frottement du copeau sur l'outil. De plus, ce sont aussi des zones de forte pression car le copeau applique des contraintes sur l'outil. Les hautes températures, ainsi que les pressions et la vitesse relative de défilement du copeau, permettent de donner suffisamment d'énergie (élévation de température) aux atomes pour que ceux-ci puissent migrer de l'outil au copeau. Ce processus est aussi grandement accentué par les phénomènes d'affinités chimiques que l'on peut avoir entre les atomes de la matière usinée et les atomes de l'outil (figure I-21).

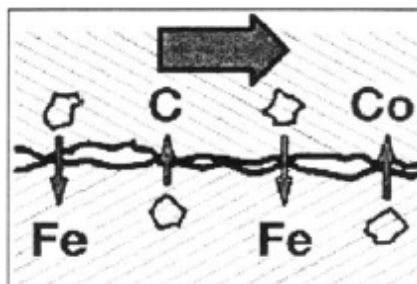


Figure I-21 : Processus d'usure par diffusion

Processus d'oxydation (physico-chimique)

Le milieu de l'usinage est constitué :

- de l'oxygène dans l'air
- des hautes températures
- de l'eau dans les huiles de coupe solubles (cas de lubrification)

Avec l'élévation de température de l'outil, la vaporisation de l'eau contenue dans les huiles solubles au contact de l'outil et l'oxygène de l'air provoque localement une fragilisation de l'outil par oxydation de ce dernier (figure I-22). De plus, le potentiel d'oxydoréduction des matériaux diminue avec la température ce qui favorise d'autant le processus d'oxydation des outils

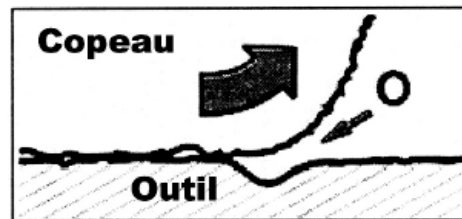


Figure 1.22 : Processus d'usure par oxydation

Processus combiné : (figure 1.23) Au cours d'un usinage, l'ensemble de ces processus se produit. Suivant les conditions d'usinage certains processus sont favorisés par rapport à d'autres.

En général on peut dire que :

- les processus d'abrasion et d'adhésion sont favorisés lors des usinages où les températures sont faibles et où les vitesses de défilement du copeau sont faibles. En effet dans ces cas là, il n'y a pas de formation de couche de glissement due à la température ou aux vitesses élevées. Il y a donc grippage ou arrachement.
- les processus de diffusion, de déformation plastique, d'oxydation sont favorisés par l'élévation de la température et des vitesses de coupe.

Ce qui peut se résumer d'après KONIG [39,40] par le diagramme suivant :

Figure 1.23 : Diagramme de combinaison des différents processus d'usure en fonction de la température d'usinage (parallèle possible avec la vitesse)

1.10.2 Usure visible sur l'outil : (figure 1.24)

L'ensemble des processus décrits dans les deux paragraphes précédents, en se combinant les uns aux autres, conduit à une détérioration par usure des outils.

Dans ce paragraphe, nous décrivons les conséquences de ces usures, ces dernières sont mesurables : Indices:

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

Usure en dépouille : (figure 1.25)

Elle est due au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil et provoque une bande striée parallèle à l'arête de coupe. Elle influe sur l'état de surface de la pièce usinée et sur la précision dimensionnelle de l'usinage car elle modifie la position de l'arête de coupe. C'est un critère général pour la tenue d'outil, caractérisée par une valeur d'usure admissible VB. Les valeurs indiquées se rapportent généralement à une tenue d'outil (durée de vie T=15 min).

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

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

Mesures correctives :

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

Usure en entaille ou par oxydation : (figure 1.26)

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

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

En général : VN critique = 1 mm

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

Mesures correctives :

- Accroître la rigidité de l'arête de coupe
- Choisir un outil avec un angle de direction d'arête plus faible (45°)
- Réduire l'avance

Usure en cratère : (figure 1.27)

C'est une usure en creux sur la face de coupe, caractérisée par la profondeur de cratérisation (indice KT) et le rapport KT/KM ou son angle de cratérisation γ_c . Elle peut avoir à terme une incidence sur la tenue d'outil (durée de vie : effondrement ou recul de l'arête de coupe). Elle est due au frottement du copeau sur la face de coupe de l'outil. Lors de l'usinage, la température élevée à l'interface copeau-outil et les pressions de contact entre le copeau et l'outil provoquent une diffusion importante de la matière de l'outil vers le copeau par processus d'adhésion. Elle donne aussi une déformation plastique de la pointe de l'outil, caractérisée par une flèche SVp et un renflement de la face de dépouille. L'usure est souvent constatée sur les outils carbures, elle provoque généralement la rupture de la pointe de l'outil

Valeur limite : $KT_{critique} = 0,06 + 0,3 f \dots\dots\dots (1.10)$

Rem : f = avance par tour

La valeur critique est celle à partir de laquelle l'outil est considéré comme hors d'usage avec risque important de rupture de l'outil. L'usure est généralement due à une vitesse de coupe excessive ou à une avance trop faible.

Mesures correctives :

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

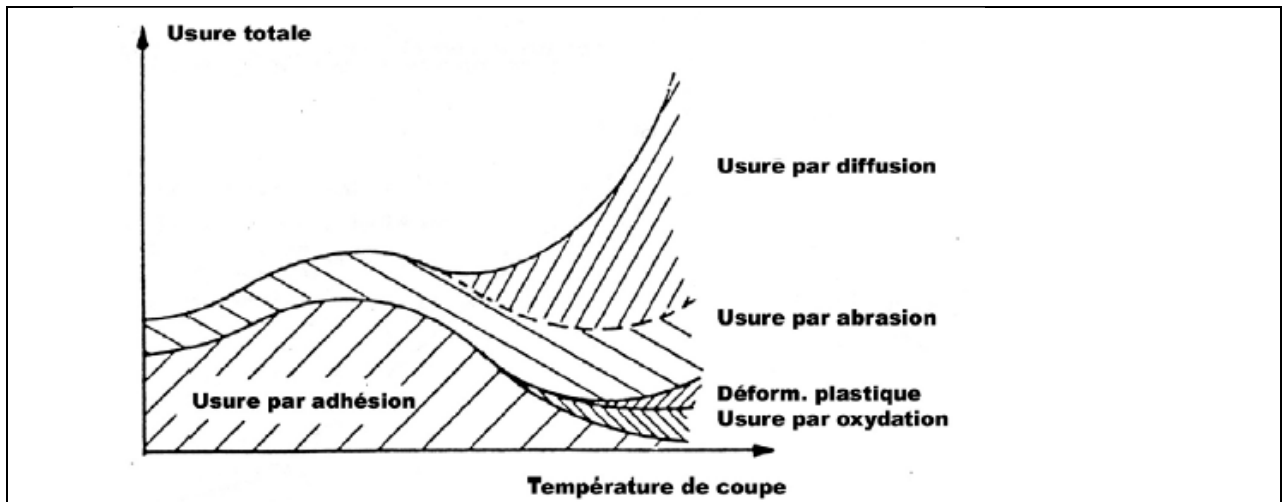


Fig I-23 diagramme de combinaison des différents processus d'usure en fonction de la température (parallèle avec la vitesse)

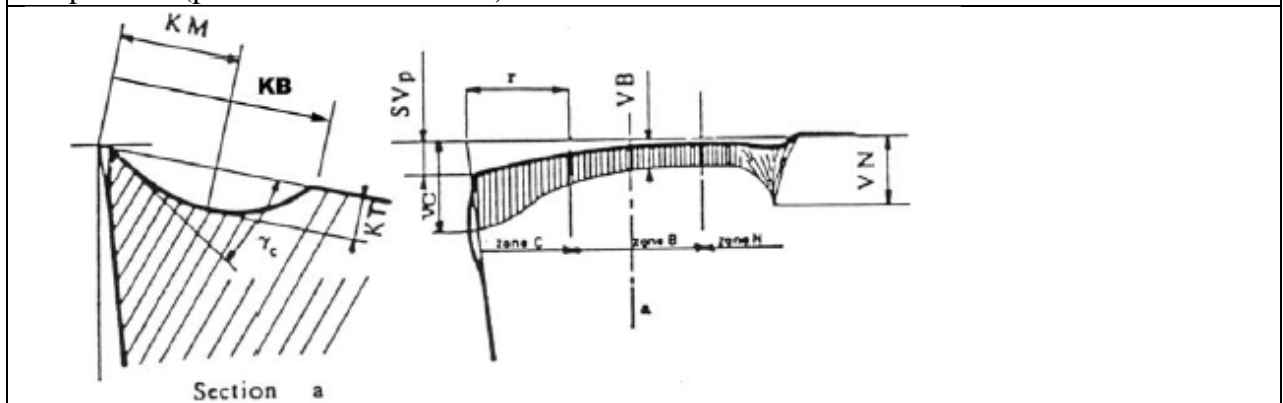
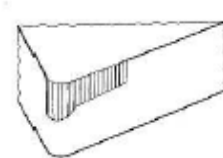
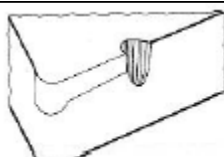

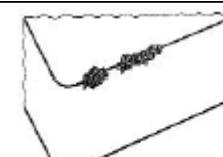
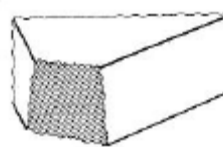

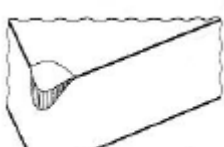
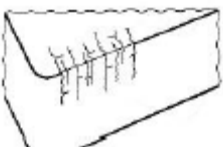


Fig. I-24 Schéma de la caractérisation de l'usure d'un outil d'après la norme NFE 66 505

 <p>Fig. I-25 Usure en dépouille</p>	 <p>Fig. I-26 Usure en entaille ou par oxydation</p>	 <p>Fig. I-27 Usure en cratère</p>	 <p>Fig. I-28 Ecaillage de l'arête coupe</p>
 <p>Fig. I-29 Rupture de la plaquette</p>	 <p>Fig. I-30 Arêtes rapportées</p>	 <p>Fig. I-31 Déformation plastique</p>	 <p>Fig. I-32 Fissurations de l'arête de coupe ou usure en peigne</p>

Écaillage de l'arête de coupe : (figure 1.28)

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

Mesures correctives :

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

Rupture de la plaquette : (figure 1.29)

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

Mesures correctives :

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

Arêtes rapportées : (figure 1.30)

Les arêtes rapportées résultent d'une accumulation de métal de la pièce usinée sur la face de coupe, en particulier dans le cas de matériaux difficilement usinables. Il arrive parfois que cet apport de métal se détache et détériore l'arête de coupe. Il mène en outre à des états de surface médiocres. Le phénomène est dû à une vitesse de coupe et une avance trop faible ou des angles de coupe non appropriés

Mesures correctives :

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

Déformation plastique : (figure 1.31)

Elle est occasionnée par une sollicitation trop importante de l'arête de coupe (matériaux usinés trop durs) en combinaison avec des températures d'usinages élevées. La zone de déformation plastique du matériau dépassé, il y aura rupture ! On peut trouver cette déformation plastique en parallèle d'une cratérisation. En effet le cratère affaiblit la section de l'outil.

Mesures correctives

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

Fissurations de l'arête de coupe ou usure en peigne : (figure 1.32)

Légères fissures sensiblement perpendiculaires à l'arête de coupe occasionnées par les chocs thermiques résultant des interruptions de coupe, en particulier dans le cas du fraisage. Risque de rupture ! Mesures correctives :

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

1.11 Lubrification

Depuis longtemps, la lubrification est utilisée dans le milieu industriel car on lui reconnaît une double action bénéfique :

- elle favorise l'évacuation des calories,
- elle réduit les frottements de l'outil sur la pièce et du copeau sur l'outil

Les techniques nouvelles, qui ont été mises en place afin d'améliorer l'efficacité de la lubrification, sont influentes sur les conditions de coupe (projection sur les faces de coupe et de dépouille de l'outil, micro pulvérisation).

Des études scientifiques ainsi que l'expérience industrielle ont montré que la lubrification modifie le comportement de formation du copeau, joue sur les efforts de coupe et donc sur la durée de vie de l'outil [59, 60,61]

Mais la lubrification a un coût non négligeable (16% du total des frais [1])

1.12 Etats de surface des pièces usinées

Dès les débuts de l'usinage industriel, il a fallu définir la qualité de la surface usinée. Outre les aspects dimensionnels, il est aussi nécessaire de définir l'état de rugosité de la surface. Le critère le plus couramment utilisé dans le milieu industriel [62, 63,64] est le paramètre statistique R_a (figure I-33) défini par l'expression I-2 :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Y_R - R_p| dX_R \quad \dots\dots\dots (1.11)$$

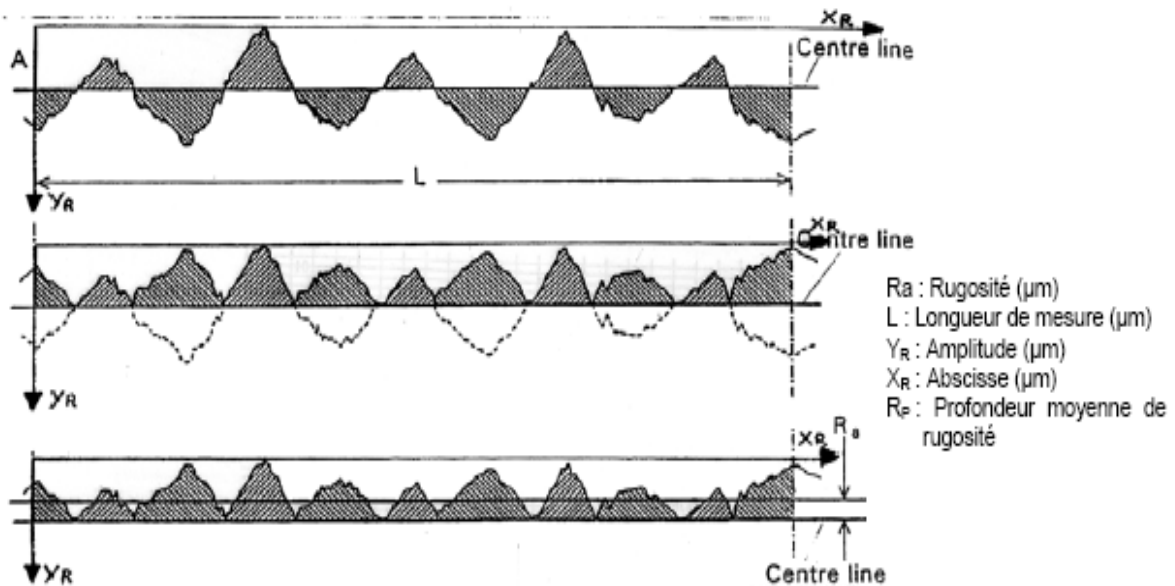


Figure I-33: schéma représentant le mode de calcul du paramètre industriel R_a
 R_a : Rugosité (μm)
 L : Longueur de mesure (μm)

YR : Amplitude (μm)
XR : Abscisse (μm)
RP: Profondeur moyenne de rugosité

Le critère Ra reste encore le plus répandu dans l'industrie, seules les entreprises de pointe utilisent d'autres paramètres pour caractériser les états de surface des pièces usinées car sa sensibilité permet de faire la distinction entre des surfaces de qualités différentes.

Le niveau de qualité de surface demandé à l'usinage, a évolué dans le temps, notamment pour l'usinage d'aciers traités thermiquement avec l'avènement des outils pour matériaux durs. Cependant, le procédé de finition dit de tournage dur ne pouvait se développer car le coût des outils est très élevé pour des outils en carbure, céramique ou en CBN.

Les industriels ne se sont intéressés à cette technique d'usinage qu'à partir de la crise du début des années 90. Pendant cette période de récession économique, les procédés devaient être encore plus performants pour rester compétitif. Les progrès réalisés dans la fabrication des outils ouvraient alors la voie au tournage dur, il est courant de voir des pièces ayant une qualité de surface de $0,15 \mu\text{m}$ (Ra) obtenue directement par usinage sans rectification.

D'autres caractéristiques de la surface ont évolué rapidement dans le temps. Dans le cas de l'usinage traditionnel comparé à l'Usinage à Grande Vitesse (UGV), l'état des contraintes à la surface de la pièce varie fortement. Cette variation des contraintes résulte de deux effets de nature totalement différente [65,66] :

- un effet thermique dépendant de l'évacuation des calories durant l'usinage,
- l'effet mécanique de génération de contraintes résiduelles par enlèvement de matière qui dépend de la vitesse d'usinage.

Après l'étude et l'analyse bibliographique, il ressort que les céramiques de coupe sont des matériaux à outil en pleine évolution, elles permettent des performances irréalisables avec les autres matériaux d'outil du point de vue :

- productivité -coût, parce qu'elles sont utilisées dans l'usinage à grande vitesse, par conséquent une réduction considérable des temps d'usinage.
- elles offrent la possibilité d'usiner des matériaux difficilement usinables.
- elles permettent d'obtenir des qualités de surface, avec toute satisfaction, lors des opérations de finition.

Toutes ces performances nous ont poussés à faire l'étude comparative de quelques nuances de céramique de coupe. Alors nous avons essayé de définir l'influence des éléments du régime de coupe sur deux paramètres technologiques d'optimisation, qui sont : l'usure et la rugosité, et par la suite définir les performances des différentes nuances de céramique utilisées

CHAPITRE II : METHODOLOGIE DE RECHERCHE ET PREPARATION DES EXPERIENCES.

2 Objectif

Notre objectif est d'appréhender, du mieux possible, la dynamique d'usure des outils de coupe. Il s'intègre dans une préoccupation plus large de l'industrie : parvenir, en fin, à mettre en place un protocole d'essais permettant la caractérisation de l'aptitude à l'usinage des outils de coupe, il existe bon nombre de méthodes de caractérisation des matériaux :

- compositions chimiques, structurale et texturale,
- propriétés mécaniques : dureté, etc....
- coefficient de frottement, etc....

2.1 Essais préliminaires

Afin de vérifier la possibilité d'enregistrer l'influence et la variabilité des matériaux sur la coupe, une première série d'essais a été faite pour connaître la sensibilité et la capacité de nos systèmes de mesure à saisir et analyser des efforts de coupe. Il s'agissait d'essais de type duré de vie, comportant de longs temps d'usinage, préalables et indispensables au lancement d'un travail de recherche nécessitant, entre autres :

- Des moyens de contrôle diversifiés,
- Une mobilisation de matériaux homogènes,
- Le choix d'une méthodologie comparative de type plan d'expériences,
- Une pré-reconnaissance du rôle des paramètres de coupe,
- L'identification des grandeurs et variables sensibles de l'usinage et de leurs effets.

2.1.1 Moyens de réalisation

a)-Machine outils utilisée : tour parallèle type TOS N40

b)-Matières usinées : Les deux matériaux utilisés pour ces essais préliminaires sont des aciers fréquemment utilisés dans l'industrie : 30CD12 non traité et traité, XC45 non traité et traité et enfin GG25.

c)- Matériaux de coupes : Les plaquettes utilisées lors de nos essais ont été choisies en fonction des recommandations de notre partenaire industriel ERIS / Seriana - Batna. Dans des conditions «normales» d'usinage, (matériau tendre), une géométrie fine et un rayon de plaquette en carbure non revêtu type P35 et YT15 de faible rayon ($r = 0,4$ mm) pour application sur l'acier 30CD12. Mais pour enrichir notre recherche sur les aptitudes à l'usinage des nouveaux matériaux de coupe et comme on a pu avoir une source d'approvisionnement en plaquette en céramique nous avons choisie quatre nuances (Al_2O_3 , $Al_2O_3 + ZrO_2$, $Al_2O_3 + TiC$, $Al_2O_3 + TiC+TiN$) pour les appliquer sur trois types de matériaux de dureté différente et très utilisés dans les ateliers mécaniques (30CD12, XC45, GG25).

Le mode d'usinage en tournage est de type chariotage. Le choix de la porte plaquette s'est orienté sur un porte outil de référence PCLN R 20-20 K12 pour les plaquettes en céramique et SNUM 12 04 04 pour les carbures.

2.1.2 Choix de la méthode

Partant des conclusions de l'analyse critique des essais préliminaires, afin de mieux distinguer l'action spécifique des diverses nuances et de mieux suivre leur dégradation nous avons fixé :

- d'une part la procédure expérimentale et sa mise en oeuvre,
- d'autre part les techniques de mesure quantitative et qualitative des grandeurs liées à la coupe.

L'étude devenant plus complexe, avec une augmentation prévisible du nombre d'essais, du coût et de la durée, il devenait indispensable d'utiliser un outil de planification expérimentale

permettant de différencier le comportement des différentes nuances en minimisant le nombre d'essais.

Parmi les premiers à utiliser les techniques de planification expérimentale développées en 1925 par FISHER [79], on peut citer les travaux menés en chimie par BOX [80] ainsi que ceux de PHAN TAN LUU et MATHIEU [81; 82]. Le besoin de réduire le nombre d'essais (pour atténuer les coûts et gagner du temps), tant dans les phases expérimentales qu'analytiques, ont été des facteurs incitatifs puissants, propices au développement et à l'utilisation d'outils de type plans d'expériences.

Son intérêt en mécanique a été illustré, il y a 10 ans, par les travaux de LANTERI, et Coll. se rapportant aux procédés d'élaboration de surfaces [83]. C'est donc en exploitant les possibilités offertes par ces outils que nous avons fixé notre nouveau cadre d'étude destinée à comparer les différentes nuances, à travers leurs influences sur diverses grandeurs caractéristiques de l'usinage de matériaux ferreux par tournage à sec.

2.1.3 Plan d'expérience

Une propriété peut toujours être décrite par une expression mathématique : [84] telle que :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Avec :

- y grandeur (ici appelée variable de sortie) qui exprime la propriété à laquelle s'intéresse l'expérimentateur.

- x_i variable (ici appelé paramètre d'entrée) choisie par l'expérimentateur qui en maîtrise les valeurs et dont il peut rechercher les corrélations avec ses homologues x_j.

Les plans d'expériences permettent de déterminer les coefficients des différents paramètres de cette forme analytique d'une propriété (parfois d'un phénomène), en la validant par les outils statistiques sur lesquels est fondée la méthode.

Pour parvenir à cette forme mathématique, selon le type de plan, on peut par exemple à partir d'une matrice d'expérience (méthode de moindre carré) [85] pour l'expérimentation.

La mise en place d'un plan d'expérience demande donc de suivre le processus d'élaboration suivant :

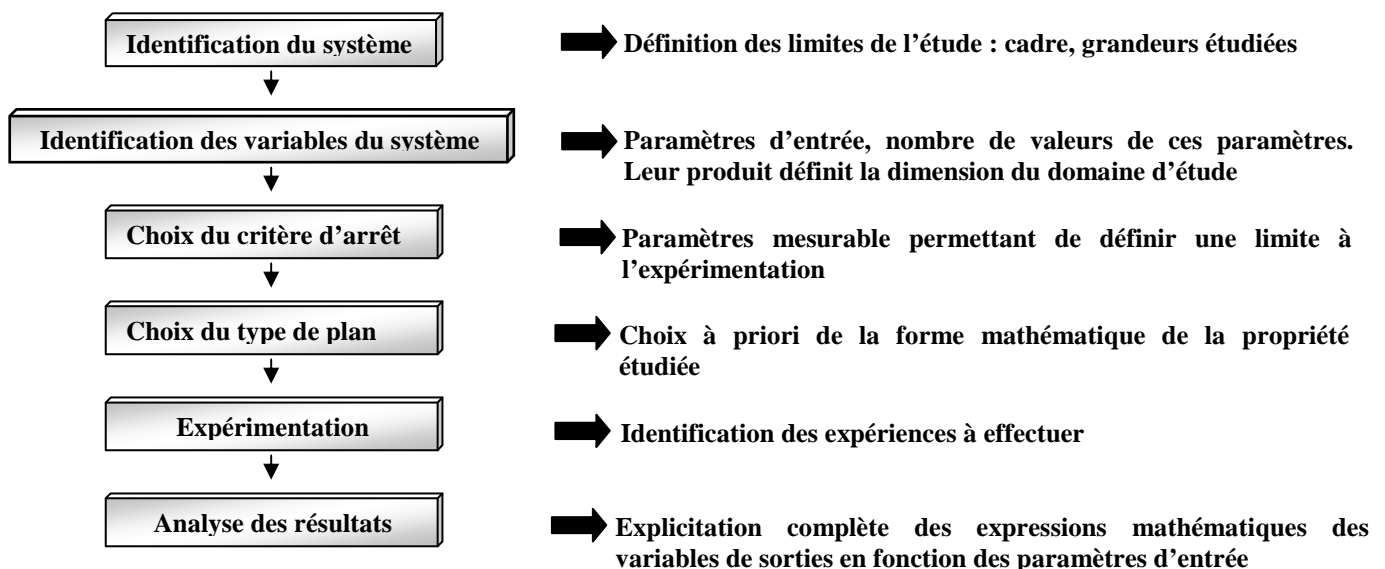


Fig. 2-1 Schéma du processus d'élaboration d'un plan d'expérience

La forme mathématique recherchée pour décrire les variables de sortie influe sur le type de plan à adopter, donc sur le nombre et la répartition des expériences à effectuer. A ce stade, on distingue plusieurs familles types de plans d'expériences [83] :

- les plans factoriels complets à 2 niveaux « 2k », qui permettent d'étudier toutes les combinaisons des différents paramètres et ainsi de déterminer les facteurs prépondérants.
 - les plans factoriels fractionnaires à deux niveaux « 2k-p » qui permettent d'étudier les effets d'un paramètre indépendamment des autres.
 - les plans de second degré (plans composites, plans hybrides ou quadratiques) qui permettent d'étudier les effets d'un paramètre indépendamment des autres avec une modélisation des variables de sortie de type polynomiale ou quadratique.
- Nous nous limiterons ici à décrire et justifier le plan adopté, en fonction des contraintes de notre étude.

Choix du plan d'expérience

Le type de plan choisi est un plan basé sur la planification des expériences par les méthodes unifactorielles et multifactorielles, son intérêt dans le cadre de notre étude est de pouvoir caractériser l'influence des paramètres par un modèle linéaire en minimisant le nombre d'essais. Comme tout plan d'expériences, le plan adopté implique le choix de paramètres d'entrée et l'identification des variables de sortie.

Les paramètres d'entrée sont ceux qui changent suivant les essais. Leur nombre définit le nombre total d'essais du plan d'expériences. Il doit être suffisant pour décrire le problème posé, à savoir ici le comportement en tournage à sec des outils en carbure et en céramique.

Les variables de sortie constituent l'ensemble des grandeurs dont les variations, en fonction des paramètres, permettent de caractériser le comportement à l'usure des outils et leur évolution au cours du temps d'usinage.

Détermination des paramètres d'entrés

Les paramètres d'entrée à définir se rapportent :

- aux matériaux de coupes retenues,
- aux matières usinées
- aux conditions de coupe.

Nous préconisons 4 nuances de céramiques et deux nuances de carbure non revêtu

- Plaquette Al_2O_3
- Plaquette $Al_2O_3 + ZrO_2$
- plaquette $Al_2O_3 + TiC$
- Paquette $Al_2O_3 + TiC+TiN$
- Carbure P35
- Carbure YT15

Nous avons sélectionné 3 matières à usiner :

- Acier 30CD12 trempé
- Acier 30CD12 non trempé
- Acier XC45 trempé
- Acier XC45 non trempé
- Acier GG25

Pour chaque combinaison intervient la variabilité des paramètres de coupe :

- Vitesse de coupe V_c
- Avance de l'outil : f
- Profondeur de passe : a_p

Le critère d'arrêt de chaque essai du plan sera l'usure excessive de l'arête de coupe de la plaquette, conformément aux critères mentionnés auparavant. ($VB=0.3$ mm)

Identification des variables de sortie

Les variables de sortie sont les grandeurs physiques étudiées à travers le plan d'expériences :

Pour les céramiques

- usure (duré de vie)
- rugosité (états de surface après usinage)

Pour les carbures

- usure (duré de vie)
- rugosité (états de surface après usinage)
- efforts de coupe

2.2 -Méthodologie de recherche :

L'étude des performances des matériaux de coupe, conduite à la réalisation des expériences, en prenant comme critère d'évaluation, l'usure et la rugosité. Pour le faire, nous avons, opté pour les méthodologies de recherche suivantes :

2.2.1 -méthode uni factorielle

L'expérimentation à l'aide de la méthode unifactorielle est basée sur la variation d'un paramètre des conditions de coupe (f , a_p , V), alors que les deux autres ainsi que les conditions d'expérimentations ont été maintenues constants,

La méthode uni factorielle se réalise d'après la succession méthodique suivante :

- On donne une série de valeurs discrètes du facteur examiné $X(X_1 \in X_{min}, X_{max})$ tout en maintenant les autres facteurs.

- Pour chaque valeur $X=X_1$, on réalise un essai et on mesure la valeur correspondante y_1 , ou i varie de 1 à N .

Les résultats des essais sont portés dans un tableau ayant la forme suivante

Tableau 2-1 Résultats des essais expérimentaux

N°= essai	variable	Paramètre Y						
	X	Y _{i1}	Y _{i2}	...	Y _{ij}	...	Y _{im}	Y _{imoy}
1	X ₁	Y ₁₁	Y ₁₂	...	Y _{1j}	...	Y _{1m}	Y _{1moy}
2	X ₂	Y _{2i}	Y ₂₂	...	Y _{2j}	...	Y _{2m}	Y _{2moy}
.
1	X _i	Y _{i1}	Y _{i2}	...	Y _{ij}	...	Y _{im}	Y _{imoy}
.
N	X _N	Y _{N1}	Y _{N2}	...	Y _{Nj}	...	Y _{Nm}	Y _{Nmoy}

Le nombre d'essai global $N_g = n.m$

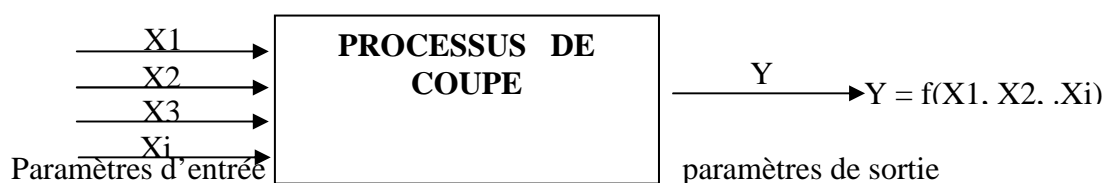
Ou :

m : est le nombre de répétition pour chaque variable X_1

n : est le nombre de valeurs de la variable X_1

$$\bar{y}_{imoy} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_{1j} \quad \text{La valeur moyenne d'y}_{1j}$$

2.2.2 Méthode multifactorielle



Cette méthode permet de varier en même temps plusieurs facteurs dans des intervalles définis, ceci peut être atteint en réalisant les essais conformément à la méthode de planification des expériences.

Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (f, a_p, V) sur les diverses fonctions d'optimisation (T, Ra). Le nombre d'essais nécessaires à nos expériences est donné par la formule suivante : N = P^m

Où : P- Nombre de niveaux pour chaque variable

m- Nombre de paramètres à varier

En prenant pour chaque variable les deux valeurs limites seulement, le nombre de niveaux P = 2. Encore, si nous nous limitons aux valeurs usuelles du régime de coupe (V, f, a_p), l'exposant m = 3, dans ce cas, le nombre d'essais sans répétition est égale à : N = P^m = 2³ = 8

La matrice de planification pour un plan N=8 ainsi que la codification des facteurs sont représentées dans le tableau 2.2.

Tableau 2-2 matrice de planification pour un plan N=8

Essai N°	Val. Codifiées			Val. de sortie	
	X ₁	X ₂	X ₃	Y _i	Y _{it}
1	-1	-1	-1		
2	+1	-1	-1		
3	-1	+1	-1		
4	+1	+1	-1		
5	-1	-1	+1		
6	+1	-1	+1		
7	-1	+1	+1		
8	+1	+1	+1		

Où : $x \rightarrow -1, x_{i\max} \rightarrow +1, x_{imoy} \rightarrow 0$

y_i- valeurs de sortie issues de l'essai.

y_{it}- valeurs de sortie déterminée analytiquement.

Les modèles mathématiques les plus couramment utilisés s'expriment (conformément aux idées de Taylor) par les relations suivantes ;

$$T = C_T f^\beta a_p^\gamma V^\alpha \dots\dots\dots (2.1)$$

$$R = C_{T1} f^{\beta1} a_p^{\gamma1} V^{\alpha1} \dots\dots\dots (2.2)$$

Où

T : Tenue de l'outil

R : Critère de rugosité (Ra)

C_T ; C_{T1} : Constantes qui tiennent compte des facteurs non cités dans (2.1), (2.2)

α_i ; β_i ; γ_i: exposants qui expriment le degré d'influence des différents facteurs de base (V, f, a_p) sur les paramètres résultants (T, Ra)

2.3 Préparation des expériences et équipements utilisés :

Les expériences ont été réalisées dans les ateliers du Département de Mécanique des Universités de Annaba et de Guelma et sont divisées en :

2-3-1 Essais de longue durée (essais d'usure) : Pour mesurer l'usure frontale des plaquettes, on utilise un microscope optique Fig. 2.4

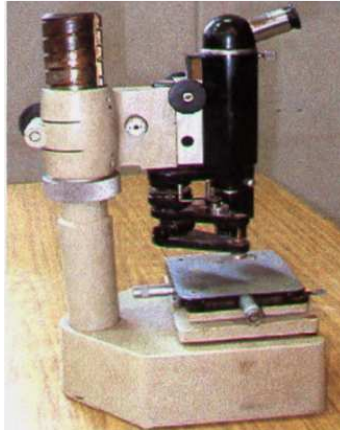


Fig. 2.4 : Photo de Microscope optique

2-3-2 Essais de rugosité :

Pour relever le critère de rugosité des surfaces usinées (Ra)

La mesure de la rugosité a été réalisée au moyen d'un Rugosimètre électronique suffisamment sensible qui est montré dans la figure 2.5



Caractéristiques techniques:

- Paramètres de mesures de Ra et Rz
- Plage de mesure $0.05 \div 10 \mu\text{m}$ pour Ra
 $0.1 \div 50 \mu\text{m}$ pour Rz
- Longueur de mesure 6mm
- Calibre $\lambda_1=0.25 \text{ mm}$ pour Ra $0.05 \div 0.25 \mu\text{m}$
 $\lambda_2=0.8 \text{ mm}$ pour Ra $0.32 \div 2.5 \mu\text{m}$
 $\lambda_3=2.5 \text{ mm}$ pour Ra $2.5 \div 10 \mu\text{m}$
- Précision $\pm 15 \%$
- Rayon de la sonde $10.0 \div 2.5 \mu\text{m}$
- force de mesure 0.016 N
- Poids 200 gr.

Figure 2.5 Mesure de la rugosité Ra

2-3-3 Machine outil utilisé : Tour parallèle modèle SN40 de puissance sur la broche 6.6 kw



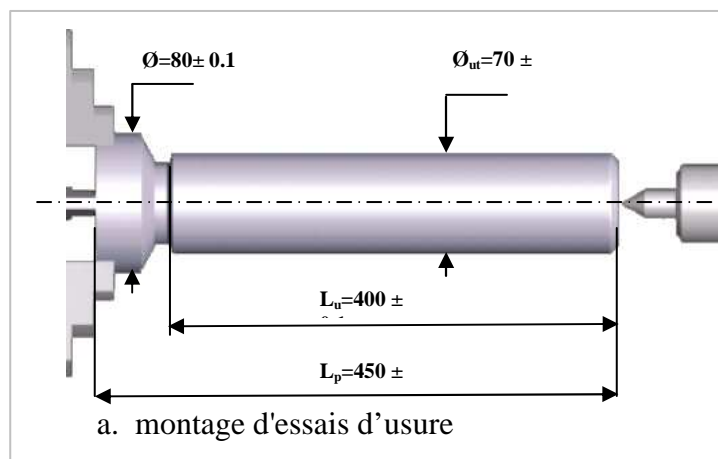
Fig. 2.6 tour parallèle modèle SN40

2-3-4 Matériaux à usiner

Pour se rapprocher du contexte industriel, nous avons choisi pour tester nos plaquettes, des matériaux qui présentent des caractéristiques voisines des matériaux les plus souvent utilisés dans les différentes industries mécaniques. Nous avons utilisé deux nuances d'acier pour les essais d'usure et une troisième nuance de fonte pour les essais de rugosité.

- acier 30CD12 non traité (HB = 490)
- acier 30CD12 traité (HRC =36)
- Acier XC45 non traité (HB =240)
- Acier XC45 trempé (HRC =56)

Les ébauches sont des rondins en acier et en fonte de ($D=72\text{mm}$, $L=400\text{mm}$) préparés préalablement : dressés, centrés, charioté et chanfreinés, en montage mixte est choisi pour la réalisation des essais de l'usure et de la rugosité, les montages et les formes des ébauches sont représentées sur le figure 2.7 (a et b).



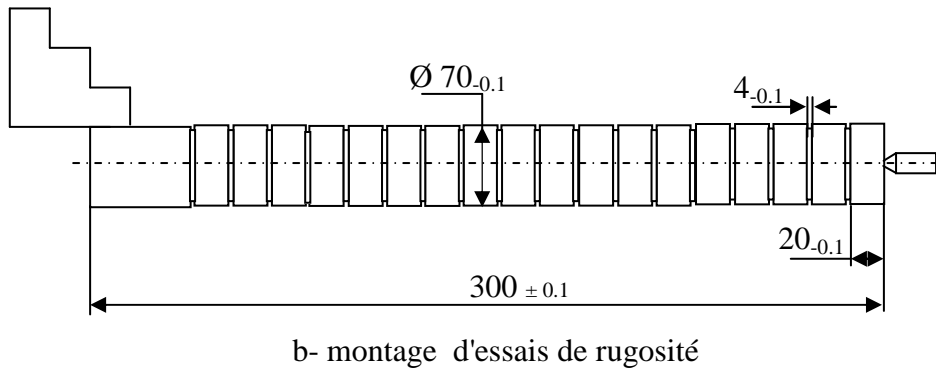


Fig. 2.7 Montages et formes des éprouvettes pour les essais d'usure et de rugosité

2-3-5 Outils de coupe utilisés

Plaquettes en carbures : En premier lieu nous avons testé les carbures métalliques élaborés à l'Unité carbure d'ERIS / Sériana - Batna (P35, YT15).



Fig. 2.8 forme et dimension des plaquettes P35 et YT15

Tableau 2.4 : Angle de porte plaquette et de la plaquette

Géométrie	Angles	
	de la porte plaquette	de la plaquette
α	7°	0°
γ	-6°	14°
φ	45°	

La porte plaquette :

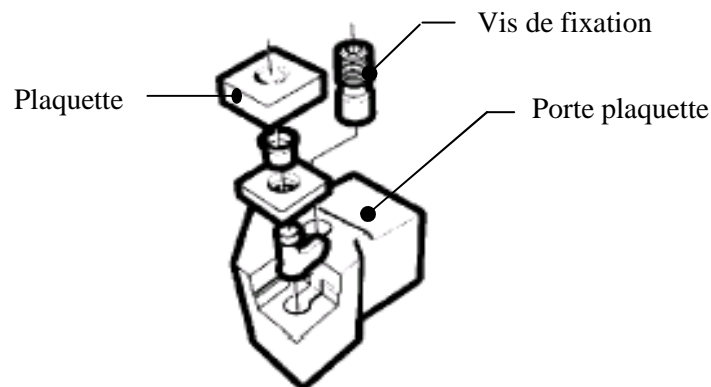


Fig. 2-9 Système de fixation de la plaquette (mécanique)

Plaquettes en céramiques :

- céramique pure : Al_2O_3
- céramique à dispersion : $Al_2O_2 + ZrO_2$
- céramique mixte : $Al_2O_3 + TiC$
- céramique mixte : $Al_2O_3 + ZrO_2 + TiC$

Tableau 2.5 nuances de céramique de coupe

Matériaux de coupe	nuance	Désignation
Céramique pure	Al_2O_3	SNGN 12 08 08
Céramique à dispersion	$Al_2O_3 + ZrO_2$	SNGN 12 08 08
Céramique mixte	$Al_2O_3 + TiC$	SNGN 12 08 08
Céramique mixte	$Al_2O_3 + TiC + TiN$	SNGN 12 08 08

Porte plaquette

Pour la réalisation des essais nous avons utilisé une porte plaquette à fixation mécanique de type CEBNR 32 25 12 section 32x25

- Angle de direction principale $\chi_r = 75^\circ$
- Angle de dépouille principale $\alpha = 6^\circ$
- Angle d'attaque $\gamma = -6^\circ$
- Angle d'inclinaison de l'arête tranchante $\lambda = -6^\circ$

Les plaquettes en céramiques utilisées sont amovibles de forme carrée à fixation par bride

2-3-6 Condition de coupe

Les essais effectués sur les différentes nuances de céramique sont planifiés d'après les méthodes uni factorielle et méthode multifactorielle.

Les conditions expérimentales sont choisies parmi celles recommandées par les industrielles et qui sont comme suit :

Méthode uni factorielle

- Tout en maintenant constante l'avance (f) et la profondeur de passe (a_p):
($f=0.16$ mm/tr ; $a_p=1.0$ mm),
- on fait varier la vitesse de coupe : ($V1=150$ m/mn, $V2 =300$ m/mn ; $V3 = 400$ m/mn)
- La matière testée est l'acier 30CD12.

Méthode multifactorielle

a)- Cas de l'usure:

Selon la matrice des plans d'expérience nous avons des combinaisons de huit essais à réaliser,

Tableau 2-7 tableau des niveaux min et max des paramètres de régime de coupe

Niveau des facteurs	Vc (m/mn)	a_p (mm)	f(mm/tr)
Niveau inférieur (-1)	200	0.5	0.11
Niveau supérieur (+1)	400	1.0	0.22

b)- Cas de la rugosité :

Les conditions de coupe pour les essais de la rugosité sont identiques à celle de l'usure, mais nous avons testé, avec en plus deux autres nuances (Al_2O_3+TiC) et une nuance de matière à usiner fonte GG25

2.4 Mesure des efforts de coupe

2.4.1 Données expérimentales

Acier utilisé: acier allié au **Chrome – Molybdène**, « 30CD12 »

2.4.2 Forme et dimensions des ébauches :

Les essais sont effectués en chariotage sur des ébauches de forme cylindrique ($\varnothing = 70.6\text{mm}$, $L = 460\text{ mm}$).

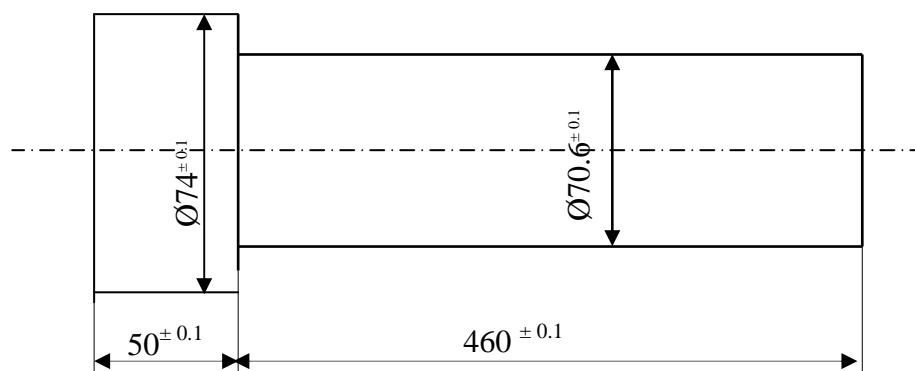


Fig. 2-10 ébauches préparées pour les mesures des efforts de coupe

2.4.3 Plaquettes d'outils utilisées

a- Carbure P35

Le code des plaquettes - échantillons du carbure P 35 est : S N U M 12 04 04

b- Carbure YT15 : au vue de sa composition chimique, cette nuance est un mono –carbure, son code usine est YT15, il est élaboré à l'Unité « CARBURES » de l'Entreprise ERIS de Sériana / Batna, il doit avoir une grande force combinée avec haute résistance à l'usure et il conviendrait aussi bien pour les outils abrasifs que pour les non abrasifs.

Le code des plaquettes - échantillons du carbure YT 15 est aussi : S N U M 12 04 04.

Types de fixation des plaquettes :

La fixation des plaquettes à la porte plaquette est mécanique et le serrage est par levier.

2.4.4 Appareil de mesure des efforts de coupe :

L'appareil utilisé permet d'avoir des valeurs des efforts exercés sur un ou plusieurs axes durant l'opération de chariotage en tournage. Il se compose de :

- Amplificateur de mesure à quatre canaux,
- Transmetteur des efforts de coupe (enregistrement) : Ses plages de mesures sont :
- Force : 1 / 3 / 10 KN
- Moment de torsion : 1 / 1 / 10 KN. Cm
- Plage de température : - 30 / + 3100 / 300 / 1000 °C



Fig. 2.11 : installation de détermination des composants de l'effort de coupe.
(Laboratoire Mécanique univ .Guelma)

- (1) Plate forme KISTLER modèle 9257B
- (2) Amplificateur multicanaux
- (3) Ordinateur avec logiciel Dynoware
- (4) Traceur

CHAPITRE III : RESULTATS DES EXPERIENCES, TRAITEMENT ET ANALYSE

D'après l'étude et l'analyse bibliographique, il ressort que :

- les carbures métalliques restent toujours les matériaux de coupe les plus utilisés dans nos ateliers mécaniques à cause de leur bon résultat en usinage classique (vitesse modérée) de leur prix (bon marché).

- les céramiques de coupe sont des matériaux à outil en pleine évolution, elles permettent des performances irréalisables avec les autres matériaux d'outil du point de vue :

- productivité
- coût, parce qu'elles sont utilisées dans l'usinage à grande vitesse, par conséquent une réduction considérable des temps d'usinage.
- elles offrent la possibilité d'usiner des matériaux difficilement usinables.
- elles permettent d'obtenir des qualités de surface, avec toute satisfaction, lors des opérations de finition.

Toutes ces performances nous ont poussés à faire l'étude comparative de quelques nuances de céramique de coupe et de carbures, alors nous avons essayé de définir l'influence des éléments du régime de coupe sur deux paramètres technologiques d'optimisation, qui sont : l'usure et la rugosité, et par la suite définir les performances des différentes nuances de céramiques et de carbures utilisés.

Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus par la méthode des plans d'expériences pour l'étude de l'évolution de l'usure et de la rugosité de 04 outils en céramique (Al_2O_3 , $Al_2O_3+ZrO_2$, Al_2O_3+TiC , $Al_2O_3+TiC+TiN$) et le carbure P35 et de la rugosité des surfaces obtenue sous l'influence des paramètres du régime de coupe à savoir:

- La vitesse de coupe
- L'avance
- La profondeur de passe

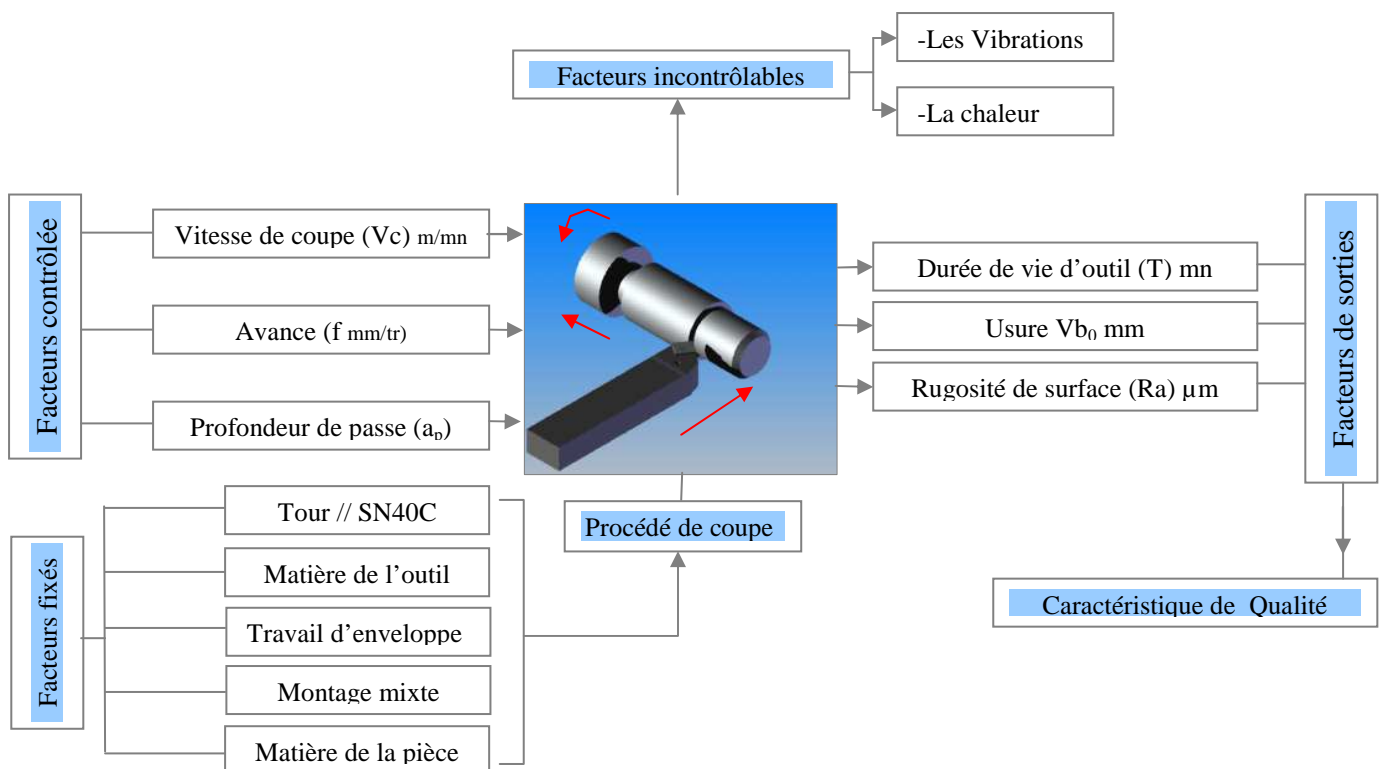


Fig. 3.1 schémas du principe du processus de coupe

Le schéma montre que parmi les facteurs de sortie, on a les fonctions :

$$\left\{ \begin{array}{l} T = f(Vc, f, a_p) \\ VB = f(Vc, f, a_p) \\ Ra = f(Vc, f, a_p), Ra = f(VB) \end{array} \right.$$

L'étude de l'influence de chaque niveau de facteur du régime de coupe sur la durée de vie de l'outil (usure) et l'évolution de la rugosité est possible en variant un facteur et en gardant les autres constants, procédure à appliquer pour les trois facteurs.

Pour réaliser ces expériences, on procède de la même manière pour les carbures et pour les céramiques.

Pour la méthode de planification des expériences à trois facteurs d'entrée (m=3) et deux niveaux de Variation (p=2), un nombre d'essais (N) égal à :

$$N = P^m = 2^3 = 8$$

Les régimes des expériences ont été arrêtés après établissement des essais Préliminaires, conformément aux normes d'essai en la matière : (ISO3685).

3. Résultats des essais d'usure et de la rugosité des surfaces

3.1 Résultats des essais d'usure des outils céramique et de la rugosité des surfaces

3.1.1 Résultats des essais d'usure des outils céramique

3.1.1.1 Résultats des essais d'usure des outils céramique obtenus par la méthode uni factorielle : Voir Annexe 1

Cette méthode nous permet d'apprécier l'influence d'un seul facteur qui est la vitesse de coupe sur la tenue des outils, tandis que l'avance et la profondeur de passe ainsi que les conditions d'expériences ont été maintenues constantes ($f=0.16\text{mm/tr}$, $a_p= 1.0\text{mm}$)

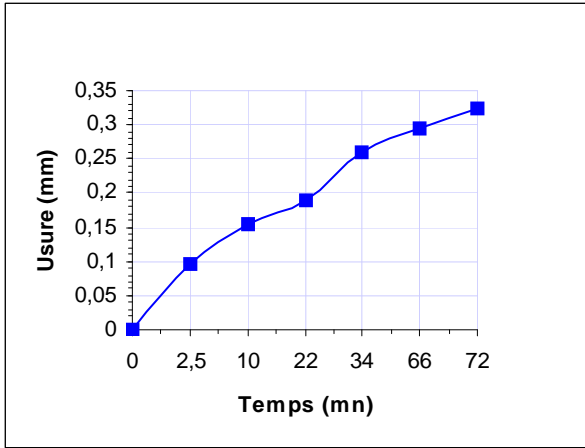
Nous avons testé quatre nuances de céramique sur l'acier 30CD12

- céramique pure : Al_2O_3
- céramique à dispersion : $\text{Al}_2\text{O}_2 + \text{ZrO}_2$
- céramique mixte : $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$
- céramique mixte : $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{TiC}$

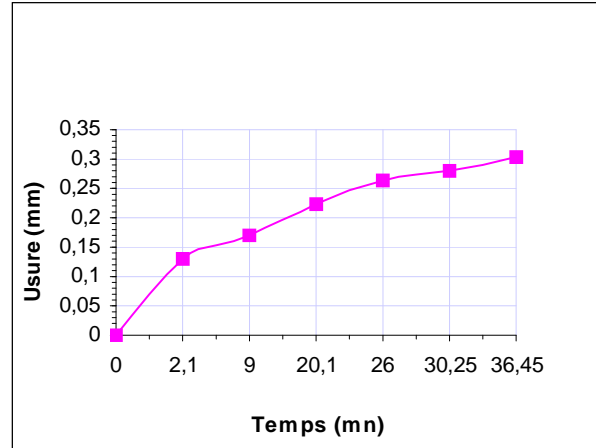
Les résultats de cette première série d'essais sont portés dans les tableaux (3.1 à 3.12) Annexe 1

3.1.1.2 Traitement des résultats d'usure VB des outils céramiques par la Méthode Uni factorielle

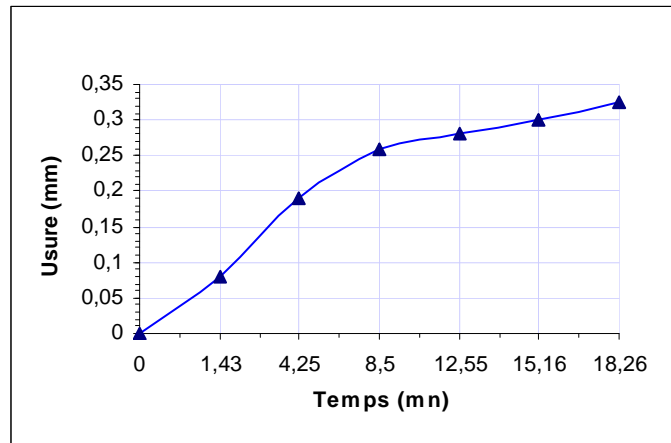
Les résultats expérimentaux de l'évolution de l'usure frontale (VB) en fonction du temps avec les divers matériaux de coupe testés sont représentés dans les graphes fig.3.1 à fig.3.4 Avec le critère d'usure admissible $\text{VB} = 0.3\text{mm}$ pour l'usure frontale (norme ISO)



a : Régime ($V_c=150\text{m/mn}; f=0.16\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)

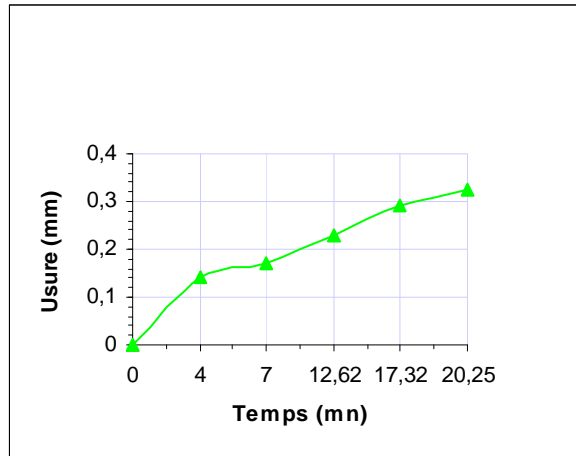


b : Régime ($V_c=300\text{m/mn}; f=0.16\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)

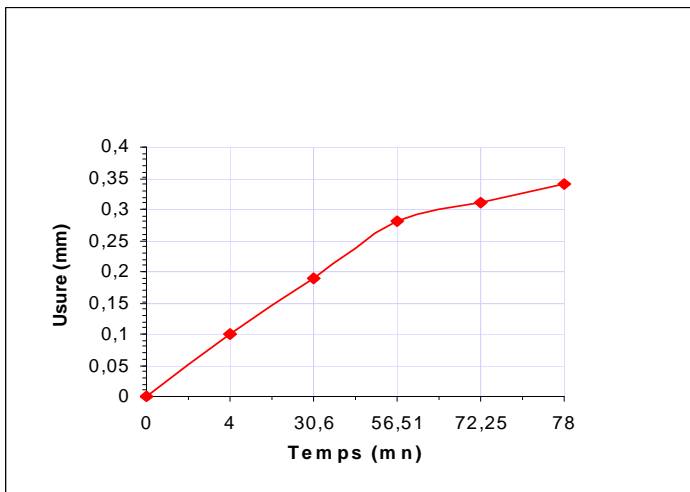


c : Régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.16\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)

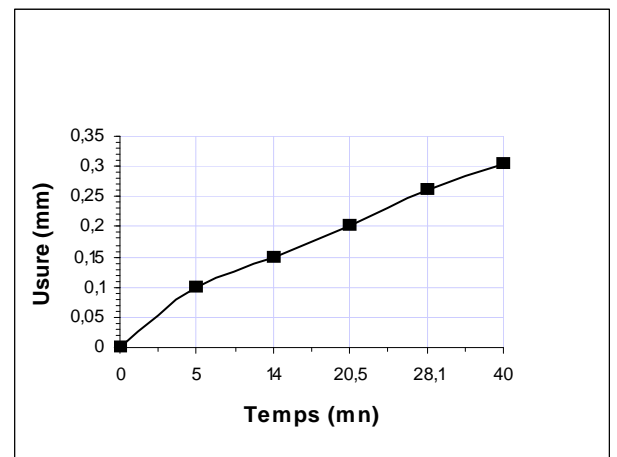
Fig. 3.1. Courbes d'usure VB de l'outil en céramique Al_2O_3 , ébauche en acier 30CD12 avec 3 régimes différents



a : régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.16\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)

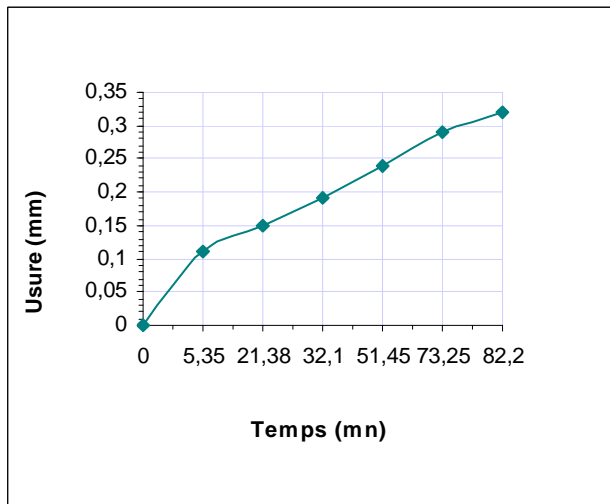


c : Régime ($V_c=150\text{m/mn}; f=0.16\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)

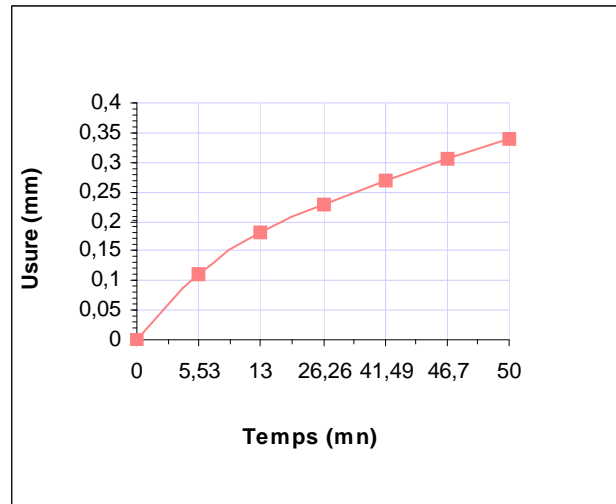


b : Régime ($V_c=300\text{m/mn}; f=0.16\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)

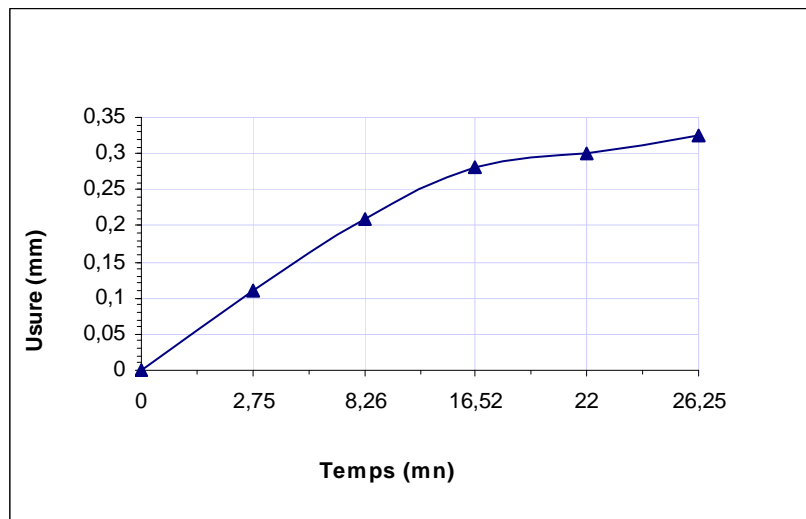
Fig. 3.2 courbes d'usure VB de l'outil en céramique $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$
Ebauche en acier 30CD12 avec 3 régimes différents



a : Régime ($V_c=150\text{m/mn}$; $f=0.16\text{mm/tr}$; $a_p=1\text{mm}$)

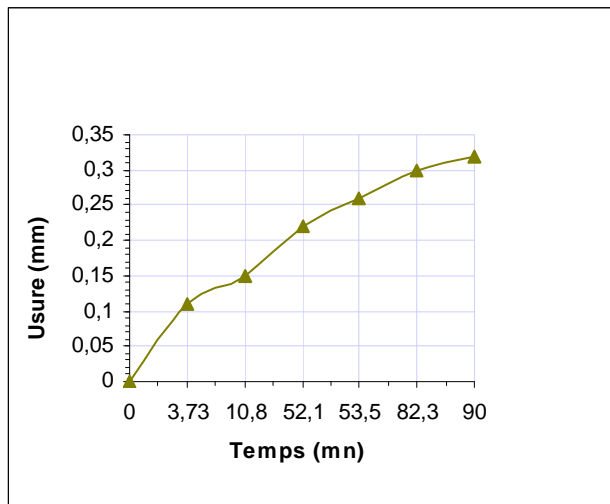


b:, Régime ($V_c=300\text{m/mn}$; $f=0.16\text{mm/tr}$; $a_p=1\text{mm}$)

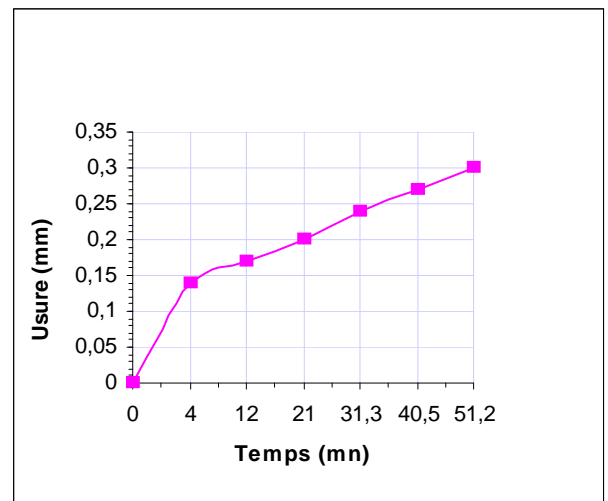


c:., Régime ($V_c=400\text{m/mn}$; $f=0.16\text{mm/tr}$; $a_p=1\text{mm}$)

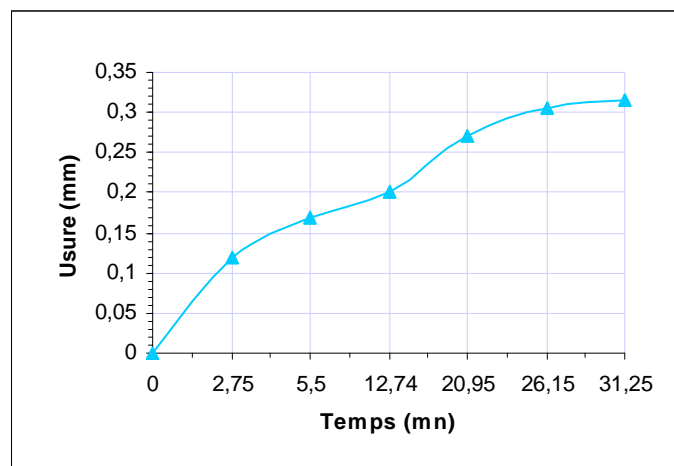
Fig. 3.3 Courbes d'usure VB de l'outil en céramique $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$
Ebauche en acier 30CD12 avec 3 régimes différents



a : Régime ($V_c=150\text{m/mn}; f=0.16\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)



b : Régime ($V_c=300\text{m/mn}; f=0.16\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)



c : Régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.16\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)

Fig. 3.4 Courbe d'usure VB de l'outil en céramique $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}+\text{TiN}$

L'ébauche en acier 30CD12 avec 3 régimes différents

3.1.1.3 Détermination des durées de vie des différentes nuances de céramiques

Les tenues au travail des différentes nuances de céramique ont été déterminés graphiquement en se basant sur les courbes d'usure $\text{VB} = f(T)$, avec le critère d'usure normalisé $\text{VB} = 0.3\text{mm}$.

Tableau 3.1 Tenus de travail des différentes céramiques en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier 30CD12 ($f = 0.16 \text{ mm/tr}$, $a_p = 1.0 \text{ mm}$)

Matériau de coupe	Vitesse de coupe (m/mn)	Tenue au travail T (mn)
Céramique pure Al_2O_3	150	66.00
	300	36.45
	400	15.16
Céramique à dispersion $Al_2O_3+ZrO_2$	150	63.43
	300	40.00
	400	18.22
Céramique mixte Al_2O_3+TiC	150	75.55
	300	46.70
	400	22.00
Céramique mixte $Al_2O_3+TiC+TiN$	150	82.30
	300	51.22
	400	26.15

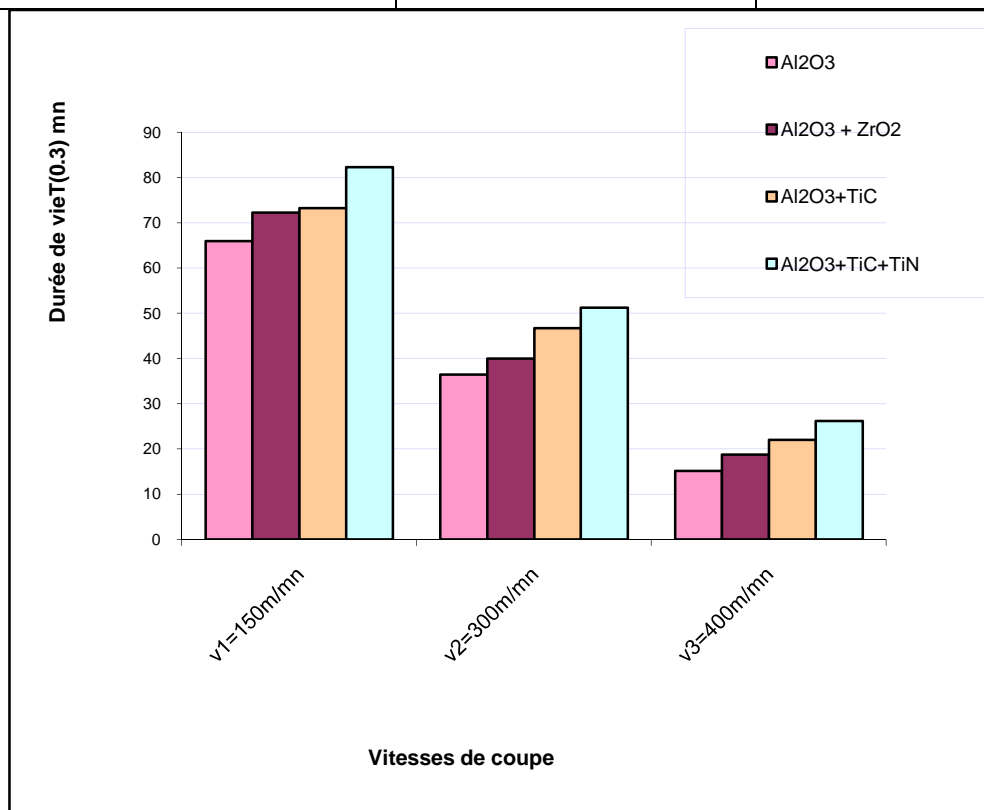


Fig. 3.5 Durée de vie des céramiques en fonction des vitesses de coupe lors de l'usinage de l'acier 30CD12 avec $f=0.16$ mm/tr et $a_p=1.0$ mm.

3.1.2 Résultats des essais d'usure VB des outils céramique obtenus par la méthode Multifactorielle : Voir Annexe 2

Cette méthode nous permet d'apprécier l'influence des paramètres variables d'essai (v_c , f , a_p) sur les fonctions d'optimisation (T , R_a), les essais sont réalisés d'après la matrice de planification pour un plan N=8 (tableau.2.2).

Nous avons testé deux nuances de céramiques ($Al_2O_3+ZrO_2$ et $Al_2O_3+TiC + TiN$) sur deux matière à usiner (acier 30CD12 et acier XC45) traitées et non traitées (voir paragraphe : 2.3.5)

-Les résultats de cette série d'expérience ainsi que les conditions de travail sont consignés sur les tableaux suivants : (tableau 3.13 à 3.56) en annexe 2

1-Evolution de l'usure en fonction du temps lors de l'usinage de l'acier 30CD12, selon les différents régimes de coupe Tableaux 3.13à 3.28

2-Evolution de l'usure en fonction du temps lors de l'usinage de l'acier 30CD12 traité selon les différents régimes de coupe, Tableaux 3.29à 3.36

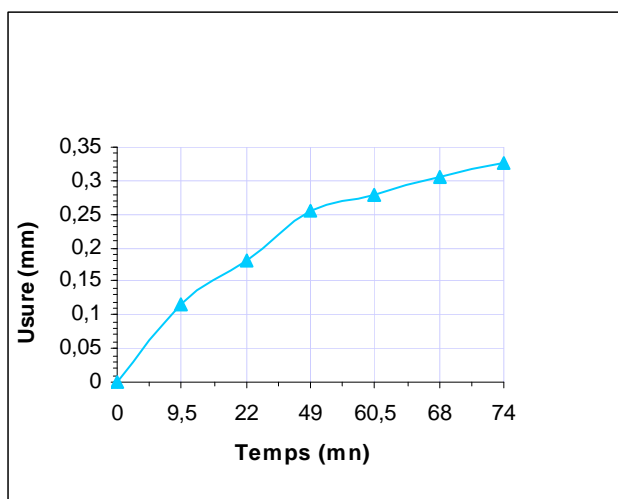
3-Evolution de l'usure en fonction du temps lors de l'usinage de l'acier XC45 selon les différents régimes de coupe ; Tableaux 3.37 à 3.52

4-Evolution de l'usure en fonction du temps lors de l'usinage de l'acier XC45 traité Tableaux 3.53 à 3.56

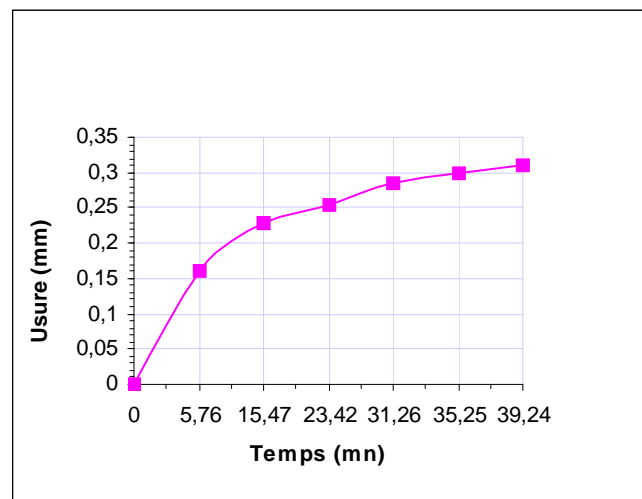
3.1.2.1 Traitement des résultats d'usure VB des outils céramiques

Les résultats expérimentaux de l'évolution de l'usure frontale (VB) en fonction du temps des deux céramiques ($Al_2O_3+ZrO_2$ et $Al_2O_3+TiC+TiN$) en usinant, des ébauches en acier 30CD12, en acier XC45 , en l'acier 30CD12 trempé et en acier XC45 trempé

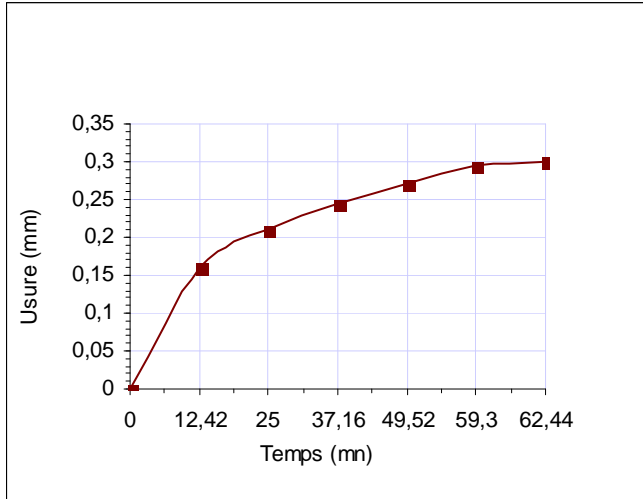
Le critère d'usure admissible $VB = 0.3mm$ pour l'usure frontale d'après la norme ISO



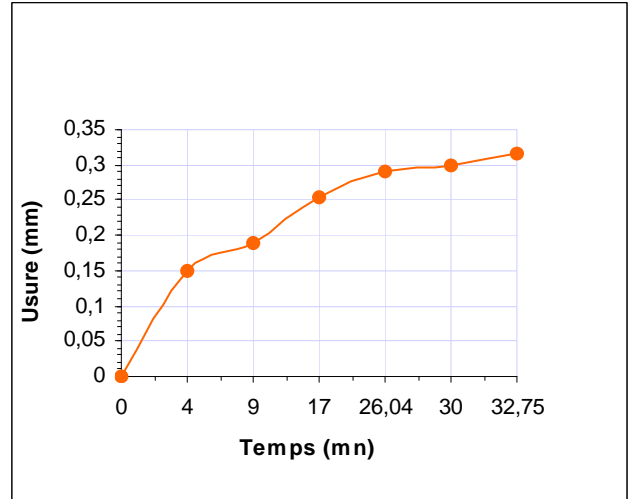
a: Régime ($V_c=200m/mn; f=0.11mm/tr; a_p=0.5mm$)



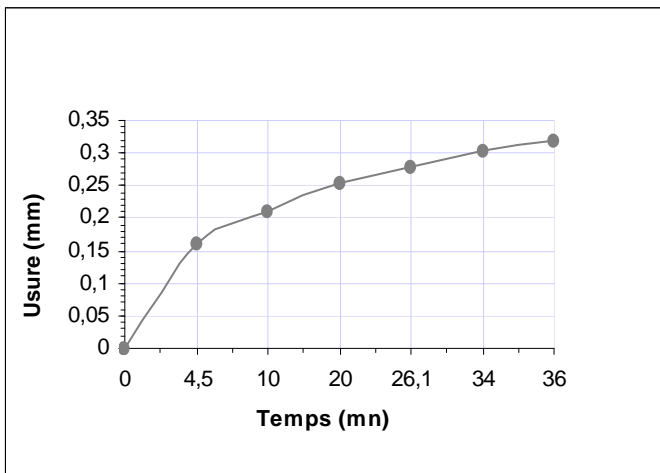
b : régime ($V_c=400m/mn; f=0.11mm/tr; a_p=0.5mm$)



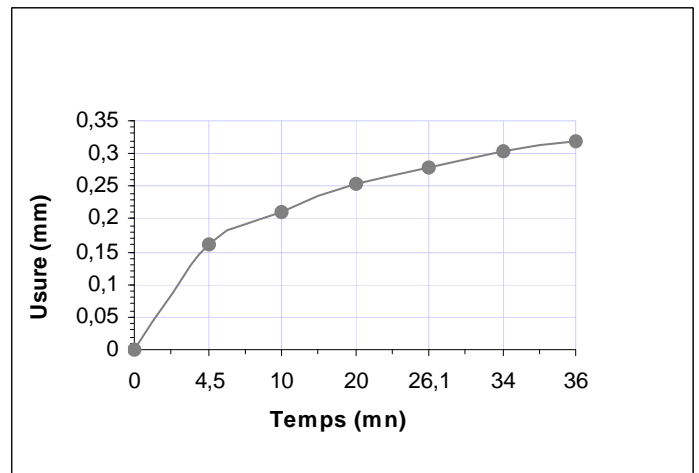
c : régime ($V_c=200\text{m/mn}; f=0.22\text{mm/tr}; a_p=0.5\text{mm}$)



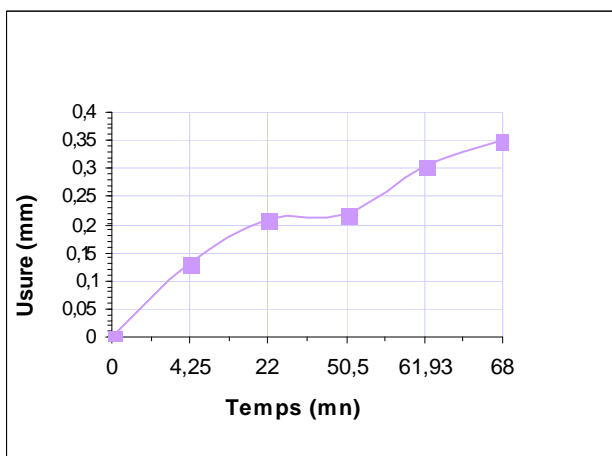
d : régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.22\text{mm/tr}; a_p=0.5\text{mm}$)



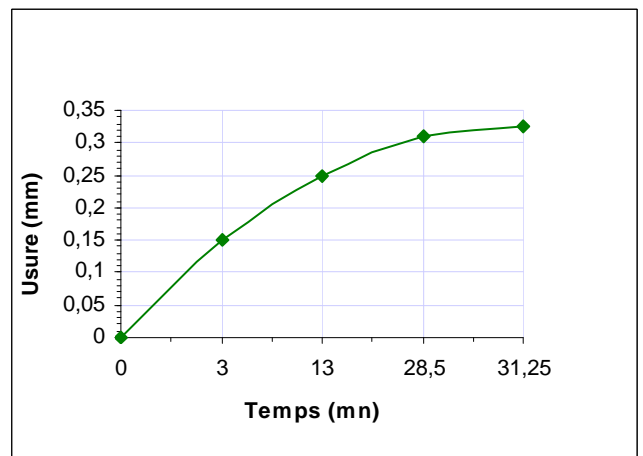
e : régime ($c=200\text{m/mn}; f=0.11\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)



f : régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.11\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)

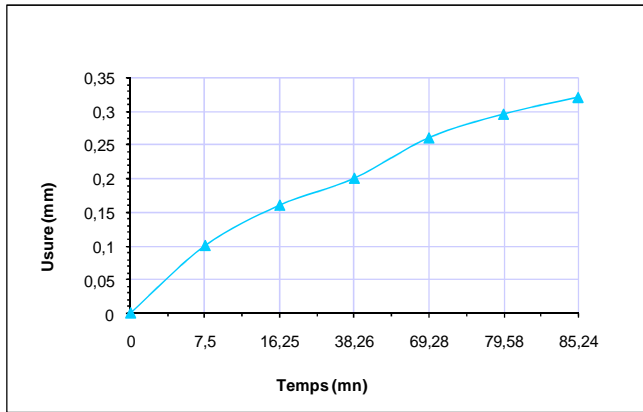


g : régime ($V_c=200\text{m/mn}; f=0.22\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)

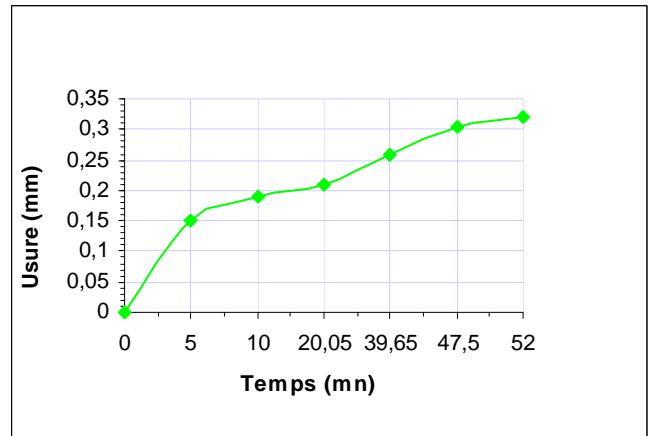


h : régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.22\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)

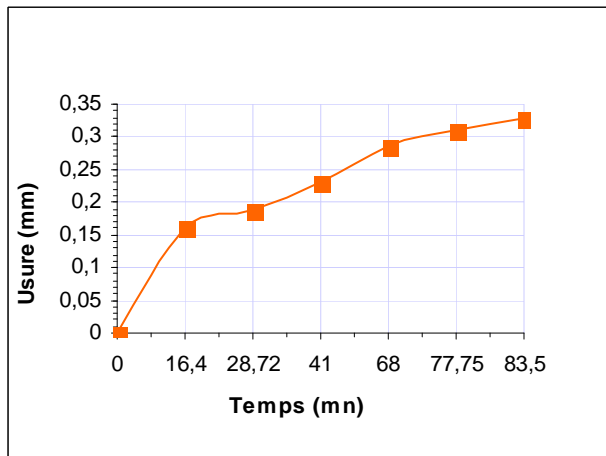
Fig. 3.6. Courbes d'usure VB de l'outil en céramique $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$
Ebauche en acier 30CD12 avec 8 régimes différents



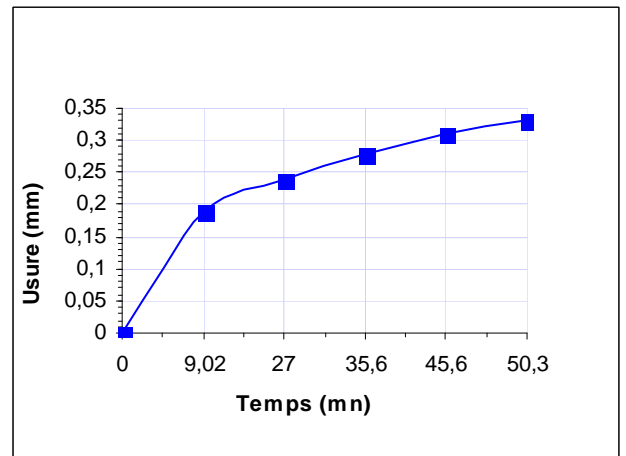
a : Régime ($V_c=200\text{m/mn}; f=0.11\text{mm/tr}; a_p=0.5\text{mm}$)



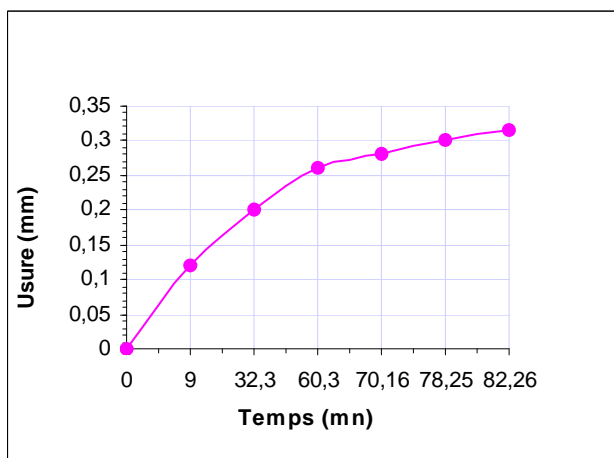
b : Régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.11\text{mm/tr}; a_p=0.5\text{mm}$)



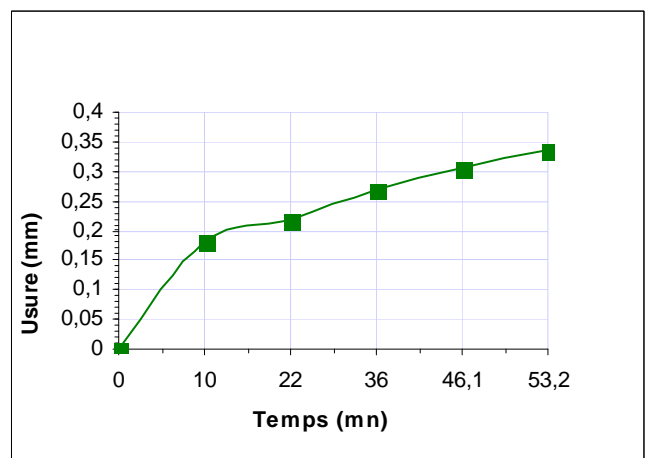
c : Régime ($V_c=200\text{m/mn}; f=0.22\text{mm/tr}; a_p=0.5\text{mm}$)



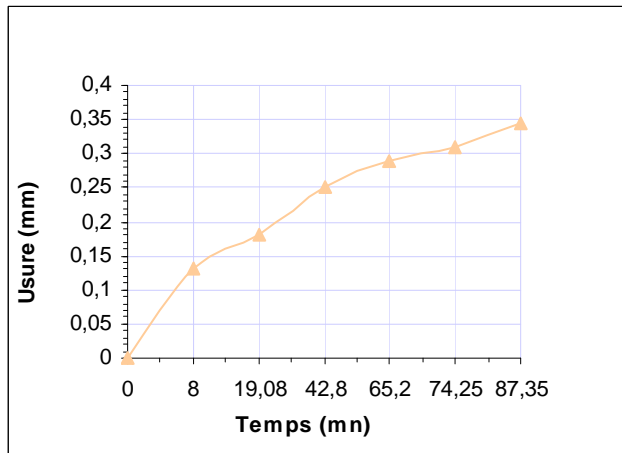
d : Régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.22\text{mm/tr}; a_p=0.5\text{mm}$)



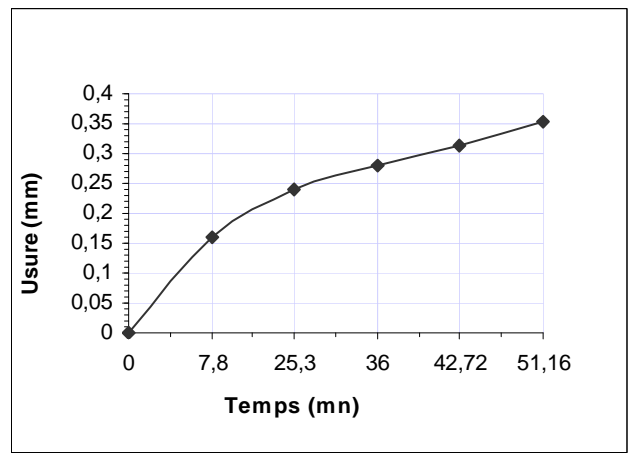
e : Régime ($V_c=200\text{m/mn}; f=0.11\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)



f : Régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.11\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)



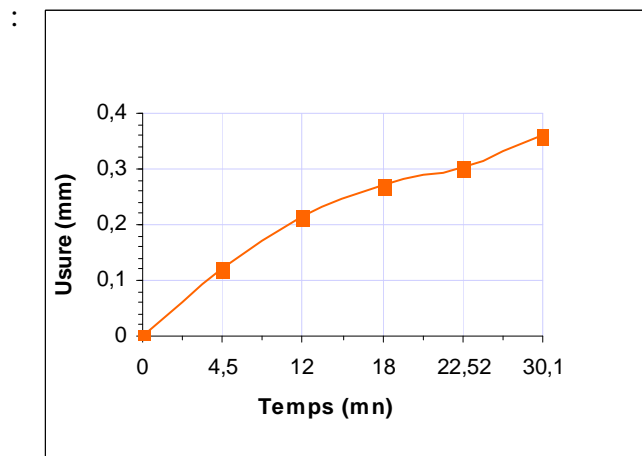
g : Régime ($V_c=200\text{m/mn}; f=0.22\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)



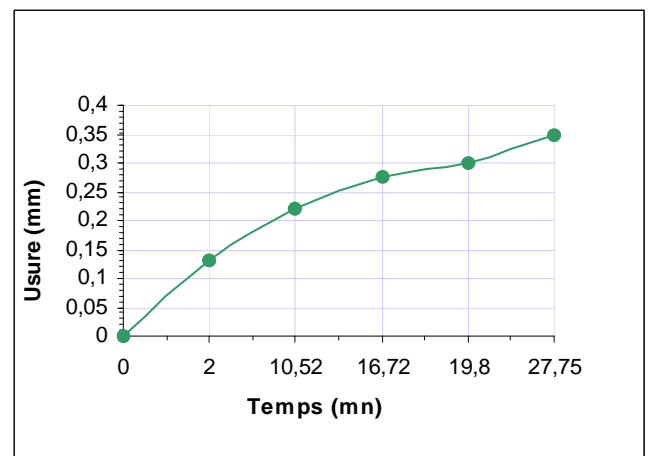
h Régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.22\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)

Fig. 3.7 Courbes d'usure VB de l'outil en céramique $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}+\text{TiN}$

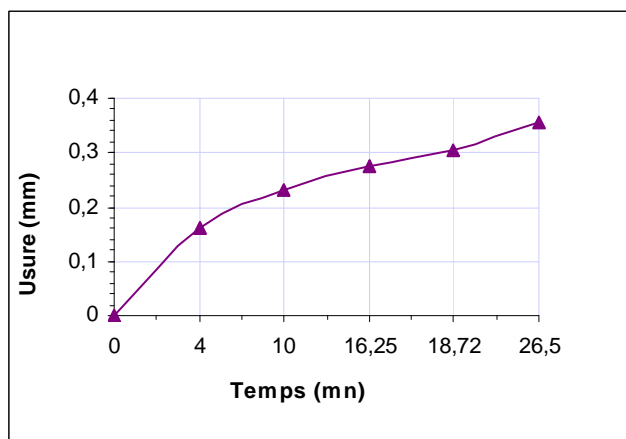
Ebauche en acier 32CD12 avec 8 régimes différents



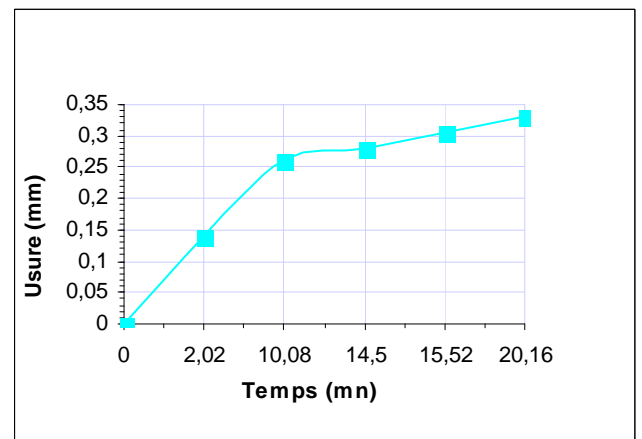
a : Régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.11\text{mm/tr}; a_p=0.5\text{mm}$)



b : Régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.11\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)



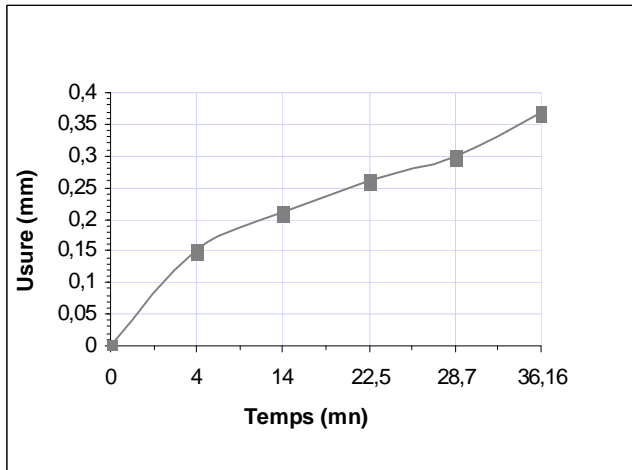
c : Régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.22\text{mm/tr}; a_p=0.5\text{mm}$)



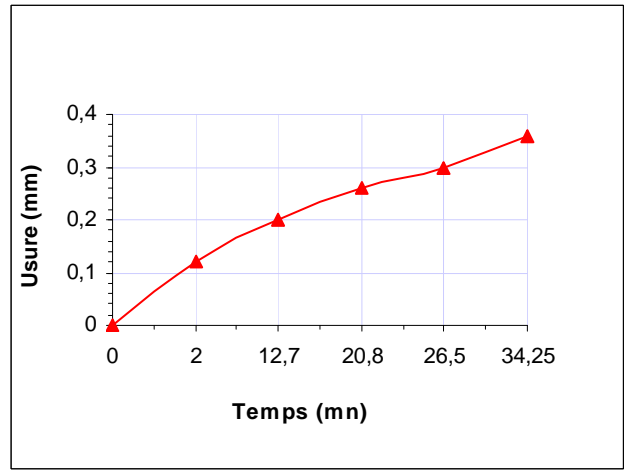
d: Régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.11\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)

Fig. 3.8. Courbes d'usure VB de l'outil en céramique $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2$

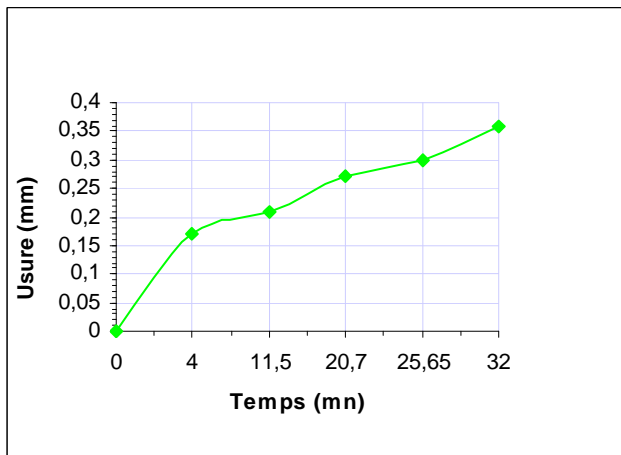
Ebauche en acier 30CD12 trempé avec 4 régimes différents



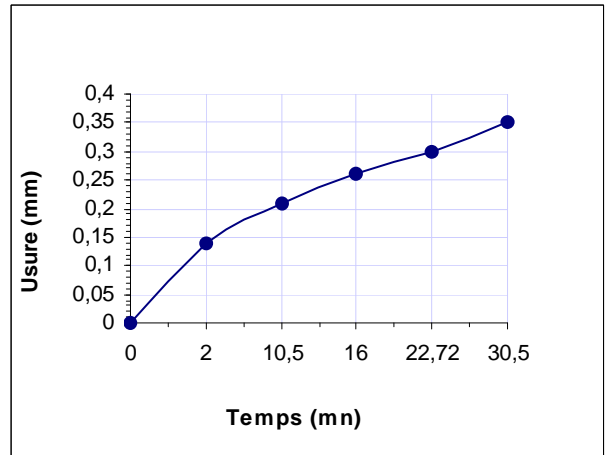
a : Régime ($V_c=400\text{m/mn}$; $f=0.11\text{mm/tr}$; $a_p=0.5\text{mm}$)



b : Régime ($V_c=400\text{m/mn}$; $f=0.11\text{mm/tr}$; $a_p=1\text{mm}$)

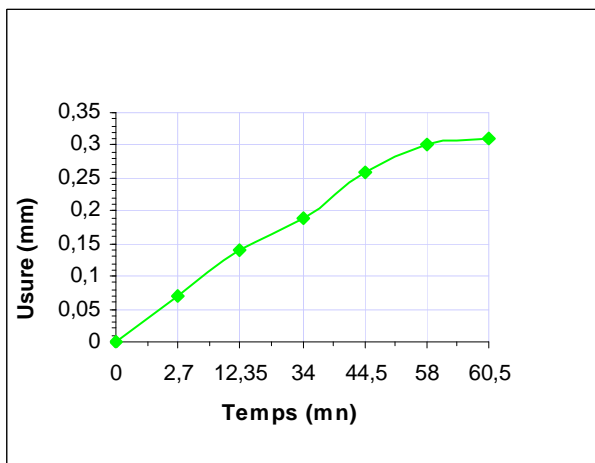


c : Régime ($V_c=400\text{m/mn}$; $f=0.22\text{mm/tr}$; $a_p=0.5\text{mm}$)

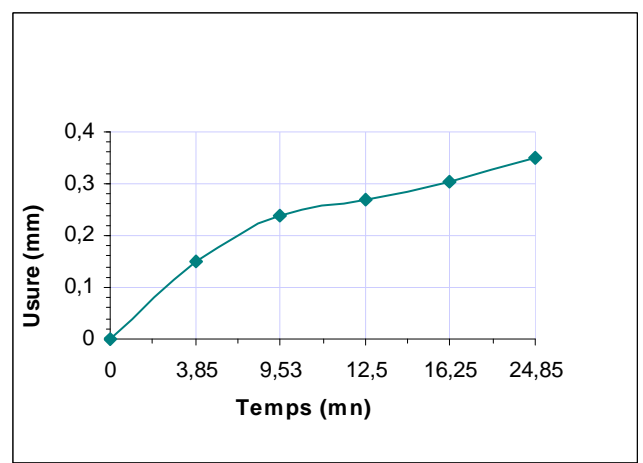


d : Régime ($V_c=400\text{m/mn}$; $f=0.22\text{mm/tr}$; $a_p=1\text{mm}$)

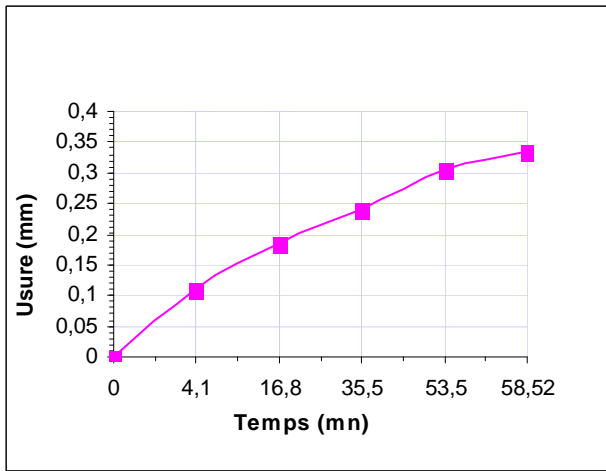
Fig. 3.9 Courbes d'usure VB de l'outil en céramique $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}+\text{TiN}$
Ebauche en acier 30CD12 trempé avec 4 régimes différents



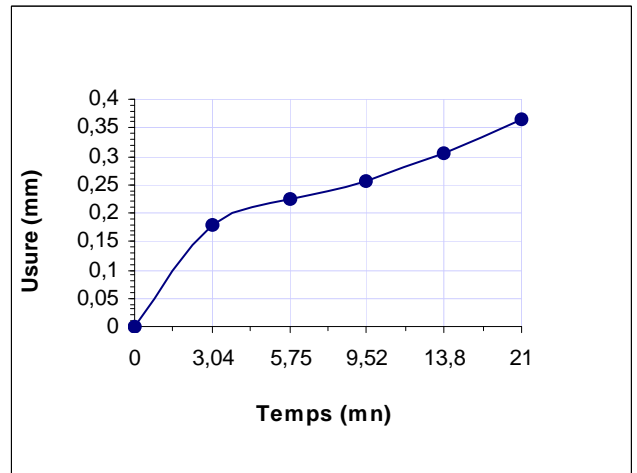
a : Régime ($V_c=200\text{m/mn}$; $f=0.11\text{mm/tr}$; $a_p=0.5\text{mm}$)



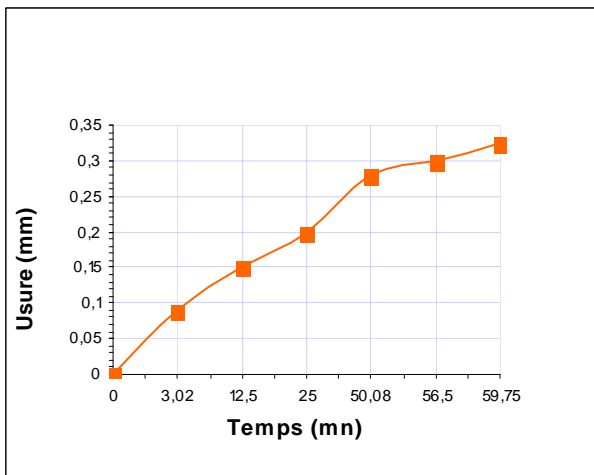
b : Régime ($V_c=400\text{m/mn}$; $f=0.11\text{mm/tr}$; $a_p=0.5\text{mm}$)



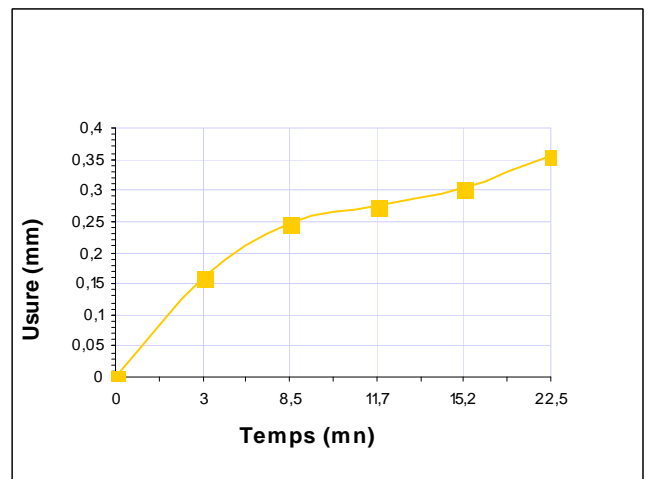
c : Régime ($V_c=200\text{m/mn}; f=0.22\text{mm/tr}; a_p=0.5\text{mm}$)



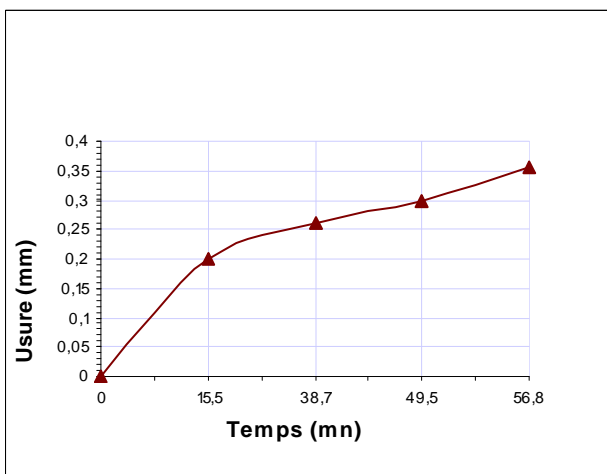
d : Régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.22\text{mm/tr}; a_p=0.5\text{mm}$)



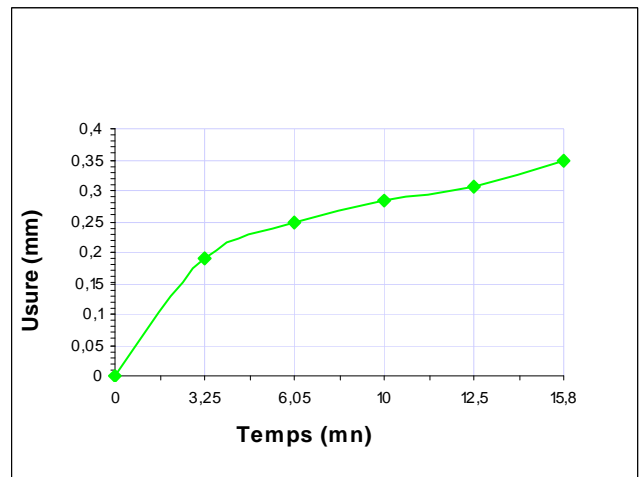
e : Régime ($V_c=200\text{m/mn}; f=0.11\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)



f : Régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.11\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)

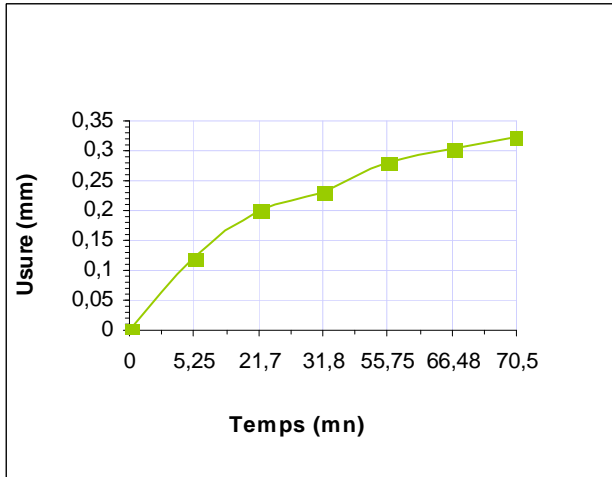


g : Régime ($V_c=200\text{m/mn}; f=0.22\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)

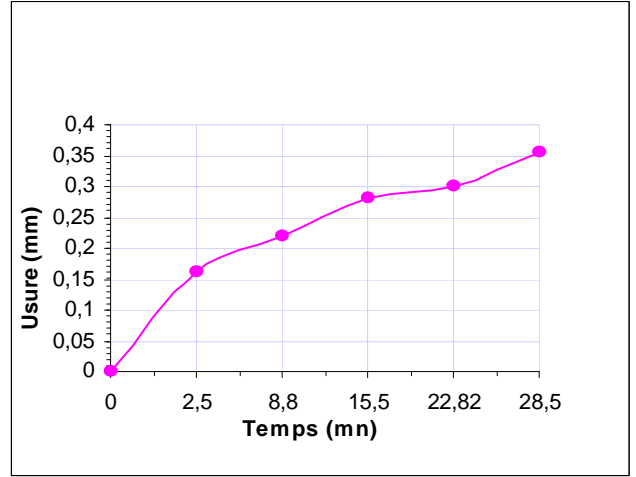


h : Régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.22\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)

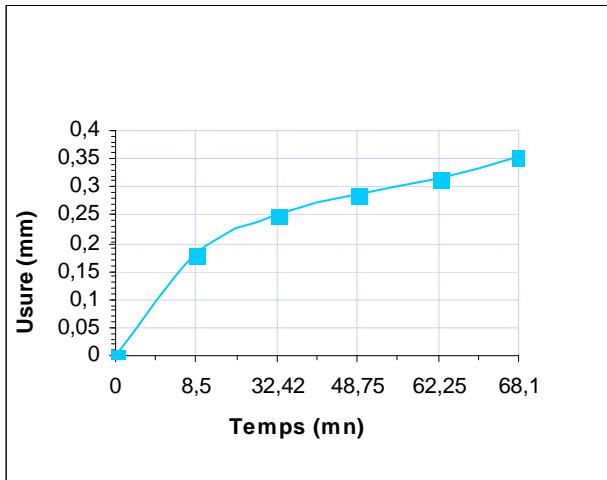
Fig. 3.10. Courbes d'usure VB de l'outil en céramique $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2$
Ebauche en acier XC45 avec 8 régimes différents



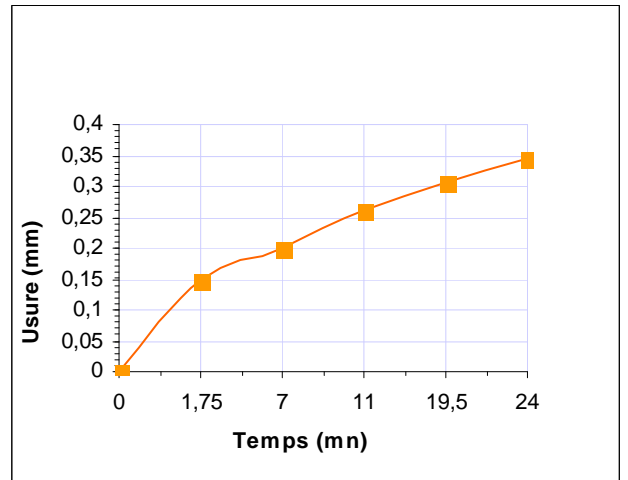
a : Régime ($V_c=200\text{m/mn}; f=0.11\text{mm/tr}; a_p=0.5\text{mm}$)



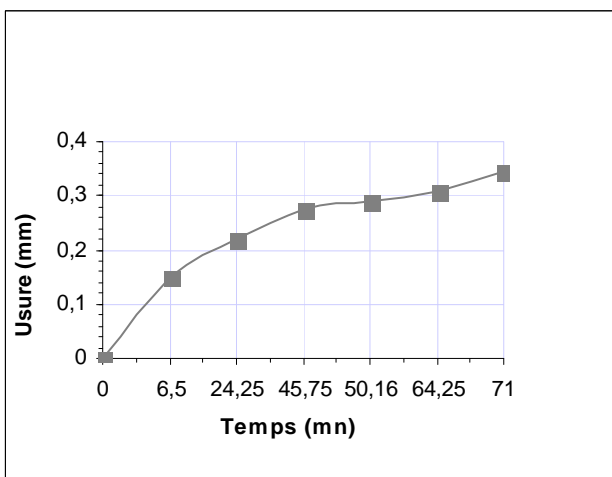
b : Régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.11\text{mm/tr}; a_p=0.5\text{mm}$)



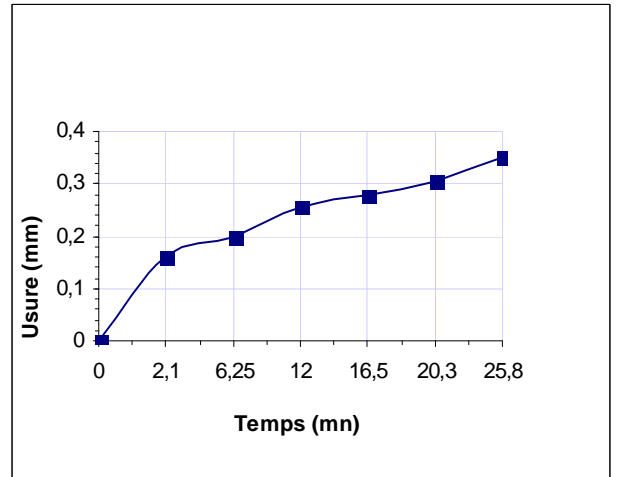
c : Régime ($V_c=200\text{m/mn}; f=0.22\text{mm/tr}; a_p=0.5\text{mm}$)



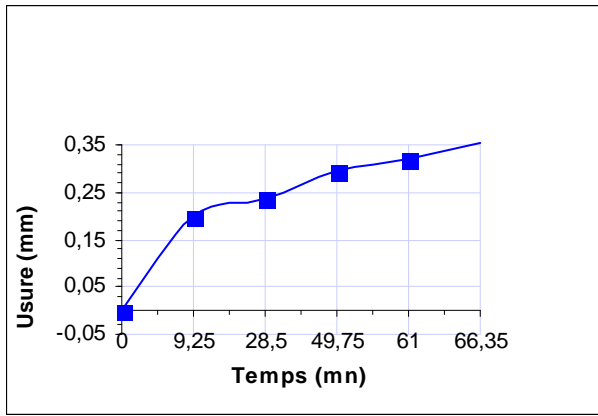
d : Régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.22\text{mm/tr}; a_p=0.5\text{mm}$)



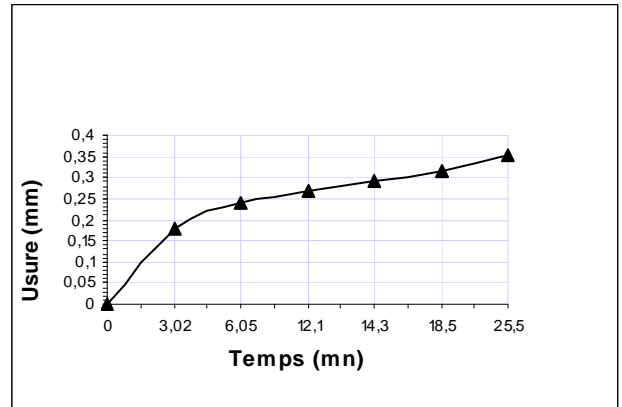
e : Régime ($V_c=200\text{m/mn}; f=0.11\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)



f : Régimes ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.11\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)

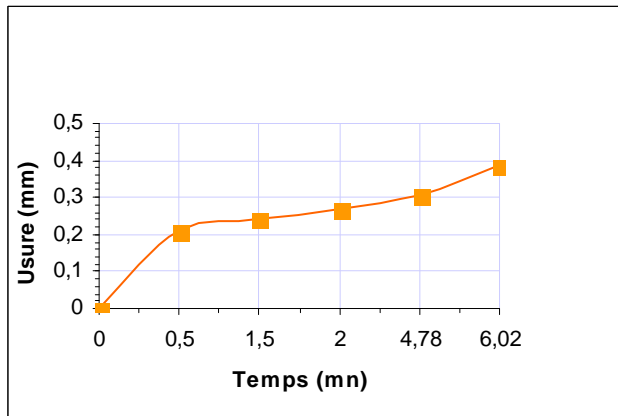


g : Régime ($V_c=200\text{m/mn}; f=0.22\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)

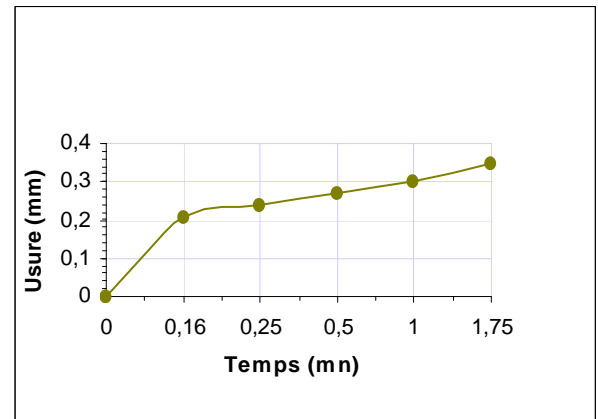


h : Régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.22\text{mm/tr}; a_p=1\text{mm}$)

Fig. 3.11. Courbes d'usure VB de l'outil en céramique $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}+\text{TiN}$
Ebauche en acier XC45 avec 8 régimes différents

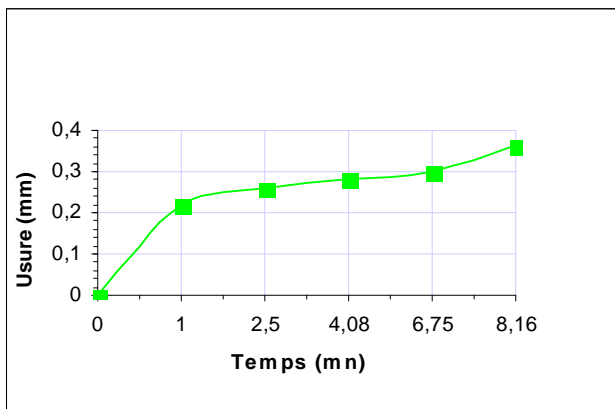


a : Régime ($V_c=200\text{m/mn}; f=0.11\text{mm/tr}; a_p=0.5\text{mm}$)

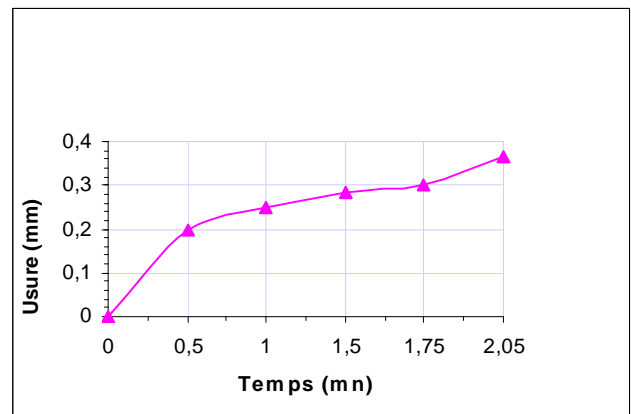


b : Régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.11\text{mm/tr}; a_p=0.5\text{mm}$)

Fig. 3.12. Courbes d'usure VB de l'outil en céramique $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2$
Ebauche en acier XC45 trempé avec 2 régimes différents



a : Régime ($V_c=200\text{m/mn}; f=0.11\text{mm/tr}; a_p=0.5\text{mm}$)



b : Régime ($V_c=400\text{m/mn}; f=0.11\text{mm/tr}; a_p=0.5\text{mm}$)

Fig. 3.13. Courbes d'usure VB de l'outil en céramique $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}+\text{TiN}$
Ebauche en acier XC45 trempé avec 2 régimes différents

3.1.2.2 Analyse de l'évolution de l'usure

a) L'analyse de ces courbes de l'évolution de l'usure des différentes nuances de céramique montre que leur allure générale obéit à la loi universelle de l'usure, celle-ci se caractérise par trois (03) zones principales.

-La première zone est celle de l'usure initiale ou de rodage, c'est une usure intensive, elle s'explique par l'élimination des aspérités au niveau de l'arête de coupe ou de ses abords.

-La deuxième, celle de l'usure dite normale, ici l'usure évolue plus lentement et devient plus ou moins linéaire, dans ce cas l'usure est stabilisée et s'effectue à un rythme beaucoup moins rapide jusqu'elle atteint l'intervalle 0.3 à 0.35 au delà de cet intervalle l'usure s'accroît et la précision dimensionnelle et l'état de surface de la pièce ne sont pas assurés, il y a une forte résistance à l'usure ce qui fait monter la température au contact de l'outil avec la pièce et avec le copeau ; on entre, alors, dans

-La troisième zone, c'est celle de l'usure accélérée ou catastrophique. L'usure s'accélère par abrasion et par diffusion, l'outil perd ses qualités de coupe et devient inutilisable.

b) En observant les mécanismes d'usure des plaquettes en céramique, on peut dire que la vitesse d'usure est d'autant plus faible que la céramique est plus dure, ce qui implique que l'abrasion est ici le principal mécanisme d'usure.

c) on remarque aussi que le bon comportement à l'usure des céramiques (Al_2O_3+TiC ; $Al_2O_3+TiC+TiN$) face aux aciers (30CD12, CX45), par contre les céramiques ($Al_2O_3+ZrO_2$) et (Al_2O_3). S'usent plus rapidement, on remarque aussi que la nuance ($Al_2O_3+ZrO_2$) renforcée présente une usure moins importante comparativement à la céramique pure (Al_2O_3).

d) Le comportement à l'usure des différentes nuances de céramique varie très largement en fonction de leur composition chimique et de leur structure à savoir

-L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) confère au matériau de coupe son excellente dureté à chaud, permettant des vitesses de coupe particulièrement élevée.

-Avec la céramique noire (Al_2O_3+TiC) (70% Al_2O_3 + 30% TiC), la haute teneur en oxyde d'aluminium confère à ce matériau de coupe sa très forte dureté à chaud, tandis que l'addition de carbure de titane a pour effet de rendre les arêtes de coupe particulièrement robustes, ce qui augmente leur résistance à l'usure ainsi qu'aux chocs mécaniques et thermiques.

-La céramique mixte ($Al_2O_3+TiC+TiN$) comprend en plus de sa base Al_2O_3 du TiC et de TiN . L'adjonction du TiC , permet d'améliorer la tenue aux contraintes thermique du matériau, alors que le TiN partiellement stabilise et augmente les propriétés de ténacité.

3.1.2.3 Détermination des durées de vie des deux nuances de céramiques.

Le traitement graphique des résultats expérimentaux détermine les durées de vie des deux matériaux $Al_2O_3+ZrO_2$ et $Al_2O_3+TiC+TiN$.

Sur les tableaux 3.2 et 3.3 sont regroupées les valeurs des tenues des céramiques ($Al_2O_3 + ZrO_2$; $Al_2O_3+ TiC+ TiN$).

Tableau 3.2 Tenue au travail des céramiques $Al_2O_3 + ZrO_2$ et $Al_2O_3+ TiC+ TiN$ en fonction de 8 régimes de coupe lors de l'usinage de l'acier 30CD12

Essai N°	Valeurs réelles			$Al_2O_3 + ZrO_2$	$Al_2O_3+ TiC+ TiN$
	a_p (mm)	f(mm/tr)	v_c (m/mn))	T (mn)	T (mn)
01	0.5	0.11	200	68.00	81.00
02	1.0	0.11	200	65.50	78.25

03	0.5	0.22	200	59.30	72.50
04	1.0	0.22	200	61.93	68.50
05	0.5	0.11	400	35.25	47.50
06	1.0	0.11	400	34.50	46.10
07	0.5	0.22	400	30.00	42.00
08	1.0	0.22	400	24.00	39.0

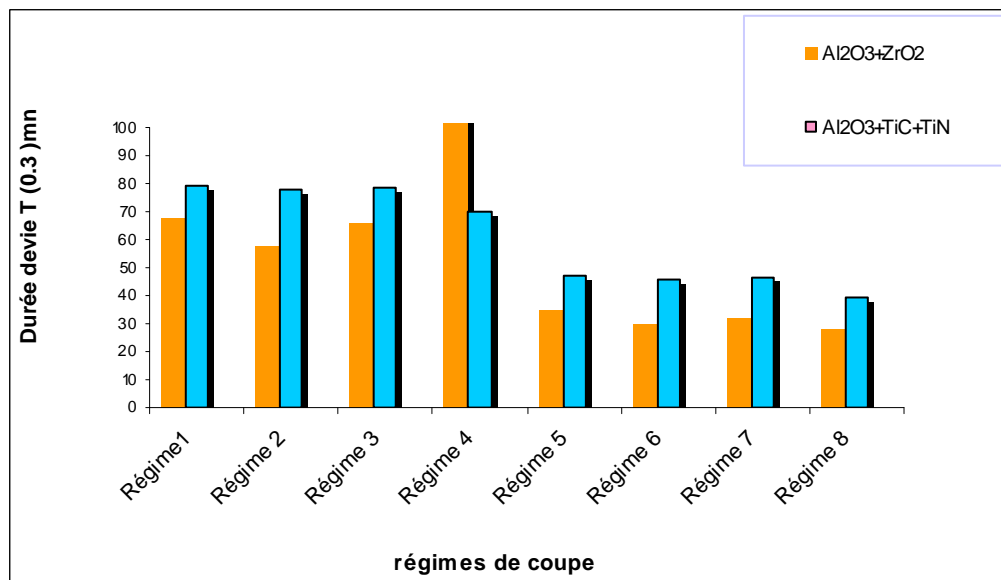


Fig. 3.14. Durées de vie T (0.3) en fonction des régimes de coupe lors de l'usinage de l'acier 30CD12

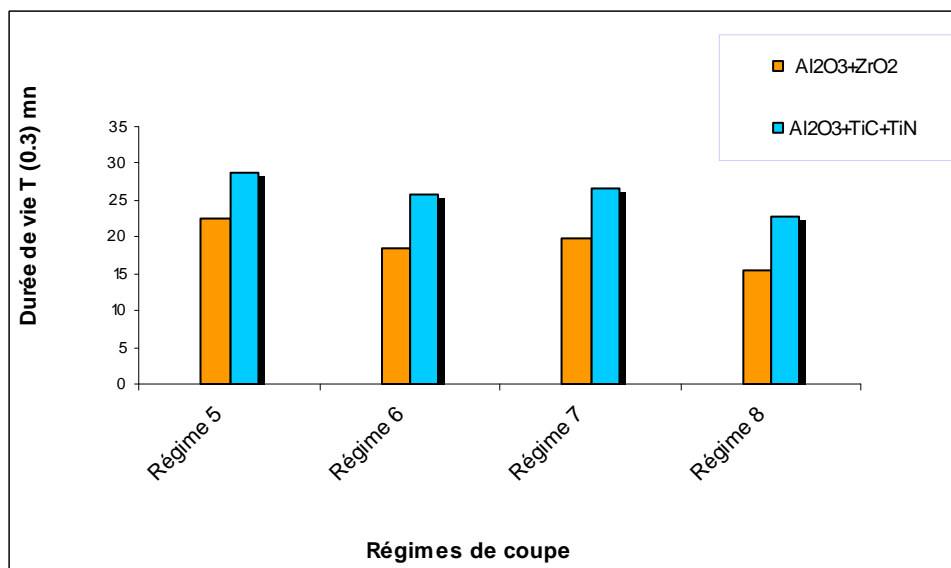


Fig. 3.15. Durées de vie T (0.3) en fonction des régimes de coupe lors de l'usinage de l'acier 30CD12 trempé

Tableau 3.3 Tenue au travail des céramiques $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$ et $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC} + \text{TiN}$ en fonction de 8 régimes de coupe lors de l'usinage de l'acier XC45

Essai N°	Valeurs réelles			$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC} + \text{TiN}$
	a_p (mm)	f (mm/tr)	v_c (m/mn)	T (mn)	T (mn)
01	0.5	0.11	200	58.	66.48
02	1.0	0.11	200	56.5	57.2
03	0.5	0.22	200	53.5	55.50
04	1.0	0.22	200	49.5	49.75
05	0.5	0.11	400	16.25	22.82
06	1.0	0.11	400	15.16	20.3
07	0.5	0.22	400	13.6	19.50
08	1.0	0.22	400	12.5	16.37

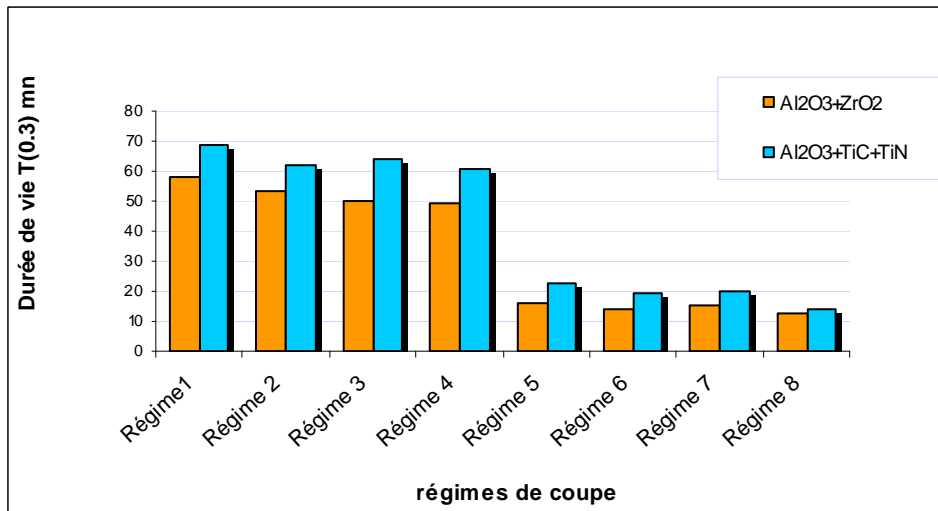


Fig. 3.16. Durées de vie T (0.3) en fonction des régimes de coupe lors de l'usinage de l'acier XC45

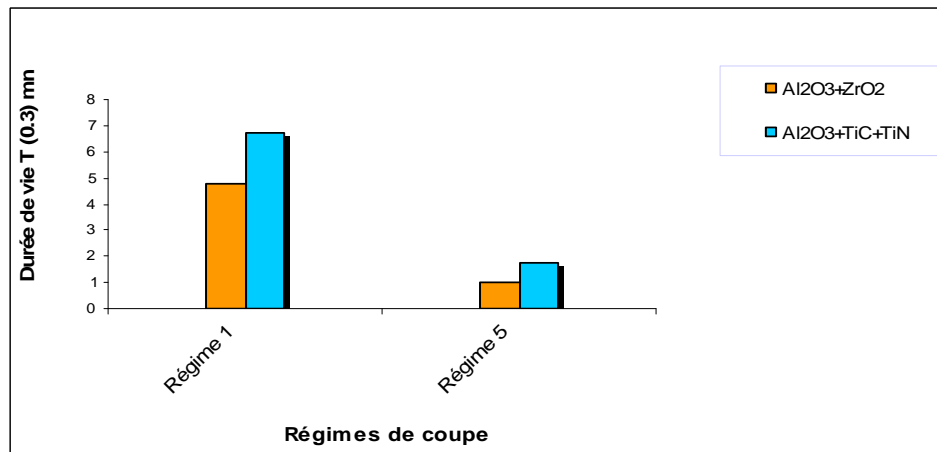


Fig. 3.17. Durées de vie T (0.3) en fonction des régimes de coupe lors de l'usinage de l'acier XC45 trempé

3.1.2.4 Modèles mathématiques des tenues au travail.

un programme en turbo pascal donne directement les valeurs des exposants et des constantes du modèle de TAYLOR ainsi que les coefficients de corrélation globaux (R) .

Les modèles de TAYLOR pour chaque matériau de coupe sont présentés sous la forme suivante :

Matériaux usinés	Nuances d'outils céramiques	Modèles de tenue T(mn)	Coefficient de corrélation R
Acier 30CD12	Céramique Al ₂ O ₃	$V T^{0.55} = 2367.65$	R=.0.997
	Céramique Al ₂ O ₃ + ZrO ₂	$V T^{0.62} = 9253.93$	R=.0.996
	Céramique Al ₂ O ₃ + TiC	$V T^{0.61} = 4248.05$	R=.0.995
	Céramique Al ₂ O ₃ + TiC+ TiN	$V T^{0.72} = 5698.40$	R=.0.997

3.1.2.5 Analyse des modèles mathématiques des tenues au travail;

Les modèles mathématiques de Taylor pour chaque nuance de céramique face à l'acier 30CD12 montrent la relation entre la vitesse de coupe et la durée de vie des différentes nuances de céramique, la vitesse de coupe a une influence capitale sur la durée de vie des plaquettes, plus on augmente la vitesse de coupe plus la tenue des plaquettes diminue.

En utilisant la méthode multifactorielle, les résultats du chariotage avec les deux nuances de céramiques Al₂O₃+ZrO₂ et Al₂O₃+TiC+TiN face aux deux nuances d'acier 30CD12 et XC45, montrent clairement un meilleur comportement à l'usure de la céramique (Al₂O₃+TiC+TiN) par rapport à la céramique (Al₂O₃+ZrO₂),.

3.1.3 Résultats des essais de rugosité

En plus des deux nuances de céramique testé sur les aciers 30CD12 et XC45, nous avons testé une troisième matière à usiner fonte GG25 et une troisième nuance de céramique (Al₂O₃ + TiC). Les résultats de ces tests sont consignés dans les tableaux (3.56 à 3.58) ces résultats ont été obtenus avec différents régimes de coupe correspondant

Tableau 3.4 Valeurs des rugosités pour l'acier 30CD12

N° régime	Régimes de coupe				Al ₂ O ₃ + TiC	Al ₂ O ₃ + TiC+ TiN
	a _p (mm)	f (mm/tr)	v _c (m/mn)	Ra (μm)	Ra (μm)	Ra (μm)
01	0.5	0.11	200	1.00	0.75	0.60
02	0.5	0.22	200	1.60	1.25	1.15
03	1.0	0.11	200	1.15	0.85	0.75
04	1.0	0.22	200	1.75	1.30	1.25
05	0.5	0.11	400	0.80	0.65	0.55
06	0.5	0.22	400	1.45	1.05	0.95
07	1.0	0.11	400	0.65	0.70	0.55
08	1.0	0.22	400	1.55	1.15	1.05

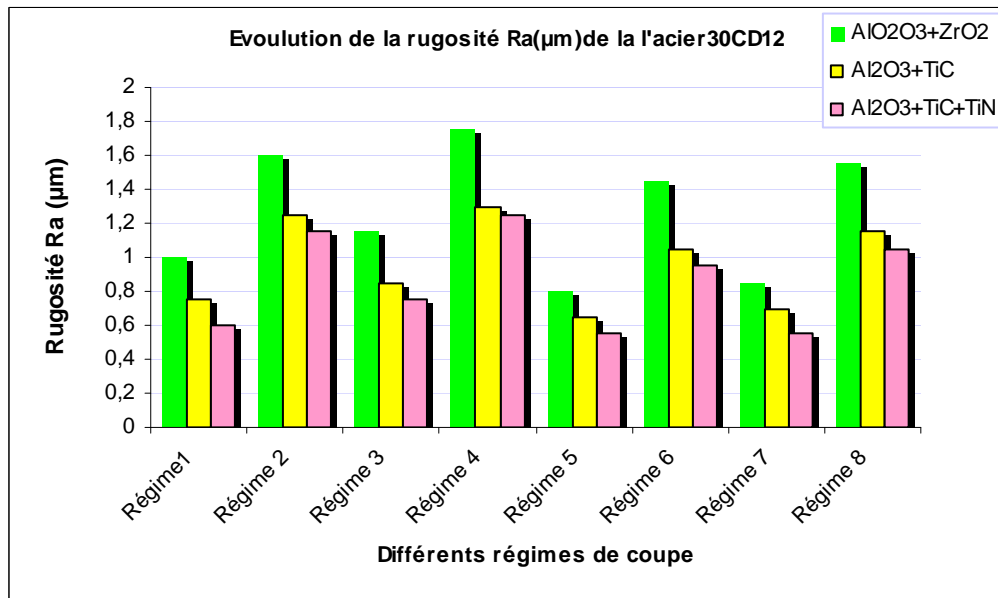


Fig.3.18.Histogramme des rugosités Ra (μm) obtenus avec différentes nuances de céramiques de coupe et différents régimes de coupe sur l'acier 30CD12

Tableau 3.5 Valeurs des rugosités pour l'acier XC45

N° régime	Régime de coupe			Al ₂ O ₃ + ZrO ₂	Al ₂ O ₃ + TiC	Al ₂ O ₃ + TiC+ TiN
	a _p (mm)	f(mm/tr)	v _c (m/mn)	Ra (μm)	Ra (μm)	Ra (μm)
01	0.5	0.11	200	1.00	0.75	0.60
02	0.5	0.22	200	1.70	1.35	1.30
03	1.0	0.11	200	1.10	0.85	0.80
04	1.0	0.22	200	1.80	1.50	1.45
05	0.5	0.11	400	0.80	0.50	0.45
06	0.5	0.22	400	1.50	1.20	1.0
07	1.0	0.11	400	0.60	0.60	0.55
08	1.0	0.22	400	1.60	1.30	1.10

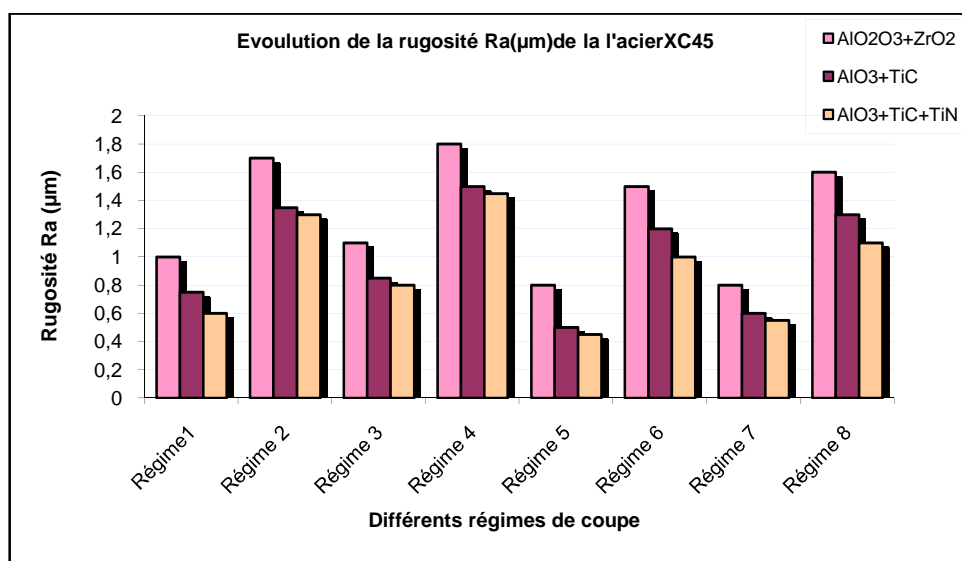


Fig.3.19 Histogramme des rugosités Ra (μm) obtenus avec différentes nuances de céramiques de coupe et différents régimes de coupe sur l'acier XC45

Tableau 3.6 Valeurs des rugosités pour la Fonte GG25

N° régime	Régime de coupe			Al ₂ O ₃ + ZrO ₂	Al ₂ O ₃ + TiC	Al ₂ O ₃ + TiC+ TiN
	a _p (mm)	f(mm/tr)	v _c (m/mn)	Ra (µm)	Ra (µm)	Ra (µm)
01	0.5	0.11	200	1.10	0.80	0.75
02	0.5	0.22	200	1.20	1.00	0.95
03	1.0	0.11	200	1.15	0.90	0.85
04	1.0	0.22	200	1.25	1.15	1.10
05	0.5	0.11	400	0.85	0.65	0.55
06	0.5	0.22	400	0.95	0.95	0.85
07	1.0	0.11	400	0.90	0.75	0.65
08	1.0	0.22	400	1.00	1.10	1.05

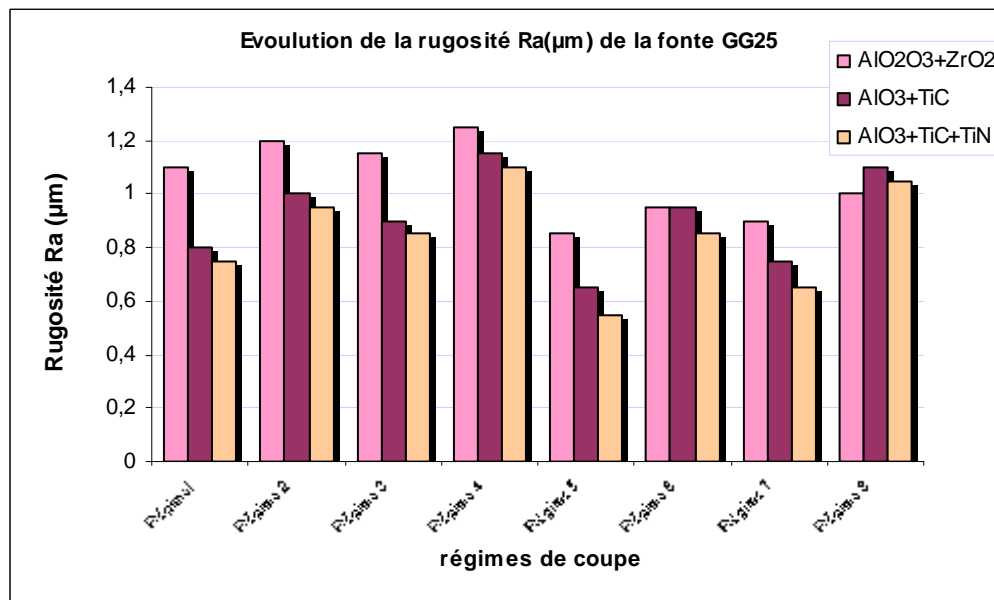


Fig. 3.20. .Histogramme des rugosités Ra (µm) obtenus avec différentes nuances de céramiques de coupe et différents régimes de coupe sur la fonte GG25

3.1.3.1 Analyse de l'évolution du critère d'état de surface Ra

D'après les résultats des états de surface obtenus lors du tournage des trois nuances de matière (30CD12, XC45, GG25), avec les nuances de céramiques (Al₂O₃+ZrO₂, Al₂O₃+TiC, Al₂O₃+TiC+TiN), on a remarqué que les céramiques (Al₂O₃+TiC, Al₂O₃+TiC+TiN) présentent une bonne état de surface que la céramique Al₂O₃+ZrO₂.

Cela peut être partiellement expliqué par l'influence des facteurs suivants :

- La haute rigidité et la tenue exceptionnelle des arêtes de coupe des céramiques mixtes (Al₂O₃+TiC, Al₂O₃+TiC+TiN), figurent parmi les facteurs qui garantissent des surfaces de très bonnes qualités.

3.1.3.2 Modèles mathématiques des rugosités:

Un programme en turbo pascal donne directement les valeurs des constantes (c1, α1, β1, γ1), et le coefficient de corrélation global (R).

Les modèles mathématiques représentant la relation entre la rugosité et les paramètres de régime de coupe (V_c ; f ; a_p) en fonction des matériaux usinés et nuances d'outils céramiques sont de la forme :

Tableau 3.7 modèles mathématiques des rugosités

Matériaux usinés	Nuances d'outils céramiques	Modèles de rugosité Ra	Coefficient de corrélation R
Acier 30CD12	$Al_2O_3 + ZrO_2$	$Ra = e^{3.827} f^{0.752} a_p^{0.120} v^{-0.300}$	R=0.939
	$Al_2O_3 + TiC$	$Ra = e^{3.112} f^{0.690} a_p^{0.119} v^{-0.323}$	R=0.998
	$Al_2O_3 + TiC + TiN$	$Ra = e^{3.662} f^{0.848} a_p^{0.147} v^{-0.389}$	R=0.999
Acier xc45	$Al_2O_3 + ZrO_2$	$Ra = e^{4.105} f^{0.846} a_p^{0.078} v^{-0.400}$	R=0.977
	$Al_2O_3 + TiC$	$Ra = e^{5.000} f^{0.988} a_p^{0.154} v^{-0.550}$	R=0.969
	$Al_2O_3 + TiC + TiN$	$Ra = e^{6.854} f^{0.951} a_p^{0.169} v^{-0.726}$	R=0.98
Fonte GG25	$Al_2O_3 + ZrO_2$	$Ra = e^{3.137} f^{0.141} a_p^{0.070} v^{-0.489}$	R=0.989
	$Al_2O_3 + TiC$	$Ra = e^{2.991} f^{0.608} a_p^{0.236} v^{-0.376}$	R=0.931
	$Al_2O_3 + TiC + TiN$	$Ra = e^{2.210} f^{0.444} a_p^{0.197} v^{-0.246}$	R=0.970

3.1.3.3 Analyse des modèles de rugosité :

L'analyse des différents modèles de la rugosité, montre clairement que l'augmentation de chacun des facteurs (f) et (a_p) contribue à l'élévation de la valeur de la rugosité, alors que la vitesse influe dans le sens contraire.

Le classement des exposants, en valeur absolue, traduit l'ordre et le degré d'influence de chaque élément (v , f , a_p) sur la rugosité, par conséquent l'influence majeure est réservée à l'avance, suivi par celui de la vitesse de coupe et en dernier lieu par celui de la profondeur de passe.

Les coefficients de corrélation de ces modèles, varient entre [0.93- 0.99] et par conséquent ils sont adéquats.

Conclusion:

Les résultats des essais d'usure ont montré que, chaque nuance de céramique présente des particularités de comportement à l'usure qui sont principalement fonction de la composition chimique et de la structure, ainsi que des caractéristiques du matériau usiné, par conséquent on peut classer ces nuances de céramiques selon le meilleur comportement à l'usure face aux aciers (30CD12, XC45) testés.

- 1. $Al_2O_3 + TiC + TiN$
- 2. $Al_2O_3 + TiC$
- 3. $Al_2O_3 + ZrO_2$
- 4. Al_2O_3

On observant l'influence des paramètres de régime de coupe on peut conclure que la vitesse de coupe est le facteur principal provoquant l'usure.

Les résultats des essais des deux nuances (30CD12, XC45) trempés montrent que la tenue des arêtes céramiques diminue avec l'augmentation de la dureté de la pièce et même dans ce cas

la meilleure résistance à l'usure à été observée par la nuance $Al_2O_3+TiC+TiN$, suivie par la nuance $Al_2O_3+ZrO_2$

En ce qui concerne les résultats des essais de rugosité on peut dire que la tenue exceptionnelle des arêtes de coupe des céramiques mixtes (Al_2O_3+TiC , $Al_2O_3+TiC+TiN$), rend ce genre de plaquette de coupe particulièrement appropriée aux travaux de finition.

Aux vue des opérations de tournage des aciers et des fontes réalisées, on a obtenu des qualités de surfaces comparables à celles des opérations de rectification, par conséquence avec l'utilisation de ces nuances de céramique on peut éliminer définitivement l'opération ultérieures de rectification

En prenant en considération le critère de rugosité, les meilleures performances sont données dans l'ordre suivant :

- 1. $Al_2O_3+TiC+TiN$
- 2. Al_2O_3+TiC
- 3. $Al_2O_3+ZrO_2$
- 4. Al_2O_3

3.2. Résultats des essais d'usure de l'outil en carbure P35 et de la rugosité des surfaces de la pièce en acier 30CD12

Dans cette partie, un seul type d'acier 30CD12, qui a été utilisé pour la réalisation des expériences sous la forme de rondins (au nombre de 8) de même diamètre $\varnothing = 73$ mm. Ils a été sélectionné pour disponibilité et aussi pour son utilisations multiples dans le domaine industriel. L'usure admissible retenue est $[VB_0] = 0.3$ mm. (**Norme ISO3685**)

Les valeurs limites des régimes de coupe utilisées sont :

Paramètres de coupe	Valeurs limites
Vitesse de coupe V_c (m/mn)	95-264
Avance de coupe f (mm/tr)	0,08-0.16
Profondeur de passe a_p (mm)	0,5-1,00

3.2.1 Résultats des essais de l'usure et de la rugosité : Voir Annexe 3

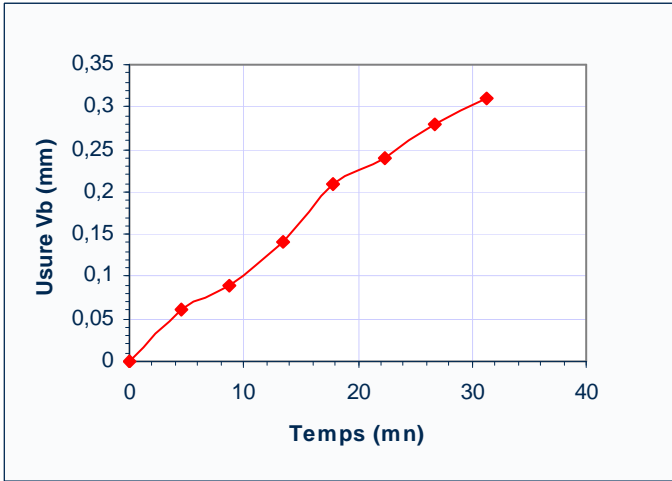
Les essais de l'usure et de la rugosité lors de l'usinage de l'acier 30CD12 ont été effectués avec un seul matériau de coupe (carbure P35).

Les essais ont été menés conformément à la méthode multifactorielle, le suivi de l'usure a été réalisé au moyen d'un microscope optique et le suivi de la rugosité a été réalisé au moyen d'un rugosimètre, les résultats sont donnés sur les tableaux (3.59 à 3.66)

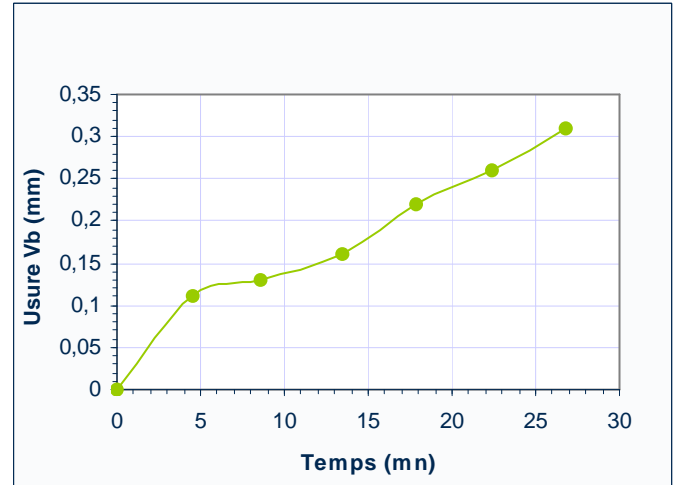
Le suivi de l'évolution de l'usure a été effectué pour l'usure en dépouille (VB) des plaquettes en carbure P35 élaboré à SERIANA.

3.2.2 Traitement des résultats de l'usure des outils en carbures

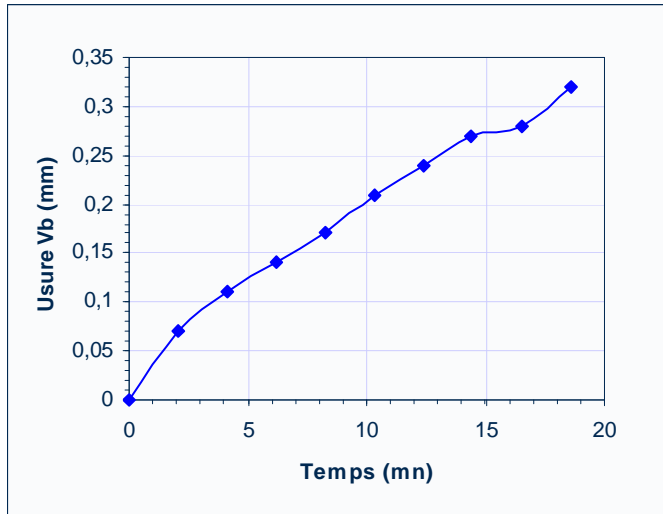
3.2.2.1- Evolutions des usures VB des plaquettes P35 en fonction du temps :



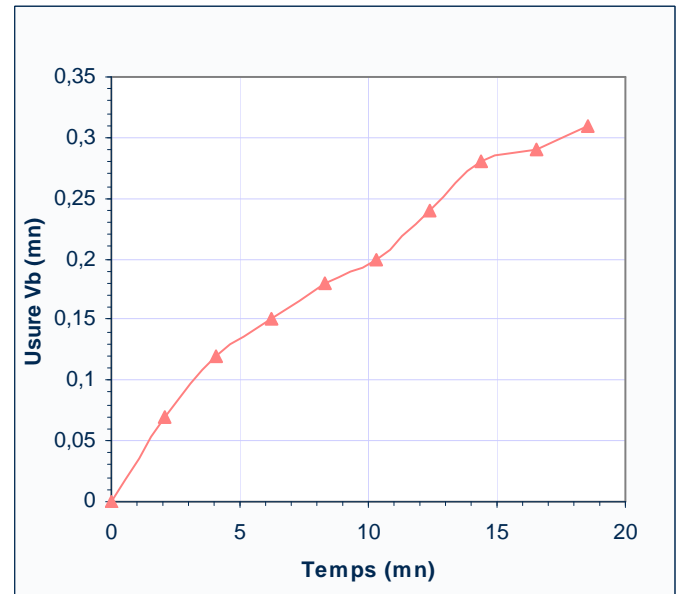
a- Régime ($V_c= 95 \text{ m/mn}; f=0,08 \text{ mm/tr}; a_p=0,5 \text{ mm}$)



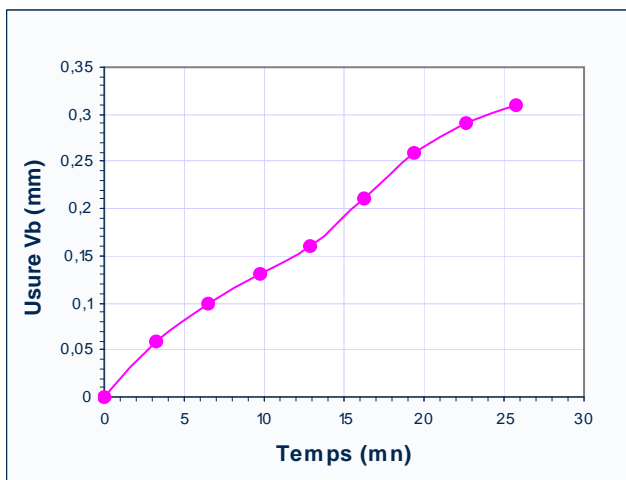
b-Régime ($V_c= 95 \text{ m/mn}; f=0,08 \text{ mm/tr}; a_p=1 \text{ mm}$)



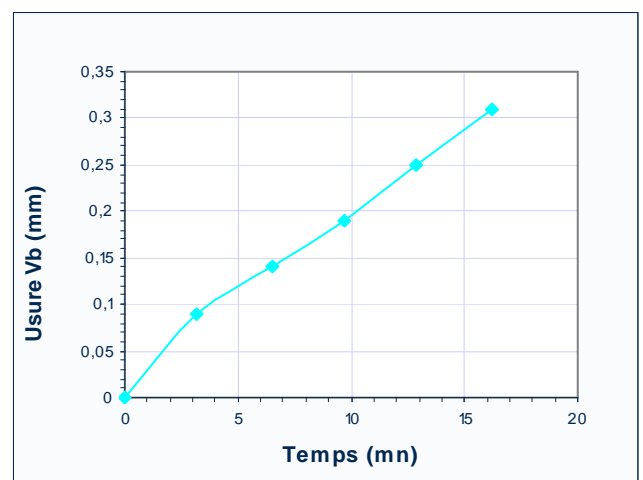
c. Régime ($V_c= 95 \text{ m/mn}; f=0,16 \text{ mm/tr}; a_p=0.5 \text{ mm}$)



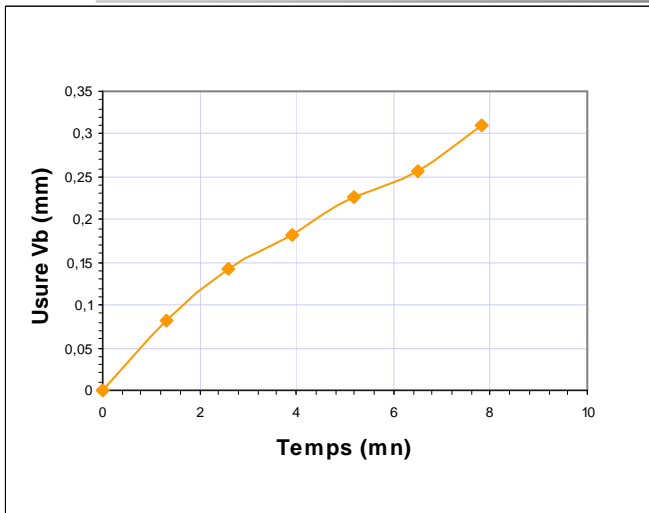
d. Régime ($V_c= 95\text{m/mn}; f=0,16\text{mm/tr}; a_p=1 \text{ mm}$)



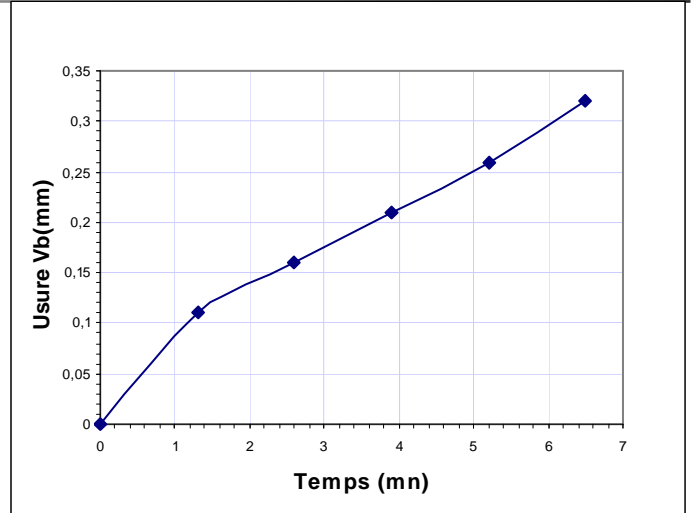
e. Régime ($V_c= 264 \text{ m/mn}; f=0,08\text{mm/tr}; a_p=0.5 \text{ mm}$)



f. Régime ($V_c= 264 \text{ m/mn}; f=0,08\text{mm/tr}; a_p=1 \text{ mm}$)



g. Régime ($V_c=264$ m/mn; $f=0,16$ mm/tr; $a_p=0.5$ mm)



h. Régime ($V_c=264$ m/mn; $f=0,16$ mm/tr; $a_p=1$ mm)

Fig. 3.21 Courbes d'usure VB de l'outil en carbure P35Ebauche en acier 30CD12 avec 8 régimes différents

3.2.2.2 Analyse de l'évolution de l'usure

L'analyse de ces courbes montre que leur allure générale obéit à la loi universelle de l'usure, celle-ci se caractérise par trois (03) zones principales.

La première zone est celle de l'usure initiale ou de rodage. C'est une usure intensive Elle s'explique par l'élimination des aspérités au niveau de l'arête de coupe ou de ses abords.

La deuxième, celle de l'usure dite normale. Ici l'usure évolue plus lentement et devient plus ou moins linéaire. Il y a une forte résistance à l'usure ce qui fait monter la température au contact de l'outil avec la pièce et avec le copeau ; on entre, alors, dans la troisième zone.

C'est celle de l'usure accélérée ou catastrophique. L'usure s'accélère par abrasion et par diffusion. L'outil perd ses qualités de coupe et devient inutilisable.

3.2.2.3 - Analyse des résultats de durée de vie obtenus par différents régime de coupe :

Tableau 3.8 Tenue à l'usure T (0.3) et rugosité Ra pour différents régimes de coupe

régime	a_p (mm)	f (mm/tr)	V_c (m/mn)	T(0.3) mn	Ra (μ m)
1	0.5	0.08	95	30.0	4.6
2	1.0	0.08	95	25.8	3.8
3	0.5	0.16	95	17.8	3.75
4	1.0	0.16	95	17.5	4.2
5	0.5	0.08	264	24	3.9
6	1.0	0.08	264	16	3.35
7	0.5	0.16	264	7.5	4.3
8	1.0	0.16	264	6	4.6

3.2.2.4 - Histogramme des durées de vie obtenue par différents régimes de coupe pour P35 sur l'acier 30CD12

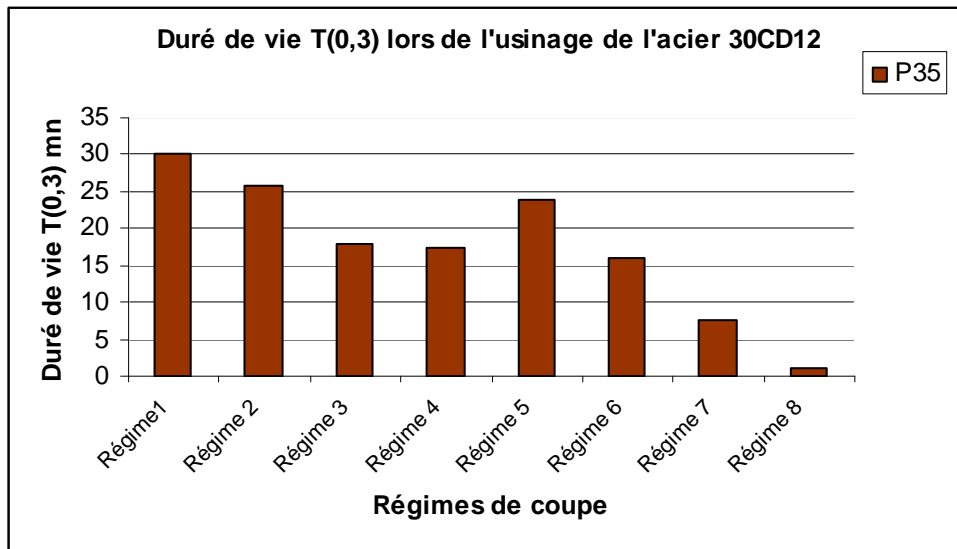


Fig. 3.22 durées de vie de l'outil P35 en fonction Des différents régimes de coupe

L'analyse comparée des valeurs moyennes des courbes d'usure, ci-dessus, tracées de la plaquette P35, nous indique (Figure 3.2-2) ci-dessous la meilleure combinaison possible des éléments du régime de coupe, celle qui donne à l'usure la valeur la plus proche de la valeur ciblée soit $(V_{b0})=0.3\text{mm}$.

3.2.2.5 - Histogramme des rugosités Ra (μm) obtenus avec carbure P35 aux différents régimes de coupe sur l'acier 30CD12

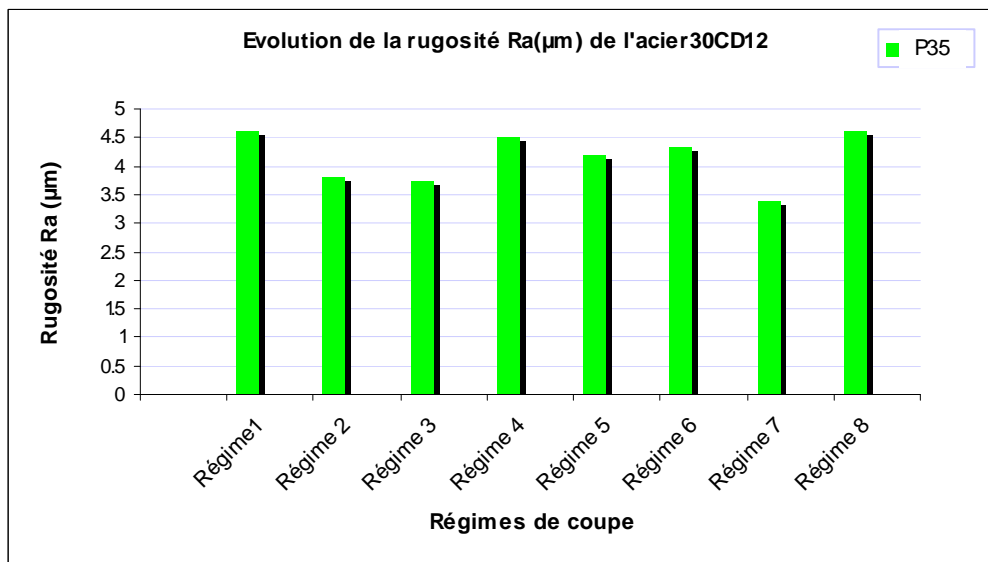
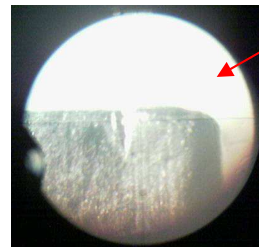
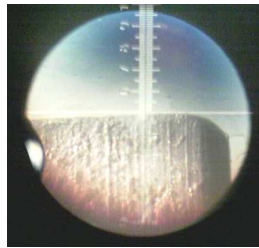


Fig. 3.23 évolution de la rugosité Ra en fonction des régimes de coupe pour l'acier 30CD12
La rugosité (Ra) est influencée par les éléments du régime de coupe et, en particulier, par les différentes formes que prend la plaquette des suites de son usure .C'est ce qu'expriment la figure 3.23 ci-dessous, qui traduis les résultats des tableaux (3.21 à 3.28).

La figure 3.2-4 présente les différentes formes et faciès d'usure en surface de dépouille pour le P35 lors de l'usinage de l'acier 30CD12 selon les combinaisons des éléments du régime de coupe. Nous constatons qu'à l'état initial la plaquette ne présente pas un bon état de surface

(plaquette non revêtue) ce qui provoque un frottement important du copeau sur la surface d'attaque de l'outil en début d'usinage.

- La plaquette non revêtue présente une augmentation de la rugosité aux grandes vitesses, à cause de son faible comportement à l'usure.

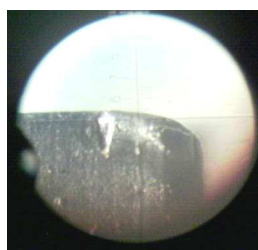


Plaquette à l'état neuf

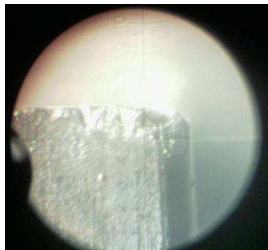
Plaquette P35 à l'état initial.



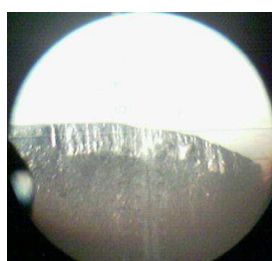
$V_c=95\text{m/mn}, a=0.08\text{mm/tr}, p=0.5\text{mm},$
 $T_u=31.29, V_b=0.305$



$V_c=95\text{m/mn}, a=0.08\text{mm/tr}, p=1\text{mm},$
 $T_u=26.83, V_b=0.31$



$V_c=95\text{m/mn}, a=0.08\text{mm/tr}, p=1\text{mm}$
 $T_u=26.79, V_b=0.30$



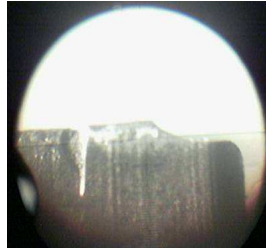
$V_c=95\text{m/mn}, a=0.18\text{mm/tr}, p=1\text{mm}$
 $T_u=18.53, V_b=0.31$



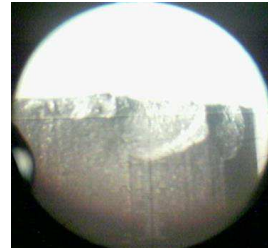
$V_c=95\text{m/mn}, a=0.18\text{mm/tr}, p=1\text{mm}$
 $T_u=18.46, V_b=0.32$



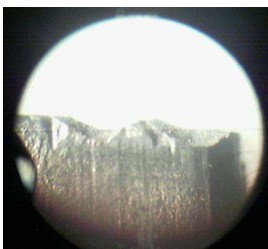
$V_c=264\text{m/mn}, a=0.08\text{mm/tr}, p=1\text{mm}$
 $T_u=16.19, V_b=0.31$



$V_c=264\text{m/mn}, a=0.08\text{mm/tr}, p=1\text{mm}$
 $T_u=16.18, V_b=0.305$



$V_c=264\text{m/mn}, a=0.18\text{mm/tr}, p=0.5\text{mm}$
 $T_u=7.86, V_b=0.32$



$V_c=264\text{m/mn}, a=0.18\text{mm/tr}, p=0.5\text{mm}$
 $T_u=7.86, V_b=0.32$



$V_c=264\text{m/mn}, a=0.18\text{mm/tr}, p=1\text{mm}$
 $T_u=6.55, V_b=0.32$

Fig. 3.24 : Faciès d'usure en surface de dépouille de la plaquette P35 à différentes combinaisons des régimes de coupe

3.3 Calcul et modélisation des efforts de coupe

L'objectif de cette partie consiste à tester et surtout établir les graphes d'évolution des efforts par rapport aux paramètres du régime de coupe de deux types de carbures métalliques « YT15 » et « P35 », produits tous deux à ERIS / Sériana - Batna. Le carbure P 35 répond à la réf. ISO (un quadri carbure, réf. Usine identique réf. ISO), alors que le YT15 est un nouveau carbure par sa composition chimique et ses caractéristiques mécaniques, sa réf. est propre à l'Unité ERIS-Sériana. Les données de ces matériaux seront développées ultérieurement.

On étudie le degré d'influence des paramètres du régime de coupe à savoir : vitesse, avance et profondeur de passe, sur les efforts de coupe, on établira les modèles mathématiques des efforts et l'élaboration d'un logiciel de calcul.

En utilisant la méthode de planification des expériences avec trois facteurs d'entrée et deux niveaux de variation, le nombre d'essais est : $N = 2^3 = 8$ essais

Tableau 3.9 Matrice de planification des essais

N°	Facteur Xi				Réponse Yi
	X0	X1	X2	X3	
1	+1	-1	-1	-1	
2	+1	+1	-1	-1	
3	+1	-1	+1	-1	
4	+1	+1	+1	-1	
5	+1	-1	-1	+1	
6	+1	+1	-1	+1	
7	+1	-1	+1	+1	
8	+1	+1	+1	+1	

Tableau 3.10 valeurs limites (V_c , f , a_p)

	V_c (m/min)	f (mm/min)	a_p (mm)
Mini	70	0.08	0.5
Maxi	220	0.2	2

3.3.1 Résultats expérimentaux :

La procédure expérimentale du plan d'expérience et les moyens mis en place nous ont permis d'avoir deux types de lecture des valeurs des efforts :

- Valeurs lues sur cadran de l'amplificateur,
- Valeurs obtenues dans le tableau transmis à l'ordinateur au moyen d'un logiciel.

3.3.2 Mesure des efforts de coupe obtenus par lecture directe :

Tableau 3.11 Résultat de mesure des composantes de l'effort de coupe du carbure **YT15**

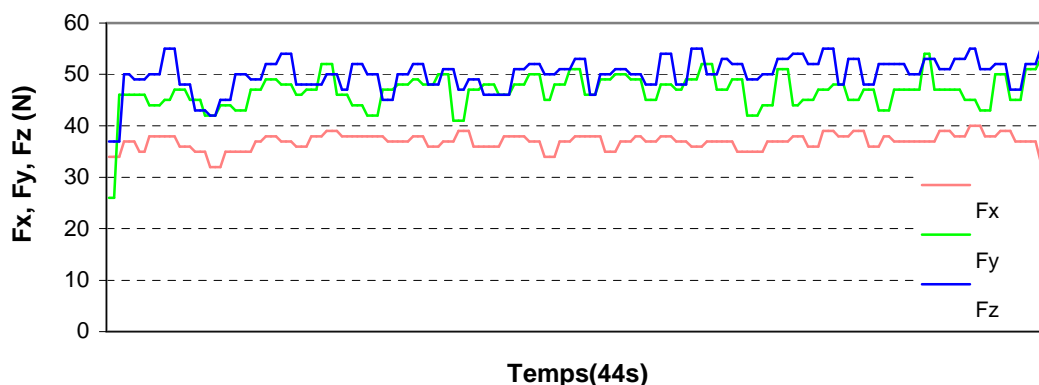
N° Régime	Vc(m/min)	f(mm/tr)	a_p(mm)	F_x(N)	F_y(N)	F_z(N)
1	70	0.08	0.5	37	47	50
				38	45	52
				39	46	50
2	220	0.08	0.5	43	60	65
				45	59	60
				44	58	63
3	70	0.20	0.5	87	89	100
				90	99	95
				85	88	90
4	220	0.20	0.5	89	80	85
				88	85	84
				85	84	86
5	70	0.08	2	160	145	300
				155	150	290
				162	150	285
6	220	0.08	2	160	100	315
				155	95	310
				154	99	300
7	70	0.20	2	288	220	458
				310	215	410
				300	210	480
8	220	0.20	2	290	205	350
				310	210	370
				300	207	380

Tableau 3.12 Résultat de mesure des composantes de l'effort de coupe du carbure **P35**

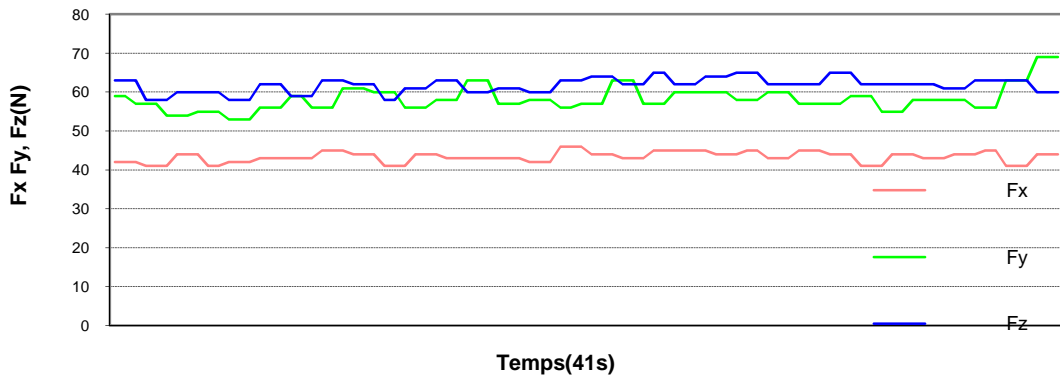
N° Régime	Vc(m/min)	f (mm/tr)	a _p (mm)	Fx(N)	Fy(N)	Fz (N)
1	70	0.08	0.5	55	60	105
				54	57	100
				50	55	99
2	220	0.08	0.5	50	60	95
				55	63	94
				53	65	90
3	70	0.20	0.5	70	80	125
				75	75	130
				73	79	120
4	220	0.20	0.5	75	95	155
				72	93	160
				75	90	153
5	70	0.08	2	180	215	405
				175	210	403
				178	210	395
6	220	0.08	2	165	189	460
				159	215	455
				162	205	450
7	70	0.20	2	325	188	555
				330	170	610
				327	155	590
8	220	0.20	2	300	245	540
				280	235	575
				305	233	580

3.3.3 Lecture des efforts de coupe sur ordinateur :

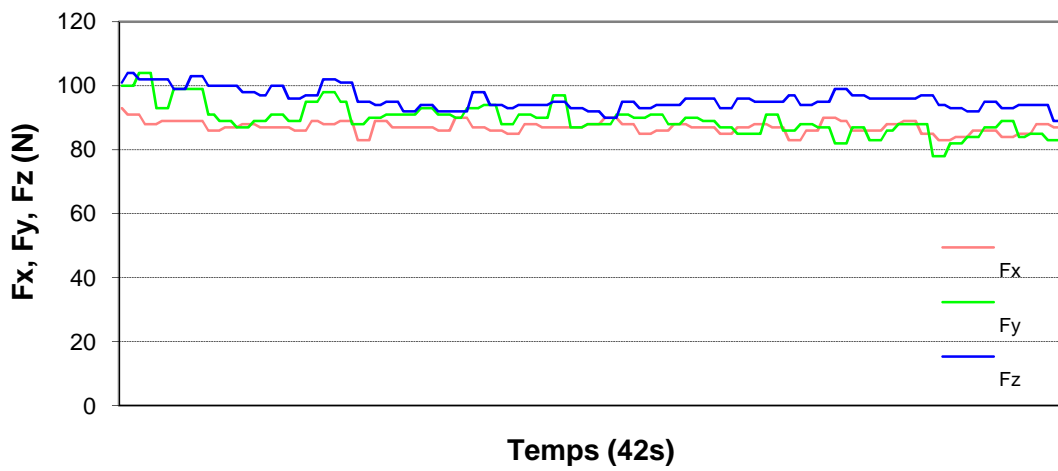
Les tableaux affichés sur ordinateur comprennent une saisie de 90 à 180 valeurs des efforts Fx, Fy et Fz dans un temps d'usinage compris entre 30 à 48 secondes. Avec ces valeurs enregistrées dans un tableau, on a reconstitué le signal transmis par les capteurs.



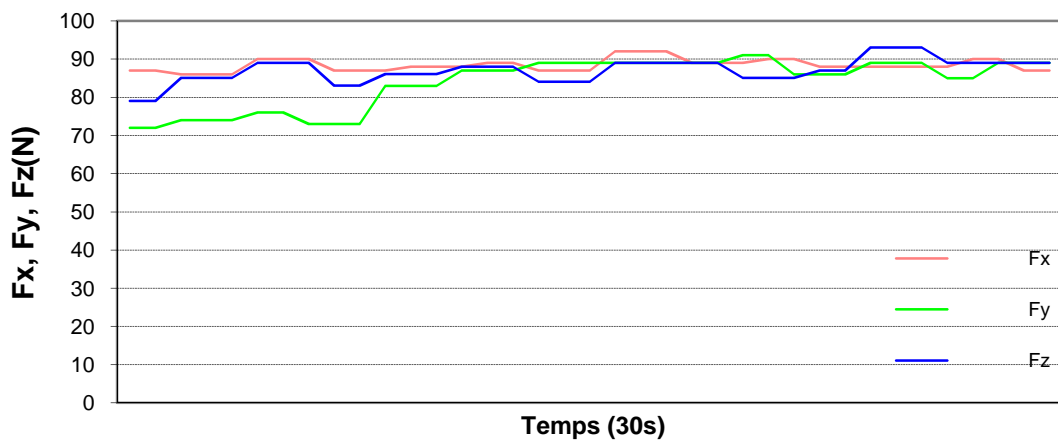
a : Signaux des efforts de coupe du carbure **YT15** obtenus avec régime 1



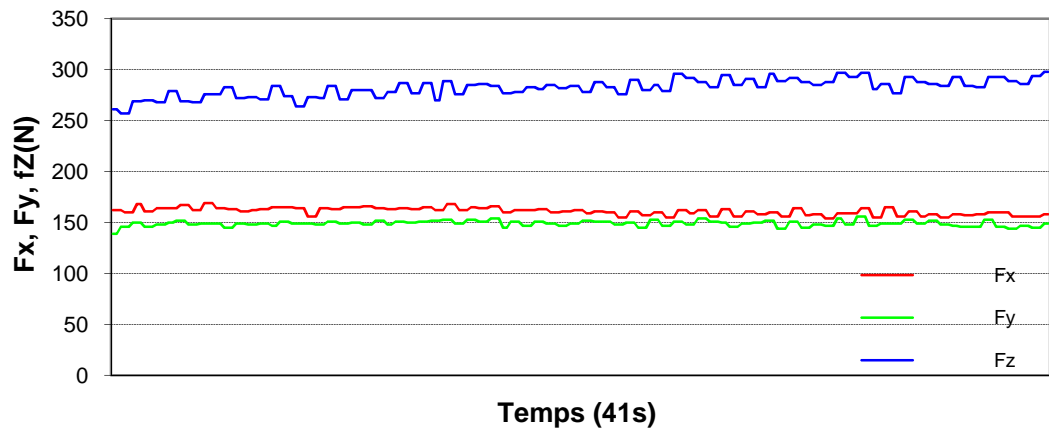
b : Signaux des efforts de coupe du carbure **YT15** obtenus avec régime 2



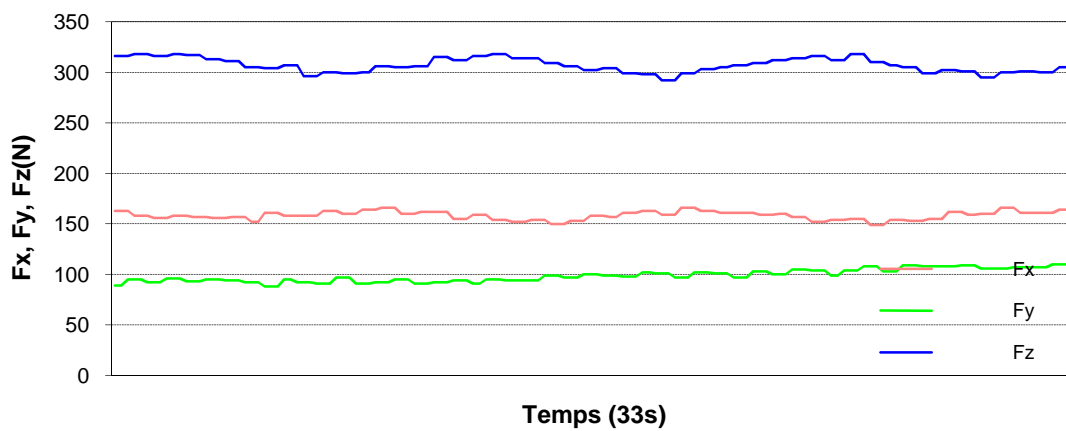
c : Signaux des efforts de coupe du carbure **YT15** obtenus avec régime 3



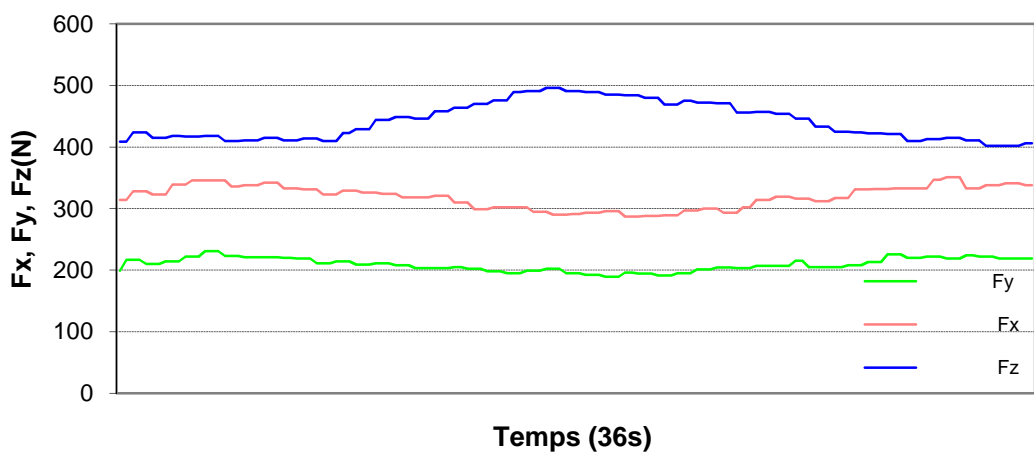
d : Signaux des efforts de coupe du carbure **YT15** obtenus avec régime 4



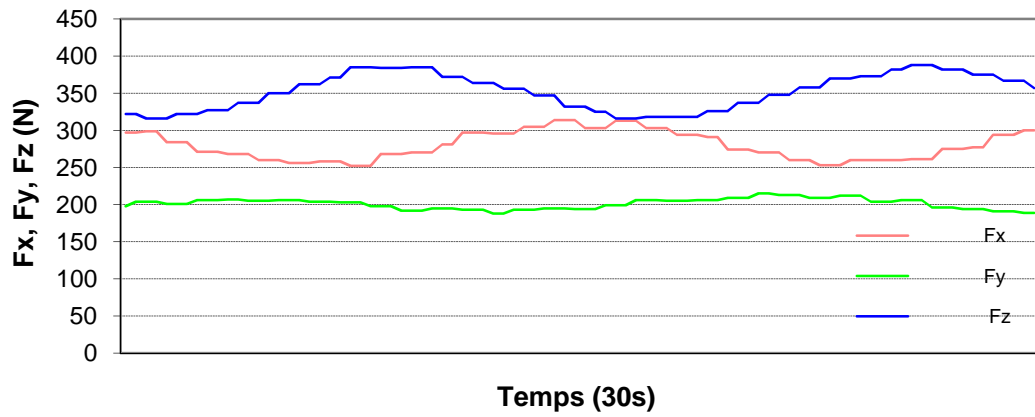
e : Signaux des efforts de coupe du carbure **YT15** obtenus avec régime 5



f : Signaux des efforts de coupe du carbure **YT15** obtenus avec régime 6

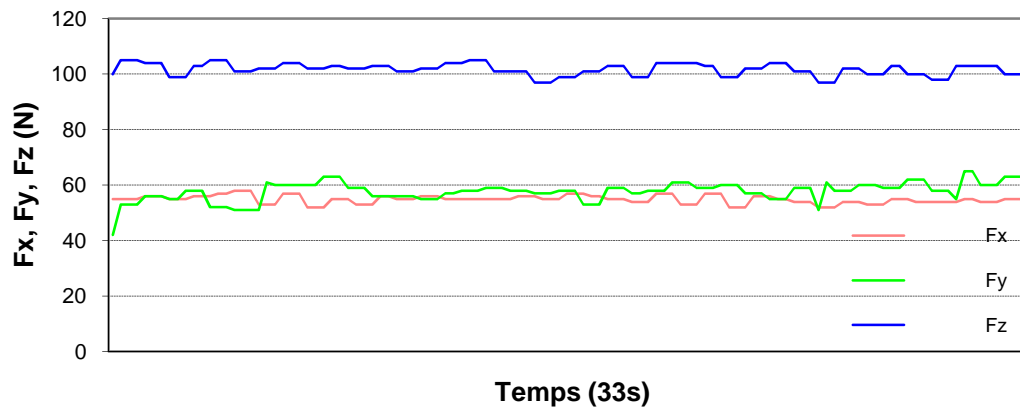


g : Signaux des efforts de coupe du carbure **YT15** obtenus avec régime 7

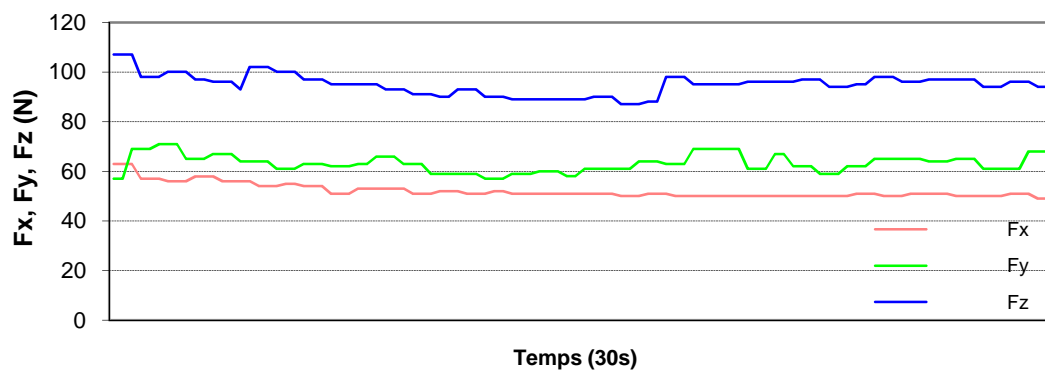


h : Signaux des efforts de coupe du carbure **YT15** obtenus avec régime 8

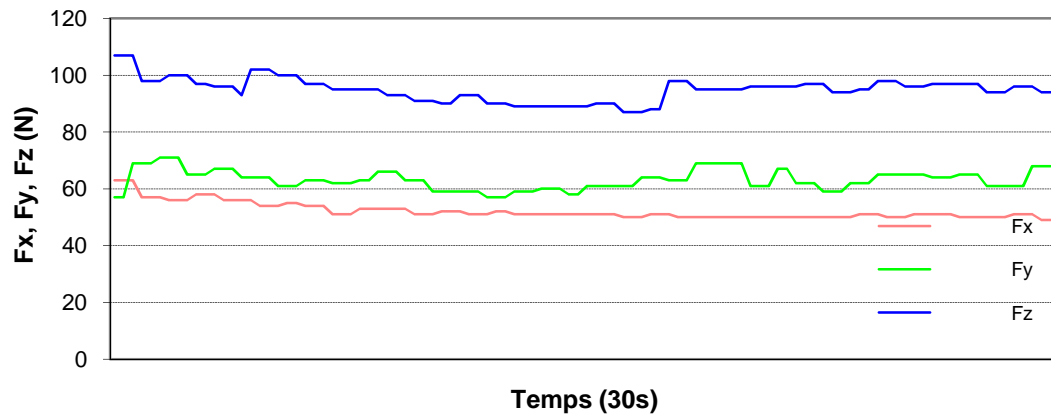
Fig. 3.25 (a,b,c,d,e,f,g,h): Signaux des efforts de coupe du carbure **YT15** obtenus avec régime 8



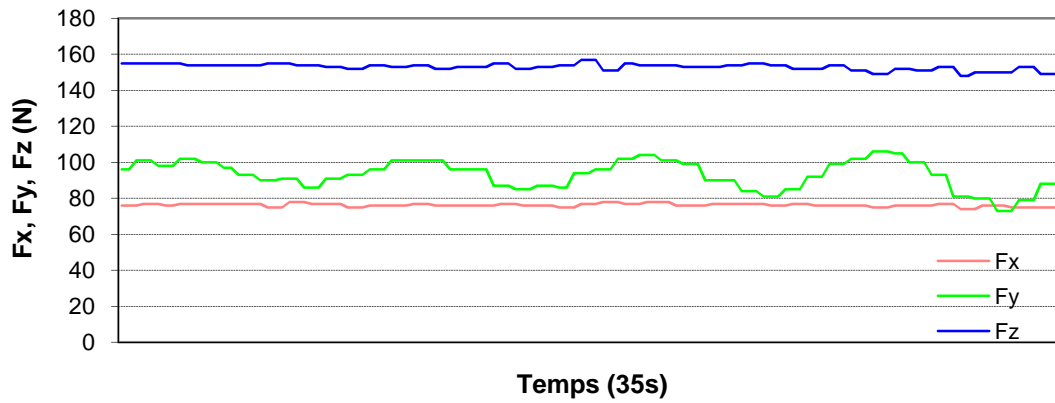
a: Signaux des efforts de coupe du carbure **P35** obtenus avec régime 1



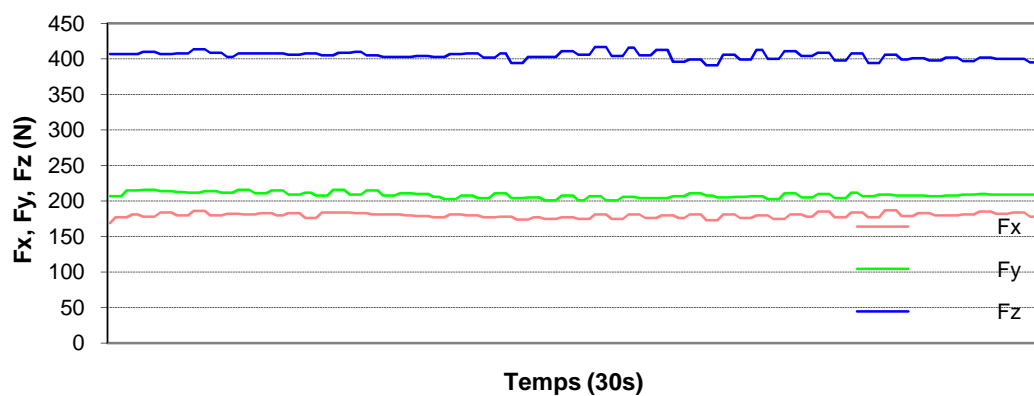
b : Signaux des efforts de coupe du carbure **P35** obtenus avec régime 2



c : Signaux des efforts de coupe du carbure P35 obtenus avec Régime 3



d : Signaux des efforts de coupe du carbure P35 obtenus avec régime 4



e : Signaux des efforts de coupe du carbure P35 obtenus avec régime 5

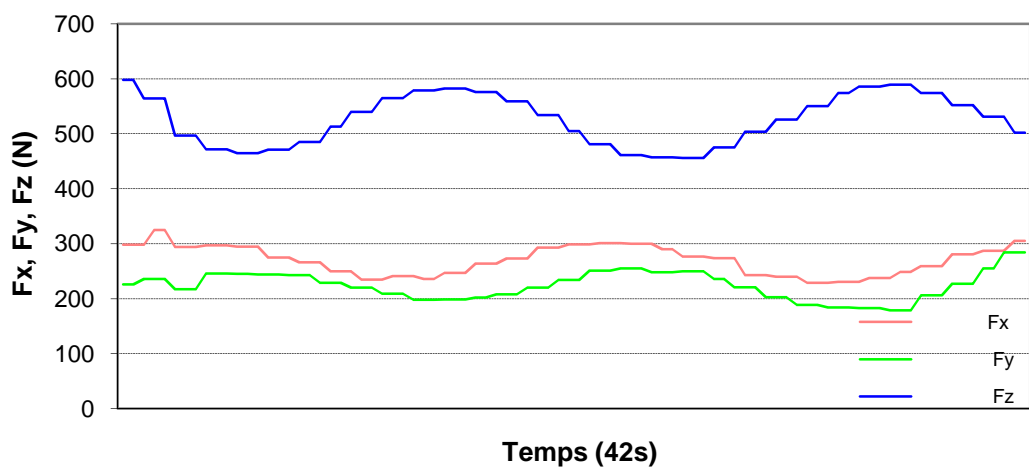
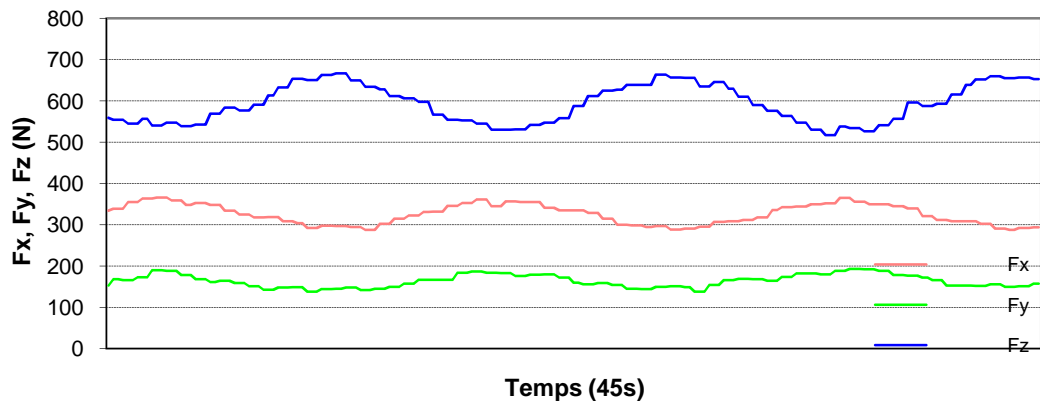
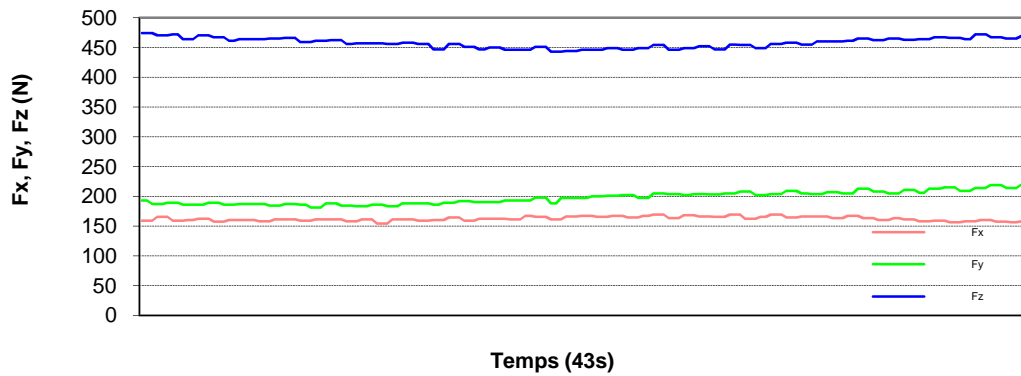


Fig. 3.26 (a, b, c, d, e, f, g, h): Signaux des efforts de coupe du carbure P35 obtenus avec 8 régimes

Détermination des valeurs moyennes des efforts de coupe et de la force résultante selon la formule suivante: $F_r = \sqrt{F_z^2 + F_y^2 + F_x^2}$

Tableau 3.13 Valeurs moyennes des composantes de l'effort et des résultantes du carbure YT15

N°	Vc(m/min)	f(mm/tr)	a _p (mm)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	Fr(N)
1	70	0.08	0.5	36.967	46.688	50.069	77.802
2	220	0.08	0.5	43.336	58.384	61.391	95.111
3	70	0.20	0.5	87.024	89.573	95.774	157.822
4	220	0.20	0.5	88.405	83.864	86.972	149.708
5	70	0.08	2	160.995	149.118	282.233	357.506
6	220	0.08	2	158.367	98.632	306.931	359.186
7	70	0.20	2	318.757	209.185	441.542	583.37
8	220	0.20	2	279.411	201.255	352.244	492.61

Tableau 3.14 Valeurs moyennes des composantes de l'effort et des résultantes du carbure P35

N°	Vc(m/min)	f(mm/tr)	a _p (mm)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	Fr(N)
1	70	0.08	0.5	54.884	57.690	101.716	129.176
2	220	0.08	0.5	52.125	63.153	94.913	126.914
3	70	0.20	0.5	72.293	78.068	121.931	169.826
4	220	0.20	0.5	76.317	93.170	153.046	194.751
5	70	0.08	2	162.075	197.531	457.589	524.093
6	220	0.08	2	325.668	164.082	593.010	696.163
7	70	0.20	2	313.590	208.606	585.227	695.949
8	220	0.20	2	270.125	223.602	525.875	632.067

3.3.4 Analyse des signaux reconstitués :

Pour YT15 : l'analyse des signaux (fig.3.25 a, b, c, d, e, f, g, h) reconstitués des efforts de coupe montre, d'une manière générale, une stabilité avec beaucoup de vibrations sauf pour les régimes f, g et h on constate une instabilité qui est due à l'augmentation de l'avance et de la profondeur en même temps.. On a enregistré des vibrations beaucoup plus importantes aux faibles conditions de coupe qui correspondent au régime 1.

Pour P35: l'analyse des signaux (fig.3.26 a, b, c, d, e, f, g, h) reconstitués des efforts de coupe montre, d'une manière générale que l'instabilité remarquée pour le YT15 est plus accentuée pour le P35 en régime g et h.

En comparant les signaux entre les 2 matériaux, on constate que le carbure P35 a montré moins de vibrations que le carbure YT15.

3.3.5 Modélisation des efforts de coupes

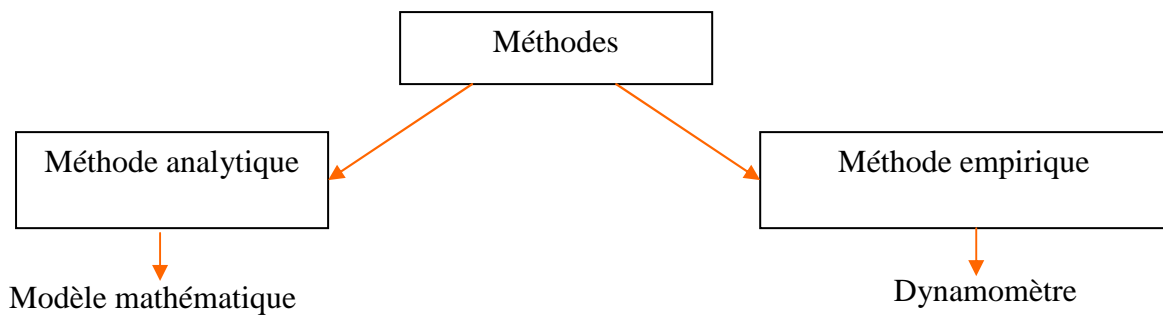


Fig. 3.27 Méthodes de détermination des efforts de coupe

Modèles mathématiques des efforts de coupes [6]:

$$F_z = C_{F_z} \cdot Vc^{X_{F_z}} \cdot f^{Y_{F_z}} \cdot a_p^{Z_{F_z}} \quad (3.3-2)$$

$$F_y = C_{F_y} \cdot Vc^{X_{F_y}} \cdot f^{Y_{F_y}} \cdot a_p^{Z_{F_y}} \quad (3.3-3)$$

$$F_x = C_{F_x} \cdot Vc^{X_{F_x}} \cdot f^{Y_{F_x}} \cdot a_p^{Z_{F_x}} \quad (3.3-4)$$

C_{F_z} , C_{F_y} , C_{F_x} : constantes liées aux conditions de coupe

X, Y, Z : exposants liés aux conditions de coupe

La forme mathématique des efforts de coupe est : $F = C \cdot Vc^x \cdot f^y \cdot a_p^z$,

Soit la forme linéaire suivante : $\ln F = \ln C + \ln Vc^x + \ln f^y + \ln a_p^z$

Autrement écrite : $Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3$

Ou Y : valeurs des composantes de l'effort de coupe (Fx, Fy, Fz, Fr)

$a_0 \dots a_3$: coefficients du modèle.

X_1 : vitesse de coupe.

X_2 : avance par tour.

X_3 : profondeur de passe.

Après établissement des matrices, la résolution est obtenue selon :

$$[Y] = [X] \times [a] \Rightarrow [a] = [X]^{-1} \times [Y]$$

Qui est validée par le coefficient de corrélation :

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Y_i - \bar{Y}_i]^2}{\sum_{i=1}^n [Y_i - \bar{Y}_i]^2}}$$

Avec :

\bar{Y}_i : résultat moyen de chaque expérience, en suivant l'ordre des expériences indiquées dans la matrice de planification des expériences.

\bar{Y}_i : résultat obtenu après la substitution des valeurs réelles de chaque paramètre dans le modèle, en suivant l'ordre des expériences indiquées dans la même matrice.

$$\bar{Y} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^n Y_i$$

Les modèles mathématiques obtenus des efforts de coupe sont présentés dans le tableau 3.15

Tableau 3.15 modèle mathématique des efforts de coupe

Matériaux testés	Effort (N)	Coeff. corrélation
carbure YT 15	$F_x = 542.8 V_c^{-0.005785} f^{0.7694} a_p^{0.9407}$	(R = 0.9961)
	$F_y = 455.1 V_c^{-0.06455} f^{0.5639} a_p^{0.615}$	(R = 0.9754)
	$F_z = 394.5561 V_c^{-0.077} f^{0.4317} a_p^{1.13}$	(R = 0.9928)
	$F_r = 692.4860 V_c^{-0.036} f^{0.5365} a_p^{0.9652}$	(R = 0.9937)
carbure P 35	$F_x = 435 V_c^{-0.06236} f^{0.4813} a_p^{0.9175}$	(R = 0.9945)
	$F_y = 94.74 V_c^{-0.1149} f^{0.158} a_p^{0.7286}$	(R = 0.9739)
	$F_z = 391.1 V_c^{-0.3553} f^{0.3226} a_p^{1.04}$	(R = 0.9952)
	$F_r = 509.1933 V_c^{-0.0281} f^{0.3294} a_p^{0.9733}$	(R = 0.9968)

Analyse des modèles mathématiques obtenus :

D'une manière générale, et pour les deux carbures YT15 et P35, la profondeur de passe influe le plus sur les efforts de coupe. Le deuxième paramètre d'influence pour les deux carbures est l'avance. La vitesse de coupe vient en 3^{ème} position comme paramètre d'influence.

-Pour le carbure YT15 :

Les paramètres a_p et f varient proportionnellement par rapport aux efforts F_x , F_y et F_z et même par rapport à la force résultante F_r , par contre le paramètre V_c varie inversement proportionnelle

aux efforts F_x , F_y et F_z . Tout de même nous enregistrons une exception pour la force F_x , où la variation a montré une certaine proportionnalité.

-Pour le carbure P35 :

Tous les paramètres V_c , f et a_p ont montré une variation proportionnelle par rapport aux efforts F_x , F_y et F_z et même F_r , sauf pour l'effort F_x où l'on a enregistré une variation proportionnellement inverse du paramètre vitesse de coupe v_c .

3.3.6 Logiciel développé pour le calcul mathématique des efforts de coupe :

Le logiciel développé permet de déterminer les modèles mathématiques des efforts de coupe (programme de calculs sous MATLAB) et leur validation à partir des valeurs mesurées expérimentalement et des valeurs limites des paramètres. En plus des modèles, le logiciel nous donne aussi les graphes d'estimation des efforts de coupe en 2D et 3D.

Saisie et présentation des modèles mathématiques à l'aide du logiciel :

Espace de modélisation

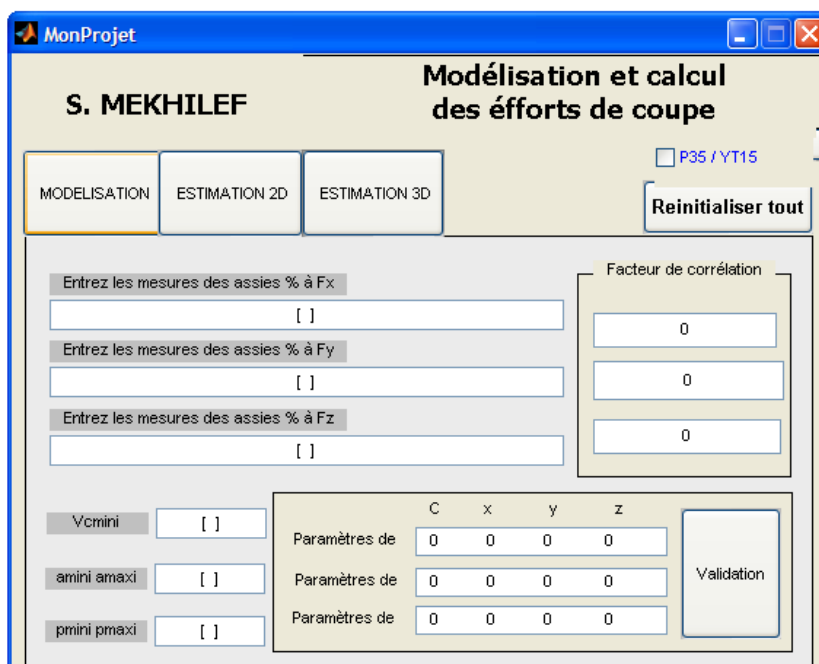


Fig. 3.28 fenêtre de modélisation

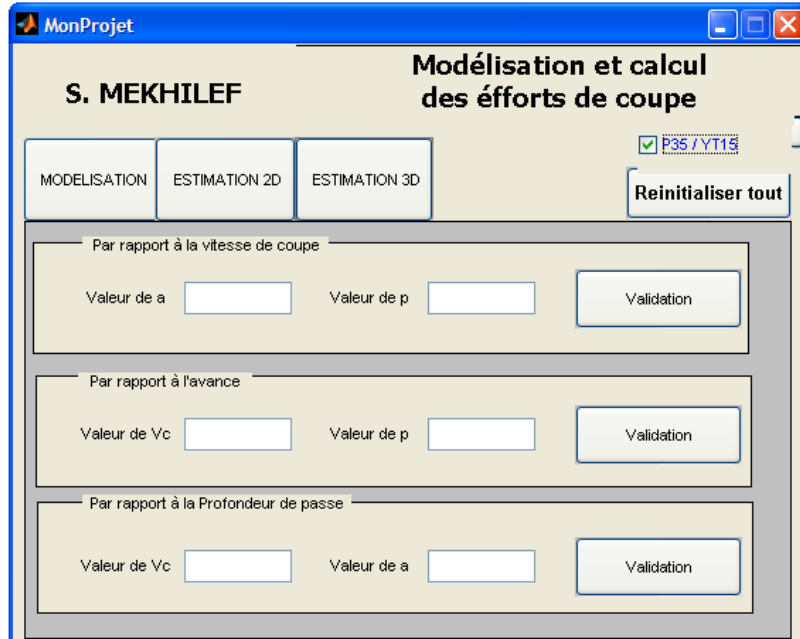


Fig. 3.29 fenêtre d'estimation 2D

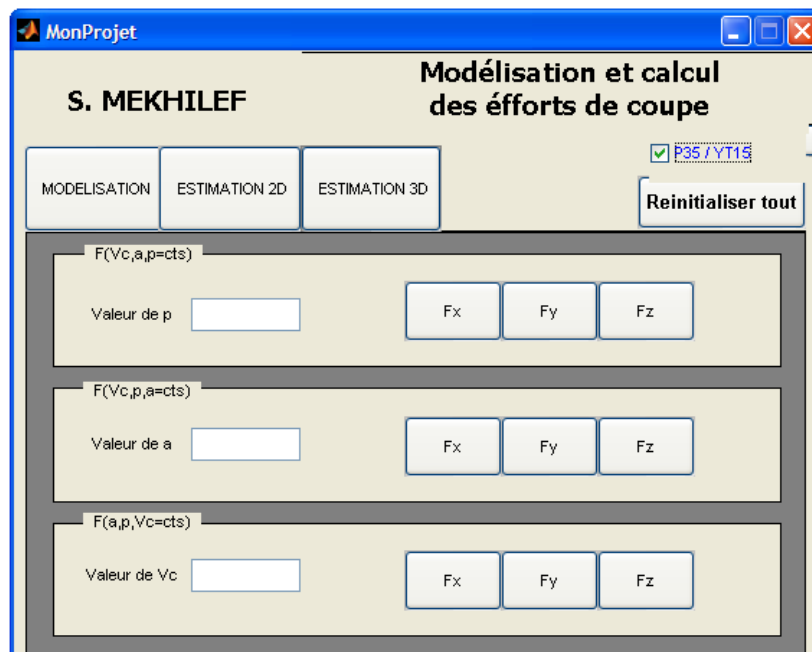


Fig. 3.30 fenêtre d'estimation 3D

Manipulation du logiciel :

- Entrer les valeurs expérimentales des composantes Fx, Fy et Fz.
- Entrer les valeurs des paramètres variables (vitesse de coupe, avance de coupe et profondeur de passe) mini et maxi.

Représentation graphique en 2D :

Représentation graphique Les composantes de l'effort de coupe F_x , F_y et F_z pour les deux types de carbures YT15 et P35 élaboré à SERIANA en fonction de vitesse de coupe.

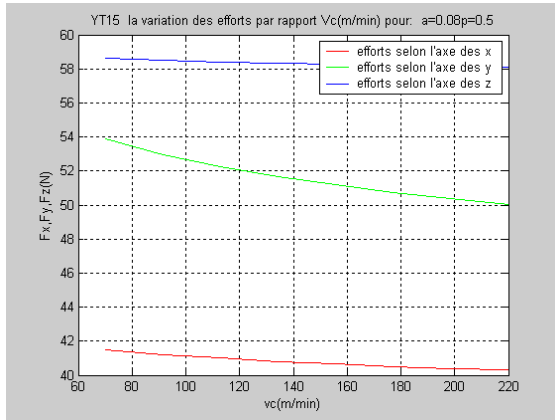


Fig. 3.31 Composantes de l'effort en fonction de la vitesse de coupe du carbure **YT15**

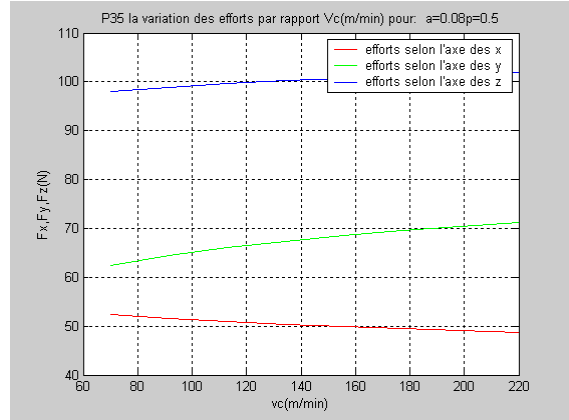


Fig. 3.32 Composantes de l'effort en fonction de la vitesse de coupe du carbure **P35**

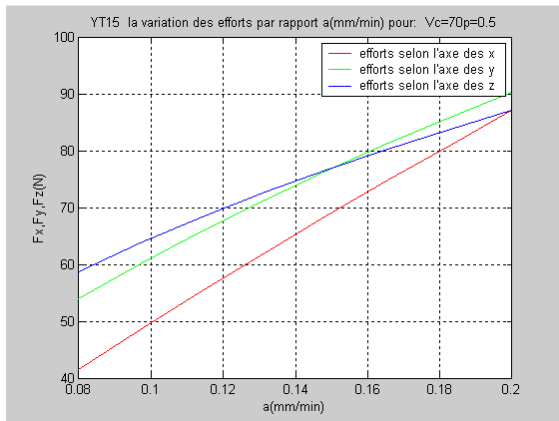


Fig. 3.33 Composantes de l'effort en fonction de l'avance du carbure **YT15**

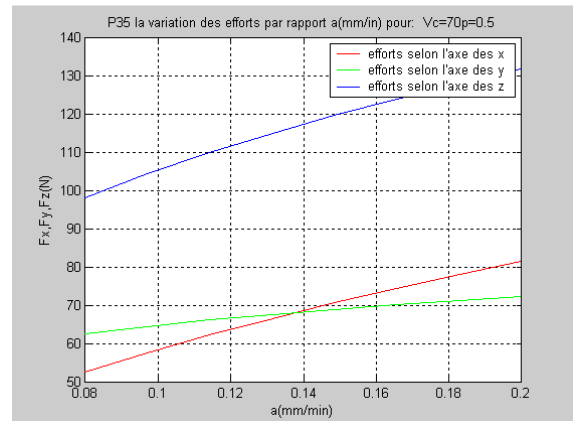


Fig. 3.34 Composantes de l'effort en fonction de l'avance de coupe pour **P35**

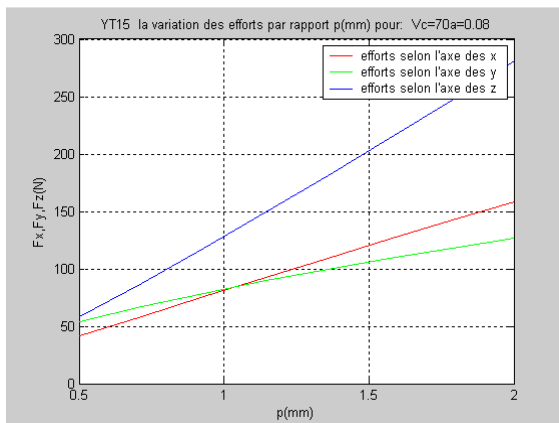


Fig. 3.35 Composantes de l'effort en fonction de la profondeur de passe du carbure **YT15**

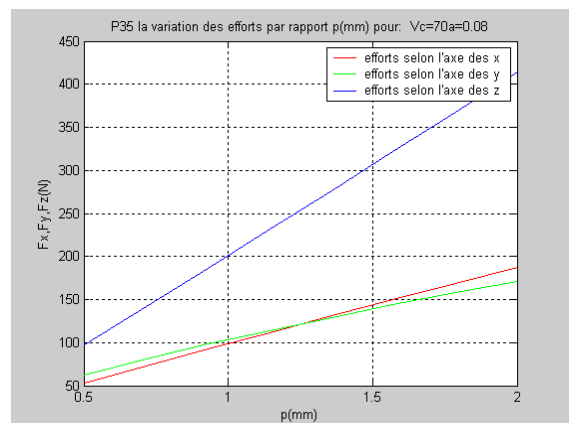


Fig. 3.36 Composantes de l'effort en fonction de la profondeur de passe du carbure **P35**

3.3.7. Analyse de l'influence d'un paramètre (graphe 2D):

Comparaison des efforts de coupe :

D'une manière générale, les graphes des composantes F_x , F_y , F_z , pour les deux carbures YT15 et P35 confirment la théorie selon la quelle les valeurs de la composantes F_z sont beaucoup plus importantes que les valeurs des composantes F_y et F_x , sauf pour les carbure YT15, en variation de l'avance, le composante F_y a dépassé la composantes F_z au de l'avance 0.15mm/min.

Discussion sur les graphes 2D :

- Graphes du carbure YT 15 :

Les composantes F_x , F_y et F_z de la force de coupe en usinage avec le carbure YT15 affichent un caractère croissant par rapport à la profondeur de passe et à l'avance, alors que ces composantes montrent un caractère légèrement décroissant pour la vitesse de coupe, ce qui confirme les approches théoriques. Du point de vue valeurs, les efforts de coupe sont plus importantes à la variation de la profondeur de passe, ils le sont un peu moins à la variation de l'avance et presque pas du tout à la variation de la vitesse de coupe.

- Graphes du carbure P 35 :

Les efforts de coupe F_x , F_y , F_z pour ce carbure, montrent aussi un caractère croissant dans les variations de la profondeur de passe et de l'avance, alors qu'en variation de la vitesse de coupe, les efforts F_x , F_y et F_z ont montré une très légère croissance à l'inverse de l'avance, sinon une stabilité, ce carbure a confirmé la théorie selon laquelle il y a augmentation remarquable des efforts sur les paramètres de coupe a_p et f et une diminution ou une stabilité dans la variation de la vitesse de coupe.

Du point de vue valeurs, les efforts de coupe et la profondeur de passe sont légèrement importants en variant l'avance et un peu faible en variant la vitesse de coupe.

Comparaison entre les deux carbures :

Les valeurs des efforts de coupe sont beaucoup plus importantes pour le carbure P 35 que celles du carbure YT 15.

Représentation graphique en 3D :

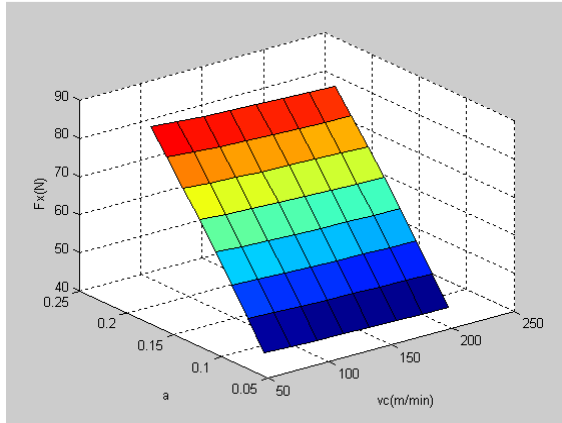


Fig. 3.37 Composante de l'effort de F_x en fonction de V_c et de f du carbure **YT15**

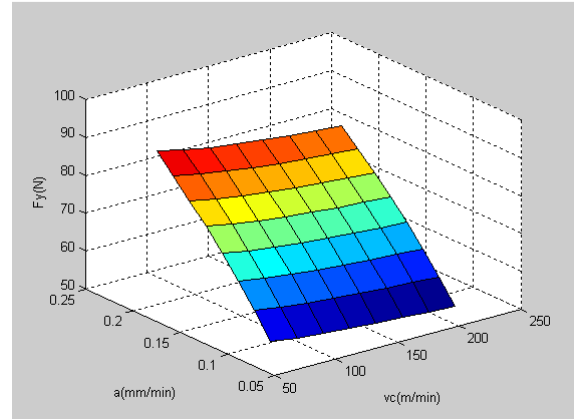


Fig. 3.38 Composante de l'effort de F_y en fonction de V_c et de f du carbure **YT15**

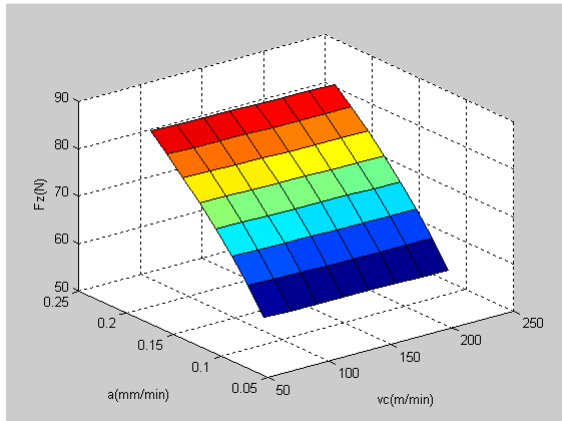


Fig. 3.39 Composante de l'effort F_z en fonction de V_c et de f du carbure **YT15**

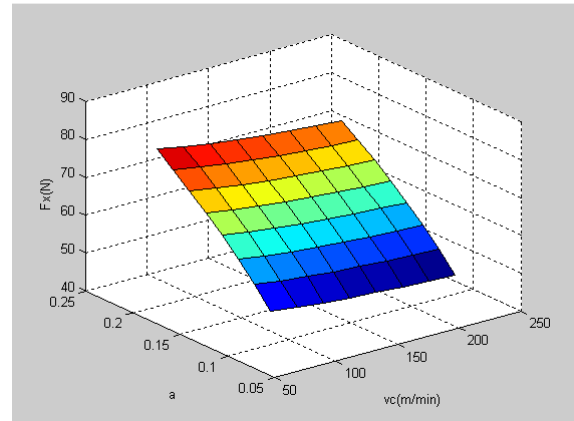


Fig. 3.40 Composante de l'effort F_x en fonction de V_c et de f du carbure **P35**

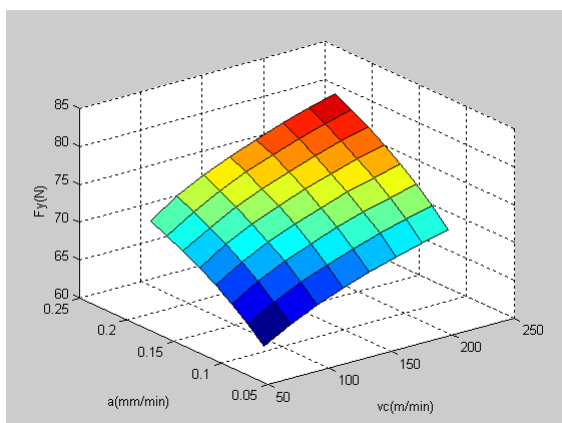


Fig. 3.41 Composante de l'effort F_y en fonction de V_c et de f du carbure **P35**

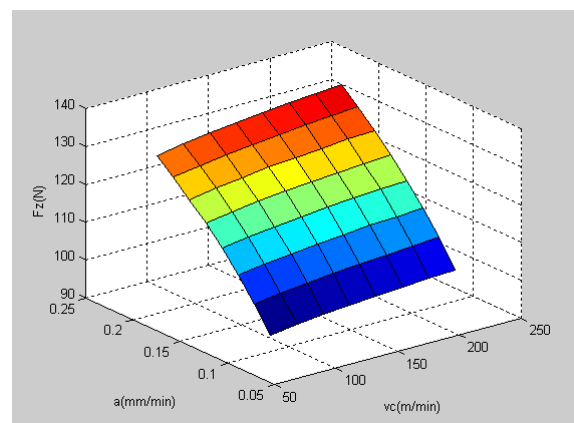


Fig. 3.42 Composante de l'effort F_z en fonction de V_c et de f du carbure **P35**

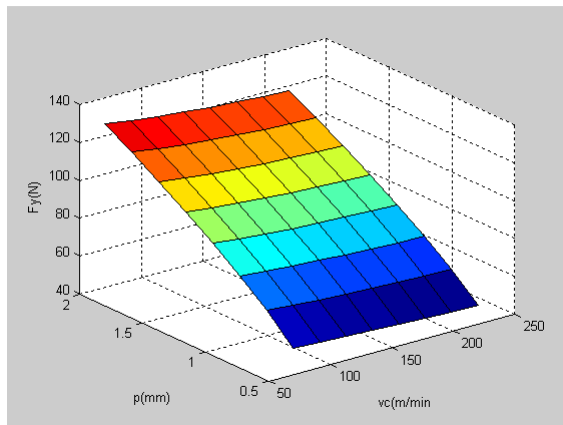


Fig. 3.43 Composante de l'effort F_y en fonction de V_c et de a_p du carbure **P35**

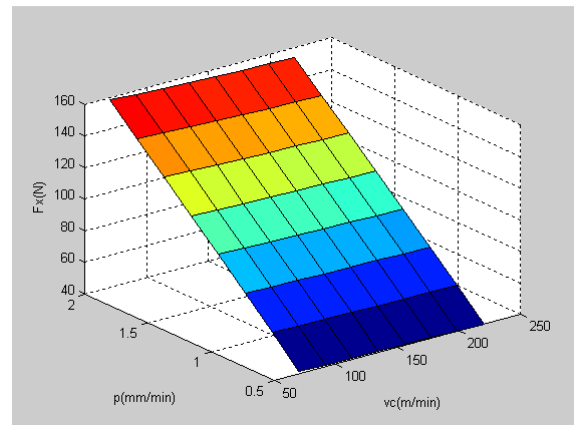


Fig. 3.44 Composante de l'effort F_x en fonction de V_c et de a_p du carbure **P35**

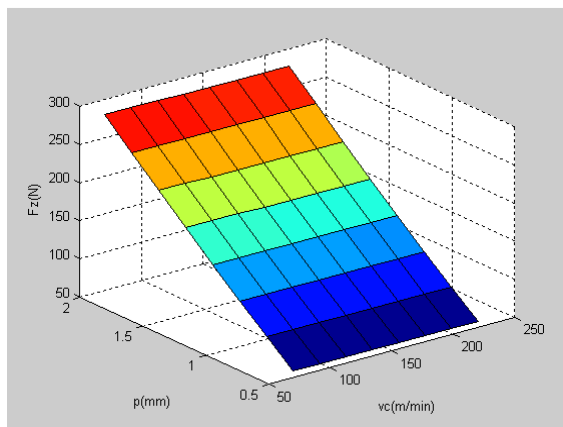


Fig. 3.45 Composante de l'effort F_z en fonction de V_c et de a_p du carbure **P35**

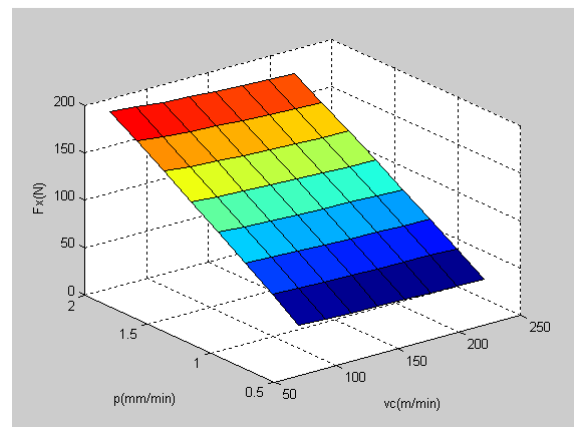


Fig. 3.46 Composante de l'effort F_x en fonction de V_c et de a_p du carbure **YT15**

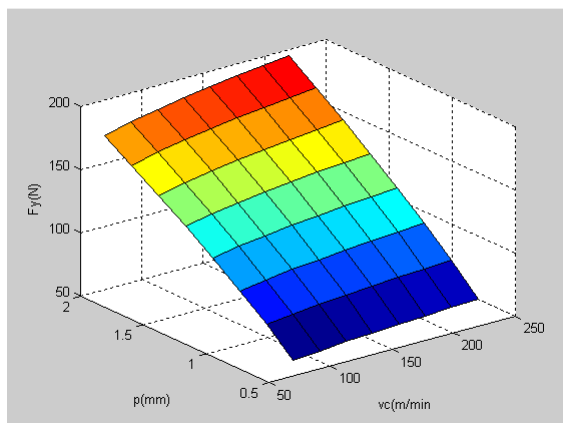


Fig. 3.47 Composante de l'effort F_y en fonction de V_c et de a_p du carbure **YT15**

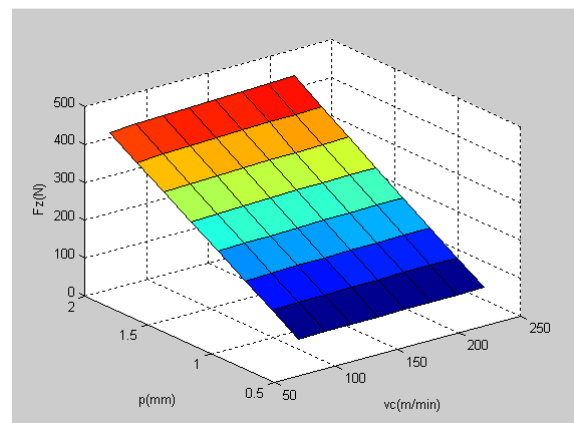


Fig. 3.48 Composante de l'effort F_z en fonction de V_c et de a_p du carbure **YT15**

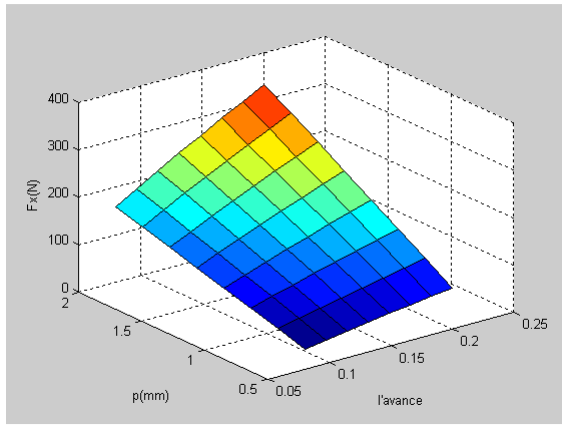


Fig. 3.49 Composante de l'effort F_x en fonction de f et de a_p du carbure **YT15**

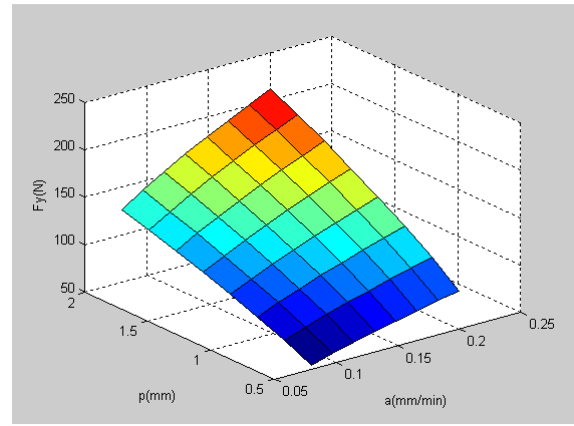


Fig. 3.50 Composante de l'effort F_y en fonction de f et de a_p du carbure **YT15**

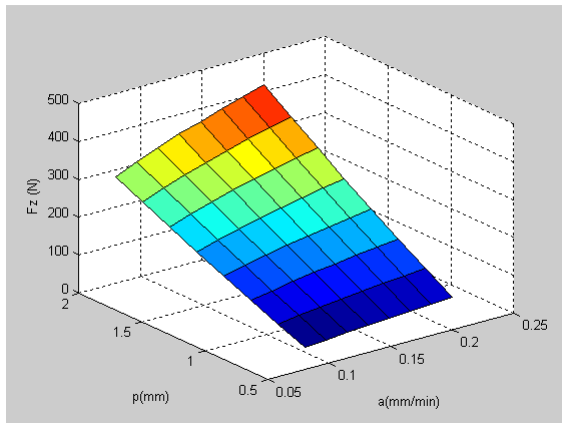


Fig. 3.51 Composante de l'effort F_z en fonction de f et de a_p du carbure **YT15**

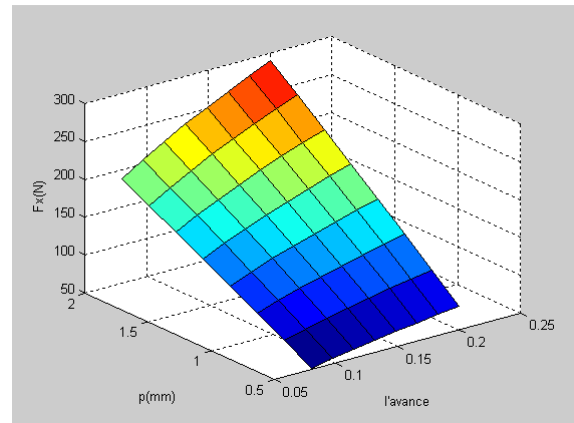


Fig. 3.52 Composante de l'effort F_x en fonction de f et de a_p du carbure **P35**

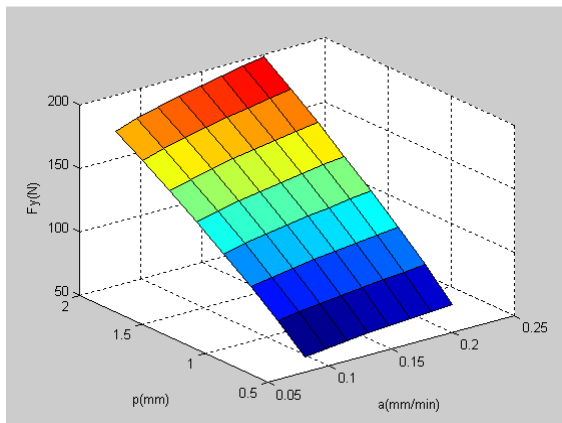


Fig. 3.53 Composante de l'effort F_y en fonction de f et de a_p du carbure **P35**

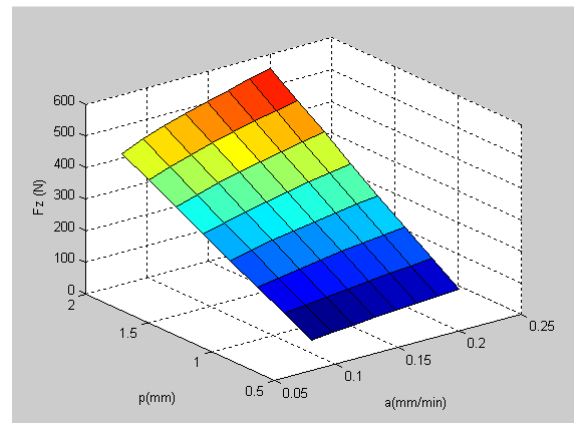


Fig. 3.54 Composante de l'effort F_z en fonction de f et de a_p du carbure **P35**

Analyse de l'influence de deux paramètres (graphe 3D):

Cette analyse tient compte de deux paramètres du régime de coupe par apport aux efforts de coupe. Les couleurs rouges indiquent des valeurs importantes des efforts alors que les couleurs bleu foncés indiquent des valeurs faibles des efforts de coupe.

Pour le P35 : le paramètre profondeur de passe combiné aux deux autres paramètres du régime a donné les valeurs les plus importantes des efforts de coupe, l'effort vertical F_z est important avec des valeurs combinées d' a_p et f .

Pour l'YT15 : aussi, en termes de paramètres combinés, la présence de la profondeur de passe a donné des valeurs importantes des efforts de coupe. A titre d'exemple aussi ; l'effort vertical F_z pour ce carbure est important avec des valeurs combinées de f et a_p .

Conclusion :

L'étude sur les efforts de coupe des carbures P35 et YT15 élaborés à SERIANA nous a permis d'établir des modèles de calcul à partir des régimes de coupe pris dans les intervalles d'étude. Les modèles mathématiques obtenus paraissent bien rapprochés, avec un degré d'influence important du paramètre profondeur de coupe sur les efforts de coupe et une influence inversement proportionnelle de la vitesse de coupe dans beaucoup de cas.

L'analyse des graphes a confirmé, d'une manière générale, les résultats des modèles mathématiques. Dans la majorité des cas, l'effort F_z se détache des autres efforts par ses valeurs importantes.

CHAPITRE 4 : Tendances actuelles dans la recherche des matériaux de coupe

Malgré l'évolution spectaculaire dans le domaine des matériaux de coupe, le carbure de tungstène reste le plus utilisé dans les ateliers de fabrication mécanique pour des raisons techniques et économiques. Les éléments composants les matériaux de coupe en carbures métalliques, comme le tungstène, le titane, le tantale et bien d'autres, sont devenus de plus en plus rares sur le marché mondial pour cette raison la réflexion actuelle est de les réserver à des emplois spécifiques tels que l'armement le spatial etc...

Les tendances actuelles dans la recherche des nouveaux matériaux de coupe sont dirigées vers: l'économie de ces matériaux devenus rares sur le marché mondial et cela par l'application de la technique d'insert et le substrat à gradient dans le but de concevoir des matériaux aux caractéristiques de coupe avec les mêmes performances, et surtout bon marché.

C'est à juste titre, que notre travail de recherche ambitionne le développement d'un axe qui combine, à la fois, la technique d'insert et le substrat à gradient dans le but de concevoir des matériaux aux caractéristiques de coupe performantes, surtout « bon marché » et produit en Algérie.

4- Objectifs recherchés

1. Etudier le lien qui peut exister entre les phénomènes physiques sus cités du contact.
2. Déterminer les zones de la plaquette soumises aux fortes sollicitations,
- 3- Choisir les matériaux adéquats dans les différentes zones.

Pour réaliser ces objectifs :

- Il faut avoir des données sur les carbures métalliques ou alliages dure et sur leurs aptitudes à l'usinage { composition, caractéristiques, efforts de coupe, températures }
- Traitements des sollicitations par éléments finis.
- Applications des calculs au moyen de logiciels. [CASTEM 2000]

4.1 Présentation des données

4.1.1 Matériaux proposés et leurs performances

Nous ambitionnons de tester principalement les alliages durs, élaborés à partir de poudres métalliques (métallurgie des poudres) suivant la technique de frittage avec une phase liquide, Justement l'entreprise ERIS/Seriana – Batna unique en Algérie, élabore et commercialise des alliages durs en carbures métalliques. Parmi les carbures ciblés, on peut citer: les plaquettes d'usinage du type mono carbure (K), bicarbure (P) et même quadri carbure (M), produits par cette entreprise selon la norme ISO.

Type K: mono carbure de Tungstène de composition WC + Co

Type P: bicarbure de composition WC + TiC + Co

Type M: quadricarbure WC + TiC + TaC + NbC + Co

Tous ces carbures métalliques utilisent un même liant le Cobalt (Co) et avec différents pourcentages.

Les résultats des testes préliminaires de performance à l'usinage de ces alliages produits par cette entreprise, traduits par la mesure de l'usure en surface de dépouille VB (mm) et la tenue au travail Tu (mn) pour une usure critique VB= 0.3 mm { norme des carbures }:

Tableau 4.1 des valeurs de régime de coupe et durée de vie carbures SERIANA

Type de plaquette	Vc (mm)	F (mm/tr)	a _p (mm)	Tu (min)
K	179	0.08	0.5	10
	89.5	0.08	2	10
P	127	0.08	0.5	15
	127	0.56	4	10
M	89.5	0.08	2	15
	89.5	0.08	0.5	10

4.1.2 Environnement des expériences

Les expériences réalisées, les méthodes et les appareils classiques employés, aussi bien pour le processus de coupe que pour les mesures d'usures d'outil ou même pour les calculs. Elles sont menées en usinage de finition de l'acier non allié, d'usage général et de série A avec une résistance à la rupture de 45 daN/mm², présentée en éprouvettes de forme cylindrique Ø = 80mm et L = 300mm sur un tour universel modèle SN40C et avec les variations des régimes de coupe utilisés dans les tests préliminaires. Chaque composition chimique du matériau expérimenté se présente en plaquette (1 à 4) de forme carrée et aux dimensions selon disponibilité. Ces plaquettes sont portées par une porte plaquette à fixation et serrage mécaniques.

Plaquette expérimentale type SNUM 12 04 04

Pour l'évaluation de l'aptitude du matériau à l'usinage, nous avons mesuré au moyen d'un microscope (x 50), la hauteur de l'usure en surface de dépouille (VB en mm), la tenue du matériau à l'usinage mesurée avec un chronomètre {t en min}. Pour limiter les expériences dans le temps, nous avons utilisé l'intensité de l'usure en surface de dépouille

Nous procéderons aux mesures des micros duretés et aux enregistrements des limites de rupture à la flexion {σf en MPa}, obtenues statistiquement selon la loi normale de distribution et par calculs utilisant le moment fléchissant à la rupture, nous avons mesuré le volume de la partie usée pour en déduire l'usure abrasive ou l'usure par perte de masse en mg.

4.1.3 Conception préliminaire de plaquettes

Technique d'insert {un 3ème matériau ou matériau intermédiaire peut être envisagé avec cette technique}.

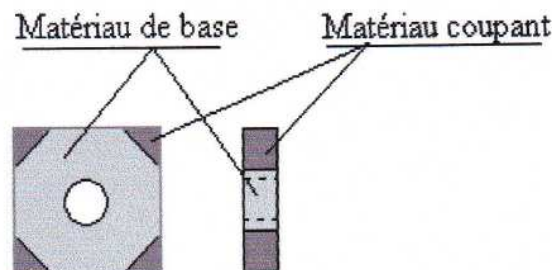


Fig. 4.1 Texture de la plaquette après insertion

Le dimensionnement, la quantification et la nature de ces inserts sont justement les buts recherchés par ce travail. Les choix des matériaux pour la réalisation des prototypes se feront, sur la base des propositions suscitées et de nos résultats de recherches antérieures et aussi sur la base des propositions de l'unité « Carbures » d'élaboration et de fabrication d'ERIS/Sériana, en fonction des matériaux disponibles.

4.2 Modélisation proposée à L'effort de coupe

4.2.1 Effort due à l'action de coupe

Les mesures des efforts sont faite sur une pièce en cours de tournage par exemple, à des expériences méthodiques permettant de déceler les efforts et de comparer leurs valeurs fig. 4-2.

On observe que les trois directions d'actions retenues sont celle du mouvement de coupe, du mouvement d'avance et du mouvement de profondeur de passe {pénétration} formant un trièdre trirectangle. Nous admettons qu'un léger fléchissement de l'outil en porte à faux dont la mesure de son amplitude à l'aide d'un comparateur prouve l'existence d'un effort. Plus la flèche mesurée est grande, plus l'effort sera grand [48]

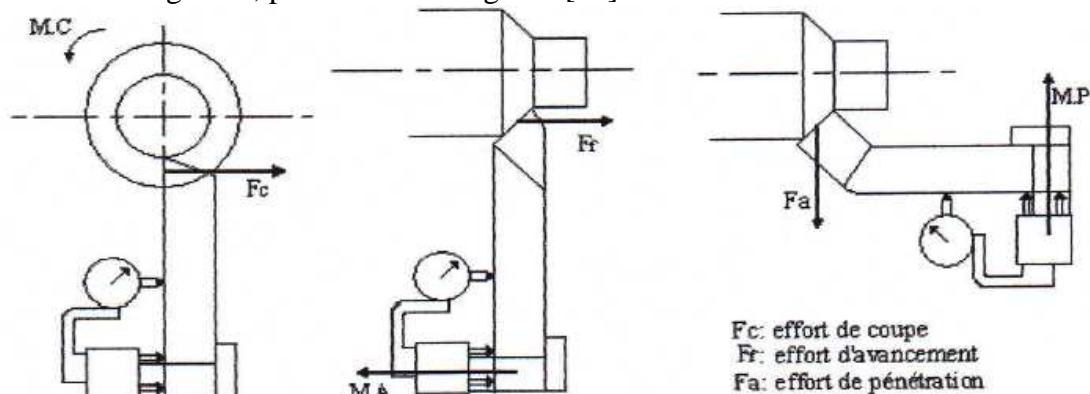


Figure 4.2 : mise en évidence des efforts provoqués par la coupe du métal

On répétera identiquement l'usinage pour que les lectures successives de {flèches soient cohérentes pour le même outil, on fera varier progressivement la nature de la matière façonnée sans toucher à la section de copeau, puis la section de copeau sans changer de matière façonnée. on en déduira que les efforts varient dans le même sens que la section du copeau et que la ténacité de la matière ainsi que sa dureté.

4.2.2 Actions réciproque de la pièce et de l'outil

L'expérience met en évidence les trois actions de la matière sur l'outil [Gelin1995] [Loladze 1982], Fig. 4.3

- l'effort tangentiel de coupe F_t (F_c) de même direction que le mouvement de coupe;
- l'effort d'avancement F_f de même direction que le mouvement d'avance;
- l'effort de pénétration F_a même direction de mouvement de profondeur de passe ;

Bien entendu, l'outil entraîné est supporté par la machine, exerce des réactions égales et opposées.

La composition des forces donne lieu à une force résultante F , les mesures expérimentales montrent que le plus souvent la force F est sensiblement égale à l'effort de coupe

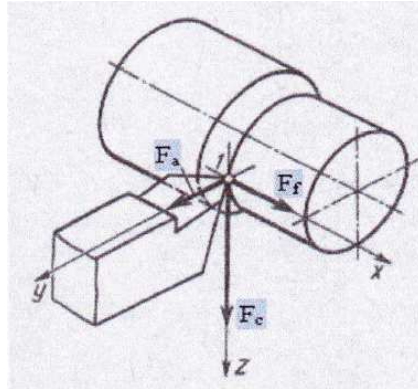


Fig. 4.3 schéma des actions du matériau sur l'outil de coupe

La combinaison de ces efforts donne une force résultante F . En théorie de coupe et même selon des données expérimentales, cette force F est sensiblement égale à l'effort de coupe F_c [49], effort exercé par l'outil sur la pièce. Dans la pratique, on considère que cet effort se répartit suivant deux directions principales, l'une de coupe et l'autre d'avance et une troisième direction définie comme le produit vectoriel des deux premières. [Bissey 2005]

Afin de simplifier l'étude de la coupe, on considère la coupe dite "orthogonale" dont les plans d'étude seront définis par les directions de coupe et d'avance, on prend aussi, pour des raisons de simplification l'angle de direction d'arête $\chi = 90^\circ$ et l'angle de son inclinaison $\lambda = 0^\circ$. D'autre part on suppose que la vitesse de coupe est constante en tout point de l'arête tranchante en contact avec la pièce.

4.2.3 Étude simplifiée de la formation du copeau

Paramétrage du phénomène

Considérons l'usinage d'un tube de grand diamètre et de faible épaisseur à l'aide d'un outil couteau, dans les conditions de la coupe orthogonale, représentée par les schémas suivant :

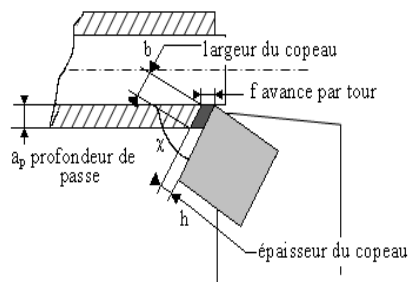


Figure 4.4 : paramètre de coupe

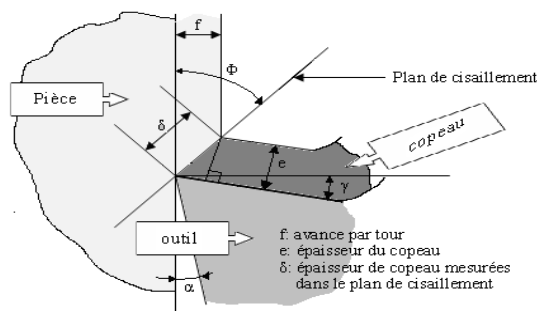


Fig. 4.5 Schéma de coupe orthogonale continue.

La formation du copeau se fait suivant un plan de cisaillement dont la position (angle Φ) peut être déterminée comme il suit :

$$\left. \begin{aligned} \delta &= \frac{f}{\sin \phi} \\ e &= \delta \cdot \cos(\phi - \gamma) \end{aligned} \right\} \Rightarrow e = \frac{f}{\sin \phi} \cos(\phi - \gamma) = f \left[\frac{\cos \gamma}{\tan \phi} - \sin \gamma \right]$$

$$\tan \phi = \frac{f \cos \gamma}{e - f \sin \gamma}$$

Étude de l'équilibre du copeau

Isolons le copeau afin d'étudier son équilibre pendant la coupe, alors son équilibre est représenté par le schéma suivant [49] :

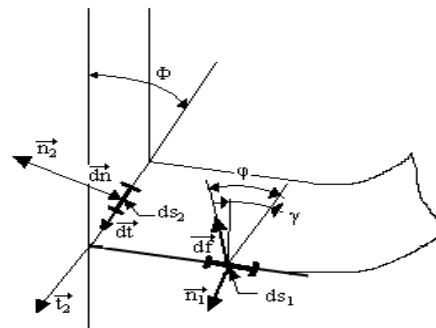


Fig. 4.6 Schéma d'équilibre du copeau.

Permet d'écrire l'équation suivante :

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{0} \Rightarrow \int_{S_1} \vec{df} + \int_{S_2} \vec{dn} + \int_{S_2} \vec{dt} = \vec{0}$$

Avec :

$\int_{S_1} \vec{df}$: Résultante générale du torseur des efforts outil / copeau.

$\int_{S_2} \vec{dn}$: Projection sur la normale au plan de cisaillement de la résultante générale du torseur des inter efforts pièce / copeau.

$\int_{S_2} \vec{dt}$: Projection dans le plan de cisaillement de la résultante générale du torseur des inter efforts pièce / copeau.

S_1 : surface de contact outil / copeau.

S_2 : surface de contact copeau / pièce ($S_2 \in$ au plan de cisaillement).

Φ : aussi angle de frottement au niveau de S_1 .

On suppose que les répartitions des pressions de contact au niveau de S_1 et des contraintes normales et tangentielles au niveau de S_2 sont uniformes.

En introduisant la contrainte de cisaillement τ , on peut écrire : $\vec{dt} = \tau \cdot ds_2 \cdot \vec{t}_2 \Rightarrow \int_{S_2} \vec{dt} = \frac{\tau \cdot f \cdot a_p}{\sin \phi} \vec{t}_2$

Ainsi la statique graphique permet de déterminer l'effort de coupe \mathbf{F}_C , en projetant $\int_{S_1} \vec{dM}$ sur

la direction de coupe et l'effort d'avance \mathbf{F}_F , en projetant $\int_{S_1} \vec{df}$ sur la direction d'avance

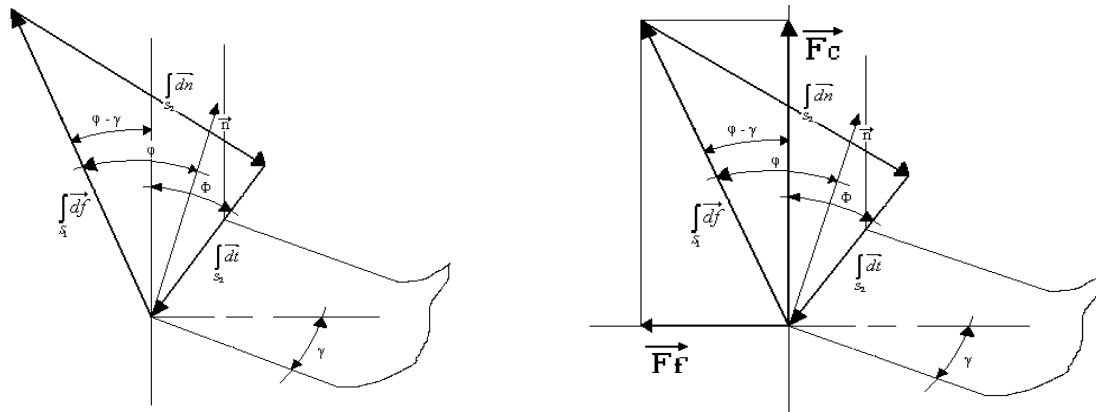


Fig. 4.7 schéma de projection des efforts F_c et F_f sur la directions de coupe et d'avance.

Théorie de MERCHANT

La théorie de MERCHANT est le premier modèle mathématique de la formation du copeau. Cette théorie fait appel aux mêmes hypothèses que celles pour l'étude simplifiée de la coupe. MERCHANT a défini le cercle des efforts, ce cercle est une construction géométrique permettant de déterminer, par projection du vecteur F représentatif de la résultante générale du torseur des actions de contact sur le copeau, les différents efforts dus à la coupe.

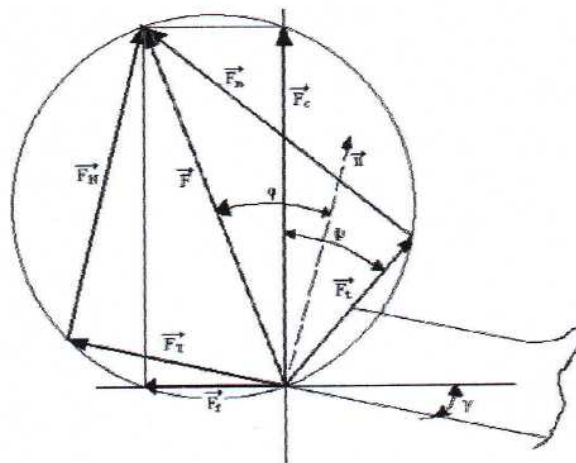


Figure 4.8 cercle des efforts de MERCHANT

4.2.4 Détermination de l'effort de coupe F_c et l'effort d'avance F_f

Pendant la coupe l'outil exerce sur la pièce un effort F que l'on peut projeter suivant la direction de coupe et la direction d'avance pour obtenir les efforts de coupe et d'avance.

Détermination de F_c :

$$F_c = \int_{S_1} df \cdot \cos(\varphi - \gamma)$$

$$\int_{S_2} df = \frac{1}{\cos[\phi + (\varphi - \gamma)]} \times \int_{S_2} dt ; \quad \int_{S_1} df = \frac{\tau \cdot f \cdot a_p}{\cos[\phi + (\varphi - \gamma)] \sin \phi}$$

$$F_c = \frac{\tau \cdot f \cdot a_p \cdot \cos(\varphi - \gamma)}{\cos[\phi + (\varphi - \gamma)] \sin \phi} \dots \dots \dots (4.1)$$

En considérant l'expression $\frac{\tau \cdot \cos(\varphi - \gamma)}{\cos[\phi + (\varphi - \gamma)] \sin \phi}$ comme étant un effort spécifique de coupe ou k_C , c'est à dire l'effort nécessaire pour séparer de la pièce un copeau de 1mm^2 de section ;

$$k_C = \frac{\tau \cdot \cos(\varphi - \gamma)}{\cos[\phi + (\varphi - \gamma)] \sin \phi} \dots \dots \dots (4.2)$$

Aussi, en admettant que la section du copeau A_0 est le produit du pas d'avance par la profondeur de passe, c'est-à-dire : $A_0 = f \cdot a_p \dots \dots \dots (4.3)$

On peut alors écrire une relation de proportionnalité entre l'effort de coupe F_c et la section du copeau A_0 sous la forme :

$$F_c = k_C \cdot A_0 \dots \dots \dots (4.4)$$

Détermination de F_f :

$$F_f = \int_{S_1} df \cdot \sin(\varphi - \gamma)$$

$$F_f = \frac{\tau \cdot f \cdot a_p \cdot \sin(\varphi - \gamma)}{\cos[\phi + (\varphi - \gamma)] \sin \phi} \dots \dots \dots (4.5)$$

En première approximation et selon des données expérimentales spécifiques à l'usinage de l'acier et de la fonte, avec des angles $\chi = 90^\circ$ et $\chi = 45^\circ$, les efforts d'avance F_f et de profondeur de passe F_a peuvent être déterminés, à leur tour, selon ces relations :

Tableau 4.3.relation entre F_c , F_f et F_p

Type d'outil	Matériau à usiner	F_f	F_a
$\chi = 90^\circ$	Aciers	$2/3 F_c$	$1/10 F_c$
	Fontes	$2/3 F_c$	$1/10 F_c$
$\chi = 45^\circ$	Aciers	$2/5 F_c$	$2/5 F_c$
	fontes	$1/3 F_c$	$1/3 F_c$

Alors que les valeurs de k_c en fonction de la matière à usiner et l'avance par tour f [50] (tableau 13).

Tableau 4.4 Valeurs de l'effort spécifique K_c en fonction de l'avance f .

Avance f (mm/tr)	Effort spécifique k_c (daN/mm ²)	
	Acier	fonte
0,1	320 à 660	190 à 240
0,2	260 à 480	136 à 230
0,4	170 à 350	100 à 170
0,8	124 à 252	72 à 120

Notre modélisation de l'effort de coupe est, en définitif, basée sur la loi de F_c , les rapports de F_a , F_f avec F_c et les valeurs de l'effort spécifique de coupe k_c .

Pour l'établissement du programme, en plus des lois de la modélisation de l'effort de coupe et en référence à la norme ISO, on a introduit les données d'une plaquette à usiner du type SNUN 12 04 04, en carbure métallique type P 10 avec un Module de Young $E = 6,5.10^5$ et un Coefficient de Poisson $\nu = 0,3$.

Conditions aux limites : Les conditions aux limites, subies par une plaquette de coupe en tournage sont définies comme suit :

- les trois faces du siège encastrées
- les trois autres faces sont libres.

4.2.5 Modélisation de la température

La formation du copeau, met en jeu de très grandes vitesses de déformation et les matériaux sont fortement sollicités. Pour faire le lien avec l'usure des outils, les sollicitations thermiques doivent être étudiées. Elles sont générées lors de la coupe, par l'auto échauffements au sein du matériau de la pièce, et par le frottement à l'interface outil pièce, en négligeant le frottement sur la face de dépouille, la montée en température modifie les caractéristiques aussi bien du matériau usiné que du matériau d'outil.

Analyse thermique

La connaissance du champ thermique permet de remonter à l'énergie thermique dissipée lors de la coupe et de connaître les sollicitations imposées à l'outil. Le CALVEZ dans sa thèse [54] fait une analyse expérimentale poussée du champ de températures au sein de l'outil. La détermination de ce champ est faite à partir de trois moyens des mesures : Thermocouple, pyromètre et caméra infrarouge CCD.

La grande difficulté de ces études est que les vitesses de chauffage et de refroidissement sont en dehors de la zone de détermination des diagrammes TRC. Ainsi des changements de phase ne peuvent être expliqués simplement par interprétation de diagrammes. L'usinage est un phénomène exceptionnellement violent par les vitesses de variation des grandeurs physiques qu'il impose.

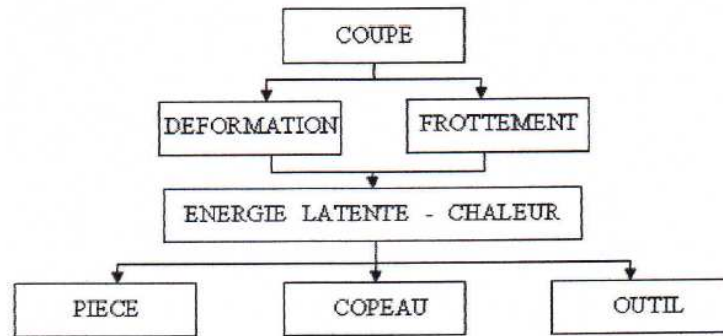


Figure 4.9: sources de chaleur dans le processus de coupe

La répartition approximative de la chaleur est comme suit [55].

- 75% dans le copeau
- 13% dans l'outil
- 12% dans la pièce

Les sources de chaleur (voir figures) dans le processus de coupe [Loladze 1982] sont :

La zone de formation du copeau est le lieu du principal travail mécanique dû à la déformation plastique et à la rupture du métal à usiner. Cette zone, qui englobe toute la surface d'écoulement, constitue la première source de chaleur (Q1). [51]

La zone de frottement du copeau sur la surface d'attaque de l'outil, avec une vitesse de glissement, provoquant ainsi un travail mécanique, constitue la deuxième source de chaleur (Q2).

La zone de frottement entre la surface de dépouille de l'outil et la matière à usiner avec une vitesse de coupe, engendrant aussi un autre travail mécanique, est la troisième source de chaleur (Q3). [51]

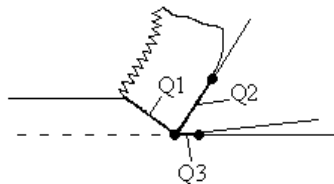
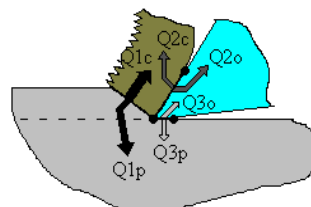


Fig. 4.10. schéma de répartition des chaleurs dans la zone de coupe

L'évacuation des chaleurs provoquées par tout le travail mécanique (déformation, rupture, frottements) de la zone de coupe se fait de cette manière :



Q1c, Q2c : à travers le copeau.

Q2o, Q3o : à travers l'outil de coupe

Q1p, Q3p : à travers l'ébauche.

Fig. 4.11. schéma de la décapation de la chaleur
Dans la zone de coupe

Les quantités de chaleur à évacuer de chaque zone sont :

$$Q1 = Q1c + Q1p.$$

$$Q2 = Q2c + Q2o.$$

$$Q3 = Q3o + Q3p.$$

Et les quantités de chaleur évaluées dans chacun des éléments :

Le copeau : $Q_c = Q_{1c} + Q_2 - Q_{2o}$.

La pièce : $Q_p = Q_{1p} + Q_3 - Q_{3o}$.

L'outil de coupe : $Q_o = Q_{2o} + Q_{3o}$.

Maintenant, dans le but de réaliser la répartition des températures dans les différentes zones de la plaquette de coupe [Habak 2006], suivant la source de chaleur Q_o , nous avons choisi l'expression de la température de coupe T qui tient compte de la vitesse de coupe et des températures de fusion et de début de chauffe du matériau à usiner [53]

$$T_c = (T_\alpha - T_\beta)(1 - e^{-kv}) \dots\dots\dots (4-6)$$

Ou T_α : Température de fusion du matériau à usiner.

T_β : Température de début de chauffe du matériau à usiner (pièce).

v : vitesse de coupe (m/min)

k : coefficient qui dépend de la contrainte tangentielle τ_ϕ

$$k = \frac{2,12 \cdot 10^{-1}}{\tau_\phi} \dots\dots\dots (4-7)$$

Avec $\tau_\phi = \frac{1}{6} HV$ (HV dureté Vickers du matériau à usiner)

Les conditions aux limites :

Ces conditions définissent l'environnement thermique subies par la plaquette de coupe en tournages sont définies comme suit :

- les trois faces du siège sont considérées isolées c'est-à-dire non soumises à la conduction
- les trois autres faces sont soumises à la convection à l'exception des zones en contact avec le copeau et la pièce qui reçoivent un flux de chaleur.

Notre modélisation de la température de coupe est basée sur la loi explicite de TC qui tient compte de la vitesse de coupe, paramètre fonctionnel, et des paramètres mécaniques et thermiques du matériau à usiner. Là aussi, pour élaborer le programme, le même type de plaquette ISO (SNUN 12 04 04, P 10) avec une conductivité thermique $K = 0,065 \text{ Cal/cm} \cdot ^\circ\text{C}$ et un coefficient de convection $H = 950 \text{ w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

La méthode des éléments finis a été utilisée pour l'analyse et la réalisation du maillage de la plaquette d'usinage du type SNUN 12 04 04, et le logiciel CASTEM 2000 pour les différentes applications de calcul, logiciel développé par le Département Mécanique et Technologie (DMT) du Commissariat Français à l'Energie atomique (CEA). [CASTEM 2000]

La résolution comporte quatre grandes étapes :

- Le choix de la géométrie et du maillage.
- La définition du modèle mathématique.
- La résolution du modèle discrétisé.
- L'analyse et le post - traitement

4.2.6 Résolution du problème

Pour le calcul de l'effort de coupe, un programme informatique a été élaboré, il est basé sur la loi de F_c , sur les rapports de F_a , F_f avec F_c et sur les valeurs de l'effort spécifique de coupe k_c . Afin d'avoir des résultats chiffrés, on a introduit les données d'une plaquette à usiner du type SNUN 12 04 04, en carbure métallique type P 10 avec un Module de Young $E = 6,5.10^5 \text{ dan/mm}^2$ et un coefficient de Poisson $\nu = 0,3$.

Pour ce qui est de l'élaboration du programme de calcul de la température de coupe, là aussi et afin d'avoir des résultats chiffrés, le même type de plaquette ISO {SNUN 12 04 04 P10}, une conductivité thermique $K = 150 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ et un coefficient de convection $H=950 \text{ w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, on été introduits. Nous rappelons que le modèle de la température de coupe est basé sur la loi explicite de T_c qui tient compte de la vitesse de coupe {paramètre fonctionnel} et des paramètres mécaniques et thermiques du matériau à usiner.

4.2.7 Organisation du calcul

Une analyse générale effectuée à l'aide de la méthode des éléments finis peut se décomposer en quatre grandes étapes:

- 1- Le choix de la géométrie et du maillage,
- 2- La définition du modèle mathématique.
- 3- La résolution du problème discrétisé.
- 4- L'analyse et le post-traitement des résultats.

Chacune des étapes peut également être décomposée en une série de processus élémentaires.

Afin d'avoir des résultats chiffrés, on a introduit les données suivantes : Plaquette d'usinage type SNUN 12 04 04, en carbure métallique P10 avec les propriétés mécaniques et thermiques suivantes :

- $E = 6.5.105 \text{ Mpa}$, $\nu = 0.3$, $K = 150 \text{ w/m} \cdot ^\circ\text{C}$, $H = 950 \text{ w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
- Matière d'ébauche : acier XC 70, aux propriétés mécaniques et thermiques suivantes : $HV = 110$. $T_f = 1350^\circ\text{C}$.
- Le régime de coupe suivant: $VC = 150 \text{ m/min}$, $a_p = 0.8 \text{ mm}$, $f = 0.8 \text{ mm/tr}$

4.2.8 Le programme de calcul Voir annexe 4

Résultat des calculs

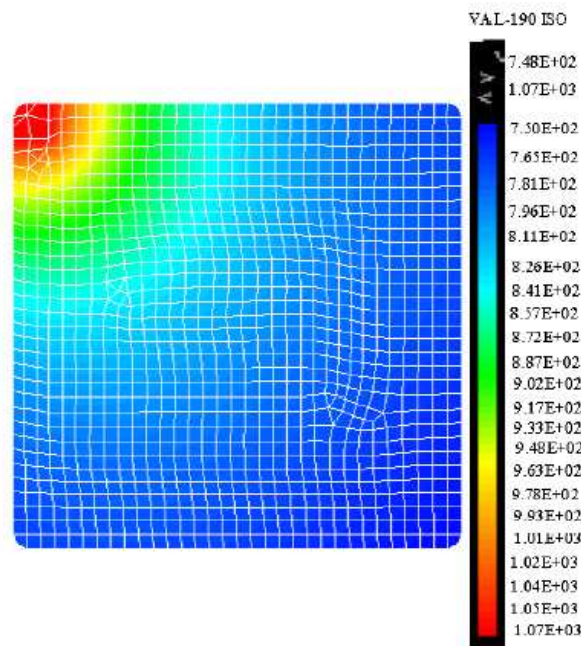


Fig. 4.12. Résultat de calcul des températures et leur répartition en surface d'attaque (vue en plan)

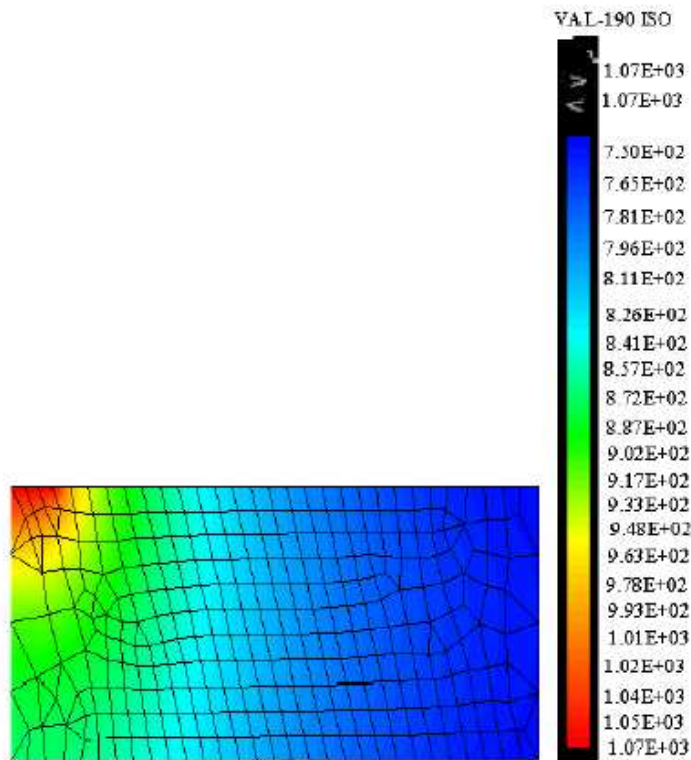


Fig. 4.13. Résultat de calcul des températures et leur répartition en surface de dépouille (vue de profil)

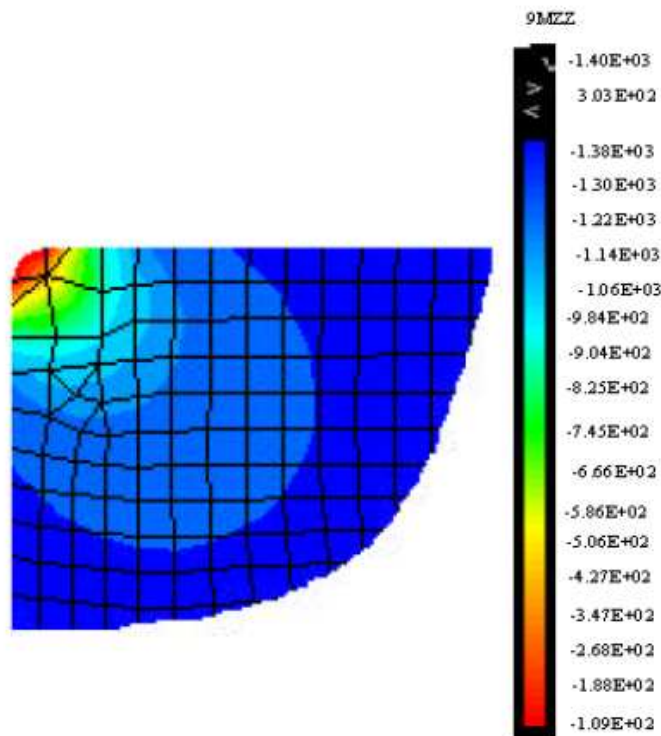


Fig. 4.14. Résultat de calcul des contraintes dues aux efforts de coupe et leur répartition en surface d'attaque (vue en plan)

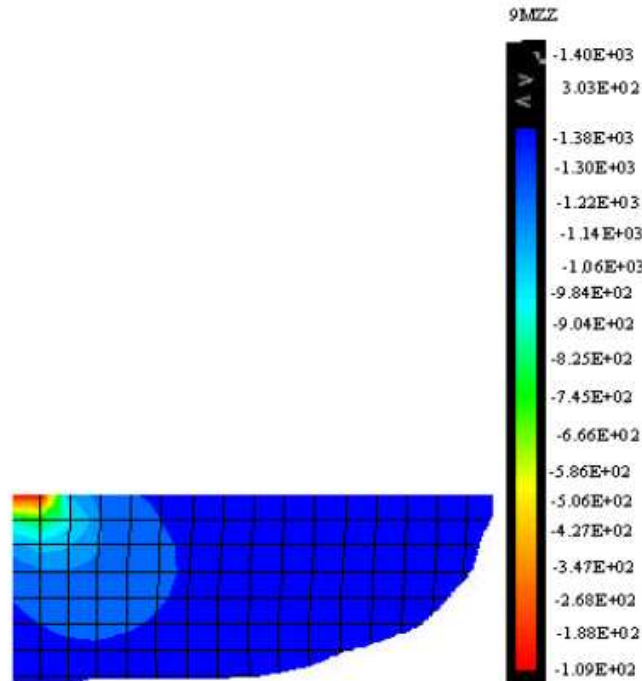


Fig. 4.15. Résultat de calcul des contraintes dues aux efforts de coupe et leur répartition en surface de dépouille (vue de profil)

Conclusion :

La démarche entreprise pour concevoir la plaquette d'usinage en plusieurs matériaux frittés a donné ses premiers résultats, pour un carbure standard (79 % WC+15 % TiC+6%Co) et des conditions de coupe normales, au sommet de l'outil, la température a atteint 998 °C et les efforts de coupe 138 daN/mm².

Aussi cette démarche nous a permis de délimiter les zones de sollicitations thermiques et d'efforts et d'en déduire, avec les mêmes conditions de coupe (matériau à usiner, régime de coupe et géométrie de plaquette), les zones obtenues sont différentes en volume. En effet, les zones des chaleurs sont beaucoup plus étendues que celles des efforts de coupe parce que la chaleur a cette faculté de propagation alors que l'effort est contenu et concentré.

a)-Dans le cas de la chaleur: 03 zones ont été délimitées :

Zone rouge (1/4 de la largeur de la plaquette), la température est comprise entre 918°C, 998 °C,

Zone verte (1/4 de la largeur de la plaquette), la température est comprise entre 818 °C, 849 °C,

Zone bleue (1/2 de la largeur de la plaquette), la température est comprise entre 849 °C, 758 °C.

b)-Dans le cas de l'effort de coupe: 03 zones ont été délimitées mais avec des proportions de surface très réduites :

Zone rouge (1/16 de la largeur de la plaquette), les valeurs de l'effort de coupe sont comprises entre 138 et 82,5 daN/mm²,

Zone verte (1/16 de la largeur de la plaquette), les valeurs de l'effort de coupe sont comprises entre 82,5 et 42,7 daN/mm²,

Zone bleue (7/8 de la largeur de la plaquette), les valeurs de l'effort de coupe sont comprises entre 42,7 et 10,9 daN/mm².

Ces résultats permettent donc de choisir les mélanges de poudre de carbures ou autres matériaux frittés à insérer dans ces zones selon ces proportions, répondant aux paramètres physiques retenus (température et effort de coupe) et aux exigences métallurgiques d'adhésion aux interfaces (liant commun ou matériau intermédiaire).

Pour des raisons pratiques, on peut concevoir nos prototypes de plaquette et procéder à l'insertion des matériaux, en considérant seulement les zones en surface d'attaque et les étendre sur toute la largeur de la plaquette :

Prototype n° 1, avec deux zones de matériaux différents :

Zone I ou zone principale (équivalente à la zone rouge en température) :

60 % TiC + 10 % MoC + 30 % acier thermo resistant (14% Ni +14% Cr +10% Mn +6% Co)

Zone II ou zone auxiliaire (composée des zones vertes et bleues en température) :

Acier thermorésistant (14% Ni +14% Cr +10% Mn +6% Co).

Prototype n° 2, avec trois zones de matériaux différents :

Zone I ou zone principale (équivalente à la zone rouge en température) :

60 % TiC + 10 % MoC + 30 % acier thermo resistant (14% Ni +14% Cr +10% Mn +6% Co).

Zone II ou zone intermédiaire (équivalente à la zone verte en température) :

30 % TiC + 10 % MoC + 60 % acier thermo resistant (14% Ni +14% Cr +10% Mn +6% Co).

Zone III ou zone secondaire (équivalente à la zone bleue en température) :

Acier thermorésistant (14% Ni +14% Cr +10% Mn +6% Co).

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Cette étude nous a permis d'éclaircir quelques points d'un problème intéressant et assez complexe de la coupe des métaux, en faisant intervenir un nombre important de paramètres liés au comportement inter facial du couple outil-matière, en vue de déterminer le meilleur emploi des matériaux de coupe testés pour des conditions de travail données.

Analyser l'usure de ses outils de coupe et prendre les mesures nécessaires pour le développement sur leurs arêtes d'une usure correcte et équilibrée est essentiel pour la qualité et les performances de toutes les opérations d'usinage puisqu'il est hors de question, même compte tenu des développements permanents des matériaux de coupe, de disposer d'outils d'une durée de vie infinie. L'usure détermine dans quelle mesure et de combien l'arête de coupe s'écarte de ses dimensions nominales et des exigences de précision et d'état de surface imposées. On recherche, en règle générale, le moyen de parvenir à un développement équilibré et prévisible de cette usure au cours d'une durée de vie d'outil la plus longue possible donnant entièrement satisfaction. La manière dont ce développement de l'usure se produit détermine la fluctuation des cotes usinées au sein d'une plage imposée de tolérances. De ce fait même, elle détermine aussi la fréquence des ajustements requis de la position précise de l'arête de coupe au cours des cycles d'usinage successifs.

La méthodologie de recherche adoptée au moyen de la planification des expériences en utilisant la méthode uni factorielle et multifactorielle, a permis d'avoir une estimation des paramètres de régime de coupe sur l'usure des outils. Le programme élaboré en turbo pascal a permis le traitement des modèles mathématiques trouvés. Le processus de coupe en particulier, l'usure des outils, les lois d'usure, la rugosité des surfaces. Le traitement des résultats de l'usure a permis la détermination des modèles de la tenue en fonction de la vitesse de coupe. Un suivi de l'endommagement des outils en fonction du temps de coupe et une caractérisation de l'usure en dépouille pour chaque matériau de coupe. Les tenues des outils de coupe, ont été déterminées en se basant sur les courbes $VB=f(t)$.

Cette étude a abouti à la détermination des modèles mathématiques exprimant d'une part la relation entre les critères de rugosité (R_a) et les éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p) et d'autre part la relation entre la rugosité arithmétique (R_a) et l'usure en dépouille de l'outil sous forme d'une équation puissance.

Cette étude nous a permis d'établir les écarts de performances entre les outils en céramique (Al_2O_3 , $Al_2O_3+ZrO_2$, Al_2O_3+TiC , $Al_2O_3+TiC+TiN$) en termes d'usure, de tenue et de rugosité. Il ressort que le meilleur comportement à l'usure est observé avec la céramique $Al_2O_3+TiC+TiN$ suivi par la céramique Al_2O_3+TiC , la céramique $Al_2O_3+ZrO_2$, et en dernier la céramique Al_2O_3 .

Malgré la haute dureté des aciers trempés usinés (56HRC) la céramique $Al_2O_3+TiC+TiN$ supporte des vitesses de coupe élevées et fournit un très bon état de surface comparable à celui obtenue par rectification. Donc la céramique $Al_2O_3+TiC+TiN$ reste une alternative intéressante pour remplacer des CBN qui restent toujours des matériaux de coupe les plus indiqués pour l'usinage des pièces traités (usinage dur) mais qui reste toujours extrêmement cher.

- Les modèles mathématiques de l'usure trouvés, montrent la relation entre la vitesse de coupe et la durée de vie des différentes céramiques. Celle-ci a une influence capitale sur la durée de vie des outils, car avec son augmentation la tenue des matériaux de coupe diminue.

-Les résultats des rugosités obtenues par les matériaux de coupe, soit par la méthode uni factorielle soit multifactorielle montrent que les performances la céramique $Al_2O_3+TiC+TiN$ dépassent de loin celles des autres céramique.

-Les modèles mathématiques de la rugosité obtenus, expriment la relation qualitative et quantitative entre les différents critères de rugosité (R_a) et les éléments du régime de coupe

(V_c , f , a_p). Par conséquent, l'augmentation de chacun des paramètres (f) et (a_p) contribue à l'élévation de la rugosité, alors que la vitesse de coupe a une influence inversement proportionnelle sur cette dernière. Le classement des exposants en valeur absolue des différents modèles, traduit le degré d'influence de chaque paramètre (V_c , f , a_p) sur la rugosité.

- Les résultats obtenus de la rugosité, montrent que la vitesse de coupe et la profondeur de passe ont des influences antagonistes sur la qualité de l'état de surface. En effet l'augmentation de la vitesse de coupe améliore l'état de surface, alors que l'accroissement de la profondeur de passe le dégrade. Cependant les rugosités obtenues par ces deux facteurs (V_c , a_p) sont nettement plus faibles que celles occasionnées par la variation de l'avance.

- Avec l'augmentation de l'usure, l'état de surface se dégrade, ceci s'explique par les modifications géométriques de l'arête de coupe de l'outil provoquées par les conditions de coupe sévère et des températures élevées qui règnent à la pointe de l'outil.

- Grâce à son excellent effet sur la qualité des surfaces usinées, les résultats des rugosités obtenues avec la céramique $Al_2O_3 + TiC + TiN$ sont comparables avec ceux de la rectification.

- Avec l'augmentation de la vitesse de coupe, la vitesse d'usure augmente et conduit directement à la dégradation de l'état de surface usinée ce qui implique que l'évolution de l'usure des matériaux étudiés influe sur les valeurs des rugosités

- Selon les différentes formes des faciès d'usure en surface de dépouille pour le P35 non revêtu lors de l'usinage de l'acier 30CD12 et selon les combinaisons des éléments du régime de coupe, on constate que le copeau provoque un frottement important sur la surface d'attaque de l'outil en début d'usinage, on constate aussi que la plaquette non revêtue présente une augmentation de la rugosité aux grandes vitesses, à cause de son faible comportement à l'usure.

- Les essais réalisés sur les carbures P35 et YT15 ont permis d'observer l'évolution des composantes des efforts de coupe, et d'obtenir des modèles mathématiques exprimant la relation entre les efforts de coupe et les paramètres (V_c , f , a_p).

- Les résultats obtenus montrent clairement qu'en tournage classique l'effort tangentiel (F_z) est prépondérant surtout lorsqu'on travaille dans la limite du rayon du bec de l'outil. Par conséquent, l'effort tangentiel (F_z) ne peut être négligé dans les calculs du comportement du système usinant.

- Les grandes vitesses de coupe engendrent d'une part une diminution des efforts de coupe et d'autre part une accélération de l'usure. Ce qui nous pousse à chercher un compromis entre l'effort minimal et la tenue qu'on peut exploiter sur le plan industriel.

- L'augmentation de l'usure engendre une élévation des efforts de coupe. L'effort radial est le plus dominant, suivi par l'effort axial, alors que l'effort tangentiel est moins sensible à l'usure.

- Les modèles mathématiques obtenus et exprimant la relation qualitative et quantitative entre les différentes composantes (F_y , F_x et F_z) et les paramètres du régime de coupe (V_c , f , a_p), permettent de distinguer que l'augmentation de chacun des paramètres (f) et (a_p) contribue à l'élévation des efforts, alors que la vitesse de coupe a une influence inversement proportionnelle. Le classement des exposants en valeur absolue des différents modèles, traduit le degré d'influence de chaque paramètre (V_c , f , a_p) sur les efforts de coupe.

- Les modélisations des efforts et la température dans la zone de coupe sur le carbure P10 par utilisation des éléments finis sous CASTEM 2000, ont abouti à la détermination des zones par degré de sollicitations dans la plaquette, ce qui nous permettra de concevoir une nouvelle plaquette en carbure en économisant certains matériaux qui sont devenu rares (tungstène...), tout en gardant les mêmes performances.

Ce travail de recherche intéresse toutes les unités de fabrication mécanique, du fait qu'il permet d'avoir des informations nécessaires, pour définir les conditions de travail optimales des matériaux de coupe modernes (Céramique et carbures).

PERSPECTIVES

Les résultats obtenus dans ce travail ouvrent d'importantes perspectives.

- Etude du comportement à l'usure de nouvelles nuances de matériaux de coupe modernes (CBN), cela dans le but d'avoir une meilleure caractérisation scientifique du procédé de tournage dur. Ce qui permettra aussi de déterminer les lois d'usure dans un nouveau contexte de matériau de coupe et avec des matériaux difficilement usinables.
- Approfondir les connaissances sur la corrélation qui existe entre l'usure des outils de coupe et la rugosité de surfaces usinées ainsi que les efforts de coupe. Dans le but de permettre des prédictions de l'usure à partir du suivi des efforts de coupe et de la rugosité.
- En dernier lieu, il faut s'intéresser aussi au côté dynamique de la coupe, en particulier l'étude des vibrations générées en tournage dur, l'influence des vibrations sur la tenue des outils de coupe.
- La modélisation et la simulation du processus de coupe est un aspect à développer et les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse présentent des informations pour leur validation

Références bibliographiques :

- [1] LEROY (F). – les essais d’usinabilité et de formabilité des aciers. Internationaux de France du traitement thermique (1990).
- [2] POULACHON (G.), BORDES (S.) et COLOMBET (L.). - Tournage dur : endommagement d'un outil PCBN durant l'usinage d'un acier à roulement 100Cr6 traité à 62HRc. Bulletin du Cercle d'étude des métaux. Colloque international Usinabilité et mécanismes endommageant des outils de coupe, 19 novembre 1998.
- [3] le MAITRE (F), HAN (K.L)- Contribution à l'étude de l'usure d'outils céramique. Colloque international sur la coupe des matériaux, cercle d'étude des métaux (1990).
- [4] LEROY (F).-Mise en forme par usinage .les référentiels Dunod : Pratique des matériaux industriels (1990).
- [5]- LE MAITRE (F.), BIZEUL (D.). - Les outils céramiques, nitrure de bore cubique, diamants. Quel avenir ? 1985 École Nat. sup. Mécanique (Nantes).
- [6] OPITZ (H), KONIG (W). – Basic research on the wear carbide cutting tools machnability. Proceedings of ISI, Londres (1965). première.
- [7] SCHULZ (H).-Hochges chwindigkeitfrasen metallischer und nicht metallischer Werkstoffe (fraisage à Grande vitesse des produits métalliques et non métalliques). Carl Hanser Verlag, Munch, vienne (1989).
- [8] TRENT (E.M).- Metal cutting. Butterworths, Londres (1977).
- [9] KRAMER (B.M).- A comprehensive tool wear model. Annais of CIRP, vol. 35/1, P. 67 (1986).
- [10] MAGINEE (A). – Mécanismes de l'endommagement par abrasion. Chapitre 9/5/1. les référentiels Dunod : Pratique des matériaux industriels (1992).
- [11] YAO (Y.) et al.- On –line estimation of groove wear in the minor cutting edge for finish machining. Annais of CIRP, vol. 40/1, p. 41 (1991).
- [12] A. C. Rapier, « A theorical investigation of the temperature distribution in the metal cutting process » British Journal of applied Physics, vol. 5, pp. 400-405, 1954.
- [13] W. B. Palmer et P. L. B. Oxley, « Mechanics of orthogonal machining. » Institute of the mechinacal engineers, pp. 623-654, 1959.
- [14] W.F. Hasting, P. Mathew et P. L.B Oxley, “A machining theory for predicting chip geometry, cutting forces etc. From work material properties and cutting conditions.” Royal society of London, pp. 569-587, 1980.
- [15] P.L.B Oxley et W.F. Hasting, « Minimum work as possible criterion for determining the frictionnal condition at the tool interface in machining.” Philosophical transaction of the royal society of London, vol. 282, N° A1310, pp. 565-584, 1976.
- [16] S. SÖDERBERG : “Recent advances in cutting tool materials” in “advances in hard materials production” (Proc. Eur. Conf. Held in Stockholm May 27-29, 1996), EPMA Shrewsbury (1996), 19-27
- [17] H. PASTOR : “L'évolution des matériaux pour outils de coupe“ Colloque International du Cercle d'Études des Métaux, 13 et 14 Novembre 1996, pages 7-1 à 7-11
- [18] Documentation Widia Valenite Fabricant d'outil
- [19] H.K. TONSHOFF, A. MOHLFELD, C. SPENGLER : “Pre-treatment of coated tools for cutting applications” Actes de la conference internationale THE COATINGS IN MANUFACTURING ENGINEERING, Hannover 2001
- [20] H.K. TONSHOFF, A. MOHLFELD, C. SPENGLER : “PVD coated tools for metal cutting applications“ Actes de la conference internationale THE COATINGS IN MANUFACTURING ENGINEERING, Thessalonique 1999
- [21] Platit, Documentation commerciale
- [22] F.FLOCKE, G. EISENBLATTER : “Dry citting“ Annals du CIRP, VOL 46, 1997

-
- [23] Documentation CETIM : “Les revêtements CVD et PDV appliqués aux outils de coupe“ 1994
- [24] J. RECH « Thèse de Doctorat » faisant référence à J. RECH, B. LAHALLE “Bilan économique d’un atelier UGV de production de culasses” Rapport d’étude industrielle, Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers de Cluny, 2001
- [25] F. SANCHETTE, E. DAMOND, L. HENRY, P. JACQUOT, G. VEYSSIERE : “Revêtement sur outils coupants avec la méthode d’évaporation par arc cathodique sous vide“ Colloque International du Cercle d’Etudes des Métaux, 13 et 14 Novembre 1996
- [26] R.F. BUNSHAH : “Handbook of deposition technologies for films and coatings”, Noyes publications, ISBN 8155-1337-2, 1994
- [27] Anonyme : “Global cutting tool sales to reach US \$25 billion in 2005” Metal powder Reports 51, (6), 10-12, (1996)
- [28] Documentation Balzers, 2001
- [29] Société française du vide, “Cours d’obtention des couches minces“ 1994
- [30] F.M. KUSTAS : “Nanocoatings on cutting tools for dry machining“ 1997
- [31] E.M. TRENT : “Métal cutting“ Butterworth Heinemann, 1991
- [32] Z. ZUHA, C. PING : “Study of cold welding caused by friction in metal cutting“ Wear, n°201, 1996
- [33] BALZERS : Communication personnel et documentations commerciales
- [34] C.A. Van LUTTERVELT : “Present situation and future trends in modelling of machining operation“ 1998
- [35] M. FIELD, M.E. MERCHANT : “The mechanism of the formation of the discontinuous chip in the metal cutting“ Trans. ASME, Vol 71, 1949
- [36] Anonyme : “Global cutting tool sales to reach US \$25 billion in 2005” Metal powder Reports 51, (6), 10-12, (1996)
- [37] N.H. COOK, I. FINNIE and M.C. SHAW : “Discontinuous chip formation“ Trans ASME, Vol 76, 1954
- [38] M.C. SHAW : “Assesment of machinability” The iron and steel institute, London, 1967
- [39] J.C. LEMAIRE, W.A. BACKOFFEN : “Adiabatic instability in the orthogonal cutting of steel” Metall. Trans. 1972
- [40] R. KOMANDURI, R.H. BROWN : “The mechanics of chip segmentation in machining“ ASME journal of engeneering for industry, 1981
- [41] Y. MATSUMOTO, M.M. BARSH : “Cutting mechanism during machining of hardened steel” Materials sciences and technology, 1987
- [42] W. KONIG, A. BERKTOLD : “Turning versus grinding – A comparison of surface integrity aspects and attainables accuracies“ 1993
- [43] W. KONIG, M. KLINGER, R. LINK : “Machining hard matériaux with geometrical defined cutting edges – Field of application and limitations“ Annals of the CIRP 1990
- [44] K. NAKAYAMA, M. ARAI, T. KANDA : “Machining characteristics of hard materials” Annals of CIRP 1988
- [45] H. SCHULTZ : “Hoghgeschwindigkeitsfrasen matalisher und nicht metallisher werkstoffe“ Carl Hanser verlag, 1989
- [46] H. WINKLER : “La formation des copeaux par usinage à grande vitesse“ Bulletin du cercle d’Etudes des Métaux , 1983
- [47] G. BOOTHROYD : “Temperature in orthogonal metal cutting“ 1963
- [48] P.K. WRIGHT : “Effects of rake face design on cutting tool temperature distributions“ ASME 1980
- [49] P. OXLEY : “Modelling machining processes with a view to their optimisation and to the adaptive control of metal cutting machine tools“ Robotics Computer Integrated Manufacturing 1988

-
- [50] JL. BACARIA : “Un modèle comportementale et transitoire pour la coupe des métaux“
Thèse de doctorat ENI de Tarbes 2001
- [51]R. RAKOTOMALALA et P. JOYOT : “Arbitrary lagrangien Eulerian thermomechanical finite element model of material cutting“ Num. Meth. Eng. 1993
- [52] P. JOYOT, R. RAKOTOMALALA et M. TOURATIER : “Modélisation de l’usinage formulée en Euler Lagrange Arbitraire“ journal Physics 1993
- [53] O. PANTALE, R. RAKOTOMALLA et M. TOURATIER : “An ALE three dimensional model of orthogonal and oblique metal cutting processes“ Inter. Jour. Forming Processes 1998
- [54] H.T.Y. YANG, M. HEINSTEIN et J.M. SHIH : “Adaptative 2D finite element simulation of metal forming processes“ 1989
- [55] T. OBIKAWA, H. SASAHARA, T. SHIRAKASHI et E. USUI : “Application of computational machining method to discontinuous chip formation“ Journal Manu. Sci. Eng. 1997
- [56] T.D. MARUSICH et M. ORTIZ : “Modeling and simulation of high speed machining“ Inter. Jour. Num. Meth. Eng. 1995
- [57] V. MADHAVAN, S. CHANDRASEKAR et T.N. FARRIS : “machining as a wedge indentation“ ASME 2000
- [58] PROPERTIES and SELECTION et METALLOGRAPHY, STRUCTURES and PHASE DIAGRAMS, METALS HANBOOKS Vol 1 et 8
- [59] JC HAMANN, B. VERQUIN, E. LE FLOCH : “Effect of various lubricating technics on tool loading and chip formation mechanisms in milling“ Colloque international du Cercle d’Etudes des Métaux, 18 et 19 novembre 1998, pages 5-1 à 5-6
- [60] M. CHAMBE : “Eléments de recherche quant aux applications de l’usinage à grande vitesse et de précision dans le processus de fabrication “ Thèse Doctorale 14 juin 2000 pages 84 à 85
- [61] G. POULACHON : “Aspect phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage c-BN des aciers durcis. Application : usinabilité de l’acier 100Cr6“ Thèse Doctorale 2 décembre 1999 page 37
- [62] ISO 4287 : “Spécifications géométrique des produits – Etat de surface : méthode du profil“ Afnor 1997
- [63] ISO 4288 : “Spécifications géométriques des produits – Etat de surface : méthode du profils, règles et procédures pour l’évaluation de l’état de surface“ Afnor 1998
- [64] B. SCHEFFER : “Etat de surface : comparaison des différentes normes nationales“ Rapport de la régie nationale des usines Renault et de la direction générale de la recherche scientifique et technique 1969.
- [65] J.M. KAHLES, M. FIELD, S.M. HARVEY : “High speed machining possibilities and needs” 1978
- [66] J.BRUNET “Influence des contraintes résiduelles induites par usinage sur la tenue à la fatigue des matériaux métalliques aéronautiques “ Thèse de Doctorat Ensam, 26 Novembre 1991
- [67] H. PASTOR : “L’évolution des matériaux pour outils de coupe“ Colloque International du Cercle d’Etudes des Métaux, 13 et 14 Novembre 1996, pages 7-1 à 7-11
- [68] Documentation technique ISCAR Fabricant d’outil
- [69] Documentation Widia Valenite Fabricant d’outil
- [70] H.K. TONSHOFF, A. MOHLFELD, C. SPENGLER : “PVD coated tools for metal cutting applications“ Actes de la conference internationale THE COATINGS IN MANUFACTURING ENGINEERING, Thessalonique 1999
- [71] G. GLABEL, D. GOURDET, JL. TOUS : “Matériaux pour outils de coupe“, Techniques de l’Ingénieurs, Traité de Mécanique et Chaleur.

[72] Plaitit, Documentation commerciale

[73] F.FLOCKE, G. EISENBLATTER : “Dry citting“ Annals du CIRP, VOL 46, 1997

[74] Documentation CETIM : “Les revêtements CVD et PDV appliqués aux outils de coupe“ 1994

[75] J. RECH « Thèse de Doctorat » faisant référence à J. RECH, B, LAHALLE “Bilan économique d’un atelier UGV de production de culasses” Rapport d’étude industrielle, Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers de Cluny, 2001

[76] M. FIELD, M.E. MERCHANT : “The mecanism of the formation of the discontinuous chip in the metal cutting“ Trans. ASME, Vol 71, 1949

[77] N.H. COOK, I. FINNIE and M.C. SHAW : “Dicontinuous chip formation“ Trans ASME, Vol 76, 1954

Internet

www.ceramic-center.com

www.e-leclerc.fr

www.sandvik.com

www.sumitomo.com

Annexe 1 : 3.1.1 Résultats des essais d'usure des outils céramique obtenus par la méthode uni factorielle.

Tableau 3.1 : $V_c=150\text{m/mn}$
 $f=0.16\text{ mm/tr}$, $a_p=1\text{ mm}$

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	2.5	0.095
2	10.0	0.155
3	22.	0.190
4	34.0	0.260
5	66..0	0.295
6	72.0	0.325

Tableau 3.2 : $V_c=300\text{ m/mn}$
 $f=0.16\text{ mm/tr}$, $a_p=1\text{ mm}$

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	2..1	0.130
2	9.0	0.170.
3	20.1	0.225
4	26.0	0.265
5	30.25	0.280
6	36.45	0.305

Tableau 3.3 : $V_c=400\text{ m/mn}$,
 $f=0.16\text{ mm/tr}$, $a_p=1\text{mm}$

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	1.43	0.08
2	4.25	0.190.
3	8.5	0.26
4	12.55	0.28
5	15.16	0.300
6	18.26	0.325

Tableaux : 3.1 à 3.3 évolutions de l'usure VB de l'outil en céramique Al_2O_3 , ébauche en acier 30CD12 avec 3 régimes différents

Tableau 3.4 : $V_c=150\text{ m/mn}$
 $f=0.16\text{ mm/tr}$, $a_p=1\text{mm}$

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	4.00	0.100
2	30.6	0.190
3	56.51	0.280
4	72.25	0.310
5	78..0	0.340

Tableau 3.5 : $V_c=300\text{ m/mn}$
 $f=0.16\text{ mm/tr}$, $a_p=1\text{mm}$

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	5.	0.10
2	14.0	0.15
3	20.50	0.20
4	28.1	0.260
5	40.0	0.30.5

Tableau 3.6 : $V_c=400\text{ m/mn}$
 $f=0.16\text{ mm/tr}$, $a_p=1\text{mm}$

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	4.0	0.14
2	7.0	0.17
3	12.62	0.230
4	17.32	0.290
5	20.25	0.325

Tableaux : 3.4 à 3.6 évolution de l'usure VB de l'outil en céramique $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$, ébauche en acier 30CD12 avec 3 régimes différents

Tableau 3.7 : $V_c=150$ m/mn
 $f=0.16$ mm/tr, $a_p=1$ mm

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	5.35	0.11
2	21.38	0.15
3	32.1	0.19
4	51.45	0.24
5	73.25	0.29
6	82.2	0.32

Tableau 3.8 : $V_c=300$ m/mn
 $f=0.16$ mm/tr, $a_p=1$ mm

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	5.53	0.11
2	13.0	0.18
3	26.26	0.23
4	41.49	0.270
5	46.70	0.305
6	50.0	0.340

Tableau 3.9 : $V_c=400$ m/mn
 $f=0.16$ mm/tr, $a_p=1$ mm

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	2.75	0.11
2	8.26	0.21

2

8.26

0.21

Tableaux : 3.7 à 3.9 évolution de l'usure VB de l'outil en céramique $Al_2O_3 + TiC$, ébauche en acier 30CD12 avec 3 régimes différents

Tableau 3.10 : $V_c=150$ m/mn
 $f=0.16$ mm/tr, $a_p=1$ mm

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	3.73	0.11
2	10.77	0.15
3	52.10	0.22
4	53.50	0.26
5	82.30	0.30
6	90.00	0.320

Tableau 3.11 : $V_c=300$ m/mn
 $f=0.16$ mm/tr, $a_p=1$ mm

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	4.00	0.14
2	12.00	0.17
3	21.00	0.20
4	31.25	0.240
5	40.45	0.270
6	51.22	0.300

Tableau 3.12 : $V_c=400$ m/mn
 $f=0.16$ mm/tr, $a_p=1$ mm

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	2.75	0.12
2	5.50	0.17
3	12.74	0.20
4	20.95	0.27
5	26.15	0.305
6	31.25	0.315

Tableaux : 3.10 à 3.12 évolution de l'usure VB de l'outil en céramique, $Al_2O_3 + TiC + TiN$, ébauche en acier 30CD12 avec 3 régimes différents

Annexe2 : 3.1.2 Résultats des essais d'usure des outils céramique obtenues par la méthode Multifactorielle

1-Evolution de l'usure en fonction du temps lors de l'usinage de l'acier 30CD12, selon les différents régimes de coupe Tableaux 3.13 à 3.28

Tableau 3.13 : Régime
(V=200m/mn ; f=0.11 mm/tr ; a_p=0.5mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	09.5	0.11.5
2	22.0	0.18
3	49.0	0.255
4	60.5	0.28
5	68	0.305
6	74	0.325

Tableau 3.14 : Régime
(V=200m/mn; f=0.11mm/tr; a_p=1mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	11	0.14
2	22	0.195
3	49.5	0.26
4	52.25	0.270
5	65.50	0.305
6	70.0	0.325

Tableau 3.15 : Régime
(V=200m/mn ; f=0.22mm/tr ; a_p=0.5mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	12.42	0.16
2	25.0	0.21
3	37.16	0.245
4	49.52	0.270
5	59.30	0.295
6	62.44	0.300
7	67.50	0.330

Tableau 3.16 : Régime
(V=200 m/mn, f=0.22mm/tr ; a_p=1mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	4.25	0.13
2	22	0.21
3	50.5	0.22
4	61.93	0.305
5	68.0	0.350

Tableau 3.17 : Régime
V=400 m/mn ; f=0.11mm/tr ; a_p=0.5mm

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	5.76	0.16
2	15.47	0.23
3	23.42	0.255
4	31.26	0.285
5	35.25	0.300
6	39.24	0.310

Tableau 3.18. : Régime
(V=400m/mn; f=0.11mm/tr; a_p=1mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	4.5	0.16
2	10	0.21
3	20	0.255
4	26.1	0.280
5	34.00	0.305
6	36.00	0.320

Tableau 3.19: Régime
(V=400m/mn ; f=0.22mm/tr ; a_p=0.5mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	4.0	0.15
2	9.0	0.19
3	17.0	0.255
4	26.04	0.290
5	30.0	0.300
6	32.75	0.315

Tableau 3.20 : Régime
(V=400 m/mn; f=0.22mm/tr; a_p=1 mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	3	0.15
2	13	0.250
3	28.5	0.310
4	31.25	0.325

Tableau 3.21: Régime
(V=200 m/mn ; f=0.11mm/tr ; a_p=.5mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	7.50	0.1
2	16.25	0.16
3	38.26	0.20
4	69.28	0.26
5	79.58	0.295
6	85.24	0.32

Tableau 3.22 : Régime
(V=200 m/mn; f=0.11mm/tr ; a_p=1mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	9	0.12
2	32.30	0.2
3	60.30	0.26
4	70.16	0.28
5	78.25	0.30
6	82.26	0.315

Tableau 3.23 : Régime
(V=200 m/mn ; f=0.22mm/tr ; a_p=0.5mm)

N°Essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	16.4	0.16
2	28.72	0.19
3	41	0.230
4	68	0.285
5	77.75	0.31
6	83.50	0.33

Tableau 3.24 : Régime
(V=200m/mn ; f=0.22mm/tr ; a_p=1mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mM)
1	8.	0.13
2	19.08	0.18
3	42.80	0.25
4	65.20	0.29
5	74.2	0.31
6	87.35	0.345

Tableau 3.25: Régime
(V=400m/mn ; f=0.11mm/tr ; a_p=0.5mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	5.0	0.15
2	10.0	0.19
3	20.05	0.21
4	39.65	0.26
5	47.50	0.305
6	52.0	0.320

Tableau 3.26 : Régime
V=400m/mn; f=0.11mm/tr; a_p=1mm;

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	10	0.18.
2	22	0.22
3	36	0.27
4	46.1	0.305
5	53.2	0.335

Tableau 3.27: Régime
(V=400 m/mn f=0.22mm/tr; a_p=0.5mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (Mm)
1	902	0.19
2	27	0.24
3	35.6	0.28
4	45.60	0.31
5	50.30	0.33

Tableau 3.28: Régime
(V=400m/mn ; f=0.22mm/tr ; a_p=1.0mm)

N°esSais	TemPs (mn)	Usure VB (mm)
1	7.8	0.16
2	25.30	0.24
3	36.0	0.28
4	72.72	0.315
5	51.16	0.355

Tableaux : 3.21 à 3.28 évolution de l'usure VB de l'outil en céramique Al₂O₃+TiC+TiN, ébauche en acier 30CD12 avec 8 régimes différents

2-Evolution de l'usure en fonction du temps lors de l'usinage de l'acier 30CD12 traité selon les différents régimes de coupe, Tableaux 3.29 à 3.36

Tableau 3.29 : Régime
(V=400m/mn ; f=0.11mm/tr ; a_p=0.5mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	4.5	0.12
2	12.0	0.215
3	18.0	0.270
4	22.52	0.305
5	30.10	0.360

Tableau 3.31: Régime
(V=400m/mn; f=0.11mm/tr; a_p=1.0mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	2.0	0.13
2	10.52	0.22
3	16.72	0.275
4	19.80	0.300
5	27.75	0.350

Tableau 3.30 : Régime
(V=400m/mn; f=0.22mm/tr ; a_p=0.5mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	4.0	0.16
2	10.0	0.23
3	16.25	0.275
4	18.72	0.305
5	26.50	0.355

Tableau 3.32 : Régime
(V=400m/mn; f=0.22mm/tr ; a_p=1.0mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	2.02	0.14
2	10.08	0.260
3	14.5	0.28
4	15.52	0.305
5	20.16	0.330

Tableaux : 3.29 à 3.32 évolution de l'usure VB de l'outil en céramique Al₂O₃+ZrO₂, ébauche en acier 30CD12 trempé avec 4 régimes différents

Tableau 3.33 : Régime
(V=400m/mn ; f=0.11mm/tr ; a_p=0.5mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	4	0.15
2	14	0.21
3	22.5	0.26
4	28.70	0.300
5	36.16	0.370

Tableau 3.34 : Régime
(V=400m/mn ; f=0.11mm/tr ; a_p=1.0mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	2.0	0.12
2	12.70	0.2
3	20.80	0.260
4	26.50	0.30
5	34.25	0.360

Tableau 3.35 : Régime
(V=400 m/mn; f=0.22mm/tr ; a_p=0.5mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	4.0	0.17
2	11.5	0.21
3	20.7	0.27
4	25.65	0.30
5	32.0	0.360

Tableau 3.36 : Régime
(V=400 m/mn; f=0.22mm/tr ; a_p=1.0mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	2.0	0.14
2	10.5	0.21
3	16	0.26
4	22.72	0.30
5	30.50	0.35

Tableaux : 3.33 à 3.36 évolution de l'usure VB de l'outil en céramique Al₂O₃+TiN+TiC, ébauche en acier 30CD12 trempé avec 4 régimes différents

3-Evolution de l'usure en fonction du temps lors de l'usinage de l'acier XC45 selon les différents régimes de coupe ; Tableaux 3.37 à 3.52

Tableau 3.37 : Régime
(V=200m/mn; f=0.11mm/tr; a_p=0.5mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	2.70	0.07
2	12.35	0.14
3	34.0	0.19
4	44.50	0.26
5	58.0	0.30
6	60.50	0.310

Tableau 3.38 : Régime
(V=200 m/mn; f=0.11mm/tr; a_p=1.0mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	3.02	0.090
2	12.50	0.150
3	25.0	0.200
4	50.08	0.280
5	56.50	0.300
6	59.75	0.325

Tableau 3.39 : Régime
(V=200 m/mn; f=0.22 mm/tr ; a_p=0.5 mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	4.1	0.110.
2	16.80	0.185
3	35.50	0.240
4	53.5	0.305
5	58.52	0.335

Tableau 3.40 : Régime
(V=200m/mn; f=0.22mm/tr; a_p=1.0mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	3.02	0.12
2	15.50	0.20
3	38.70	0.260
4	49.50	0.300
5	56.75	0.355

Tableau 3.41 : Régime
(V=400m/mn; f=0.11mm/tr; a_p=0.5mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	3.85	0.15
2	9.53	0.24
3	12.50	0.27
4	16.25	0.305
5	24.85	0.350

Tableau 3.42 : Régime
(V=400m/mn; f=0.11mm/tr ; a_p=1.0 mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	3.0	0.16
2	8.5	0.245
3	11.70	0.275
4	15.16	0.305
5	22.50	0.355

Tableau 3.43 : Régime
(V=400m/mn; f=0.22mm/tr; a_p=0.5mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	3.04	0.18
2	5.75	0.225
3	9.52	0.255
4	13.80	0.305
5	21.0	0.365

Tableau 3.44 : Régime
(V= 400 m/mn; f=0.22mm/tr; a_p=10mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	3.25	0.190
2	6.05	0.250
3	10.0	0.285
4	12.50	0.305
5	15.75	0.350

Tableaux : 3.37 à 3.44 évolution de l'usure VB de l'outil en céramique Al₂O₃+ZrO₂, ébauche en acier XC45 avec 8 régimes différents

Tableau 3.45 : Régime
(V=200m/mn; f=0.11mm/tr ; a_p=0.5mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	5.25	0.12
2	21.70	0.20
3	31.80	0.230
4	55.75	0.280
5	66.48	0.305
6	70.50	0.325

Tableau 3.46 : Régime
V=200m/mn; f=0.11mm/tr ; a_p=1.0mm ;

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	6.50	0.15
2	24.25	0.22
3	45.75	0.275
4	50.16	0.29
5	64.25	0.31
6	71.0	0.345

Tableau 3.47 : Régime
(V=200m/mn; f=0.22 mm/tr ; a_p=0.5 mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	8.50	0.18
2	32.42	0.25
3	48.75	0.285
4	62.25	0.315
5	68.10	0.355

Tableau 3.48 : Régime
(V=200m/mn; f=0.22mm/tr ; a_p=1.0mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	9.25	0.2
2	28.50	0.235
3	49.75	0.295
4	61.0	0.320
5	66.35	0.355

Tableau 3.49 : Régime
(V=400m/mn ; f=0.11mm/tr ; a_p=0.5mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	2.50	0.16
2	8.80	0.3-22
3	15.50	0.28
4	22.82	0.300
5	28.50	0.355

Tableau 3.50 : Régime
(V=400m/mn; f=0.11mm/tr; a_p=1.0mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	2.1	0.16
2	6.25	0.2
3	12.0	0.255
4	16.5	0.28
5	20.3	0.305
6	25.80	0.350

Tableau 3.51 : Régime
(V=400m/mn ; f=0.22mm/tr ; a_p=0.5mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	1.75	0.15
2	7.0	0.200
3	11.0	0.26
4	19.50	0.305
5	24.0	0.345

Tableau 3.52 : Régime
(V=400 m/mn; f=0.22mm/tr ; a_p=1.0mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	3.02	0.18
2	6.05	.0.24
3	12.1	0.27
4	14.25	0.29
5	18.5	0.315
6	25.50	0.355

Tableaux : 3.45à 3.52 évolution de l'usure VB de l'outil en céramique Al₂O₃+TiC+TiN, ébauche en acier XC45 avec 8 régimes différents

4-Evolution de l'usure en fonction du temps lors de l'usinage de l'acier XC45 traité
Tableaux 3.53 à 3.56

Tableau 3.53 : Régime
(V=200m/mn; f=0.11mm/tr ; a_p=0.5mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	0.5	0.210
2	1.5	0.24
3	2.	0.270
4	4.78	0.305
5	6.02	0.385

Tableau 3.54 : Régime
(V=400m/mn; f=0.11mm/tr ; a_p=0.5mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	0.16	0.210
2	0.25	0.240
3	0.5	0.270
4	1.0	0.300
5	1.75	0.350

Tableaux : 3.53à 3.54 évolution de l'usure VB de l'outil en céramique Al₂O₃+ZrO₂, ébauche en acier XC45 trempé avec 2 régimes différents

Tableau 3.55 : Régime
(V=200m/mn; f=0.11mm/tr ; a_p=0.5mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	1.0	0.22
2	2.50	0.26
3	4.08	0.28
4	6.75	0.30
5	8.16	0.365

Tableau 3.56 : Régime
(V=400m/mn, f=0.11mm/tr ; a_p=0.5mm)

N°essais	Temps (mn)	Usure VB (mm)
1	0.50	0.20
2	1.0	0.25
3	1.50	0.285
4	1.75	0.300
5	2.05	0.365

Tableaux : 3.55 à 3.56 évolution de l'usure VB de l'outil en céramique Al₂O₃+TiC+TiN, ébauche en acier XC45 trempé avec 2 régimes différents

Annexe3 :

3.2. Résultats des essais d'usure de l'outil en carbure P35 et de la rugosité des surfaces de la pièce en acier 30CD12

Tableau 3.59 : Régime
($V_c = 95$ m/mn, $f = 0.08$ mm/tr, $a_p = 0.5$ mm)

N° : essais	Tu (mn)	Vb (mm)	Ra (μ m)
1	4.48	0.057	2.87
2	8.57	0.093	2.89
3	13.43	0.141	3.22
4	17.90	0.205	3.70
5	22.365	0.243	3.93
6	26.822	0.283	4.09
7	31.277	0.305	4.69

Tableau 3.60 : Régime
 $V_c = 95$ m/mn, $f = 0.08$ mm/tr, $a_p = 1$ mm)

N° : essais	Tu (mn)	Vb (mm)	Ra (μ m)
1	4.482	0.108	3.11
2	8.957	0.126	3.07
3	13.427	0.158	3.44
4	17.892	0.220	3.13
5	22.350	0.263	3.97
6	26.802	0.308	4.27

Tableau 3.61 : Régime
($V_c = 95$ m/mn, $a = 0.18$ mm/tr, $p = 0.5$ mm)

N° : essais	Tu (mn)	Vb (mm)	Ra (μ m)
1	2.065	0.070	3.18
2	4.137	0.110	3.05
3	6.207	0.135	3.20
4	8.265	0.170	3.27
5	10.322	0.207	3.62
6	12.385	0.235	3.64
7	14.440	0.268	3.61
8	16.505	0.283	3.65
9	18.565	0.315	3.94

Tableau 3.62 : Régime
($V_c = 95$ m/mn, $a = 0.18$ mm/tr, $p = 1$ mm)

N° : essais	Tu (mn)	Vb (mm)	Ra (μ m)
1	2.057	0.072	2.64
2	4.112	0.117	2.79
3	6.170	0.150	3.06
4	8.227	0.175	3.12
5	10.277	0.200	3.30
6	12.327	0.236	3.05
7	14.380	0.283	3.38
8	16.430	0.286	4.11
9	18.480	0.311	4.41

Tableau 3.63 : Régime
($V_c = 264$ m/mn, $a = 0.08$ mm/tr, $p = 0.5$ mm)

N° : essais	Tu (mn)	Vb (mm)	Ra (μ m)
1	1.307	0.082	2.73
2	2.617	0.143	3.28
3	3.920	0.182	3.63
4	5.230	0.227	4.41
5	6.532	0.257	4.08
6	7.835	0.310	4.62

Tableau 3.64 : Régime
($V_c = 264$ m/mn, $a = 0.08$ mm/tr, $p = 1$ mm)

N° : essais	T(mn)	Vb (mm)	Vb (mm)
1	1.307	0.107	3.38
2	2.615	0.155	3.40
3	3.92	0.207	3.96
4	5.225	0.260	4.13
5	6.532	0.317	4.88

Tableau 3.65 : Régime
($V_c = 264$ m/mn, $f = 0.16$ mm/tr, $a_p = 0.5$ mm)

N° : essais	Tu(mn)	Vb(mm)	Ra (μ m)
1	3.237	0.055	1.59
2	6.475	0.101	1.90
3	9.710	0.131	2.22
4	12.942	0.157	2.65
5	16.175	0.210	3.11
6	19.405	0.255	3.49
7	22.625	0.286	3.65
8	25.845	0.312	4.08

Tableau 3.66 : Régime
($V_c = 264$ m/mn, $f = 0.16$ mm/tr, $a_p = 1$ mm)

N° : essais	Tu (mn)	Vb (mm)	Ra (μ m)
1	3.24	0.087	2.20
2	6.477	0.140	2.62
3	9.712	0.185	3.18
4	12.950	0.250	3.15
5	16.177	0.308	3.51

Tableau : 3.56 à 3.66- Evolution de l'usure VB de l'outil P35 et de la rugosité (Ra) des surfaces en acier 30CD12 selon 8 régimes différents

Annexe 4 :

Programme des efforts de coupe

```
% --- Executes on button press in radiobutton2.function radiobutton2_Callback(hObject,
eventdata, handles)
% hObject    handle to radiobutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of radiobutton2
test = get(handles.radiobutton2,'value') ;
if test==1
    set(handles.mesurefx,'string',[45.660 61.000 67.330 55.330 74.660 106.66 247.66 273.66])
;
    set(handles.mesurefy,'string',[38.000 48.330 74.660 73.000 86.330 95.660 166.660
168.000]) ;
    set(handles.mesurefz,'string',[46.000 58.330 66.000 71.660 79.660 116.000 257.000
312.000]) ;
else
    set(handles.mesurefx,'string',[57.660 53.660 93.660 92.330 178.330 217.660 319.000
304.330]) ;
    set(handles.mesurefy,'string',[53.000 64.000 74.000 104.000 201.000 290.000 231.000
258.330]) ;
    set(handles.mesurefz,'string',[86.660 90.330 120.330 177.000 233.000 352.660 355.000
415.130]) ;
end
    set(handles.vcm,'string',[95 207]) ;
    set(handles.pm,'string',[0.5 1]) ;
    set(handles.am,'string',[0.08 0.18]) ;
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%    See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end
function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
%    str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2 as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```

% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3 as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit4 as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5 as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end
function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit6 as text
%    str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit6 as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit7 as text
%    str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit7 as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function facteurx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to facteurx (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

```

```

end
function facteurx_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to facteurx (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of facteurx as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of facteurx as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function facteury_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to facteury (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function facteury_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to facteury (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of facteury as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of facteury as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function facteurz_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to facteurz (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function facteurz_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to facteurz (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of facteurz as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of facteurz as a double
% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%    See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit11_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit11 as text
%    str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit11 as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit12 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%    See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit12_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit12 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit12 as text
%    str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit12 as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit13_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit13 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%    See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

```

```

function edit13_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit13 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit13 as text
%    str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit13 as a double
% --- Executes on button press in validation.
function validation_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to validation (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
%----- Valeur de Fx

var1=get(handles.mesurefx,'string') ;
Y=str2num(char(var1));
var2 = get(handles.vcm,'string') ;
Vmn=str2num(char(var2));
var3 = get(handles.am,'string') ;
Amn=str2num(char(var3)) ;
var4 = get(handles.pm,'string') ;
Pmn=str2num(char(var4)) ;
% calcul des coefficients du modele
% la matrice de planification des experiences
MPE=[-1 1 -1 1 -1 1 -1 1;-1 -1 1 1 -1 -1 1 1;-1 -1 -1 -1 1 1 1 1];

y1=log(Y) ;
b0=mean(y1) ;
b1=mean(MPE(1, :).*y1) ;
b2=mean(MPE(2, :).*y1) ;
b3=mean(MPE(3, :).*y1) ;
% calcul du modele

c1=2/(log(Vmn(2))-log(Vmn(1))) ;
c3=2/(log(Amn(2))-log(Amn(1))) ;
c5=2/(log(Pmn(2))-log(Pmn(1))) ;
c2=(-log(Vmn(2))-log(Vmn(1)))/(log(Vmn(2))-log(Vmn(1)));
c4=(-log(Amn(2))-log(Amn(1)))/(log(Amn(2))-log(Amn(1))) ;
c6=(-log(Pmn(2))-log(Pmn(1)))/(log(Pmn(2))-log(Pmn(1))) ;
% calcul de contante lieu au matriciel
D=b0+b1*c2+b2*c4+b3*c6;
C=exp(D);
% calcul de x y z
x=b1*c1;
y=b2*c3;
z=b3*c5;
pl=[C x y z] ;
plt = num2str(pl) ;
set(handles.paramx,'string',plt);
% l'estimation d'apres le modele
ye=zeros(1,8);

```

```

ye(1)=log(C*(Vmn(1)^x)*(Amn(1)^y)*(Pmn(1)^z)) ;
ye(2)=log(C*(Vmn(2)^x)*(Amn(1)^y)*(Pmn(1)^z));
ye(3)=log(C*(Vmn(1)^x)*(Amn(2)^y)*(Pmn(1)^z));
ye(4)=log(C*(Vmn(1)^x)*(Amn(1)^y)*(Pmn(1)^z)) ;
ye(5)=log(C*(Vmn(1)^x)*(Amn(1)^y)*(Pmn(2)^z));
ye(6)=log(C*(Vmn(2)^x)*(Amn(1)^y)*(Pmn(2)^z));
ye(7)=log(C*(Vmn(1)^x)*(Amn(2)^y)*(Pmn(2)^z));
ye(8)=log(C*(Vmn(2)^x)*(Amn(2)^y)*(Pmn(2)^z));

% calcul de facteur de correlation
R=sqrt(1-(sum((y1(:)-ye(:)).^2))/(sum((y1(:)-mean(y1)).^2)));
set(handles.facteurx,'string',R) ;
%----- Valeur de Fy

var1=get(handles.mesurefy,'string') ;
Y=str2num(char(var1));
var2 = get(handles.vcm,'string') ;
Vmn=str2num(char(var2));
var3 = get(handles.am,'string') ;
Amn=str2num(char(var3)) ;
var4 = get(handles.pm,'string') ;
Pmn=str2num(char(var4)) ;
% calcul des coefficients du modele
% la matrice de planification des experiences
MPE=[-1 1 -1 1 -1 1 -1 1;-1 -1 1 1 -1 -1 1 1;-1 -1 -1 -1 1 1 1 1];

y1=log(Y) ;
b0=mean(y1) ;
b1=mean(MPE(1, :).*y1) ;
b2=mean(MPE(2, :).*y1) ;
b3=mean(MPE(3, :).*y1) ;
% calcul du modele

c1=2/(log(Vmn(2))-log(Vmn(1))) ;
c3=2/(log(Amn(2))-log(Amn(1))) ;
c5=2/(log(Pmn(2))-log(Pmn(1))) ;
c2=(-log(Vmn(2))-log(Vmn(1)))/(log(Vmn(2))-log(Vmn(1)));
c4=(-log(Amn(2))-log(Amn(1)))/(log(Amn(2))-log(Amn(1))) ;
c6=(-log(Pmn(2))-log(Pmn(1)))/(log(Pmn(2))-log(Pmn(1))) ;

% calcul de contante lieu au matriciel
D=b0+b1*c2+b2*c4+b3*c6;
C=exp(D);
% calcul de x y z
x=b1*c1;
y=b2*c3;
z=b3*c5;
pl=[C x y z] ;
plt = num2str(pl) ;
set(handles.paramy,'string',plt);

```

```

% l'estimation d'apres le modele
ye=zeros(1,8);

ye(1)=log(C*(Vmn(1)^x)*(Amn(1)^y)*(Pmn(1)^z)) ;
ye(2)=log(C*(Vmn(2)^x)*(Amn(1)^y)*(Pmn(1)^z));
ye(3)=log(C*(Vmn(1)^x)*(Amn(2)^y)*(Pmn(1)^z));
ye(4)=log(C*(Vmn(1)^x)*(Amn(1)^y)*(Pmn(1)^z)) ;
ye(5)=log(C*(Vmn(1)^x)*(Amn(1)^y)*(Pmn(2)^z));
ye(6)=log(C*(Vmn(2)^x)*(Amn(1)^y)*(Pmn(2)^z));
ye(7)=log(C*(Vmn(1)^x)*(Amn(2)^y)*(Pmn(2)^z));
ye(8)=log(C*(Vmn(2)^x)*(Amn(2)^y)*(Pmn(2)^z));

% calcul de facteur de corrélation
R=sqrt(1-(sum((y1(:)-ye(:)).^2))/(sum((y1(:)-mean(y1)).^2)));
set(handles.facteur,'string',R) ;

%----- Valeur de Fz

var1=get(handles.mesurefz,'string') ;
Y=str2num(char(var1));
var2 = get(handles.vcm,'string') ;
Vmn=str2num(char(var2));
var3 = get(handles.am,'string') ;
Amn=str2num(char(var3)) ;
var4 = get(handles.pm,'string') ;
Pmn=str2num(char(var4)) ;
% calcul des coefficients du modele
% la matrice de planification des experiences

MPE=[-1 1 -1 1 -1 1 -1 1;-1 -1 1 1 -1 -1 1 1;-1 -1 -1 -1 1 1 1 1];

y1=log(Y) ;
b0=mean(y1) ;
b1=mean(MPE(1, :).*y1) ;
b2=mean(MPE(2, :).*y1) ;
b3=mean(MPE(3, :).*y1) ;
% calcul du modele
c1=2/(log(Vmn(2))-log(Vmn(1))) ;
c3=2/(log(Amn(2))-log(Amn(1))) ;
c5=2/(log(Pmn(2))-log(Pmn(1))) ;
c2=(-log(Vmn(2))-log(Vmn(1)))/(log(Vmn(2))-log(Vmn(1)));
c4=(-log(Amn(2))-log(Amn(1)))/(log(Amn(2))-log(Amn(1))) ;
c6=(-log(Pmn(2))-log(Pmn(1)))/(log(Pmn(2))-log(Pmn(1))) ;

% calcul de contante lieu au matriciel
D=b0+b1*c2+b2*c4+b3*c6;

C=exp(D);

% calcul de x y z

```

```

x=b1*c1;
y=b2*c3;
z=b3*c5;

pl=[C x y z] ;
plt = num2str(plt) ;

set(handles.paramz,'string',plt);

% l'estimation d'apres le modele
ye=zeros(1,8);
ye(1)=log(C*(Vmn(1)^x)*(Amn(1)^y)*(Pmn(1)^z)) ;
ye(2)=log(C*(Vmn(2)^x)*(Amn(1)^y)*(Pmn(1)^z));
ye(3)=log(C*(Vmn(1)^x)*(Amn(2)^y)*(Pmn(1)^z));
ye(4)=log(C*(Vmn(1)^x)*(Amn(1)^y)*(Pmn(1)^z)) ;
ye(5)=log(C*(Vmn(1)^x)*(Amn(1)^y)*(Pmn(2)^z));
ye(6)=log(C*(Vmn(2)^x)*(Amn(1)^y)*(Pmn(2)^z));
ye(7)=log(C*(Vmn(1)^x)*(Amn(2)^y)*(Pmn(2)^z));
ye(8)=log(C*(Vmn(2)^x)*(Amn(2)^y)*(Pmn(2)^z));
% calcul de facteur de corrélation
R=sqrt(1-(sum((y1(:)-ye(:)).^2))/(sum((y1(:)-mean(y1)).^2)));
set(handles.facteurz,'string',R) ;
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function paramx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to paramx (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%    See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

```

Annexe 5 :

Programme de calcul pour la modélisation des efforts de coupe et de la Température **1- le programme pour les contraintes dues aux efforts de coupe**

```
OPTI DIME 3 ELEM CUB8 ;
* -----LES DONNEES----- *
ap= 0.8E-3; la profondeur de passe en mm
f=0.8E-3; l'avance par tour en mm/tr
kc=150; effort spécifique en daNlmm2
*-----.CÀLCUL DES EFFORTS DE COUPE-----.*
Ampfz=kc*ap*f ; l'effort tangentiel de coupe Fc
ampfx = {2*ampfz}/5; l'effort de pénétration Fa
ampfy= {2*ampfz}/5; l'effort d'avancement Ff
*-----GEOMETRIE-----*
p1 =0.4E-3 0. 0.; p2= 12.3E-3 0. 0.; p3 = 12.7E-3 0.4E-3 0.;
p4=12.7E-3 12.3E-3 0.; p5 := 12.58E-3 12.58E-3 0.;
p6= 12.3E-3 12.7E-3 0.; p7= 0.4E-3 12.7E-3 0.;
p8= 0. 12.3E-3 0.; p9: 0. 0.4E-3 0.;
o1 = 0.4E-3 0.4E-3 0.; o2: 12.3E-3 0.4E-3 0.; o3 : 0.4E-3 12.3E-3 0.;
l1 = D 30 p1 p2; l2 = C 2 p2 o1 p3; l3 = D 30 p3 p4; l4 = D 1 p4 p5;
l5=D 1 p5 p6; l6=D 30 p6 p7;l7 = C2 p7 o3 p8; l8=D 30 p8 p9;
l9=C2 p9 o1 p1;
s1 = l1 ET l2 ET l3 ET l4 ET l5 ET l6 ET l7 ET l8 ET l9;
surf1 = SURF s1 'PLAN';
p11 = 0.4E-3 0. 4.76E-3; p12=12.3E-3 0. 4.76E-3;
p13= 12.7E-3 0.4E-3 4.76E-3;
p14= 12.7E-3 12.3E-3 4.76E-3; p15= 12.58E-3 12.58E-3 4.76E-3;
p16:= 12.3E-3 12.7E-3 4.76E-3; p17= 0.4E-3 12.7E-3 4.76E-3;
p18 = 0. 12.3E-3 4.76E-3; p19=0. 0.4E-3 4.76 E-3;
o11 = 0.4E-3 0.4E-3 4.76E-3; o12: 12.3E-3 0.4E-3 4.76E-3;
o13= 0.4E-3 12.3E-3 4.76E-3;
l11 =D30 p11 p12; l12= C 2 p12 o11 p13;
l13=D3 p13 p14;l14=D1 p14p15;
l15 = D 1 p15 p16; l16 = D 30 p16 p17;
l17 = C 2p17 o13 p18;l18= D30 p18 p19;
l19=C2p19 o1 l p11;
S2 =l11 ET l12 ET l13 ET l14 ET l15 ET l16 ET l17 ET l18 ET l19;
Surf2= SURF s2 'LAN';
lcl = D 30 p1 p2; lc2= D l2 p2 p12;
lc3 =D 30 p12 p l1' lc4 =D 12 p11 p1;
s3 = lcl ET lc2 ET lc3 ET lc4;
$urf3= SURF s3 'PLAN';
ld1 = D 30 p9 p8; ld2= D 12 pB p18;
ld3 : D 30 p18 p19; ld4 = D 12 p19 p9;
s4 : ld1 ET ld2 ET ld3 ET ld4;
surf4= SURF s4 'LAN';
vl = surf1 VOLU surf2;
*-----DEFINITION DU MODELE ET DU MÂTERIAU -----*
modl = MODE vl MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE ISOTROPE;
matl : MÂTR madl YOUN 6.5E+5 SIGY 400.E+6 NU 0.3 RHO 11.7E+3;
```

-----LES CONDITIONS AUX LIMITES-----

c11 = BLOQ DEPL ROTA surf1;

c12 = BLOQ DEPL ROTA surf3;

c13 = BLOQ DEPL ROTA surf4;

cl = c11 ET c12 ET c13;

-----LE CHARGEMENTS-----

ampfr= -384.; ampfy : -384.; ampfz: -960.;

fort = FORCE (ampfx amp* ampfz) p13;

list1 = PROG PAS 1. 8.;

lisf1 = PROG 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. ;

evf1 = EVOL 'MÂNU'temps' list1 'force' lisf1;

chal = CHAR'MECA'for1 evf1;

* _____ CALCUL PAS A PAS _____ *

TABI = TABLE;

TAB 1 . BLOCAGES_MECANIQUES' = cl,

TAB1.'MODELE = mod1;

TAB 1.'CHARGEMENT' = chal.

TAB 1.'CARACTERISTIQUES' = mat1 ;

TÂB I. 'TEMPS_CALCULES' = list1 ;

TÂB I.'GRANDS_DEPLACEMENTS' = FAUX;

PASÂPAS TABI;

*-----RESOLUTION----- *

rig1 =RIGI mod1 mat1;

rig= rig1 ET cl;

res1 = RESO rig for1;

Inst=4;

*-----RESULTATS----- *

SIGMÂ1 = TAB 1.'CONTRAINTE'. inst;

s_zz= (EXCO SMZZ SIGMAI) / 1.e6;

TRAC mod1 s_zz ;

2.- I-e programme pour la répartition de la température

OPTI DIME 2 ELEM QUA4;

-----CREATION DE GEOMETRIE-----

p1 = 0.4E-3 0. 0.; p2=12.3E-3 0. 0.; p3=12.7E-3 0.4E-3 0.;

p4= 12.7E-3 12.3E-3 0.; p5= 12.3E-3 12.7E-3 0.;

p6:= 0.4E-3 12.7E -3 0.; p7= 0. 12.3E-3 0.; p8= 0. 0.4E-3 0.;

o1 = 0.4E-3 0.4E-3 0.; o2 = 12.3E-3 0.4E-3 0.;

o3 = 12.3E-3 12.3E-3 0.; o4= 0.4E-3 12.3E-3 0.;

11 = D 30 p1 p2.;12 = C 2 p2 o2p3; 13 = D 30 p3 p4; 14 = C 2 p4 o3 p5;

15 = D 30 p5 p6; 16 = C2p6 o4 p7;17=D 30 p7p8; 18= C 2p8 o1 p1;

s1 = 11 ET 12 ET 13 ET 14 ET 15 ET 16 ET 17 ET 18;

surf1 = SURF s1 'PLAN';

p11 = 0.4E-3 0. 4.76E-3; p12= 12.3E-3 0. 4.76E-3;

F13 = 12.7E-3 0.4E-3 4.76E-3 ; p14 = 12.7E-3 12.3E-3 4.76E-3;

p15 = 12.3E-3 12.7E-3 4.76E-3; p16=0.4E-3 12.7E-3 4.76E-3;

p17 =0. 12.3E-3 4.76E-3 ; p18=0. 0.4E-3 4.76E-3 ;

o11=0.4E-3 0.4E-3 4.76E -3 ; o12= 12.38 3 G.4E-3 4"76E-3;

o13 = 12.3E- 3 12.3E-3 4.76E-3;o14= 0.4E-3 12.3E-3 4.76E-3;

```

I11 =D 30 p11 p12; I12= C 2 p12 o12 p13;
I13=D 30 p13 p14; I14 = C2 p14 o13 p15;
I15 =D 30 p15 p16; I16 = C 2 p16 o14 p17;
I17= D 30 p17 p18; I18 = C 2 p18 o11 p11;
s2= I11 ET I12 ET I13 ET I14 ET I15 ET I16 ET I17 ET I18;
surf2= SURF s2 'LAN';
pc= 1.E-3 12.7E-3 4.76E-3;pd= 0.4E-3 12.7E-3 4.76E-3 ;
pe = 0.E-3 12.3E-3 4.76E-3 ; pa = 0.E-3 11.7E-3 4.76E-3,
pb= 1.E-3 11.7E-3 4.76E-3;
lca = D 2 pa pb; lcb = D 2 pb pc;
lcc = D 2 pc pd; lcd= C 2 pd o4 pe;
lce=D2 pe pa;
St=lca ET lcb ET lcc ET lcd ET lce;
Surft= SURF st 'PLAN'.
ELIM 0.2E-3 surf2 surft;
I150 =D 28 p15 pc; I160 = D 2 pc pb;
I170 = D 2 pb pa; I180 = D 28 pa p18;
s3 :I11 ET I12 ET I13 ET I14 ET I150 ET I160 ET I170 ET I180 ET I18
surf3: SURF s3 'PLAN';
ss = 15 ET 16 ET 17 ;
sc=I15 ET 16 ET 117:
surf4:= ss REGLER 12 sc.
v1 = surf1 VOLU surf2;
*-----DONNEES DU PROBLEME-----*
* -----MODELISATION-----*
mod1 = MODL v1 THERMIQUE ISOTROPE ;
mod2 := MODE (surf3 ET surf4) CONVECTION;
*-----CARACTERISTIQUES DU MATERIAU-----*
Mat1 = MATR mod1 K 150;
Mat2 = MATR mod2 H 950 ;
*-----CCONDITIONS AUX LIMITES-----*
C11 =BLOQUE T surft;
fcll = DEPI ell 1072.01;
flul: COOV mod2 mat2 T 30. ;
cond1=COND mod1 mat1;
cond2 = COND mad2 mat2;
*-----ÂSSEMBLAGE DES PREMIERS ET SECOND MEMBRES----*
condtot = cond1 ET cond2 ET c11 ;
flutot= fcll ET flul;
*-----RESOLUTION----- *
T= RESOLU condtol flutot;
*-----RESULTAT-----*
TRAC t wl ;

```