



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université de Tissemsilt  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département des Sciences et de la Technologie



# Polycopié de cours

---

## Coupe des métaux 2 - Cours -

---

**Filière :** Génie Mécanique

**Spécialité :** Fabrication Mécanique et Productique

Préparé par : Dr. HAMDI Amine

## SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	1
AVANT-PROPOS.....	4

### CHAPITRE 1: ASPECT ECONOMIQUE ET OPTIMISATION DES OPERATIONS D'USINAGE

1.1- Introduction.....	5
1.2- Variables des processus d'usinage .....	5
1.2.1- Variables d'entrée.....	6
1.2.2- Variables de sortie .....	6
1.3- Choix du procédé d'usinage.....	7
1.3.1- Caractéristiques des pièces .....	7
1.3.2- Matériau de la pièce .....	7
1.3.3- Caractéristiques dimensionnelles et géométriques .....	8
1.3.4- Texture de la surface.....	8
1.3.5- Intégrité de la surface .....	8
1.3.6- Productivité .....	8
1.3.7- Coût de production.....	9
1.3.8- Impacts sur l'environnement.....	9
1.4- Principe de l'optimisation.....	9
1.5- Différents paramètres d'une production.....	11
1.5.1- Le coût de revient d'une pièce.....	11
1.5.2- Le temps de production.....	11
1.6- Calcul du temps de production.....	11
1.7- Recherche du coût de production.....	13
1.8- Etude de l'optimisation : critère, coût minimum.....	13
1.8.1- Pour une avance $f$ donnée.....	13
1.8.2- Pour une vitesse de coupe $V_c$ donnée.....	15
1.8.3- Recherche d'un point optimum.....	16
1.8.4- Evolution du prix total en fonction de $f$ et de $V_c$ .....	16
1.9- Etude de l'optimisation.....	17
1.9.1- Pour une avance fixée.....	17
1.9.2- Pour une vitesse de coupe fixée.....	18
1.10- Choix d'une solution.....	18
1.11- Couple Outil/Matière.....	20
1.11.1- Introduction.....	20
1.11.2- Optimisation du processus de fabrication par la méthode COM.....	23
1.11.3- Exemples d'application.....	24
1.12- Conclusion.....	26

### CHAPITRE 2: NATURE ET PROPRIETES DES OUTILS DE COUPE

2.1- Introduction.....	27
2.2- Composition et géométrie .....	28
2.3- Corps d'outils .....	29
2.4- Matériaux des outils de coupe.....	29
2.4.1- Aciers rapides supérieurs (A.R.S).....	31

2.4.2- Carbures métalliques .....	35
2.4.3- Cermets (carbures cémentés).....	37
2.4.4- Céramiques.....	38
2.4.5- Nitrure de bore cubique (CBN).....	41
2.4.6- Diamants polycristallin (PCD).....	42
2.5- Traitements et revêtements des outils de coupe .....	43
2.5.1- Aciers rapides .....	43
2.5.2- Revêtement des carbures métalliques.....	46
2.6- Matériaux d'outils pour usinage par abrasion .....	47
2.6.1- Abrasifs.....	47
2.6.2- Grains abrasifs .....	48
2.6.3- Meule.....	49
2.6.4- Bande abrasive .....	50

### CHAPITRE 3: USINAGE DUR ET USINAGE A SEC – L'USINABILITE DES MATERIAUX

3.1- Introduction .....	51
3.2- Matériaux durs .....	51
3.3- Procédés d'usinage des matériaux durs .....	52
3.3.1- Tournage dur .....	53
3.3.2- Brochage dur .....	54
3.3.3- Alésage dur .....	55
3.3.4- Fraisage dur .....	55
3.4- Avantages de l'usinage dur par rapport à l'usinage conventionnel.....	55
3.5- Usinage à sec.....	57
3.6- Usinabilité des matériaux .....	58
3.6.1- Définitions de l'usinabilité.....	58
3.6.2- Critères d'évaluation de l'usinabilité .....	59
3.6.3- Facteurs affectant l'usinabilité .....	52
3.6.3.1- État du matériau .....	62
3.6.3.2- Propriétés physiques du matériau .....	64
3.6.3.3- Paramètres d'usinage .....	65
3.7- Conclusion.....	66

### CHAPITRE 4: MODELISATION DE LA COUPE

4.1- Introduction .....	67
4.2- Modélisation de la coupe .....	68
4.3- Efforts de coupe .....	70
4.3.1- Equation d'équilibre du copeau .....	71
4.3.2- Détermination de $F_c$ et $F_f$ .....	72
4.3.3- Recherche de la puissance minimale nécessaire à la coupe .....	74
4.3.4- Calcul des contraintes $\tau$ et $\sigma$ et du coefficient de frottement $f$ .....	76

### CHAPITRE 5: USINAGE DES MATIERES PLASTIQUES ET DES MATERIAUX COMPOSITES

5.1- Introduction .....	77
5.2- Généralités sur les matériaux composites .....	77

5.2.1- Définition .....	77
5.2.2- Renforts .....	79
5.2.3- Matrices .....	81
5.3- Usinage des matières plastiques et des matériaux composites .....	84
5.3.1- Introduction .....	84
5.3.2- Problème à résoudre .....	84
5.3.3- Outils de coupe .....	84
Références bibliographiques .....	96

## AVANT-PROPOS

Ce polycopié de cours, intitulé "**Coupe des métaux 2**", est destiné aux étudiants de Master 1 en génie mécanique, spécialité Fabrication mécanique et productique (**FM&P**), lors du semestre 2. Il constitue une extension enrichissante du domaine d'usinage des matériaux, se focalisant sur l'approfondissement des connaissances transmises dans le module préalable, "Coupe de métaux 1" du semestre 1. L'importance de ce module dans l'industrie et l'enseignement réside dans son rôle crucial pour former des professionnels compétents, prêts à relever les défis actuels de la fabrication mécanique. En mettant l'accent sur l'optimisation des opérations d'usinage, la maîtrise des nouvelles technologies, et la promotion de solutions de fabrication durables, ce cours offre des avantages significatifs. Son contenu a été élaboré en conformité avec les directives de la dernière mise à jour du plan de cours, aligné sur les recommandations du comité pédagogique national du domaine des sciences et technologies (CPND-ST).

L'objectif principal de ce module est d'approfondir la compréhension des étudiants de la spécialité FM&P au phénomène de coupe en présentant des informations plus détaillées. Le cours débutera par l'exploration des critères d'optimisation des paramètres de coupe, mettant particulièrement l'accent sur le temps et le coût d'usinage. Le chapitre 1 guidera les étudiants dans la recherche du coût optimum en usinage pour des opérations efficaces. Dans le chapitre 2, nous plongerons dans l'introduction aux outils de coupe, explorant les différentes natures d'outils ainsi que les propriétés métallurgiques qui les rendent essentiels dans le processus de coupe. Le chapitre 3 abordera des sujets cruciaux tels que l'usinage dur, l'usinage à sec, et l'usinabilité des matériaux. Les matériaux durs, les procédés d'usinage associés, ainsi que les critères et les facteurs influençant l'usinabilité seront explorés en détail. Le chapitre 4 se concentrera sur la modélisation, une technique essentielle pour prédire la géométrie du copeau, les efforts de coupe, et les échauffements de la pièce et de l'outil. La modélisation reposera sur les conditions de coupe et les propriétés thermomécaniques des matériaux. Pour conclure, le dernier chapitre examinera les particularités de l'usinage des matières plastiques et des matériaux composites, couvrant les généralités, les types de renforts, les matrices, et les différentes résines utilisées.

Ce cours vise à offrir aux étudiants une vision complète et approfondie de la coupe des métaux et des matériaux composites, renforçant ainsi leur expertise dans le domaine de la fabrication mécanique et de la productique.

# CHAPITRE 1 :

## Aspect économique et optimisation des opérations d'usinage

### 1.1- Introduction

En usinage mécanique, l'objectif fondamental est de produire une pièce au coût minimal tout en respectant les conditions technologiques nécessaires. Atteindre cet objectif implique d'intervenir à différentes étapes de l'élaboration de la pièce, notamment :

- ✧ La conception du produit et la définition de la pièce,
- ✧ Le choix du processus de fabrication et l'optimisation des conditions de coupe.

Cependant, l'optimisation n'est possible que lorsque des choix spécifiques sont faits, tels que :

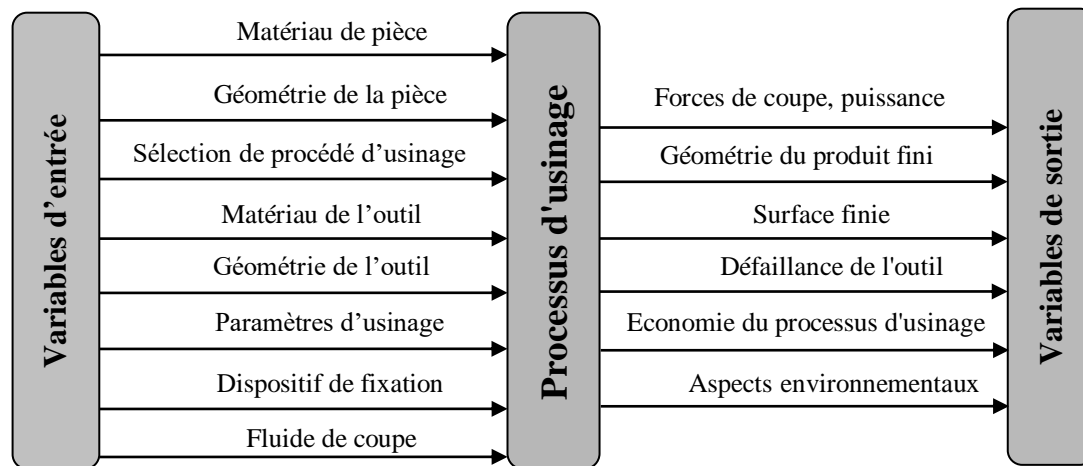
- ✧ Les machines-outils,
- ✧ Les dispositifs de maintien en position de la pièce,
- ✧ La nature et la géométrie des outils,
- ✧ Le choix nombre de passes.

Le choix des conditions de coupe influe directement sur le temps d'usinage de la pièce, et donc sur son coût final. Bien que le processus d'optimisation puisse sembler initialement coûteux en raison des calculs et du temps investis, il présente un intérêt significatif dans la production en série. Les coûts d'étude d'optimisation sont amortis par les gains réalisés sur l'ensemble de la production.

Actuellement, le développement des outils informatiques permet d'établir des programmes capables de déterminer rapidement les conditions de coupe optimales en quelques minutes. Cela simplifie le processus et rend l'optimisation plus accessible, contribuant ainsi à la rentabilité globale de la fabrication.

### 1.2- Variables des processus d'usinage

Chaque processus d'usinage comporte deux types de variables liées : les variables d'entrée (indépendantes, également appelées facteurs) et les variables de sortie (dépendantes, également appelées réponses) (voir figure 1.1).



**Figure 1.1-** Variables d'un processus d'usinage.

### 1.2.1- Variables d'entrée

- ✗ Matériau de la pièce, comprenant sa composition et ses caractéristiques métallurgiques.
- ✗ Géométrie initiale de la pièce, englobant les processus antérieurs.
- ✗ Choix du procédé, qu'il soit conventionnel ou non conventionnel.
- ✗ Matériau de l'outil.
- ✗ Paramètres d'usinage.
- ✗ Dispositifs de fixation de la pièce, allant des étaux aux gabarits et montages spécifiques.
- ✗ Fluides de coupe.

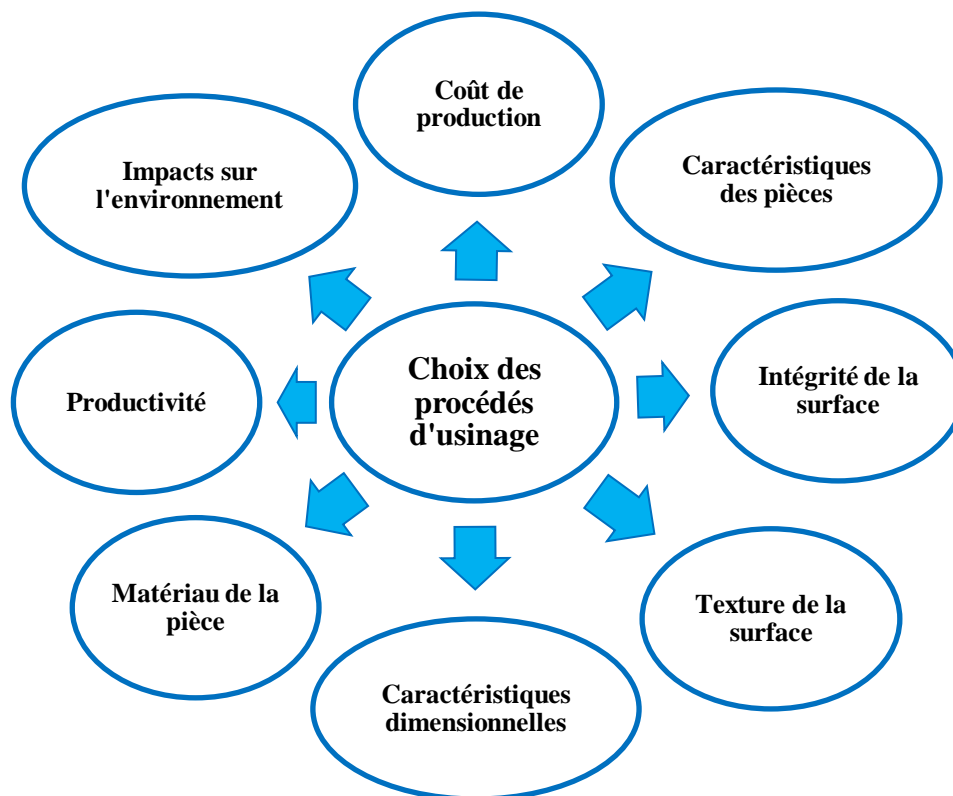
### 1.2.2- Variables de sortie

- ✗ Force de coupe et puissance : La force de coupe impacte la déformation et les vibrations, influençant ainsi la taille et la précision des pièces. La puissance affecte la génération de chaleur et, par conséquent, l'usure de l'outil.
- ✗ Géométrie du produit fini : Assure l'obtention d'une surface usinée avec la forme, la tolérance et les propriétés mécaniques souhaitées.
- ✗ Surface finie : Il est possible de nécessiter plusieurs passes pour obtenir l'état de surface souhaité.
- ✗ Défaillance de l'outil due à une augmentation de la consommation d'énergie.

- ✘ L'économie du processus d'usinage est influencée par la vitesse de coupe et d'autres variables, ainsi que par des considérations économiques et de coûts. L'aspect économique de l'usinage est important.
- ✘ Les aspects environnementaux et les risques pour la santé doivent être pris en compte et éliminés en prenant les mesures nécessaires.

### 1.3- Choix du procédé d'usinage

Les facteurs qui impactent le choix des méthodes d'usinage sont les suivants (voir figure 1.2) :



**Figure 1.2-** Facteurs affectant le choix des procédés d'usinage.

#### 1.3.1- Caractéristiques des pièces

La forme d'une pièce dépend de sa fonction. Comme tous les procédés d'usinage ne sont pas universellement adaptés à chaque pièce, les concepteurs ajustent parfois la forme tout en préservant la fonction principale. Cela facilite l'usinage avec un ensemble spécifique de procédés.

#### 1.3.2- Matériau de la pièce

Le choix du processus d'usinage dépend du matériau spécifié pour la pièce. Bien que la plupart des matériaux puissent être usinés avec divers procédés, d'autres exigent une sélection



plus limitée. La décision finale est influencée par la forme, la taille, les tolérances dimensionnelles, l'état de surface et la quantité désirée de la pièce. Ce choix doit tenir compte des aspects techniques, économiques et environnementaux de la fabrication.

### **1.3.3- Caractéristiques dimensionnelles et géométriques**

Les tolérances dimensionnelles sont cruciales, définissant les variations acceptables des dimensions d'une pièce et impactant à la fois la conception du produit et le choix du processus d'usinage. Il est vital que les tolérances spécifiées restent réalisables par le processus d'usinage choisi pour éviter des finitions supplémentaires et une hausse des coûts de production. La précision des pièces usinées reflète la proximité de leur taille par rapport aux dimensions requises, exprimées généralement par des tolérances dimensionnelles. Chaque processus d'usinage a ses propres limites de précision, dépendant de la machine-outil utilisée et des conditions d'usinage.

### **1.3.4- Texture de la surface**

La texture de surface englobe des aspects tels que la rugosité, l'ondulation, les couches superficielles et les défauts. Lors de l'usinage d'une pièce, il est crucial de respecter les exigences techniques en matière de qualité de surface et de minimiser les inconvénients potentiels résultant du processus d'usinage. En fonction de la rugosité spécifiée dans les exigences de conception, la méthode d'usinage optimale peut être choisie. Chaque procédé d'usinage peut produire un état de surface particulier et une plage de tolérance sans coûts supplémentaires. Ainsi, il est essentiel de sélectionner le procédé correspondant le mieux aux exigences de surface tout en minimisant les coûts.

### **1.3.5- Intégrité de la surface**

L'intégrité de surface se réfère à l'état global d'une surface formée pendant l'usinage, incluant les effets sous la surface visible. Dans les méthodes d'usinage classiques, les forces de coupe, le frottement, la chaleur générée et l'écoulement plastique influent sur le matériau, altérant les propriétés physiques de la couche superficielle par rapport au reste de la pièce en métal.

### **1.3.6- Productivité**

La quantité produite joue un rôle crucial dans le choix du processus d'usinage. Pour optimiser la productivité, différentes stratégies peuvent être adoptées, notamment l'utilisation de vitesses d'usinage élevées, l'augmentation des avances, l'utilisation d'outils de coupe multiples, la mise

en place de dispositifs permettant l'usinage simultané de plusieurs pièces, la minimisation du temps non lié à la coupe, l'utilisation de mécanismes d'alimentation et de changement d'outils automatiques, ainsi que le travail avec des densités de puissance élevées. Ces approches visent à accélérer le processus d'usinage, réduire les temps d'arrêt et améliorer le rendement global de la production.

### **1.3.7- Coût de production**

Les aspects économiques des processus d'usinage prennent en compte le coût total d'un produit, incluant les matériaux, l'outillage, ainsi que les coûts fixes, directs et indirects de la main-d'œuvre. Dans les petites séries, l'utilisation de machines polyvalentes est courante pour produire diverses formes et tailles, mais cela engendre des coûts de main-d'œuvre directs plus élevés. Pour des quantités plus importantes (lots moyens), les machines à commande numérique (CNC), les gabarits et les montages sont préférés pour réduire les coûts de main-d'œuvre. Pour des volumes encore plus élevés, les coûts de main-d'œuvre peuvent être minimisés grâce à l'utilisation de centres d'usinage.

### **1.3.8- Impacts sur l'environnement**

La technologie d'usinage choisie comporte des risques potentiels pour la santé de l'opérateur, la machine-outil et l'environnement. Atténuer ces risques nécessite une surveillance, une analyse, une compréhension et un contrôle minutieux. La transition vers des technologies d'usinage respectueuses de l'environnement est cruciale. Les risques liés aux fluides de coupe ont conduit à l'adoption de techniques telles que la lubrification par quantité minimale (MQL), l'usinage cryogénique et les méthodes d'usinage à sec. Ces approches permettent de minimiser les impacts environnementaux tout en préservant la sécurité des opérateurs et des machines.

## **1.4- Principe de l'optimisation**

Toutes réponses peut être optimisées en définissant une équation mathématique reliant cette réponse à toutes les variables d'entrée. Pour ce faire, il faut se poser deux questions essentielles :

❏ Qu'est-ce que l'on cherche à optimiser ?

❏ Selon quels critères doit-on le faire ?

**Exemples :**

## 1. Que cherchons-nous à optimiser ?

- Le coût d'usinage d'une pièce.
- Le temps d'usinage d'une pièce.
- Les niveaux de stock de matériel et de pièces finies.

## Critères ?

- Minimiser les coûts.
- Réduire le temps d'usinage.
- Maximiser la productivité et la quantité.

## 2. Que cherchons-nous à optimiser ?

- L'efficacité énergétique d'un système.
- Le rendement d'une production.
- La satisfaction client dans un service.

## Critères ?

- Minimiser la consommation énergétique.
- Maximiser le rendement de la production.
- Augmenter la satisfaction client.

## 3. Que cherchons-nous à optimiser ?

- La vitesse de production d'une série de pièces.
- La durée de vie des outils d'usinage.
- La précision dimensionnelle des pièces.

## Critères ?

- Maximiser la vitesse de production.
- Prolonger la durée de vie des outils.
- Minimiser les écarts dimensionnels.

## 4. Que cherchons-nous à optimiser ?

- La consommation d'énergie dans un atelier d'usinage.
- La flexibilité des équipements pour différentes pièces.
- La réduction des déchets de matériau.

## Critères ?

- Minimiser la consommation d'énergie.
- Maximiser la polyvalence des équipements.
- Réduire les déchets matériels.

## 1.5- Différents paramètres d'une production

### 1.5.1- Le coût de revient d'une pièce

Pour calculer le coût de revient d'une pièce, il convient d'additionner l'ensemble des frais de fabrication, incluant :

1. Les coûts liés à la machine-outil (amortissement, entretien, salaire de l'opérateur),
2. Les coûts de montage (montage à amortir sur l'ensemble de la série),
3. Les coûts associés à l'usure de l'outil (plaquettes, porte-plaquettes, arrêt machine pour réglage, etc.).

### 1.5.2- Le temps de production

Le temps de production d'une pièce englobe plusieurs phases, notamment :

- 1) Le temps de coupe,
- 2) Les temps auxiliaires, comprenant les changements de pièces, les prises de passe, et autres,
- 3) Les temps de changement d'outils.

### 1.5.3- Formulation du problème

Exemple : Coût de production

Le coût total ( $C_{total}$ ) est la somme des coûts individuels ( $C_1, C_2, C_3, \dots$  etc), où le coût total est une fonction dépendante de plusieurs variables telles que la pièce, la machine, le nombre de passes, la vitesse de la broche, la vitesse d'avance, etc.

Problème : Trouver les valeurs de la vitesse de la broche ( $N$ ) et de la vitesse d'avance ( $f$ ) qui minimisent le coût total.

Rechercher  $N$  et  $f$  de manière à satisfaire les conditions suivantes :

$$\frac{\partial C_t}{\partial N} = 0 \quad (1) \quad \frac{\partial C_t}{\partial f} = 0 \quad (2)$$

## 1.6- Calcul du temps de production

Le temps nécessaire pour produire une pièce peut être calculé en utilisant la formule suivante :

$$T_t = t_c + t_a + \frac{t_c}{T} t_{vb} \quad (3)$$

Où :

- $t_c$  : temps de coupe (à calculer suivant le procédé d'usinage),
- $t_a$  : temps auxiliaires (montage et démontage de pièce, prise de passes),
- $T$  : durée de vie de l'outil,
- $t_{vb}$  : temps de changement d'outil.

La temps de changement d'outil de coupe, représentée par  $t_{vb}$ , doit être répartie sur le nombre de pièces usinées avec le même outil. Si  $T$  est la durée de vie totale de l'outil et  $t_c$  est le temps de coupe par pièce, alors le nombre de pièces usinées par l'outil peut être calculé par :

$$n_{pièces} = \frac{T}{t_c} \quad (4)$$

Lorsque la durée de vie de l'outil de coupe est influencée par les conditions de coupe, le modèle privilégié est généralement le modèle de Gilbert (équation 5). Cette équation constitue une extension de la loi de Taylor afin d'intégrer l'impact de l'avance  $f$  et de la profondeur de passe  $a_p$ . Diverses recherches ont été menées pour déterminer les constantes de ce modèle, en prenant en compte le l'usure en dépouille de l'outil de coupe  $V_B = 0,3 \text{ mm}$ .

$$T = C \times f^x \times a_p^y \times V_c^n \quad (5)$$

Où :

- ✧  $T$  : durée de vie de l'outil en *min*,
- ✧  $f$  : avance en *mm/tr*,
- ✧  $a_p$  : profondeur de passe en *mm*,
- ✧  $V_c$  : vitesse de coupe en *m/min* ,
- ✧  $C$  : constante de Gilbert qui le résultat d'essai pour le couple outil/pièce,
- ✧  $x, y, n$  : coefficients de Gilbert qui dépend du matériau de l'outil et de la matière usinée.

En tournage, le temps de coupe ( $t_c$ ), déterminé par l'équation 6 :  $D$  étant le diamètre de la pièce et  $L$  la longueur à usiner, peut être calculé ainsi :

$$t_c = \frac{\pi \times D \times L}{1000 \times f \times V_c} \quad (6)$$

Par conséquent, la relation générale de calcul du temps de production est donnée par l'équation 7.

$$T_t = \frac{L \times \pi \times D}{1000 \times f \times V_c} + t_a + \frac{L \times \pi \times D}{1000 \times f \times V_c} \times \frac{t_{vb}}{C \times f^x \times a_p^y \times V_c^n} \quad (7)$$

Remarque : Il est à noter que dans la formule précédente,  $T_t$  dépend de  $f$  et  $V_c$ , ces derniers représentant les conditions de coupe à spécifier.

### 1.7- Recherche du coût de production

Le coût total de production est exprimé par la relation suivante :

$$P_t = P_0 t_a + P_0 t_c + P_1 \frac{t_c}{T} + P_a \quad (8)$$

Où :

- $P_0$  : Coût machine-outil en DA/min, fourni par le service de gestion,
- $P_1$  : Coût par unité d'une arête de coupe, à calculer en fonction du prix des outils,
- $P_a$  : Coût auxiliaire pour le lancement de la série rapporté à une pièce.

#### Remarque :

$P_1$  inclut le coût associé à l'indisponibilité de la machine pendant la durée  $t_{vb}$  du changement d'outil au coût  $P_0$ .

### 1.8- Etude de l'optimisation : critère, coût minimum

**Hypothèse :** On suppose que la machine est équipée d'une boîte de vitesses suffisamment étagée, ce qui permet de considérer  $V_c$  et  $f$  comme des variables continues.

#### 1.8.1- Pour une avance $f$ donnée

Recherchons la vitesse qui minimise le coût de revient. Nous déterminons  $V_c$  de la manière suivante :

$$\frac{\partial P_t}{\partial V_c} = 0 \quad (9)$$

Avec :

$$P_t = P_0 t_a + P_0 t_c + P_1 \frac{t_c}{T} + P_a \quad (10)$$

$$P_t = P_0 t_a + P_a + P_0 \frac{L \times \pi \times D}{1000 \times f \times V_c} + P_1 \frac{L \times \pi \times D}{1000 \times f \times V_c} \times \frac{1}{C \times f^x \times a_p^y \times V_c^n} \quad (11)$$

Cette fonction se présente sous la forme :

$$Y = A + \frac{B}{V_c} + \frac{C}{V_c^{n+1}} \quad (12)$$

Où :

$$\begin{cases} A = P_0 t_a + P_a \\ B = \frac{P_0 \times L \times \pi \times D}{1000 \times f} \\ C = \frac{P_1 \times L \times \pi \times D}{1000 \times f^{x+1} \times C \times a_p^y} \end{cases}$$

En dérivant  $P_t$  par rapport à  $V_c$  et en égalisant à zéro, nous pouvons calculer la vitesse économique  $V_E$ .

$$\frac{\partial Y}{\partial V_c} = -\frac{B}{V_c^2} - \frac{C(n+1)}{V_c^{n+2}} = 0$$

$$\Rightarrow V_c^n = -\frac{C}{B}(n+1) \quad (13)$$

Soit :

$$V_c = \sqrt[n]{\frac{-(n+1) \times P_1}{C \times f^x \times a_p^y \times P_0}} \quad (14)$$

Cette vitesse est la vitesse économique (notée  $V_E$ ).

Remarque :

- ✧  $n$  est négatif ( $< -1$ ) d'où  $-(n+1)$  est bien positif,
- ✧ La vitesse économique dépend de l'avance choisie.

En transformant la formule :

$$V_E = \sqrt[n]{\frac{-(n+1) \times P_1}{C \times f^x \times a_p^y \times P_0}} \quad (14)$$

D'où :

$$C \times f^x \times a_p^y \times V_E^n = -(n+1) \frac{P_1}{P_0} \quad (15)$$

Avec :

$$T_e = C \times f^x \times a_p^y \times V_E^n = -(n+1) \frac{P_1}{P_0} \quad (16)$$

$T_e$  représente la durée économique d'utilisation de l'outil. Cette durée est indépendante de l'avance choisie et dépend uniquement du rapport  $P_1/P_0$ , qui est le coût de l'arête de l'outil divisé par le coût de la machine-outil.

Conclusion :

- Si le coût de la machine-outil est élevé (par exemple, l'utilisation de machines à commande numérique où  $P_0$  est important), il est avantageux d'avoir une durée de vie courte pour optimiser l'utilisation de la machine et de l'outil.
- D'autre part, si le coût de l'outil est élevé ( $P_1$  important), il est préférable d'augmenter la durée de vie de l'outil en réduisant les conditions de coupe.

### 1.8.2- Pour une vitesse de coupe $V_c$ donnée

Avec  $V_c$  constant, le calcul de  $f$  est effectué de la manière suivante :

$$\frac{\partial P_t}{\partial f} = 0 \quad (17)$$

Avec :

$$P_t = P_0 t_a + P_a + P_0 \frac{L \times \pi \times D}{1000 \times f \times V_c} + P_1 \frac{L \times \pi \times D}{1000 \times f \times V_c \times C \times f^x \times a_p^y \times V_c^n} \quad (18)$$



Cette fonction prend la forme suivante :

$$Y = A + \frac{B}{f} + \frac{C}{f^{x+1}} \quad (19)$$

L'avance économique pour une vitesse de coupe donnée est déterminée par le même calcul.

$$f_E = \sqrt[x]{\frac{(x+1) \times P_1}{C \times a_p^y \times V_c^n \times P_0}} \quad (20)$$

Nous obtenons également :

$$T_e = C \times f_E^x \times a_p^y \times V_c^n = -(x+1) \frac{P_1}{P_0}$$

Ainsi, le temps économique est :

$$T_e = -(x+1) \frac{P_1}{P_0} \quad (21)$$

### 1.8.3- Recherche d'un point optimum

L'objectif idéal serait d'annuler simultanément les deux dérivées, ce qui équivaldrait à utiliser un temps économique :

$$T_e = -(x+1) \frac{P_1}{P_0} = -(n+1) \frac{P_1}{P_0} \quad (22)$$

En général,  $n \neq x$ , il n'est pas possible d'annuler simultanément les deux dérivées.

### 1.8.4- Evolution du prix total en fonction de $f$ et de $V_c$

Le minimum existe, cependant, il se produit avec des avances très élevées, sauf pour les grandes vitesses de coupe. Dans tous les cas, ces points de fonctionnement sont encore plus coûteux que ceux associés aux basses et moyennes vitesses. Les figures 1.3 et 1.4 illustrent l'évolution du coût par unité de pièce fabriquée pour une avance choisie (figure 1.3) et une vitesse choisie (figure 1.4).

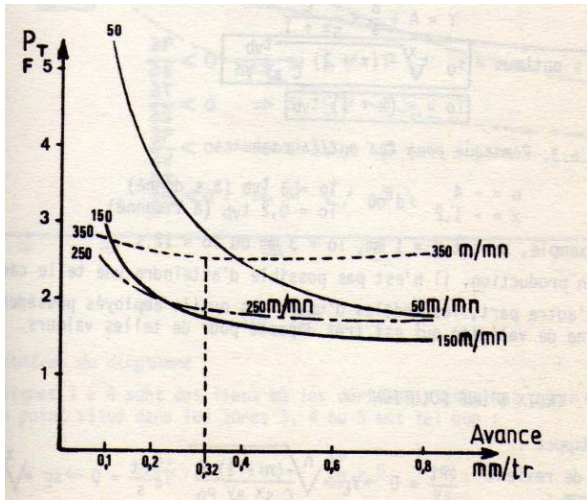


Figure 1.3- Coût à l'unité de pièce fabriquée pour une avance choisie.

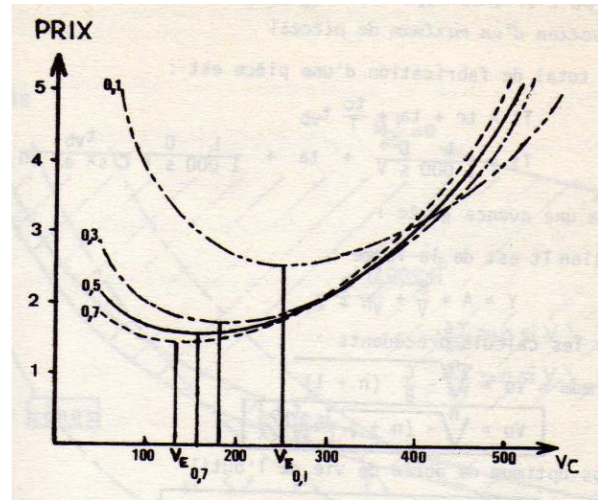


Figure 1.4- Coût à l'unité de pièce fabriquée pour une vitesse choisie.

**1.9- Etude de l'optimisation : Critère, temps minimum** (production d'un maximum de pièces)

Le temps total de fabrication d'une pièce est :

$$T_t = t_c + t_a + \frac{t_c}{T} t_{vb} \tag{23}$$

$$T_t = \frac{L \times \pi \times D}{1000 \times f \times V_c} + t_a + \frac{L \times \pi \times D}{1000 \times f \times V_c} \times \frac{t_{vb}}{C \times f^x \times a_p^y \times V_c^n} \tag{24}$$

**1.9.1- Pour une avance fixée**

La fonction  $T_t$  est exprimée comme suit :

$$Y = A + \frac{B}{V_c} + \frac{C}{V_c^{n+1}} \tag{25}$$

Selon les calculs précédents, on obtient que la valeur optimale de  $V_c$  est égale à  $V_0$ .

$$V_0 = \sqrt[n]{-\frac{C}{B} (n + 1)} \tag{26}$$

$$V_0 = \sqrt[n]{-(n + 1) \frac{t_{vb}}{C \times f^x \times a_p^y}} \tag{27}$$

Ainsi, la durée de vie optimale de l'outil, notée  $T_0$ , est déterminée.

$$T_0 = C \times f^x \times a_p^y \times V_0^n = -(n+1)t_{vb} \quad (28)$$

### 1.9.2- Pour une vitesse de coupe fixée

La fonction  $T_t$  est exprimée comme suit :

$$Y = A + \frac{B}{f^x} + \frac{C}{f^{x+1}} \quad (29)$$

Ainsi, l'avance optimale, notée  $f$  optimum, est égale à  $f_0$  de l'équation 30.

$$f_0 = \sqrt[x]{-(x+1) \frac{t_{vb}}{C \times V_c^n \times a_p^y}} \quad (30)$$

Ainsi, la durée de vie optimale de l'outil ( $T_0$ ) est déterminée par l'équation 31.

$$T_0 = -(x+1) \times t_{vb} \quad (31)$$

### 1.9.3- Remarque pour les outils carbures

$$n \approx -4 \quad T_0 = 3t_{vb} \quad (\text{à } f \text{ donnée})$$

D'où

$$x \approx -1,2 \quad T_0 = 0,2t_{vb} \quad (\text{à } V_c \text{ donnée})$$

Par exemple, avec  $t_{vb} = 1$  min,  $T_0 = 3$  min ou  $T_0 = 12$  s.

En production mécanique, il est difficile d'atteindre une cadence aussi élevée. De plus, les modèles d'usure des outils utilisés ne sont pas adaptés à de telles valeurs, car leur plage de validité est largement dépassée.

### 1.10- Choix d'une solution

Le schéma de la figure 1.5 facilite la sélection rapide d'une solution pour les paramètres de coupe tels que la vitesse et l'avance. Il identifie les zones à éviter absolument, celles à éviter si possible, et celles où il est acceptable d'opérer.

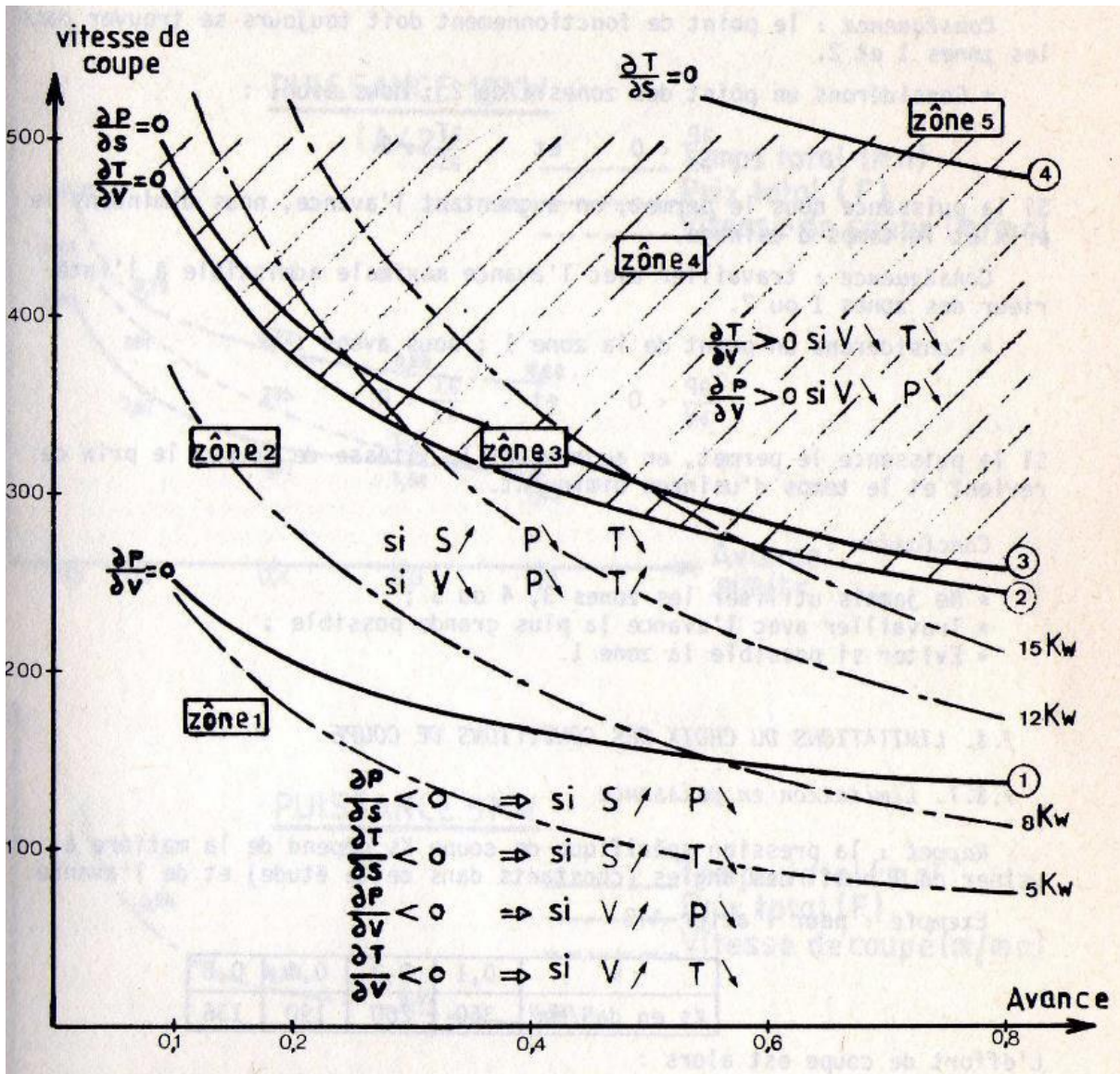


Figure 1.5- Choix des paramètres de coupe.

Rappels :

$$\frac{\partial P_t}{\partial V_c} = 0 \Rightarrow V_E = \sqrt[n]{\frac{(n+1) \times P_1}{C \times f^x \times a_p^y \times P_0}}$$

$$\frac{\partial P_t}{\partial f} = 0 \Rightarrow f_E = \sqrt[x]{\frac{(x+1) \times P_1}{C \times a_p^y \times V_c^n \times P_0}}$$

Considérons un point de travail situé dans les zones 3, 4 ou 5, correspondant aux vitesses  $V_c$  et  $f$ . En principe, réduire la vitesse de coupe est toujours possible. Cela se traduit par une

diminution du coût de fabrication de la pièce et une réduction du temps d'usinage, ce qui est bénéfique dans toutes les situations.

**Conséquence :** Il est essentiel que le point de fonctionnement se trouve soit dans la zone 1, soit dans la zone 2.

Supposons qu'un point soit dans les zones 1 ou 2.

$$\frac{\partial P_t}{\partial f} < 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial T}{\partial f} < 0$$

**Conclusion :**

- ✧ Évitez absolument les zones 3, 4 et 5.
- ✧ Privilégiez une avance maximale.
- ✧ Évitez, dans la mesure du possible, la zone 1.

## 1.11- Couple Outil/Matière

### 1.11.1- Introduction

Dans l'industrie moderne, pour réduire les délais de production et les coûts, on adopte fréquemment la méthode Outil/Matière, également connue sous le nom de COM (conformément à la norme AFNOR XP E 66-520-5). Cette approche, développée dans les années 1990, se base sur l'analyse d'une paire constituée du matériau à usiner et de l'outil prévu pour l'opération d'usinage. L'objectif est d'optimiser l'efficacité en choisissant judicieusement l'outil en fonction de la matière à traiter.

Cette méthode facilite la délimitation du champ opérationnel de l'outil de coupe en fixant les paramètres d'utilisation tels que la vitesse de coupe ( $V_c$ ), l'avance par tour ( $f$  ou par dent  $f_z$ ), la profondeur de passe axiale ( $a_p$ ), l'engagement radial ( $a_e$ ), et la durée de vie de l'outil ( $T$ ). Chacun de ces paramètres est considéré de manière indépendante pour optimiser les performances de l'outil sans compromettre les autres aspects du processus d'usinage.

La méthode COM commence par une définition rigoureuse de l'outil, de la matière à usiner et parfois de l'opération prévue. Cette définition implique une identification claire de l'outil, incluant sa géométrie, ses dimensions, sa nuance, son revêtement, sa préparation d'arête de coupe,...etc. De même, le matériau à usiner est spécifié avec des détails tels que le traitement thermique, le mode de fabrication, ou toute autre propriété distinctive. Il est important de

noter que, dans cette approche, les propriétés intrinsèques de la matière ou de l'outil ne sont pas considérées comme des paramètres ou des variables du système. Elles ne sont pas au cœur de la méthode COM.

Dans le processus d'usinage, divers éléments entrent en jeu :

- ✗ La pièce, avec sa matière et sa fixation,
- ✗ L'outil et son mode de fixation,
- ✗ L'utilisation d'un lubrifiant,
- ✗ La machine-outil,
- ✗ L'opération d'usinage et les conditions de coupe appliquées.

Par ailleurs, l'opérateur en usinage peut nécessiter :

- La mise au point d'un processus d'usinage,
- Une évaluation comparative des produits,
- La validation d'un processus d'usinage,
- La capitalisation de son savoir-faire.

La première étape consiste à trouver un réglage de coupe stable et approprié en termes de paramètres tels que la vitesse de coupe ( $V_c$ ), l'avance ( $f$  ou  $f_z$ ), la profondeur de passe ( $a_p$ ), et l'engagement radial ( $a_e$  en fraisage). Cela garantit la compatibilité de l'outil avec le matériau et l'opération d'usinage prévue, et établit un point de référence pour les essais ultérieurs. Un réglage de coupe est considéré comme acceptable si les copeaux ont une forme et une couleur stables et régulières, si le niveau d'énergie spécifique de coupe, la durée de vie de l'outil, et la qualité de la surface obtenue sont conformes à l'utilisation prévue (par exemple, sans vibrations importantes) et si l'outil ne montre aucun signe d'usure catastrophique ou accélérée.

La deuxième étape implique de déterminer la vitesse de coupe minimale autorisée pour usiner le matériau en question avec l'outil associé à ce couple Outil-Matière. Cela permettra de poursuivre la série d'essais avec une plage de vitesses de coupe appropriée. La plage de fonctionnement acceptable est définie en examinant principalement la variation de l'effort spécifique de coupe  $K_c$  (pour le tournage et le perçage) ou de l'énergie spécifique de coupe  $W_c$  (pour le fraisage) en fonction de la vitesse de coupe. Cela se fait en maintenant constantes les conditions d'avance, de profondeur de passe et d'engagement radial, correspondant à celles du point de fonctionnement stable déterminé lors de la première étape. Les valeurs de  $K_c$  ou  $W_c$

peuvent être évaluées à l'aide de mesures de puissance ou d'efforts pendant l'usinage, selon les relations suivantes.

Cette grandeur est définie comme l'effort de coupe ramené à la section du copeau non déformé :

$$K_c = \frac{F_c}{f \times a_p}$$

- $K_c$  : Effort spécifique de coupe, aussi appelé pression de coupe en  $N/mm^2$ ,
- $F_c$  : Effort principal de coupe (force),
- $f$  et  $a_p$  : Vitesse d'avance et profondeur de passe.

Il peut également être déterminé par :

$$K_c = \frac{1000 \times P_c}{Q}$$

- $K_c$  : Force de coupe spécifique en  $N/mm^2$ ,
- $P_c$  : Puissance de coupe en  $W$ ,
- $P_c = P_{mesuré} - P_{vide}$ ,
- $Q$  : Débit de copeau en  $mm^3/s$ .

Et :

$$W_c = \frac{P_c}{Q}$$

- $W_c$  : Energie spécifique de coupe en  $W \text{ min}/cm^3$ ,
- $P_c$  : Puissance de coupe en  $W$ ,
- $P_c = P_{mesuré} - P_{vide}$ ,
- $Q$  : Débit de copeau en  $cm^3/min$ .

De nombreux fabricants d'outils de coupe fournissent la force de coupe spécifique plutôt que l'énergie spécifique de coupe.

### 1.11.2- Optimisation du processus de fabrication par la méthode COM avec Cut Optimizer

Face à la multitude des facteurs impliqués dans l'opération d'usinage et aux impératifs de réduction des délais et des coûts, une approche normalisée est adoptée, appelée la méthodologie du Couple-Outil-Matière. Cette méthode repose principalement sur la mesure de la puissance absorbée par la broche de la machine, convertie ensuite en une pression de coupe.

En analysant la pression de coupe, on peut accomplir plusieurs objectifs :

- ❏ Déterminer les conditions d'utilisation optimales d'un outil lors de l'usinage d'un matériau spécifique avec un lubrifiant donné.
- ❏ Effectuer des comparaisons entre différents produits tels que des outils, des matériaux ou des lubrifiants.
- ❏ Quantifier un processus d'usinage en utilisant une approche scientifique, exprimée par des valeurs et des plages d'utilisation spécifiques.

L'utilisation de Cut Optimizer permet d'optimiser les conditions de coupe en exploitant une connaissance approfondie du domaine d'application des outils. Il permet de :

- Définir le champ d'application d'un outil pour une matière spécifique et un lubrifiant donné, réduisant ainsi le temps de réglage et de mise au point grâce à la connaissance des conditions de coupe valides (Couple Outil-Matière).
- Effectuer des comparaisons entre :
  - Lots de matière afin de déterminer les variations d'usinabilité.
  - Lots d'outils pour identifier les variations liées à l'affûtage et aux revêtements.
  - Différents lubrifiants pour déterminer leurs domaines d'application.

Après chaque analyse, il devient possible d'ajuster les conditions de coupe pour optimiser la production. Cela permet de capitaliser sur le savoir-faire de l'entreprise en quantifiant les pratiques de l'atelier. L'adoption d'une approche structurée de la coupe, intégrée à l'approche globale de l'usinage, a un impact positif sur la satisfaction des clients.

Le Cut Optimizer est constitué du matériel suivant (voir figure 1.6) :

- ✗ Un logiciel compatible avec un ordinateur de type PC.
- ✗ Un wattmètre doté d'une sortie numérique.



Sa mise en œuvre est simple :



Figure 1.6- Matériel de Cut-Optimizer.

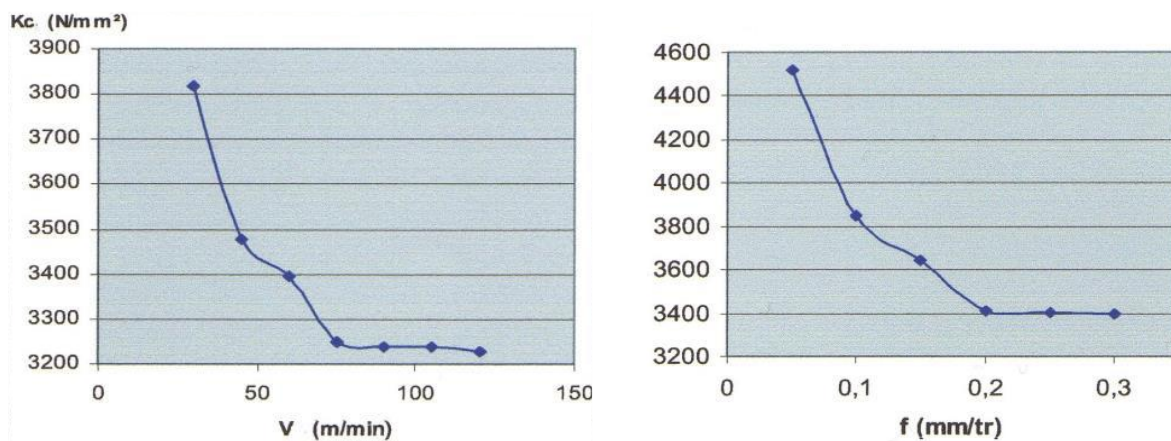
### 1.11.3- Exemples d'application du Cut-Optimizer

Les exemples suivants proviennent d'études visant à résoudre diverses problématiques industrielles et démontrent les avantages potentiels de l'utilisation du logiciel de Cut-Optimizer.

#### 1.11.3.1- Premier cas d'application

##### Détermination du domaine d'emploi d'un outil

Dans l'exemple suivant, une étude a été menée pour analyser l'impact de la vitesse de coupe et de l'avance lors du chariotage d'un matériau en acier.



En moins de 30 minutes, deux séries de mesures ont été effectuées selon la méthodologie du Couple Outil-Matière : une série avec une vitesse de coupe variable et une autre avec une avance variable. L'analyse des deux courbes obtenues révèle une vitesse de coupe minimale recommandée de  $75 \text{ m/min}$  et une avance minimale de  $0,2 \text{ mm/tr}$ .

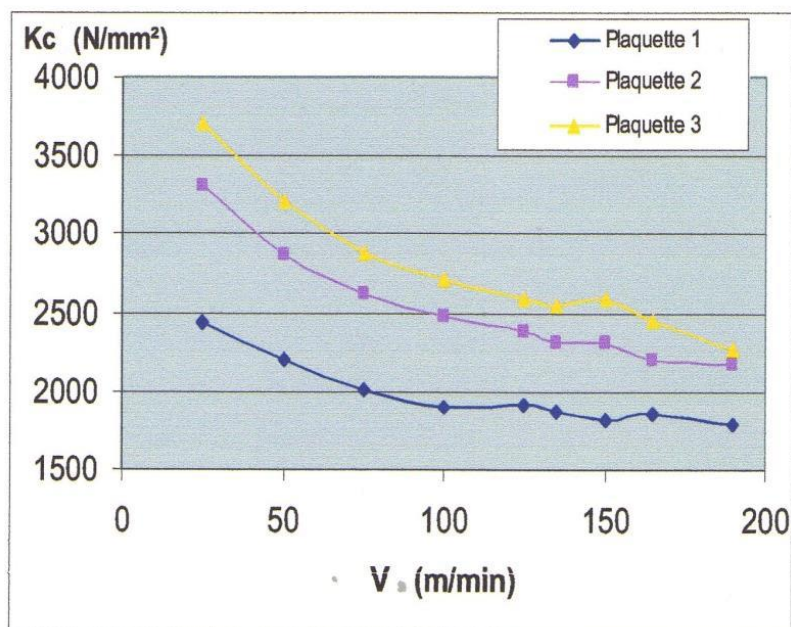
À cette avance, les copeaux se fragmentent. Ainsi, nous avons désormais un point de fonctionnement fiable qui garantit un usinage stable sans problèmes pour ce lot de matière. Cependant, l'optimisation pourra être complétée ultérieurement sur la machine de production à partir de ce point de fonctionnement.

### 1.11.3.2- Deuxième cas d'application

#### Réalisation d'essais comparatifs entre différents types d'outils

Dans cet exemple, nous comparons les pressions de coupe de trois outils candidats : une plaquette à coupe positive et deux plaquettes à coupe négative.

Initialement, nous constatons que la plaquette n°1, à coupe positive, engendre des pressions de coupe naturellement inférieures d'environ 30%. En d'autres termes, elle requiert une puissance réduite de 30%, ce qui peut s'avérer crucial lorsque l'on utilise des machines proches de leurs limites de puissance.



En revanche, en examinant les deux autres plaquettes, la légère réduction de la pression de coupe observée avec la plaquette n°2 indique une facilité accrue dans la formation ou le

glissement des copeaux. Cela peut être un aspect crucial lors de l'usinage de matériaux "collants".

Dans cet exemple, Cut Optimizer permet de choisir les outils les plus adaptés à la machine ou au matériau considéré.

### **1.12- Conclusion**

À travers ces exemples pratiques, nous avons constaté les nombreux avantages de l'utilisation de Cut Optimizer. Cela nous permet de :

- ✧ Évaluer des produits grâce à des essais comparatifs,
- ✧ Définir les domaines d'utilisation des outils,
- ✧ Optimiser et valider un processus d'usinage en choisissant la machine appropriée, et ainsi tirer des enseignements exploitables.

## CHAPITRE 2 :

### Nature et propriétés des outils de coupe

#### 2.1- Introduction

Les outils utilisés dans les opérations de coupe subissent des contraintes importantes telles que frottement, échauffement, choc, pression et flexion. Les matériaux constitutifs de ces outils doivent présenter des propriétés thermomécaniques et physiques spécifiques, notamment :

- ✧ Une résistance optimale au frottement pour éviter l'usure prématurée,
- ✧ Une excellente résistance aux chocs pour garantir la ténacité,
- ✧ Une dureté adéquate pour résister à la pénétration,
- ✧ Une stabilité thermique pour maintenir leurs propriétés à des températures élevées (dureté à chaud),
- ✧ Une stabilité chimique face aux matériaux usinés et à l'environnement environnant (air, liquide de coupe, etc.),
- ✧ Une faible propension à l'adhésion au matériau usiné sous des conditions de haute pression et haute température,
- ✧ Un coût d'achat et de mise en forme abordable, ainsi que la disponibilité des éléments constitutifs.

Cependant, certaines propriétés sont contradictoires. Par exemple, un matériau dur peut manquer de ténacité. De même, une excellente résistance à l'usure peut parfois être incompatible avec une résistance optimale aux chocs. Ainsi, choisir un matériau pour un outil de coupe implique inévitablement un compromis entre ces différentes propriétés.

La partie active de l'outil de coupe doit toujours présenter une dureté supérieure à celle de la pièce à usiner, idéalement de 3 à 5 fois plus élevée à température ambiante. Au cours de l'usinage, la dureté de cette partie de l'outil n'est pas constante et peut atteindre localement des températures allant de 500 à 1500°C, selon l'application. Cependant, la dureté de ce matériau dépend étroitement de la température générée pendant le processus de coupe. Ainsi, le choix

de la dureté à chaud du matériau de l'outil de coupe doit être significativement supérieur à celui du matériau de la pièce usinée.

## 2.2- Composition et géométrie

Afin d'atteindre les propriétés mécaniques désirées, un matériau destiné à un outil de coupe est formulé en intégrant des grains durs (pour assurer la résistance à l'usure) ainsi que des substances liantes (pour conférer la résistance aux chocs). Les caractéristiques mécaniques des différents matériaux pour les outils varient en fonction de leur processus d'élaboration et de leur composition, offrant ainsi une diversité répondant aux exigences les plus élevées. Pour faire un choix éclairé du matériau constituant la partie active de l'outil de coupe, il est impératif de comprendre les particularités de chaque produit disponible sur le marché.

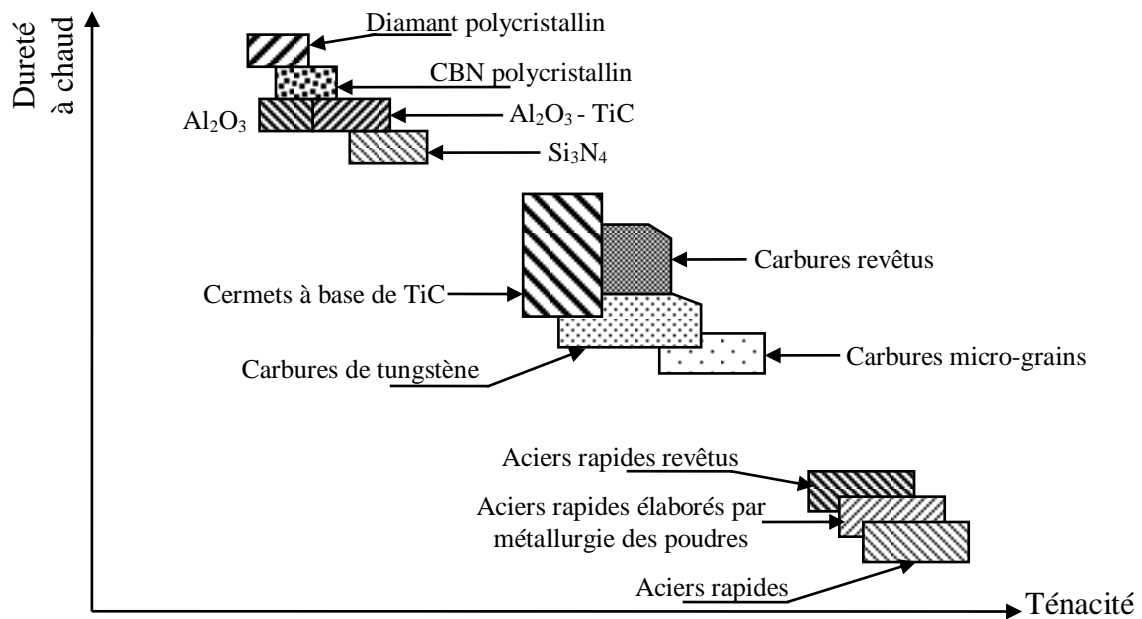
L'utilisation d'un matériau d'outil, quel qu'il soit, nécessite une considération essentielle de la géométrie de l'outil. Cependant, de nombreux utilisateurs choisissent un outil en se basant uniquement sur son matériau et ses propriétés, négligeant l'importance de sa géométrie. Cette approche conduit inévitablement à des problèmes. En effet, chaque propriété du matériau d'outil et chaque type d'opération requièrent une géométrie optimale (macro géométrie avec des angles, micro géométrie avec rugosité, rayon d'arête,...etc.) pour tirer le meilleur parti de ces matériaux d'outils.

L'évolution technologique dans le domaine de l'usinage est souvent associée à l'amélioration des performances de l'arête de coupe. Ainsi, sur le marché des outils coupants, on observe une illustration chronologique des progrès technologiques.

Les matériaux des outils de coupe sont généralement regroupés en six catégories selon leur dureté croissante :

1. Aciers rapides,
2. Carbures métalliques,
3. Cermets,
4. Céramiques,
5. Nitrures de bore cubiques,
6. Diamants mono et poly-cristallins.

La figure 2.1 représente les matériaux des outils en fonction de leur dureté et de leur ténacité.



**Figure 2.1-** Comparaison des matériaux de coupe en termes de dureté et de ténacité.

### 2.3- Corps d'outils

Les outils peuvent être soit monoblocs, soit à éléments rapportés, comme des plaquettes brasées ou fixées mécaniquement sur un corps d'acier.

Dans la production de corps à éléments rapportés, des aciers sont couramment utilisés pour des raisons économiques.

- ✘ Lorsque le corps n'est pas exposé au frottement, on opte pour l'acier C45 (XC38), de dureté modérée, non traité, ou l'acier 38CrMo4 traité avec une dureté de 380 HB (315 Hv) ou une résistance à la traction de  $\sigma_r = 1000$  MPa.
- ✘ En cas d'exposition au frottement, on privilégie l'acier 16NiCr6, cémenté et trempé.

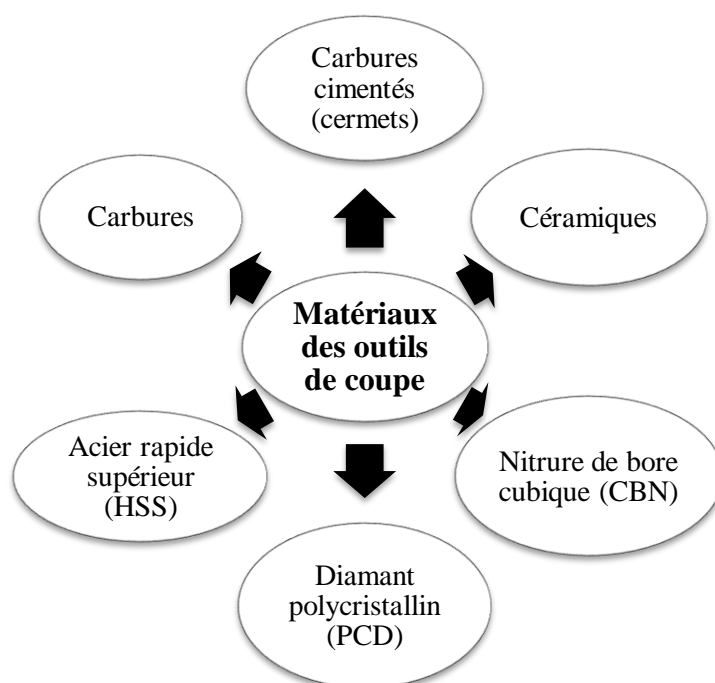
L'acier 30CrMo12, après traitement thermique comprenant la trempe, le revenu, et la nitruration, peut être employé pour fabriquer les corps des fraises à plaquettes amovibles.

### 2.4- Matériaux des outils de coupe

Le choix des outils de coupe requiert une préalable compréhension des propriétés des matériaux d'outils, de la géométrie de l'outil (angle de coupe, rayon de bec, angle de tranchant, angle d'inclinaison, etc.), des porte-outils, des conditions de coupe (vitesse, avance, profondeur de passe), de l'environnement de coupe (sec, lubrification humide, lubrification MQL) et des matériaux à usiner. L'absence d'informations sur ces paramètres peut conduire à

un usinage de qualité médiocre. La géométrie des outils de coupe est cruciale pour les industries de coupe des matériaux, influant directement sur les copeaux, le rendement, la durabilité des outils, les forces de coupe et la qualité de la surface. Le choix du matériau d'outil et des conditions de fonctionnement appropriées joue un rôle essentiel dans l'usinage. Par exemple, un outil en céramique peut fonctionner efficacement dans des conditions de rigidité élevée (vibrations) avec des coupes continues et des températures élevées. Opter pour les bonnes conditions d'usinage conduit à des pièces de qualité à moindre coût. Quelques caractéristiques souhaitables des matériaux d'outils incluent la dureté à chaud, la ténacité à la rupture, la résistance à la fatigue, la résistance à l'usure, une bonne conductivité thermique, la résistance aux chocs mécaniques et thermiques, une faible affinité chimique, et la résistance à l'oxydation et à la corrosion.

L'élaboration d'outils de coupe dotés de ces caractéristiques est une tâche difficile pour les fabricants. Les principaux acteurs du marché, tels que Sandvik, Kennametal, General Electric, Sumitomo, contribuent à environ 80 % de la part totale du marché mondial des matériaux d'outils de coupe avancés, comprenant les inserts, les porte-outils et les outils de coupe intégrés. Les matériaux prédominants utilisés dans l'usinage de matériaux durs comprennent les céramiques (alumine et nitrure de silicium) ainsi que les matériaux ultra-durs (nitrure de bore cubique CBN et diamant polycristallin PCD). L'organigramme suivant offre un aperçu des divers outils de coupe disponibles.



**Figure 2.2-** Matériaux des outils de coupe.

### 2.4.1- Aciers rapides supérieurs (A.R.S)

Les aciers rapides, également appelés ARS (aciers rapides supérieurs) ou HSS (High Speed Steel en anglais), sont des alliages robustes composés de plus de 0,7% de carbone (C), 4% de chrome (Cr), et des proportions variables de tungstène (W), de molybdène (Mo), de vanadium (V), et de cobalt (Co). Ils contiennent également environ 0,3% de manganèse (Mn) et de silicium (Si). Les taux d'impuretés tels que le phosphore (P) et le soufre (S) sont maintenus à moins de 0,03%. Ces aciers sont fabriqués par moulage en coquille ou par métallurgie des poudres, offrant une dureté comprise entre 63 et 66 HRC.

#### 2.4.1.1- Désignation

La norme NF A 356-90 propose une désignation abrégée excluant le chrome et le carbone. Cette désignation numérique présente les pourcentages moyens des éléments W, D, V (tungstène, molybdène, vanadium) ou W, D, V, K (avec cobalt) dans cet ordre.

#### Remarque :

Lorsque deux nuances se distinguent uniquement par le pourcentage de carbone, le symbole HC est ajouté à la fin de la désignation de la nuance ayant le pourcentage le plus élevé (tableau 2.1).

**Tableau 2.1-** Désignation abrégée des aciers rapides.

Désignation de l'acier fortement allié	Désignation abrégée de l'acier rapide	% des éléments d'addition
Z 80 WCV 18-04-01	18 – 0 – 1	W-18% ; D-0% ; V-1% ; et 4% de chrome
Z 85 WDKCV 06-05-05-04-02	6 – 5 – 2 – 5	W-6% ; D-5% ; V-2% ; K-5% et 4% de chrome

#### 2.4.1.2- Classes d'aciers rapides

La norme française NF A 35-590 a défini 16 aciers rapides répartis en 5 classes, reflétant ainsi les différentes productions des aciéristes (voir tableau 2.2).

#### 2.4.1.3- Structure d'un acier rapide

La structure d'un acier rapide se compose d'une matrice à base de martensite revenue avec un pourcentage élevé de carbone, dans laquelle sont finement dispersés des carbures durs formés par les éléments d'alliage.



**Tableau 2.2-** Classes d'aciers rapides et composition chimique selon NF A 35-590.

Désignation de la nuance		Composition chimique (%)					
EN 10027-1	AISI	C	Cr	W	Mo	V	Co
<b>Aciers de base</b>							
HS 18-0-1	T1	0,80	4	18		1,1	
HS 6-5-12	M2	0,85	4	6	5	2	
HS 2-8-1	M1	0,85	4	2	8	1,2	
HS 2-9-2	M7	1,00	4	2	9	2	
<b>Aciers sur-carburés</b>							
HS 6-5-3	M3	1,20	4	6	5	3	
HS 6-5-4	M4	1,30	4,5	6	5	4	
<b>Aciers au cobalt</b>							
HS 18-1-1-5	T4	0,80	4	18	0,8	1,3	5
HS 18-0-2-10	T5	0,80	4	18		1,5	10
HS 6-5-2-5	T35	0,85	4	6	5	2	5
<b>Aciers au cobalt à haute teneur en carbone</b>							
HS 7-4-2-5	M41	1,10	4	7	4	2	5
HS 2-9-1-8	M42	1,10	4	1,6	9	1,1	8
<b>Acier sur-carburées au cobalt</b>							
HS 12-1-5-5	T15	1,60	4,5	12	08	5	5
HS 10-4-3-10	-	1,30	4	9,5	3,6	3,2	10
HS 7-6-3-12	M44	1,30	4	7	6	3,2	12

#### 2.4.1.4- Influence des éléments d'addition

La présence de **carbone** a un impact sur la dureté au détriment de la ductilité, avec une limite maximale de 1,75%. Les aciers rapides moulés ont rarement plus de 0,8% de carbone, car cela entraînerait des problèmes de solidification et d'hétérogénéité lors de leur fabrication. En revanche, les aciers rapides frittés peuvent atteindre des pourcentages de carbone plus élevés en raison de leur homogénéité naturelle due à leur processus de fabrication.

Le **tungstène** confère une excellente dureté et une résistance élevée à l'usure. Il réagit avec le carbone pour former des carbures de tungstène au sein des joints des grains, affinant ainsi la structure du grain tout en préservant la dureté à chaud. Sa concentration typique varie de 6 à 18%.

Le **molybdène** améliore la ténacité de l'acier. Bien qu'il augmente la dureté et la résistance à l'usure, il est sensibilisé à la décarburation et réduit la plage de températures de trempe. Sa concentration habituelle se situe entre 0,5% et 9%.

Le **vanadium** joue un rôle essentiel comme élément d'addition : il réagit avec le carbone pour former un carbure extrêmement stable, plus dur que les autres carbures. Cela confère à l'acier

une résistance exceptionnelle à l'usure, bien qu'il n'ait pas d'impact sur la ténacité. La teneur en vanadium se situe généralement entre 1% et 5%.

Le **chrome** est présent à une teneur constante de 4%. Il affecte la capacité de trempe et la résistance au revenu. Il contribue également à accroître la dureté et la résistance à l'usure abrasive, mais cela se fait au détriment de la ténacité et de la dureté à chaud.

Le **cobalt** augmente la dureté à toutes les températures, mais son intérêt principal réside dans la préservation de la dureté à chaud.

Le **manganèse** prévient les déformations des aciers contenant jusqu'à 1% de carbone, et sa concentration est limitée à 0,35%.

Le **soufre**, ajouté en faible quantité, facilite l'usinage sans compromettre les propriétés des outils (concentration de 0,1 à 0,2%).

#### **2.4.1.5- Elaboration des aciers rapides**

##### **a) Les aciers rapides coulés**

Ce processus, le plus ancien et le plus répandu, consiste à fondre ensemble les éléments constitutifs dans un four, puis à les refroidir dans une lingotière. À partir des produits semi-finis (barres) obtenus par laminage, les outils sont fabriqués selon les étapes suivantes :

- ✧ Découpage,
- ✧ Forgeage,
- ✧ Traitement thermique,
- ✧ Usinage des surfaces fonctionnelles de l'outil,
- ✧ austénitisation à environ 1200°C avec un maintien prolongé pour dissoudre au maximum les carbures, suivi d'une trempe dans un bain de sel (durcissement martensitique), puis de 2 à 3 cycles de revenu successifs de 1 heure à 550°C pour atteindre la dureté maximale,
- ✧ Finition des surfaces fonctionnelles par rectification.

##### **b) Les aciers rapides frittés**

Les techniques de la métallurgie des poudres permettent la fabrication d'outils en acier rapide fritté, également appelés HSS-PM (High Speed Steel - Powder Metal). Comparés aux aciers rapides coulés de composition similaire, ces matériaux présentent l'avantage d'une structure

plus homogène, avec des carbures plus fins et mieux répartis, améliorant ainsi leur résistance à l'usure et facilitant l'affûtage. Ce procédé permet d'augmenter la concentration des éléments d'addition, offrant des aciers rapides aux propriétés mécaniques supérieures, surtout à des températures élevées. Ils représentent un compromis efficace entre les aciers rapides coulés et les carbures métalliques, convenant particulièrement aux applications exigeant à la fois une haute ténacité et une grande dureté (pouvant atteindre 70 HRC). Bien que cette famille d'aciers rapides soit trop récente pour être normalisée, des désignations commerciales telles que ASP 23, 30 et 60 pour les aciers de Champagnole en France, ainsi que S 390 et S690 pour la société des aciers spéciaux Boehler en Autriche, existent. D'autres sociétés telles que Crucible aux États-Unis et Erasteel en Suède fabriquent également ces aciers.

#### **2.4.1.6- Emploi des aciers rapides**

L'utilisation des aciers rapides diminue de plus en plus, étant remplacés autant que possible par des outils en carbure. Toutefois, on continue de les utiliser dans des situations nécessitant une résistance exceptionnelle à la rupture ou lorsque l'usinage avec un outil affûté selon une forme complexe est indispensable, ce qui peut s'avérer économiquement difficile à réaliser en carbure.

Les aciers rapides restent particulièrement essentiels dans la fabrication d'outils à parties actives multiples tels que forêts, alésoirs, tarauds, fraises, fraises-mères, etc. Des barreaux en aciers rapides sont également disponibles dans une gamme variée de tailles, offrant la possibilité de créer des outils aux géométries spécifiques. Leur coût d'achat relativement bas les rend très compétitifs dans de nombreuses applications de mécanique générale.

#### **2.4.1.7- Choix d'un acier rapide selon les conditions d'emploi**

Les aciers rapides se divisent en deux catégories distinctes :

- ☒ Les aciers à performances normales sont employés dans des conditions d'usinage n'entraînant pas un échauffement excessif de l'outil de coupe.
- ☒ Les aciers à hautes performances sont destinés à des conditions d'usinage ( $V_c$ ,  $a_p$ ,  $f$ , etc.) générant un échauffement significatif de l'outil.

Les nuances sont disposées selon un ordre de ténacité croissante. Les indications entre parenthèses ont une signification approximative :

- ✱ (Dur) : indique la dureté à température ambiante.

- \* (Dur au rouge) : souligne une résistance accrue à chaud.
- \* (Faible usure) : signifie une meilleure résistance à l'abrasion.

Le tableau 2.3 présente les conditions d'utilisation de quelques aciers rapides.

**Tableau 2.3-** Choix d'un acier rapide selon les conditions d'emploi.

Matière usinée	Rendement normal échauffement modéré		Rendement élevé échauffement important	
	Matériau non abrasif HB < 375	Matériau abrasif HB < 375	Matériau non abrasif HB < 375	Matériau dur abrasif HB > 375
Outil	Aciers de base  6 – 5 – 2 HC (dur) 18 – 0 – 1 (facilité de trempe) 2 – 9 – 2 (dur) 6 – 5 – 2 2 – 8 – 1	Aciers sur carburés  6 – 5 – 4 (faible usure) 6 – 5 – 3	Aciers au cobalt à teneurs en carbone et vanadium normale 11 – 0 – 2 – 10 (dur au rouge) 18 – 1 – 1 – 5 6 – 5 – 2 – 5 HC (dur) 6 – 5 – 2 – 5	Aciers au cobalt sur carburés à haute teneur en vanadium 12 – 1 – 5 – 5 (faible usure) 10 – 4 – 3 – 10 (dur au rouge) 7 – 6 – 3 – 12 (dur au rouge)

## 2.4.2- Carbures métalliques

### 2.4.2.1- Introduction

Les débuts des applications des carbures de coupe ont impliqué l'utilisation de plaquettes brasées sur des corps d'outils en aciers ordinaires. La partie active de ces outils était réaffûtée au fur et à mesure de son usure.

Vers 1958, les outils à plaquettes amovibles ont été introduits, utilisant des fixations mécaniques telles que vis, coin, bride, etc. Ce type d'outil a été rapidement adopté en raison de plusieurs avantages :

- ✧ Élimination de l'affûtage,
- ✧ Absence de brasage,
- ✧ Capacité à fonctionner dans des conditions de coupe plus sévères,
- ✧ Possibilité d'indexation de l'arête et de changement rapide de la plaquette.

### 2.4.2.2- Elaboration

Actuellement, les carbures représentent 70 % du marché des outils de coupe, et leur méthode de fabrication prédominante est le frittage. Ils se composent d'une substance dure et d'un liant,

ces deux éléments étant broyés dans des broyeurs à boulets selon une proportion déterminée pour la nuance souhaitée. Après l'ajout de lubrifiant, la poudre résultante est soigneusement broyée, mélangée au liant, puis pressée, suivie de l'opération de pré-frittage. À ce stade, les pièces (frits) restent fragiles mais peuvent éventuellement être façonnées sans difficulté. La dernière étape de la fabrication des carbures est le frittage final, au cours duquel les carbures se dissolvent partiellement dans le liant métallique et entre eux.

Pendant l'opération de frittage, seul le liant fond. Lors du refroidissement, le liant se solidifie, liant ainsi les grains de carbure. Les propriétés finales du carbure sont alors établies. Au cours du frittage, un phénomène de retrait se produit, provoquant une diminution de plusieurs pourcents du volume de la pièce pré-frittée.

### 2.4.2.3- Constitution

Les carbures sont constitués de deux composants principaux :

- La substance dure (70 à 90%), principalement du carbure, confère la dureté (1500 à 2000 Hv) et donc la résistance à l'usure. Cette substance est caractérisée par deux phases de carbures, à savoir :
  - La phase alpha ( $\alpha$ ) : WC (Carbure de tungstène, température de fusion = 2600 °C).
  - La phase gamma ( $\gamma$ ) : TiC (Carbure de titane, température de fusion = 3160 °C) ; TaC (Carbure de tantale, température de fusion = 3780 °C) ; NbC (Carbure de niobium, température de fusion = 3500 °C).
- La substance liante (10 à 30% de la composition) confère la ténacité au carbure. Le cobalt est le liant le plus couramment utilisé, mais le fer et le nickel sont également utilisés. Cette substance constitue la phase bêta ( $\beta$ ).

En ajustant les proportions des substances dures et liantes, on définit les diverses nuances de carbures. Les outils de finition mettent l'accent sur la dureté, ce qui se traduit par un pourcentage de carbure plus élevé. En revanche, les outils d'ébauche nécessitent une plus grande ténacité, d'où un pourcentage de liant plus élevé.

Les carbures métalliques sont relativement fragiles, ce qui les rend plus adaptés à la coupe continue sans choc, particulièrement avec des machines rigides. Cependant, leur amélioration constante les rend de plus en plus performants. Ils opèrent à des vitesses de coupe 4 à 6 fois plus élevées que les aciers rapides, avec une température de coupe d'environ 800 °C, offrant

ainsi une productivité accrue. Le tableau 2.4 présente la composition chimique approximative des différentes nuances d'outils carbures.

**Tableau 2.4-** Composition chimique des différentes nuances de carbures.

Matière usinée	Dureté Hv <sub>30</sub>	Nuance ISO	Composition chimique (%)		
			WC	TiC + TaC	Co
Métaux ferreux à copeaux longs	1650	P01	33	59	8
	1600	P10	55	38	9
	1500	P20	76	14	10
	1450	P30	82	08	10
	1350	P40	74	12	14
Métaux ferreux à copeaux longs et courts et métaux non ferreux	1700	M10	84	10	06
	1555	M20	82	10	08
	1450	M30	80	08	10
	1350	M40	79	06	14
Métaux ferreux à copeaux courts, métaux non ferreux et non métalliques	1800	K01	92	04	04
	1650	K10	92	02	06
	1550	K20	92	02	06
	1400	K30	93	0	07
	1350	K40	88	0	12

### 2.4.3- Cermets (carbures cémentés)

Les carbures cémentés, également connus sous le nom de carbures frittés ou cermets, trouvent leurs origines dans les stellites, des alliages de tungstène, de chrome et de cobalt. La technique de la métallurgie des poudres (Powder metallurgy : PM) est couramment utilisée pour la fabrication des outils en carbure cémenté. Dans ce processus, la poudre de carbure (tungstène ou titane) et de cobalt est pressée dans un moule, puis frittée à une température d'environ 1300 à 1600 °C. On ajoute une petite quantité de carbures de tantale, de titane ou de vanadium pour améliorer les propriétés spécifiques des carbures cémentés.

Le cobalt sert de liant, avec une proportion variant de 6 à 12%. À noter que le cobalt fond à 1493 °C et forme une phase soluble avec les grains de carbure de tungstène à 1275 °C, réduisant ainsi la porosité. Une augmentation du pourcentage de cobalt améliore la ténacité de l'outil, au détriment de sa dureté et de sa résistance. La dureté de l'outil est directement liée à la quantité de liant et à la taille du carbure de tungstène. Une réduction de la taille des grains de carbure de tungstène et de la teneur en liant améliore la dureté, et vice versa. La granulométrie du carbure de tungstène se situe généralement entre 600 et 2100 HV.

En général, le carbure cémenté offre une résistance élevée à l'usure malgré son apparence fragile. Il trouve son application optimale dans la coupe d'aciers à haute résistance, fonctionnant à des vitesses de coupe élevées.

Actuellement, les industries de découpe des métaux recourent aux revêtements durs en couches minces et aux processus de diffusion thermique pour prolonger la durée de vie des outils. Cette technologie de revêtement est utilisée sur environ 50% des aciers rapides (ARS), 85% des carbures, et 40% des outils ultra-durs. Une variété de matériaux de revêtement tels que TiN, TiAlN, TiCN, MoS<sub>2</sub>, CrN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,...etc., ainsi que différentes méthodes de dépôt comme le dépôt physique en phase vapeur, le dépôt chimique en phase vapeur, assisté par plasma et à température modérée, sont disponibles pour offrir des avantages significatifs à la technologie d'usinage, tels que maximiser la durée de vie des outils, augmenter la productivité, et permettre des coupes à avance élevée.

Les bénéfices notables de l'application de revêtements sur les outils de coupe incluent

- L'amélioration de la dureté de surface et de la résistance à l'usure,
- La réduction du coefficient de frottement pour faciliter le retrait des copeaux, la diminution des forces de coupe et de la génération de chaleur,
- Une meilleure résistance à la corrosion et à l'oxydation,
- Ainsi que l'amélioration globale de l'intégrité de surface des pièces usinées.

Cependant, il est important de noter certains inconvénients de la technologie de revêtement, notamment :

- Le coût accru des outils, lesquels conviennent généralement à des applications spécifiques (par exemple, des plaquettes indexables),
- La rectification des outils peut éliminer les matériaux de revêtement, nécessitant ainsi une gestion prudente de ce processus.

#### **2.4.4- Céramiques**

Au début des années 1950, les premiers outils céramiques ont fait leur apparition, avec l'oxyde d'aluminium à grains fins (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) comme matériau principal. Ce dernier est fritté sous haute pression et température pour former des outils offrant une excellente dureté et des propriétés de résistance à l'usure, capables de supporter des températures dépassant 1500 °C. Cependant, en raison de leur faible résilience, les céramiques ne tolèrent ni les chocs ni les vibrations, nécessitant des montages sans jeu et des machines rigides. L'utilisation de ces outils a permis d'atteindre des vitesses de coupe élevées sans recourir à des fluides de refroidissement.

Il est à noter que la ténacité des outils en céramique est significativement inférieure à celle des fontes, et leur résistance à la microfissuration est dix fois moindre. Toutefois, cette faiblesse peut être améliorée en ajustant les proportions d'oxydes de chrome, de zirconium, de titane et de magnésium de manière homogène dans le mélange pour renforcer la ténacité des outils en céramique d'alumine.

Dans le domaine de la finition, les outils céramiques se montrent adaptés pour l'usinage des métaux ferreux, mais leur utilisation est exclue pour les alliages légers et le titane en raison de problèmes d'incompatibilité chimique avec l'alumine. On distingue plusieurs types de céramiques de coupe :

### 1. Céramiques à base d'alumine pure ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) :

- ✧ Ces céramiques blanches, composées à 99,9 % d' $\text{Al}_2\text{O}_3$ , sont formées de cristaux d'alumine très fins ( $\text{Ø} = 2 \mu\text{m}$ ) et utilisent de l'oxyde de zirconium ( $\text{ZrO}_2$ ) ou du chrome ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) comme liant.
- ✧ Le frittage est employé pour accroître la ténacité. Ces céramiques conservent leur dureté, particulièrement à des températures élevées, permettant un usinage à grande vitesse et à sec.
- ✧ Elles sont idéales pour l'usinage à grande vitesse des fontes, avec un taux d'enlèvement de matière élevé, et pour l'usinage d'ébauche et de finition des alliages ferreux traités (dureté = 63 HRc).
- ✧ Présentant une haute capacité réfractaire (point de fusion = 1500 °C), une bonne résistance à l'usure et une stabilité chimique, elles offrent des performances appréciables.

### 2. Céramiques mixtes noires à base d'alumine à grains fins :

- ✧ Ces céramiques noires comprennent des additifs tels que le carbure de titane ou le nitrure de titane (jusqu'à 30 %).
- ✧ Les céramiques noires sont renforcées par le TiC et le TiN, améliorant la conductivité thermique, la résistance aux chocs thermiques, et conférant une meilleure tenue mécanique à l'arête de coupe.
- ✧ Bien adaptées à l'usinage de fontes très dures, d'alliages réfractaires à base de nickel et de cobalt, elles sont utilisées en finition pour l'usinage d'aciers de construction et d'aciers rapides. L'usage de lubrifiant est possible.



### 3. Céramiques renforcées (whiskers) de couleur verte :

- ✧ Ces céramiques, constituées d'une matrice d'alumine et de carbure de silicium (SiC), contiennent jusqu'à 25 % de SiC.
- ✧ L'ajout de bâtonnets (whiskers) de 2  $\mu\text{m}$  de diamètre améliore significativement la ténacité, la résistance aux chocs thermiques et la dureté, comparativement aux céramiques traditionnelles.
- ✧ Elles sont employées pour l'usinage d'aciers et de fontes traités, ainsi que pour le tournage des superalliages à base de nickel (Inconel 718) à grande vitesse.

### 4. Céramiques Sialons à base de nitrure de silicium (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) :

- ✧ Les Sialons (Si, Al, O, N) sont des céramiques de coupe récentes, élaborées à partir de nitrure de silicium (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>).
- ✧ Des éléments tels que l'oxyde d'yttrium (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), l'oxyde de manganèse (MgO) ou l'oxyde de béryllium (BeO) sont ajoutés pour améliorer le frittage, augmentant ainsi la dureté et la résistance à l'abrasion, similaire au carbure de titane (TiC).
- ✧ Comparées aux autres céramiques, les Sialons présentent une meilleure dureté à chaud, une résistance accrue aux chocs thermiques, une excellente résistance à l'usure et une stabilité chimique significative, les rendant adaptées à l'usinage des superalliages à base de cobalt et des fontes malléables.

En pratique, les céramiques peuvent être utilisées pour usiner la plupart des matériaux, à quelques exceptions près. L'aluminium représente l'une de ces exceptions en raison de l'activité chimique de la base Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. De plus, les alliages de titane ne sont pas recommandés pour l'usinage avec des céramiques en raison de leur propension à réagir chimiquement, ainsi que de la susceptibilité à l'inflammabilité de certains d'entre eux.

Les céramiques présentent d'importants avantages en tant que matériaux de coupe, notamment leur capacité à résister aux températures élevées, leur résistance à l'usure, ainsi qu'une résistance à la compression qui limite la déformation plastique. Ces propriétés permettent l'utilisation de vitesses de coupe 5 à 10 fois supérieures à celles des carbures, entraînant une amélioration de la productivité. De plus, les céramiques offrent des avantages tels que la réduction des coûts d'outillage, une meilleure qualité dimensionnelle des pièces usinées, la possibilité d'usiner sans lubrification, la chaleur produite étant évacuée par le copeau.

Cependant, ces avantages sont atténués par certains inconvénients tels que la faible résistance à la rupture transversale, la sensibilité aux chocs thermiques et aux vibrations. Cela nécessite

l'élimination de toute machine-outil manquant de rigidité. De plus, l'utilisation de machines puissantes est indispensable pour les grandes vitesses de coupe, et une fréquence plus élevée de ruptures aléatoires est observée par rapport au comportement des carbures. Les plaquettes en céramique doivent être épaisses pour mieux résister aux chocs, et les angles de coupe des outils sont fortement négatifs, incluant un angle d'obliquité d'arête. Lors des opérations d'ébauche, un chanfrein sur la pièce est nécessaire pour éviter la rupture de la plaquette.

#### **2.4.5- Nitrure de bore cubique (CBN)**

Après le diamant, le Nitrure de Bore Cubique (CBN) se distingue comme le matériau synthétique le plus dur connu, fabriqué par frittage à haute pression et haute température pour l'usinage de matériaux difficiles. Lorsqu'on usine des matériaux dépassant 55 HRC en dureté, les outils conventionnels s'usent rapidement en raison des contraintes, températures et vibrations élevées. Le CBN, avec une température de fusion d'environ 2730 °C, offre une résistance exceptionnelle à l'oxydation et maintient une dureté stable jusqu'à 2000 °C, assurant ainsi une performance fiable dans des conditions extrêmes d'usinage.

La proportion de CBN dans le matériau de coupe varie de 50 à 90%, avec le reste composé d'une phase céramique (par exemple, 57% de CBN, 35% de TiCN, 8% d'AlN + AlB<sub>2</sub> + WC + Co). Bien que les outils CBN soient considérablement plus coûteux à l'achat, ils surpassent les céramiques pures en performance, étant jusqu'à 30 à 40 fois plus performants et environ 10 fois plus efficaces que les sialons. Les outils CBN présentent des propriétés mécaniques supérieures, une excellente résistance aux chocs thermiques, une faible usure et une conductivité thermique exceptionnelle par rapport aux outils en carbure. Cependant, leur utilisation optimale nécessite des vitesses d'avance plus basses pour limiter l'usure tout en maximisant la durée de vie de l'outil.

Le matériau de nitrure de bore cubique polycristallin (PCBN) a été spécifiquement développé pour les opérations de tournage et autres usinages, même sur des matériaux durs tels que les aciers, la fonte et les superalliages. Les outils PCBN offrent une résistance à l'abrasion environ deux fois supérieure à celle des céramiques et dix fois supérieure à celle du carbure. Une préparation adéquate des arêtes des plaquettes PCBN est essentielle pour améliorer leur durée de vie. Bien que le chanfrein d'arête puisse améliorer les performances, les avancées technologiques récentes suggèrent que la préparation des arêtes offre des solutions encore meilleures, avec des performances de coupe améliorées et une durée de vie accrue.

Les outils PCBN peuvent être revêtus d'une fine couche de 2 à 15  $\mu\text{m}$ , appliquée soit par dépôt chimique en phase vapeur, soit par dépôt physique en phase vapeur. Ce revêtement améliore la dureté, la stabilité chimique et offre une protection contre les chocs thermiques. Bien que la technologie de revêtement offre des avantages techniques, elle peut ne pas améliorer de manière significative l'intégrité de surface des outils revêtus, notamment en termes de défauts de surface, de finition et de contraintes résiduelles. Il est à noter que les outils non revêtus peuvent présenter davantage de contraintes résiduelles en compression lors de l'usinage.

#### **2.4.6- Diamants polycristallin (PCD)**

Le diamant polycristallin (PCD) appartient à la catégorie des matériaux extra-durs. Récemment, la technologie des outils a évolué pour offrir des outils PCD avec trois qualités distinctes, classées en fonction de la taille des grains (gros grains de 50  $\mu\text{m}$ , grains fins de 5  $\mu\text{m}$  et ultrafins de 0,5  $\mu\text{m}$ ).

##### **1. Gros Grains (50 $\mu\text{m}$ ) :**

- ✗ Résistance élevée à l'abrasion.
- ✗ Idéaux pour l'usinage de matériaux riches en silicium, aluminium, graphite, fonte grise, céramique et carbure de tungstène.

##### **2. Grains Fins (5 $\mu\text{m}$ ) :**

- ✗ Résistance élevée à l'abrasion et netteté des arêtes d'outil.
- ✗ Convient pour l'usinage d'aluminium, cuivre, fibre de verre, carbone à faible teneur en silicium, contreplaqué, panneaux de fibres et bois dur.

##### **3. Ultrafins (0,5 $\mu\text{m}$ ) :**

- ✗ Offrent une ténacité supérieure.
- ✗ Utilisés dans l'usinage de plastiques, bois, aluminium et cuivre.

L'outil PCD présente des caractéristiques supérieures au diamant naturel. Il est composé de grains de diamant frittés avec un liant métallique sous des températures et des pressions élevées. Les outils PCD peuvent offrir une résistance à l'usure environ 500 fois supérieure à celle du carbure de tungstène. Cependant, ils sont extrêmement fragiles, ont une faible ténacité et ont une plus grande propension à réagir avec le fer.

Les outils PCD sont couramment utilisés pour remplacer les outils à haute dureté, tels que le carbure de tungstène revêtu et non revêtu, la céramique et le diamant naturel, dans des

applications variées telles que l'usinage des fibres de carbone, des composites renforcés par matrice métallique, du bois, des plastiques, de la céramique, ...etc.

## 2.5- Traitements et revêtements des outils de coupe

### 2.5.1- Aciers rapides

#### 2.5.1.1- Traitements de surfaces

En règle générale, les traitements de surface visent à renforcer la dureté de la surface des outils par la diffusion d'éléments durcissant dans l'acier. Ces traitements sont appliqués sur des outils d'usinage entièrement finis et présentent plusieurs avantages :

- ☞ **Extension de la durée de vie de l'outil** : Sous des conditions de coupe similaires, la durabilité de l'outil est accrue.
- ☞ **Amélioration de la productivité** : Une productivité supérieure est obtenue pour une durée de vie équivalente grâce à l'optimisation des conditions de coupe.
- ☞ **Réduction de l'usure** : Une diminution de l'usure permet, pour un nombre fixe de pièces usinées, un plus grand nombre de réaffûtages avec une quantité de matière enlevée moindre à chaque affûtage.

Trois traitements de surface couramment utilisés sont :

#### a. Nitruration

L'enrichissement superficiel de l'acier en azote (N) constitue l'une des techniques de traitement de surface. L'azote diffuse et réagit avec les éléments d'alliage pour former des nitrures extrêmement fins, induisant un durcissement de la couche superficielle, généralement compris entre 900 et 1200 Hv. Il est crucial de maintenir une profondeur inférieure à 50  $\mu\text{m}$  afin de préserver la ténacité de l'acier rapide.

Les deux principaux procédés de nitruration sont les suivants :

#### b. Nitruration en bain de sel (cyanuration)

Le processus de nitruration implique l'immersion des outils dans un bain composé de cyanures alcalins fondus à 560 °C. Cette opération conduit à la formation d'une couche externe de combinaison, d'une épaisseur de quelques micromètres, riche en nitrures et carbonitrures. Cette couche présente d'excellentes propriétés de résistance à l'usure, au collage

et au grippage. Parmi les procédés reconnus et brevetés, on trouve le Tenifer TF1 ainsi que le Sufinuz ou Sursulf.

### **c. Nitruration ionique**

Le procédé consiste à entourer les outils à traiter d'un plasma contenant des ions d'azote actifs. Ces ions sont dirigés vers les surfaces à traiter, provoquant un chauffage par la dissipation de l'énergie cinétique des ions en énergie calorifique. En même temps, il y a une implantation d'ions dans l'acier, fournissant l'azote nécessaire à la formation de nitrures. L'avantage significatif de cette méthode est la capacité de traiter de vastes surfaces tout en préservant l'état de surface initial des outils.

#### **2.5.1.2- Revêtements durs**

Vers 1980, les techniques de dépôt ionique ont connu un développement majeur, marqué par l'émergence des procédés de dépôt physique et chimique en phase vapeur (CVD pour dépôt chimique en phase vapeur et PVD pour dépôt physique en phase vapeur).

##### **a) Dépôt chimique en phase vapeur (Chemical Vapor Deposition C.V.D)**

C'est un procédé économique qui implique le dépôt, sur un substrat tel qu'une matrice en acier rapide ou en carbure, de molécules présentes dans un gaz à l'intérieur d'une enceinte chauffée entre 950 et 1050 °C. Grâce à ce procédé, il est possible d'appliquer avec une bonne adhérence divers revêtements de nitrures et de carbonitrures tels que le TiN, le TiCN, etc.

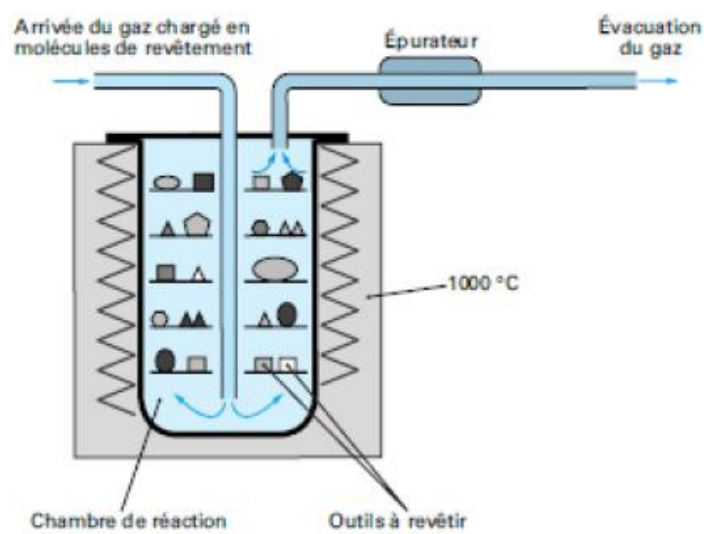
##### **b) Dépôt physique en phase vapeur (Physical Vapor Deposition P.V.D)**

Il s'agit d'un procédé deux à trois fois plus coûteux que le C.V.D. Il se déroule entre 200 et 400 °C dans une enceinte où des molécules présentes dans un plasma se déposent électrostatiquement sur le substrat. Les couches obtenues ont une épaisseur de l'ordre de 1 à 2 µm. Ce procédé permet de revêtir les aciers rapides et les carbures métalliques. Le C.V.D est déconseillé pour les aciers rapides en raison de l'épaisseur excessive des couches (4 à 8 µm). Divers revêtements sont utilisés, tels que le TiC, le Ti<sub>2</sub>N, le Ti<sub>2</sub>CN, l'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, le CBN, le diamant, le MoS<sub>2</sub>. Le tableau 2.5 résume les revêtements utilisés en fonction de la méthode, avec les épaisseurs et les duretés atteintes.

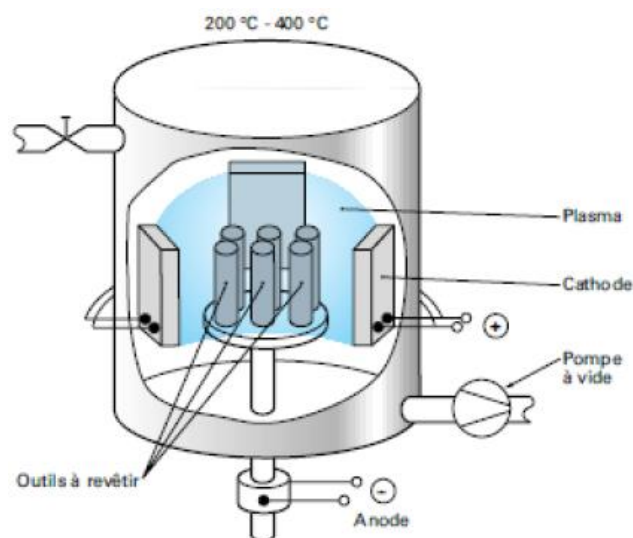
Les figures 2.3 et 2.4 montrent les schémas de principe des deux méthodes de revêtement.

**Tableau 2.5-** Dureté et épaisseur des dépôts.

	Dépôts	Dureté Hv	Epaisseur $\mu\text{m}$
<b>C.V.D</b>	TiN	2000 à 5000	3
	TiC	3000 à 3500	2 à 3
	TiCN	2500 à 3100	3
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2500 à 3100	3
	NBc	3000 à 4000	3
	Diamant	7000 à 10000	5 à 10
<b>P.V.D</b>	TiN	2000 à 2500	3 à 5
	TiCN	3000 à 3400	3 à 5
	TiAlN	2000 à 2400	3 à 5
	CrC	1850	3
	CrC	1750 à 2900	3



**Figure 2.3-** Procédé CVD.



**Figure 2.4-** Procédé PVD.

### 2.5.2- Revêtement des carbures métalliques

À partir de 1969, un nouveau matériau de coupe émerge, appelé carbure revêtu. Il se compose d'une plaquette en carbure métallique recouverte d'un mince film (3 à 10  $\mu\text{m}$ ) d'un matériau plus dur (2000 à 3000 Knoop).

Les couches les plus courantes comprennent le **carbure de titane**, le **nitruure de titane**, le **carbonitruure de titane** et l'**alumine**. Chacune de ces couches offre des améliorations spécifiques à l'outil, que ce soit en termes de résistance à l'usure, à l'oxydation, au frottement, etc. Des revêtements multicouches ont également été développés pour combiner les avantages de chacune. Certains revêtements à base de **nitruure de hafnium** et de **carbure de chrome** ont également été introduits sur le marché. En général, ces couches sont obtenues par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) dans des fours fonctionnant entre 800 et 1100 °C, assurant ainsi une excellente adhérence. Pour certaines applications, comme le fraisage, des dépôts à basse température par dépôt physique en phase vapeur (PVD) sont parfois utilisés pour minimiser la fragilisation du substrat carbure.

Les nouvelles générations de plaquettes amovibles en carbure revêtu sont caractérisées par une complexité accrue. Le substrat, enrichi en cobalt, présente une variation du taux de cobalt entre le cœur et la périphérie de la plaquette. Cette conception vise à améliorer la résistance à l'usure, assurant ainsi une meilleure performance face aux vitesses de coupe élevées, tout en préservant une ténacité acceptable. Ensuite, le substrat est revêtu, et le nombre de couches varie selon le fabricant, généralement de deux à dix, avec des dépôts réalisés par procédé CVD. Contrairement aux premiers carbures, le substrat et le revêtement sont désormais indissociables. Les substrats sont spécifiquement conçus pour recevoir certains types de revêtements, ou inversement, pour rester non revêtus.

Le tableau 2.6 montre les propriétés des différents revêtements et le tableau 2.7 les compositions des céramiques utilisées pour la fabrication des plaquettes à outils.

**Tableau 2.6-** Comparaison des propriétés de certains revêtements.

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

**Tableau 2.7-** 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 : $Al_2O_3$	$Al_2O_3$ -TiC (30 %)		base $Si_3N_4$
Actuellement : $Al_2O_3$ - $ZrO_2$	$Al_2O_3$ -TiN-TiC	$Al_2O_3$ -fibres SiC	
	$Al_2O_3$ -WC, TaC		
			→ Ténacité
← Dureté			

## 2.6- Matériaux d'outils pour usinage par abrasion

Les techniques d'abrasion mécanique sont utilisées pour des usinages de précision en utilisant des outils abrasifs performants. Les outils abrasifs couramment utilisés comprennent les meules, les toiles (bandes) et les papiers abrasifs. Ces outils permettent d'obtenir un état de surface amélioré.

### 2.6.1- Abrasifs

Les grains abrasifs sont des particules dures qui, grâce à une action mécanique sur des matériaux moins durs, sont capables de les usiner. Dans le cas des meules (abrasifs agglomérés), des toiles et des papiers abrasifs (abrasifs appliqués), les grains abrasifs répartis à la surface agissent comme des outils de coupe, provoquant l'enlèvement de matière. La quantité de matière enlevée dépend de divers facteurs tels que la dureté de l'abrasif, la taille du grain, la forme du grain, la capacité de régénération des arêtes tranchantes et la nature du liant qui maintient les grains abrasifs.

Un abrasif doit présenter plusieurs qualités essentielles :

- ✧ Il doit être plus dur que le matériau à usiner.
- ✧ Il doit être suffisamment robuste pour résister aux forces de meulage.
- ✧ Il doit résister à la chaleur afin de ne pas s'émousser à des températures élevées.
- ✧ Il doit être friable, de manière à ce que, même lorsque ses arêtes s'émoussent, de nouvelles arêtes vives soient exposées pour poursuivre le travail.



## 2.6.2- Grains abrasifs

Un grain abrasif est un cristal dur utilisé pour usiner un matériau moins dur. Plusieurs types d'abrasifs sont couramment utilisés, qu'ils soient d'origine naturelle ou artificielle.

### 2.6.2.1- Abrasifs naturels

Les premiers abrasifs utilisés en fabrication mécanique étaient d'origine naturelle. Les poudres d'émeri, de corindon et de grenat étaient les seuls abrasifs disponibles jusqu'à l'introduction du premier produit synthétique. Les abrasifs en diamant naturel ont également été utilisés pendant de nombreuses années. Aujourd'hui, avec la disponibilité d'abrasifs synthétiques de haute qualité et d'une uniformité remarquable, le rôle des abrasifs naturels dans l'industrie a nettement diminué.

### 2.6.2.2- Abrasifs synthétiques

Les abrasifs synthétiques sont produits depuis plus de 50 ans. Ils se caractérisent généralement par une excellente uniformité et une pureté élevée. Les abrasifs les plus largement utilisés sont les poudres d'oxyde d'aluminium ( $Al_2O_3$ ). Leur couleur varie du bronze au blanc pur en fonction des impuretés résiduelles. Deux autres abrasifs synthétiques importants sont le carbure de silicium (SiC) et le carbure de bore ( $B_4C$ ). Ces deux abrasifs sont extrêmement durs, le carbure de bore ayant une dureté proche de celle du diamant.

#### a) Abrasifs d'oxyde d'aluminium synthétique

L'alumine ( $Al_2O_3$ ) est l'un des oxydes extrêmement importants pour la fabrication mécanique. La couleur de la poudre abrasive donne une indication de la pureté du matériau. Une alumine de près de 100% de pureté présente une couleur blanche pure. Une couleur blanche cassée indique la présence d'impuretés minérales résiduelles, tandis qu'une poudre abrasive de couleur bronze contient un pourcentage significatif de ces minéraux.

#### b) Carbure de silicium

Le carbure de silicium (SiC) est un matériau abrasif synthétique très dur, sans équivalent naturel connu. Il existe deux types de carbure de silicium qui se distinguent par leur couleur, leur densité et leur dureté. L'un est de couleur noire ou gris foncé, tandis que l'autre est vert. Le carbure de silicium est largement utilisé dans la fabrication de meules abrasives pour le rodage précis des métaux et d'autres matériaux durs et fragiles.

### c) Diamant

Les abrasifs en diamant jouent un rôle de plus en plus important dans la fabrication mécanique des semi-conducteurs. Ils sont employés sous forme de poudre dans des suspensions diamantées ou liés dans une matrice métallique ou organique pour créer divers outils diamantés. Jusqu'à présent, l'utilisation de la suspension de diamant a été principalement restreinte au doucissage et au polissage de matériaux difficiles à travailler, tels que certains métaux et céramiques.

Les abrasifs sont classés en trois catégories principales, chacune comprenant divers types et dimensions :

1. Abrasifs agglomérés : comprenant les meules et les disques de meuleuse.
2. Abrasifs appliqués : englobant les papiers abrasifs, les bandes abrasives, les rouleaux abrasifs et les disques abrasifs.
3. Le troisième type concerne l'utilisation de grains en suspension sur un support (toile, tissu, etc.), comme c'est le cas, par exemple, pour les polissoirs chargés en abrasifs

#### 2.6.3- Meule

La meule est constituée d'une multitude de particules dures (abrasives) liées entre elles par un liant plus tendre, appelé l'agglomérant. Chaque grain d'abrasif, en frottant sur un matériau de dureté inférieure, enlève de petits copeaux de matière. La répétition de cette opération par un grand nombre de grains permet d'enlever un volume appréciable de copeaux. Bien que le terme "meule" désigne généralement un produit de forme cylindrique, il est souvent utilisé pour désigner l'outil abrasif lui-même.

La topographie de la meule a un impact direct sur les performances de coupe et la rugosité de la surface rectifiée. La composition de la meule, la taille des grains (granulométrie), le liant, la porosité, la densité de grain, ainsi que les conditions de dressage influent significativement sur la topographie de la surface. Ainsi, une meule peut être envisagée comme l'ensemble d'un très grand nombre de petits outils (cristaux abrasifs) répartis au sein d'une matrice formant le support, assurant l'enlèvement d'une petite quantité de matière. Le mode d'action de la meule sur la pièce usinée peut être décrit comme une succession d'actions de grains abrasifs sur une surface. Cependant, ce procédé présente des caractéristiques spécifiques, notamment en raison de l'orientation et de la répartition aléatoire des grains, ainsi que des vitesses de coupe très élevées, de la grande énergie spécifique et souvent des températures locales de coupe élevées.

### 2.6.4- Bande abrasive

La bande abrasive est principalement constituée de grains abrasifs, le plus couramment utilisé étant l'oxyde d'aluminium ( $Al_2O_3$ ), mais également le carbure de silicium (SiC), moins coûteux que le nitrure de bore cubique (CBN) ou le diamant. En général, ces grains sont déposés sur un support en polyester ou en toile de différentes épaisseurs, par diverses méthodes. Les grains sont fixés sur le support et maintenus ensemble par une résine synthétique. Ainsi, la bande abrasive se compose généralement de la base, des grains, du support des grains et du liant. Il existe plusieurs variétés de bandes utilisées dans l'industrie, et leur choix demeure souvent empirique en fonction de ces trois éléments structuraux.

## CHAPITRE 3 :

### Usinage dur et usinage à sec – l'usinabilité des matériaux

#### 3.1- Introduction

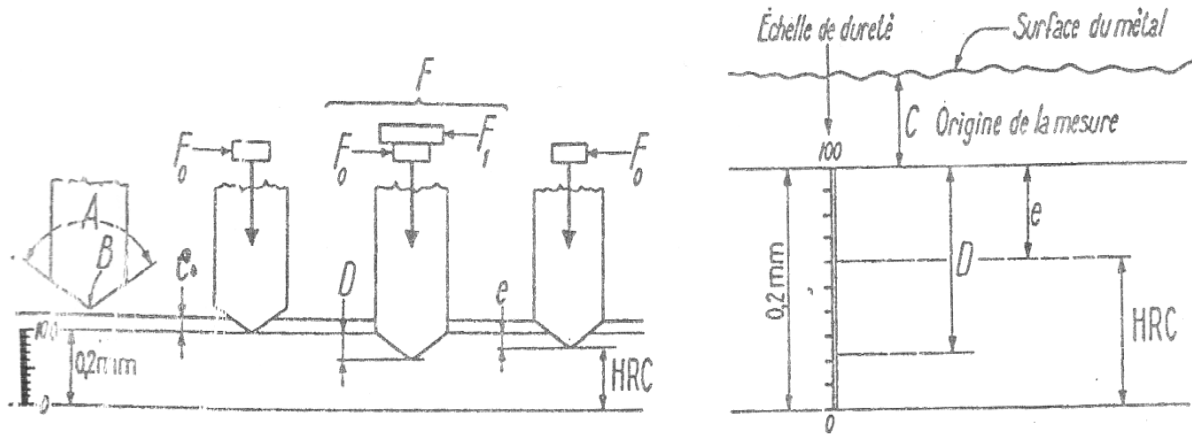
Les matériaux durs, tels que les aciers alliés durcis, les superalliages, la céramique, le titane et ses alliages, ...etc, sont largement utilisés dans les principaux domaines d'application du génie mécanique, comme les secteurs de l'automobile et de l'aérospatiale, pour la production des pièces de transmission. Ces matériaux sont utilisés pour fabriquer d'engrenages, d'essieux, de roulements, d'arbres, d'arbres à cames, de pignons, de disques d'embrayage, de vilebrequins, d'épaulements d'arbre, et bien d'autres pièces.

Le développement et l'évolution des procédés d'usinage conventionnels dépend de la dureté des matériaux des outils de coupe, qui doit être beaucoup plus élevée que celle des pièces à usiner. L'enjeu réside dans la capacité à usiner ces matériaux plus durs tout en tirant profit d'avantages économiques et technologiques. C'est là l'objectif commun des industriels et des chercheurs.

#### 3.2- Matériaux durs

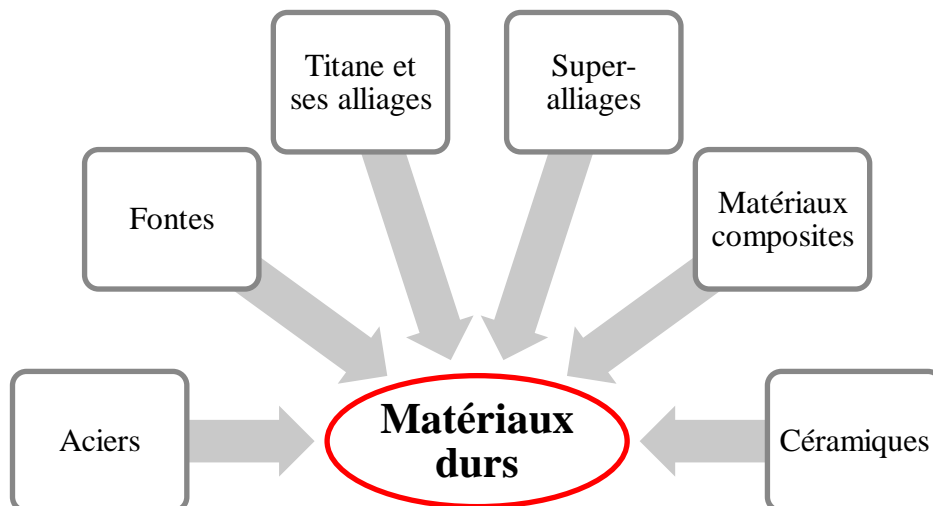
Les matériaux, qu'ils soient mous ou durs, sont généralement classés selon leur dureté, mesurée par différentes techniques. La dureté représente la résistance d'un matériau à la pénétration par un corps plus dur. Les méthodes courantes pour mesurer ce paramètre sans dimension incluent Brinell, Vickers, Knoop, Rockwel, ...etc. Le principe fondamental demeure identique : appliquer une force avec un pénétrateur indéformable (plus dur) sur le matériau à tester et mesurer la taille de l'empreinte résultante (F/S).

Le test de dureté prédominant utilise un ensemble standard d'échelles, identifiées par des lettres (par exemple : B, C, D, E, F, ... etc). Les différentes lettres correspondent à différentes échelles et sont utilisées pour enregistrer les valeurs de dureté. Une valeur numérique plus élevée dans l'échelle indique une dureté accrue du matériau. La figure 3.1 illustre le principe du test de dureté Rockwell Cône (HRC), le plus couramment employé pour évaluer la dureté des matériaux ferreux.



**Figure 3.1-** Principe de l'essai Rockwell Cône (HRC).

Les matériaux durs sont définis par une valeur de dureté supérieure à 45 HRC selon l'échelle Rockwell C. De plus, ces matériaux sont classés en deux catégories : extrêmement durs (indice de dureté supérieur ou égal à 55 HRC) et moyennement durs (indice de dureté entre 45 HRC et 55 HRC). Des exemples incluent fontes, aciers (d'outils, de roulements, de cémentations, de chromes durs, de traitements thermiques), superalliages, ...etc. L'usinage de ces matériaux, appelé usinage dur, pose un défi majeur, nécessitant des outils encore plus résistants. Pour une meilleure compréhension, l'organigramme suivant illustre la classification des matériaux durs.



**Figure 3.2-** Différents matériaux durs.

### 3.3- Procédés d'usinage des matériaux durs

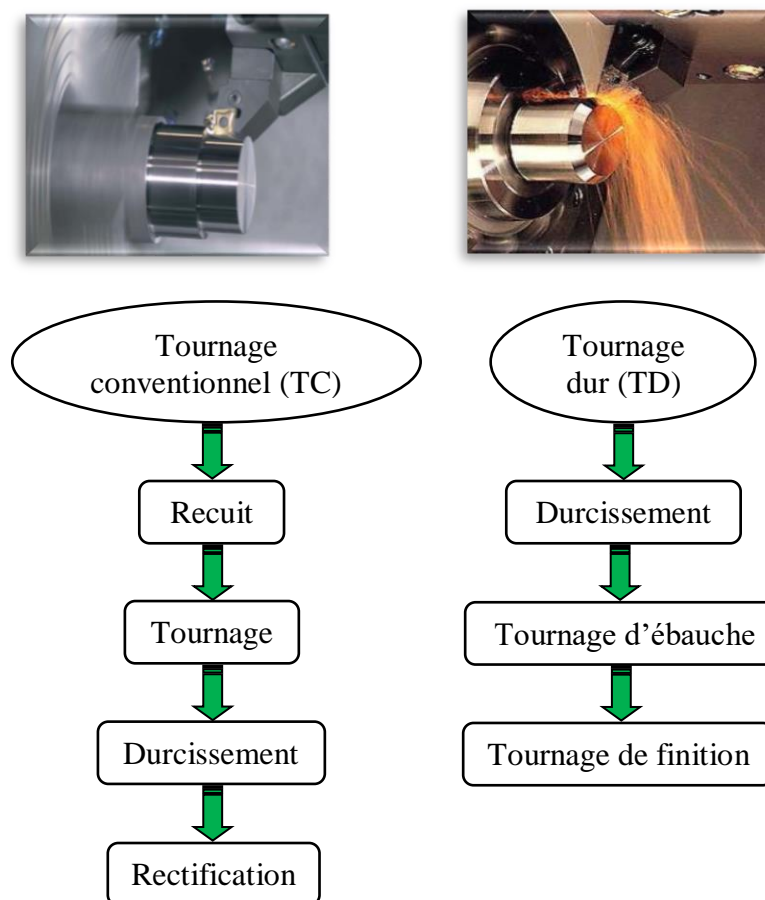
Les matériaux durs tels que les aciers trempés, les verres, les plastiques renforcés de fibres de carbone ou de verre, les composites métalliques et les céramiques sont reconnus pour leur

grande dureté, résistance à l'usure élevée et faible ténacité à la rupture. Ils trouvent une utilisation répandue dans divers secteurs tels que l'aérospatiale, l'automobile, l'électronique, les soins dentaires, l'optique,...etc. Cependant, en raison de leurs propriétés mécaniques exceptionnelles, l'usinage traditionnel de ces matériaux s'avère difficile.

Les procédés d'usinage des matériaux durs à l'aide d'outils extrêmement durs, tels que les outils céramiques et les outils en nitrure de bore cubique (CBN), sont abordées ci-dessous.

### 3.3.1- Tournage dur

Le tournage dur TD (Hard turning - HT) figure parmi les procédés d'usinage de précision les plus utilisés dans l'industrie mécanique. En général, c'est la méthode de tournage des métaux durs tels que les aciers et les fontes. Ces métaux subissent un traitement thermique qui les rend plus résistants, atteignant une dureté comprise entre 45 HRC et 68 HRC, voire jusqu'à 70 HRC sur l'échelle Rockwell C. Le TD a été développé comme une alternative au processus de rectification traditionnelle. La figure 3.3 compare le tournage conventionnel (TC) et le tournage dur (TD).



**Figure 3.3-** Comparaison entre les étapes de TC et de TD.

Ce processus d'usinage mécanique, avec une géométrie d'outil bien définie, offre des avantages par rapport à la rectification lorsqu'une finition précise de pièces géométriquement complexes est requise. De manière innovante, cette technique moderne permet une réduction efficace des temps de cycle. En général, elle est réalisée à sec, sans besoin de lubrification, ce qui a un impact positif sur l'environnement.

Les outils utilisés dans le tournage dur (TD) présentent des caractéristiques spécifiques telles que la résistance à l'usure, la résistance à la température et une stabilité chimique, ...etc. L'utilisation industrielle de cette technologie est rendue possible grâce à des outils tels que les céramiques et le nitrure de bore cubique (CBN). Le développement de ce procédé vise à remplacer les opérations coûteuses de la rectification traditionnelle, qui est souvent longue, coûteuse, inflexible et nuisible à l'environnement en raison de l'utilisation de liquides de refroidissement. Le TD permet de réduire les coûts de fabrication, d'accélérer la production et d'améliorer la qualité des pièces.

### 3.3.2- Brochage dur

Le brochage est un procédé d'usinage où la matière est enlevée par une coupe effectuée avec un outil à dents multiples étagées se déplaçant parallèlement à la surface usinée. L'outil, appelé broche, est utilisé avec une machine appelée brocheuse. Cette opération se déroule généralement en une seule passe rectiligne, couvrant à la fois l'ébauche et la finition. Le temps de coupe est relativement court, et souvent, une lubrification est utilisée, comme illustré dans la figure 3.4.



**Figure 3.4-** Opération de brochage.

### 3.3.3- Alésage dur

L'alésage est une opération d'usinage qui combine les procédés de tournage et de perçage internes. Elle sert à finir les trous préalablement forés ou à élargir le diamètre d'un trou existant. Les principaux objectifs de l'alésage incluent :

- ❖ Maintenir le diamètre du trou avec une précision dimensionnelle tout en minimisant la rugosité de surface,
- ❖ Garantir la centricité et la circularité de la pièce,
- ❖ Assurer la perpendicularité du trou par rapport à la surface usinée,
- ❖ Permettre d'obtenir une finition de surface de haute qualité.

L'alésage peut être réalisé à l'aide d'une variété d'outils tels que les alésoirs, les fraises, les forets à aléser, les têtes à aléser,...etc. En fonction des exigences de la pièce à usiner, des lubrifiants peuvent être utilisés pour faciliter l'opération et améliorer la durée de vie des outils.

Les avantages techniques de l'opération d'alésage comprennent la capacité à usiner des trous de grand diamètre. Sur le plan économique, l'alésage permet une réduction des coûts d'exploitation d'environ 35 % pour les machines, ainsi qu'une diminution de 55 % des coûts d'équipement par rapport au processus de rectification. Toutefois, il est important de noter que la qualité de surface de la pièce usinée peut être une limitation de cette opération.

### 3.3.4- Fraisage dur

La technologie de fraisage dur a suscité un grand intérêt dans la fabrication de matrices et de moules, offrant une alternative partielle à l'usinage à décharge électrique (EDM). Ce processus de fraisage permet de produire des pièces avec une qualité de surface élevée, améliorant ainsi la résistance à la fatigue par rapport à la rectification. Néanmoins, la principale limitation réside dans la réduction de la durée de vie de l'outil. D'autres inconvénients incluent l'usure des outils, leur durée de vie, leur impact sur la qualité de la surface et leur usinabilité. Ces défis peuvent être surmontés en optant pour une combinaison appropriée de matériaux pour la pièce et l'outil, une géométrie d'outil adaptée, un porte-outil efficace, l'utilisation de liquide de refroidissement et des paramètres de coupe adaptés.

### 3.4- Avantages de l'usinage dur par rapport à l'usinage conventionnel

L'objectif des fabricants est d'améliorer continuellement la productivité et la qualité des pièces lors de l'usinage de matériaux durs. Les méthodes conventionnelles d'usinage dur offrent un



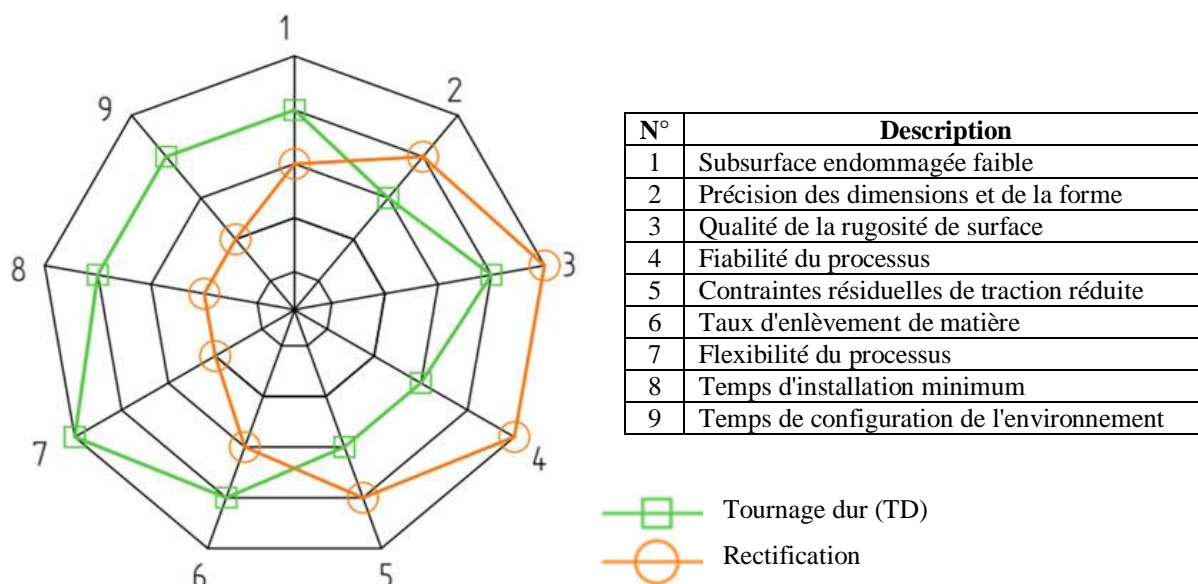
taux d'enlèvement de matière supérieur, permettant des économies lors de la fabrication de pièces mécaniques. Ainsi, pour optimiser l'usinage des matériaux durs, il est essentiel de considérer les aspects suivants :

- ❧ Rigidité du système : Assurer une rigidité suffisante du système de machine-outil et du porte-outil pour prévenir les vibrations susceptibles de causer des défauts d'usinage.
- ❧ Choix de l'outil : Sélectionner des outils adaptés aux propriétés du matériau usiné, en particulier en termes de dureté et de ténacité.
- ❧ Géométrie de l'outil : Concevoir une géométrie d'outil visant à minimiser l'usure et à optimiser le taux d'enlèvement de matière.
- ❧ Environnement de coupe : Optimiser l'environnement de coupe, incluant les paramètres de coupe et l'utilisation de liquide de refroidissement, pour prévenir l'usure prématurée de l'outil et améliorer la qualité de surface des pièces usinées.

Un choix judicieux des paramètres se traduira par une durée de vie accrue de l'outil, un taux d'enlèvement de matière optimal, une intégrité de surface, une précision dimensionnelle et des coûts d'usinage réduits. Par ailleurs, le fraisage dur, étant un processus en une seule étape, permet de découper des pièces de forme complexe, notamment des moules. Les opérations de perçage dur sont également bénéfiques pour découper des profils internes, des flancs d'engrenages internes, des cannelures, et des profils de multiples rainures de clavette.

Dans la fabrication d'engrenages, le profil est usiné par un processus de taillage qui élimine le besoin de recourir à la rectification. Le processus de taillage offre une flexibilité accrue dans la production de profils complexes en une seule étape par rapport à la rectification. Selon la littérature, l'usinage de matériaux durs avec des procédés conventionnels demeure une alternative compétitive et attrayante par rapport aux méthodes d'usinage non traditionnelles.

La figure 3.5 illustre une comparaison qualitative des capacités des processus de tournage dur (TD) et de rectification. Le tournage dur se substitue à la rectification pour la finition de la géométrie des pièces constituées de matériaux extrêmement difficiles à couper, offrant des avantages significatifs en termes de flexibilité, d'impact écologique, d'économie et de qualité.



**Figure 3.5-** Comparaison qualitative de capacité des processus de TD et de rectification.

### 3.5- Usinage à sec

L'usinage à sec englobe tous les processus de coupe pour divers matériaux, tels que l'acier trempé ou non trempé, la fonte, les alliages de titane, les plastiques, etc., qui ne nécessitent pas l'utilisation de fluide de coupe pendant la phase d'enlèvement de matière. De nos jours, l'usinage sans lubrification des matériaux durcis (c'est-à-dire ayant une dureté supérieure à 45 HRC) est largement pratiqué dans les industries d'usinage des métaux grâce au développement de nouveaux matériaux d'outils de coupe tels que le nitrure de bore cubique (CBN) et les céramiques.

L'usinage à sec présente plusieurs inconvénients :

1. La génération intense de chaleur pendant le processus peut conduire à la formation d'une couche blanche à la subsurface de la pièce, impactant son intégrité de surface. Cela peut entraîner des imprécisions dimensionnelles, particulièrement préoccupantes pour les pièces nécessitant une grande précision de surface.
2. Les forces d'usinage élevées nécessaires pour couper des matériaux durs peuvent provoquer des vibrations de la machine-outil, entraînant une usure accrue des outils de coupe et réduisant leur durée de vie. Ceci peut augmenter les coûts de production globaux.
3. La température générée dans la zone de coupe pendant l'usinage à sec a un impact significatif sur la durée de vie de l'outil.

Bien que l'usinage à sec présente de nombreux avantages économiques et environnementaux, des études ont démontré qu'il pouvait réduire le coût total de fabrication jusqu'à 7-17 % en éliminant l'utilisation de fluide de coupe. De plus, les fluides de coupe peuvent avoir des effets nuisibles sur l'environnement de travail, notamment sur la santé de l'opérateur de la machine, la pollution, et même des risques d'explosion (notamment avec les huiles). Par conséquent, l'usinage à sec a un impact positif sur l'environnement.

Cependant, l'usinage dur et sec par des procédés conventionnels tels que le tournage et le fraisage représente un domaine captivant pour la fabrication de pièces mécaniques de précision. Son avantage principal réside dans la réduction du coût total de fabrication.

### 3.6- Usinabilité des matériaux

L'usinabilité des matériaux représente la fonction qui lie les variables de sortie, telles que les efforts de coupe, les critères d'état de surface et la productivité, aux conditions d'usinage, comme les paramètres de coupe, la nuance et la géométrie de l'outil de coupe. La figure 3.6 illustre de manière générale cette fonction. L'objectif de l'étude de l'usinabilité est de comparer le comportement de différentes matières usinées selon un même procédé d'usinage, tel que le fraisage, dans des conditions de coupe identiques.

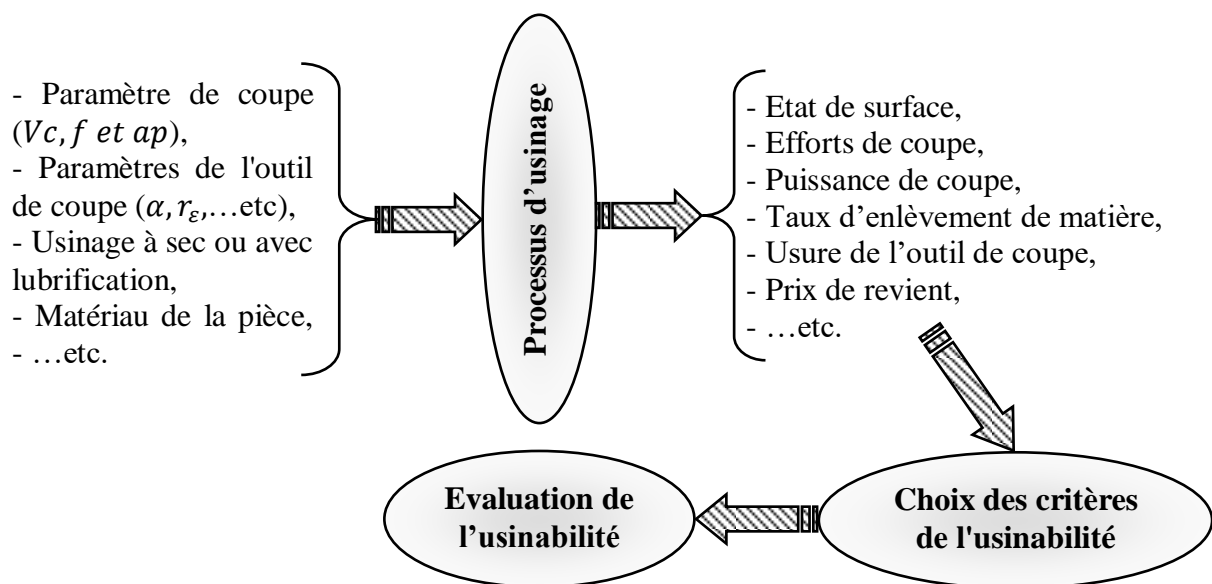


Figure 3.6- Critères d'usinabilité d'un processus de coupe.

#### 3.6.1- Définitions de l'usinabilité

L'étude de l'usinabilité est une tâche complexe, car elle se situe à l'intersection de deux domaines distincts, à savoir la métallurgie et la mécanique. D'une part, l'aspect métallurgique

englobe les conditions d'élaboration et les processus de fabrication, influençant ainsi les propriétés spécifiques du métal. D'autre part, l'aspect mécanique concerne la mise en forme du métal en vue de son utilisation prévue. La définition de l'usinabilité varie en fonction de perspectives différentes :

- ✧ L'usinabilité représente la capacité d'un matériau à être précisément façonné en dimensions et formes spécifiques, tout en obtenant une surface finie déterminée, à travers une ou plusieurs opérations d'usinage. Cette propriété ne peut être réduite à une grandeur simple et mesurable, car elle englobe la facilité ou la difficulté avec laquelle un matériau peut être transformé en copeaux pour obtenir des formes et des dimensions précises.
- ✧ La notion d'usinabilité exprime l'aptitude d'un matériau, compte tenu de toutes ses propriétés, à être façonné par un outil de coupe.
- ✧ En essence, l'usinabilité représente la propriété intrinsèque d'un matériau qui détermine sa facilité ou sa difficulté à être usiné pour atteindre des formes et des dimensions spécifiques.

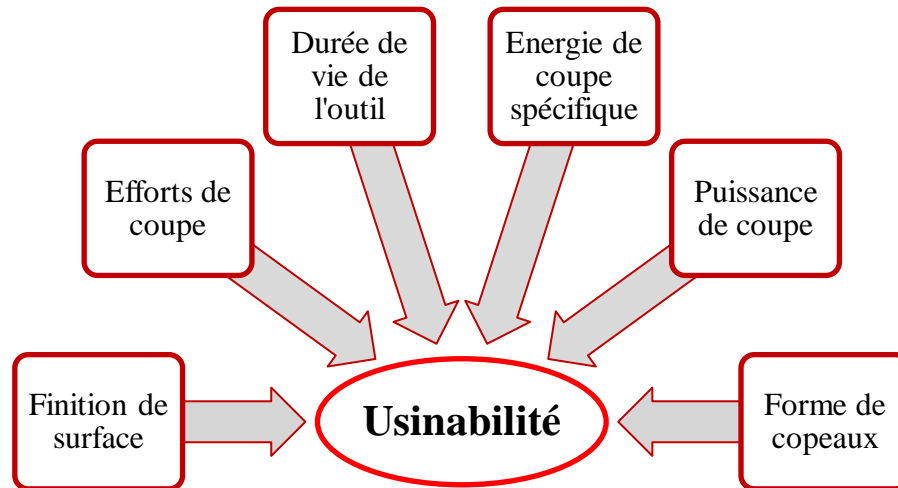
Un matériau présentant une bonne usinabilité se caractérise par une faible consommation d'énergie, une longue durée de vie de l'outil et une bonne finition de surface sans dommages. Cependant, il est crucial de noter que l'usinabilité dépend du processus d'usinage choisi. Un matériau peut être facilement usiné selon un certain procédé, mais pas avec un autre. De plus, un procédé d'usinage performant dans des conditions données peut ne pas être aussi efficace pour usiner le même matériau dans d'autres conditions. Enfin, l'interprétation de l'usinabilité peut varier selon le point de vue de l'utilisateur.

### **3.6.2- Critères d'évaluation de l'usinabilité**

En générale, les méthodes utilisées pour évaluer l'usinabilité d'un matériau sont les suivantes (voir figure 3.7) :

#### **3.6.2.1- Durée de vie de l'outil**

Les métaux faciles à usiner sont généralement ceux qui peuvent être coupés sans entraîner une usure rapide de l'outil, et vice versa. Un matériau peut avoir une usinabilité réduite en raison de ses propriétés abrasives ou de sa grande dureté, ce qui provoque une usure rapide des outils. L'utilisation de la durée de vie de l'outil comme indicateur d'usinabilité est également sensible au matériau de l'outil utilisé.



**Figure 3.7-** Critères d'évaluation de l'usinabilité.

### 3.6.2.2- Finition de surface

L'évaluation de l'usinabilité peut parfois reposer sur la qualité de la surface d'une pièce finie. Cependant, l'état de surface n'est pas toujours un critère significatif pour évaluer l'usinabilité, notamment lors de coupes d'ébauche où la préoccupation de la finition est moindre. De plus, dans de nombreuses coupes de finition, les conditions pour atteindre les dimensions souhaitées assurent généralement une bonne finition, rendant les évaluations basées sur l'état de surface parfois ne correspondent pas toujours à la réalité.

### 3.6.2.3- Efforts de coupe et consommation d'énergie

L'évaluation de l'usinabilité peut reposer sur les forces de coupe ou la consommation d'énergie lors de l'usinage. Des forces de coupe faibles indiquent généralement une bonne usinabilité, tout comme une consommation d'énergie spécifique basse, exprimant la puissance nécessaire pour couper un volume donné en unité de temps. Les matériaux avec une énergie spécifique élevée sont moins usinables que ceux avec une énergie spécifique plus faible.

L'avantage de l'énergie de coupe spécifique (SCE) comme critère d'usinabilité réside dans sa dépendance principale aux propriétés du matériau de la pièce, minimisant la sensibilité au matériau de l'outil. En revanche, la durée de vie de l'outil est fortement liée au matériau de l'outil. Le facteur d'enlèvement de métal, inverse de l'énergie spécifique, peut être un indicateur direct d'usinabilité, notamment lorsque les forces de coupe ou la consommation d'énergie définissent l'usinabilité. En pratique, la durée de vie de l'outil est souvent priorisée

pour les coupes d'ébauche, tandis que la finition de surface est privilégiée pour les coupes de finition (voir tableau 3.1).

**Tableau 3.1-** Critères d'usinabilité dans l'ébauche et la finition.

Ordre du critère d'usinabilité	Coupe d'ébauche	Coupe de finition
1	Durée de vie de l'outil	Finition de surface
2	Consommation d'énergie	Durée de vie de l'outil
3	Finition de surface	Consommation d'énergie

### 3.6.2.4- Forme des copeaux

Un critère d'usinabilité important est parfois la forme des copeaux générés lors de l'usinage. Les copeaux longs, minces et enroulés peuvent créer des problèmes s'ils ne sont pas cassés, interférant avec le processus d'usinage et pouvant entraîner une zone de coupe dangereuse. Cet aspect revêt une importance cruciale dans le contexte des machines-outils automatiques. La formation de copeaux, le frottement à l'interface entre l'outil et le copeau, ainsi que le phénomène d'arête rapportée sont des éléments clés influençant l'usinabilité.

Un matériau ductile, ayant tendance à adhérer à la surface de l'outil ou à former une arête rapportée, peut conduire à une finition médiocre de la pièce. Ceci est particulièrement observé avec des matériaux tels que l'acier à faible teneur en carbone, l'aluminium pur, le cuivre et l'acier inoxydable. Toutefois, la formation de copeaux dépend à la fois des variables de la machine et du matériau de la pièce, et l'ajustement approprié de la machine ou l'utilisation d'un brise-copeaux adapté peut modifier les valeurs obtenues selon ce critère.

Actuellement, divers critères sont utilisés pour évaluer l'usinabilité.

☞ Selon P. Mathon, les critères principaux sont classés par ordre d'importance comme suit :

- ✘ la rugosité de la surface usinée, qui définit la qualité de la finition de surface,
- ✘ la force de coupe, qui exprime la résistance à la coupe,
- ✘ la durée de vie de l'outil ou l'usure sur une période donnée.

☞ Selon A. Czaplicki, les critères d'usinabilité incluent :

- ✘ La durée de vie de l'outil, visant la production maximale,
- ✘ Les efforts de coupe, fournissant une indication de la puissance nécessaire à la broche de la machine-outil,

- ✖ La finition des surfaces usinées, permettant de choisir les conditions de coupe en fonction de l'application finale de la pièce usinée.
- ☞ M. Robelet classe les principaux critères de la manière suivante :
  - ✖ L'usure de l'outil,
  - ✖ L'effort de coupe,
  - ✖ La température de coupe.
- ☞ L'évaluation de l'usinabilité peut se faire en se basant sur plusieurs critères, ordonnés comme suit :
  - ✖ La tenue de l'outil,
  - ✖ Les efforts de coupe,
  - ✖ La qualité de la surface usinée,
  - ✖ L'usure.

### 3.6.3- Facteurs affectant l'usinabilité

Les caractéristiques mécaniques et physiques sont essentielles pour déterminer la quantité d'énergie consommée et les températures générées lors de la coupe. Parmi ces caractéristiques, on peut mentionner :

#### 3.6.3.1- État du matériau

Les éléments suivants décrivent l'état du matériau à usiner, influençant son usinabilité (voir figure 3.8) :

a) **Taille des grains :**

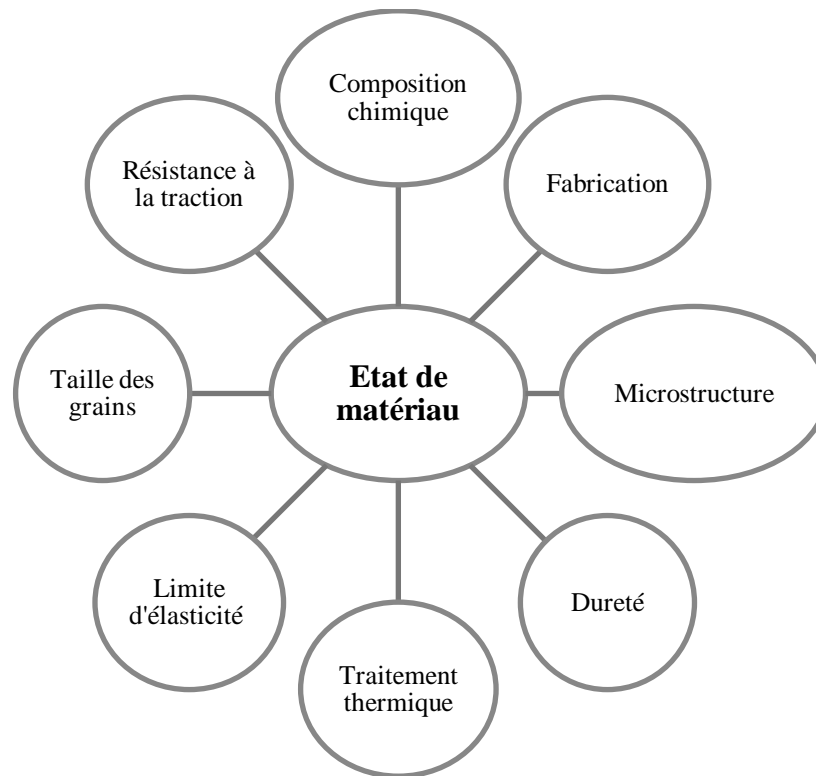
La taille des grains est un indicateur clé de l'usinabilité. Des grains plus petits et non déformés facilitent la coupe et garantissent une bonne finition de surface. Les métaux à grain intermédiaire offrent un compromis entre coupe efficace et qualité de surface.

b) **Microstructure :**

La microstructure, cristalline ou granulaire, impacte l'usinabilité. Des métaux avec des microstructures similaires ont souvent des propriétés d'usinage similaires. Les variations de microstructure peuvent influencer l'usinabilité d'un matériau.

c) **Composition chimique :**

La composition chimique est cruciale pour l'usinabilité. Les effets dépendent de la combinaison des éléments pour former un alliage. Les aciers permettent des généralisations, mais les alliages non ferreux sont trop divers.



**Figure 3.8-** Divers facteurs d'état de matériau affectant l'usinabilité.

d) **Traitement thermique :**

Le traitement thermique peut réduire la fragilité, éliminer les contraintes, améliorer la ductilité, la ténacité ou modifier la dureté, influençant directement l'usinabilité.

e) **Fabrication :**

Les processus comme le laminage, l'étirage ou le forgeage impactent les propriétés telles que la taille des grains, la ductilité, la résistance, la dureté, et par conséquent, l'usinabilité.

f) **Dureté :**

La dureté est liée à la taille des grains et indique l'usinabilité. Un matériau plus dur est généralement plus difficile à usiner.

g) **Limite d'élasticité :**

Une limite d'élasticité élevée rend le matériau plus difficile à usiner en augmentant la résistance à la traction, nécessitant plus d'énergie et de force pour l'usinage.

h) **Résistance à la traction :**

Une résistance à la traction élevée indique une usinabilité difficile et une augmentation de la complexité de l'usinage du matériau.

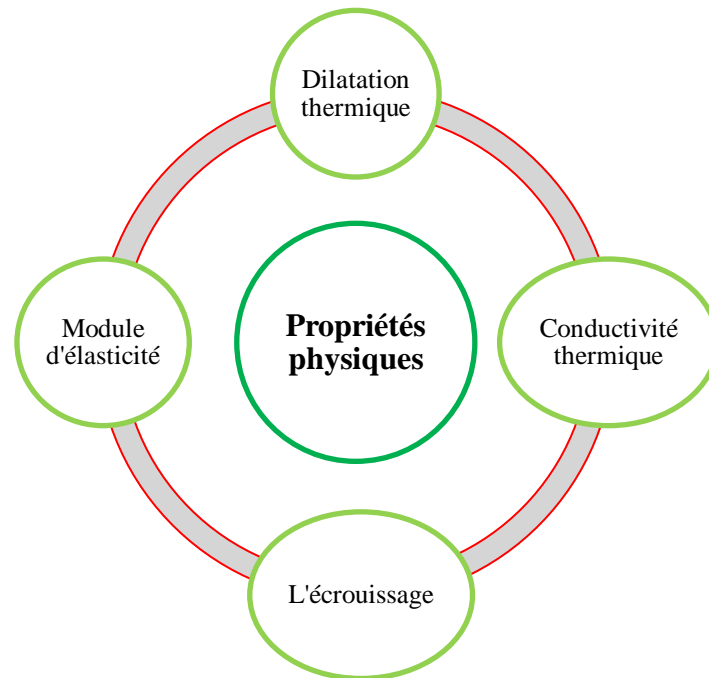


### 3.6.3.2- Propriétés physiques du matériau

Les caractéristiques physiques d'un matériau englobent le module d'élasticité, la conductivité thermique, la dilatation thermique et l'écaillage (voir figure 3.9).

a) **Module d'élasticité :**

Cette propriété intrinsèque mesure la résistance d'un matériau à la déformation sous une force externe. Un module d'élasticité élevé signifie une faible usinabilité, rendant le matériau plus difficile à travailler.



**Figure 3.9-** Propriétés physiques de la matière à usiner qui affectent l'usinabilité.

b) **Conductivité thermique :**

Les matériaux conducteurs transfèrent rapidement la chaleur. La conductivité thermique, mesurant cette capacité, impacte l'usinabilité. Par exemple, le titane présente une mauvaise usinabilité en raison de sa faible conductivité thermique, entraînant une accumulation de chaleur et une adhérence à l'outil de coupe.

c) **Dilatation thermique :**

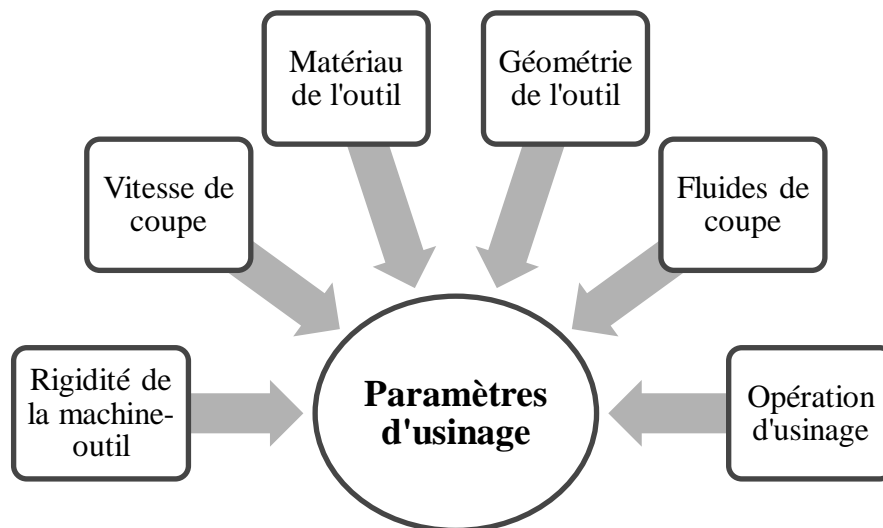
Le coefficient de dilatation thermique détermine la vitesse de dilatation d'un métal en réponse à une augmentation de température. Un coefficient élevé complique l'usinabilité en rendant difficile le contrôle des dimensions pendant l'usinage. La variation de taille causée par la dilatation thermique peut rendre délicat le maintien des dimensions souhaitées de la pièce.

d) **Écrouissage :**

Certains métaux durcissent considérablement lors d'un travail à froid, créant des contraintes internes lors de l'usinage. La vitesse et l'ampleur de ce durcissement varient d'un matériau à l'autre. La chaleur générée pendant l'usinage joue un rôle crucial dans l'écrouissage. Un taux élevé d'écrouissage indique une usinabilité réduite du matériau.

### 3.6.3.3- Paramètres d'usinage

En fonction de la facilité d'usinabilité d'un matériau, il est crucial d'ajuster les paramètres de coupe pour garantir des résultats optimaux tout en tenant compte de la productivité et des coûts liés à l'usinage (voir figure 3.10).



**Figure 3.10-** Paramètres de coupe affectant l'usinabilité.

a) **Matériau de l'outil :**

En cas de faible usinabilité, l'utilisation d'outils de coupe plus durs et résistants est nécessaire. Les nuances de carbure cémenté, les revêtements carbure, le nitrure de bore cubique (CBN) ou les outils en céramique sont recommandés pour l'usinage de matériaux plus durs.

b) **Géométrie de l'outil :**

Le choix de l'angle de coupe et de la conception du brise-copeaux est crucial en fonction de l'usinabilité du matériau. Ces éléments influent sur la gestion des copeaux, impactant la qualité de l'usinage, la durée de vie de l'outil et la productivité globale.

c) **Vitesse de coupe :**

La vitesse de coupe doit être équilibrée en fonction du matériau de l'outil et de l'usinabilité du matériau, visant une durée de vie optimale de l'outil. Des vitesses trop élevées peuvent entraîner des défauts de surface, une usure rapide de l'outil et des dimensions non conformes. Trouver le bon équilibre est essentiel pour des performances d'usinage optimales.

d) **Rigidité de la machine-outil :**

L'utilisation de machines-outils peu puissantes peut limiter l'usinabilité de certains matériaux, nécessitant éventuellement des machines CNC avec des guides linéaires et des entraînements à vis à billes pour des tolérances strictes et une finition précise.

e) **Fluides de coupe :**

Les fluides de coupe offrent des avantages essentiels, refroidissant l'outil et la pièce, assurant une lubrification efficace et réduisant les forces de frottement. Ils contribuent à améliorer l'usinabilité en termes de rugosité de surface, de puissance de coupe et de durée de vie de l'outil, tout en prévenant la formation de bavures indésirables.

### 3.7- Conclusion

Dans les processus d'usinage dur et sec, des efforts considérables ont été déployés pour optimiser les paramètres influents tels que la géométrie de l'outil, les matériaux et les revêtements des outils de coupe, la dureté du matériau, et les paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe ( $V_c$ ), la vitesse d'avance ( $f$ ), le rayon de bec ( $r_\epsilon$ ), la profondeur de coupe ( $ap$ ),...etc. L'objectif est d'améliorer l'usinabilité, couvrant des aspects tels que l'usure des outils, la rugosité de surface, le taux d'enlèvement de matière ( $MRR$ ), les forces de coupe, les contraintes résiduelles,...etc.

Pour améliorer l'indice d'usinabilité, diverses approches sont largement utilisées, notamment l'approche analytique/numérique, une variable à la fois, et la conception statistique des expériences, telle que la conception factorielle complète (FFD), la conception composite centrale (CCD), la conception Box-Behnken (BBD), la méthode Taguchi,...etc. Ces méthodes aident également le personnel industriel à identifier les combinaisons appropriées d'outils et de matériaux, ainsi que leurs propriétés.

## CHAPITRE 4 :

### Modélisation de la coupe

#### 4.1- Introduction

L'usinage des métaux met en jeu deux processus fondamentaux : la création et l'évacuation d'un copeau, qui font intervenir deux mécanismes physiques de base, la déformation plastique du copeau et son contact avec l'outil. Comprendre ces mécanismes de base est essentiel pour étudier la formation du copeau. La modélisation de cette formation vise à prédire la géométrie du copeau, les efforts de coupe et les échauffements de la pièce et de l'outil. Elle se base sur les conditions de coupe, les propriétés thermomécaniques du matériau usiné et de l'outil.

Afin d'établir ces relations, il est essentiel de s'appuyer sur un modèle géométrique de la formation du copeau. Les modèles les plus simples se concentrent uniquement sur les aspects mécaniques, en négligeant les effets thermiques. Le comportement mécanique du matériau est déterminé uniquement par la contrainte maximale de cisaillement admissible  $\tau$  (en Mpa).

Cette analyse est généralement effectuée dans le contexte d'une coupe orthogonale sans arête rapportée, en supposant une arête tranchante parfaite (sans arrondi) et avec sa face en dépouille ne venant pas en contact avec le matériau usiné. On prend une profondeur de passe  $ap$  significativement plus grande que l'avance  $f$ , avec un angle de direction principale ( $K_{re} = 90^\circ$ ) et un angle d'obliquité de l'arête de coupe principale ( $\lambda_{se} = 0^\circ$ ). Ainsi, le problème est ramené à deux dimensions (déformation plane), similaire au cas du rabotage plan ou du chariotage d'une pièce tubulaire, où le diamètre du tube est considérablement plus grand que son épaisseur, assurant que  $V_o^P$  (la vitesse de coupe) reste constante pour tout point O appartenant à  $ab$  (voir figure 4.1). Le mécanisme est supposé stationnaire, conduisant à la formation d'un copeau continu.

Où :

- ✧  $f$  : vitesse d'avance,
- ✧  $ap$  : profondeur de passe,

- ◇  $\gamma_{fe}$  : angle de coupe,
- ◇  $\alpha_{fe}$  : angle de dépouille,
- ◇  $\emptyset$  : angle de cisaillement,
- ◇  $F$  : effort résultant,
- ◇  $V_{o^p}$  : vitesse de coupe,
- ◇  $M_c$  : mouvement de coupe,
- ◇  $M_f$  : mouvement d'avance.

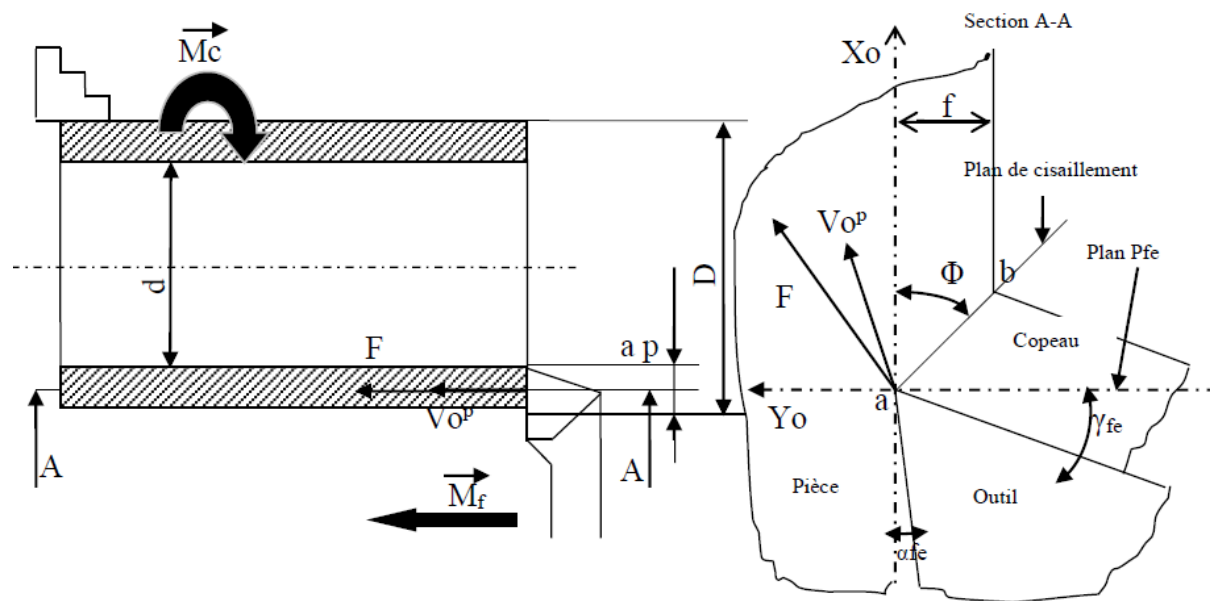


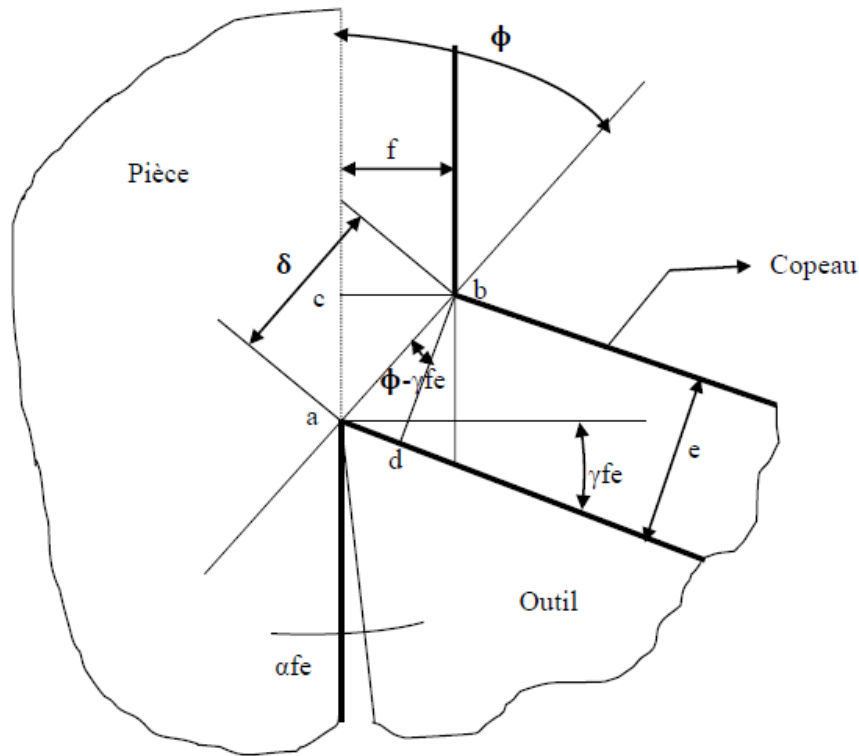
Figure 4.1- Schéma de la coupe orthogonale.

#### 4.2- Modélisation de la coupe

La première modélisation de la coupe orthogonale visant à prédire les efforts de coupe remonte à 1945 et est attribuée à Merchant et Ernst. Ce modèle suppose que la formation du copeau résulte d'un simple cisaillement le long d'une ligne droite  $ab$  partant de la pointe de l'outil, inclinée d'un angle  $\emptyset$ , également appelé angle de cisaillement primaire.

Sous l'action de l'effort résultant des mouvements de coupe et d'avance, le matériau subit une déformation par cisaillement dans une zone très étroite, assimilée à un plan dont l'orientation est déterminée par l'angle de cisaillement  $\emptyset$ , un paramètre caractéristique de la formation du copeau.

A partir de la figure 4.2, nous pouvons déterminer la position de l'angle de cisaillement.



**Figure 4.2-** Détermination de l'angle de cisaillement  $\phi$ .

Dans le triangle  $abc$ , nous avons :

$$\delta = \frac{f}{\sin(\phi)} \quad (1)$$

Dans le triangle  $abd$ , nous avons :

$$e = \delta \cos(\phi - \gamma_{fe}) \quad (2)$$

À partir des relations 1 et 2, nous obtenons :

$$e = f \frac{\cos(\phi - \gamma_{fe})}{\sin(\phi)} \quad (3)$$

$$e = f \left( \frac{\cos \gamma_{fe}}{\tan \phi} + \sin \gamma_{fe} \right) \quad (4)$$

Ainsi, la position de l'angle de cisaillement est définie par l'angle  $\phi$  tel que :

$$\tan \phi = \frac{f \cos \gamma_{fe}}{(e - f \sin \gamma_{fe})} \quad (5)$$

En posant  $r = \frac{f}{e}$ , où  $r$  est le coefficient de contraction du copeau, nous aurons:

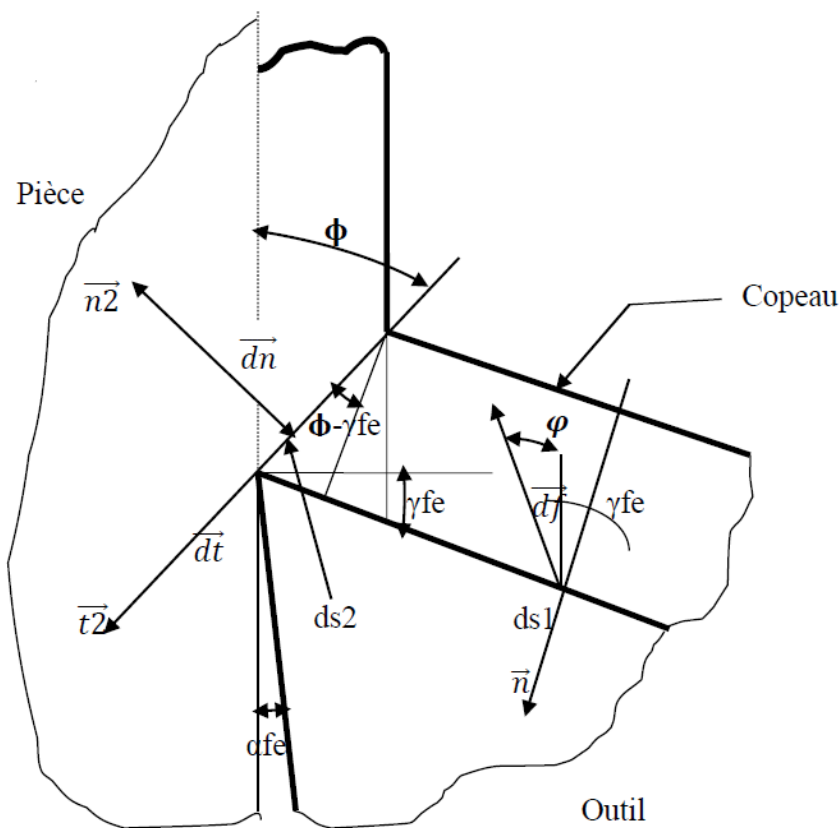
$$\tan\phi = \frac{r \cos \gamma_{fe}}{1 - r \sin \gamma_{fe}} \Rightarrow \phi = \arctg \left( \frac{r \cos \gamma_{fe}}{1 - r \sin \gamma_{fe}} \right) \quad (6)$$

### 4.3- Efforts de coupe

Pendant la coupe, l'outil applique une force  $F$  sur la pièce, que l'on peut décomposer en composantes le long des directions de coupe et d'avance pour analyser les forces correspondantes.

Examinons maintenant l'équilibre du copeau :

Isolons le copeau afin d'étudier son équilibre pendant la coupe. Soient S1 et S2 les surfaces de contact entre l'outil et le copeau, ainsi que entre le copeau et la pièce, respectivement. Définissons S1 comme la surface de contact entre l'outil et le copeau, et S2 comme la surface de contact entre le copeau et la pièce, où S2 appartient au plan de cisaillement (voir figure 4.3).



**Figure 4.3-** Forces agissantes sur le copeau.

Hypothèses de la théorie d'Ernst et Merchant :

- 1) La distribution des pressions de contact sur S1 est uniforme.
- 2) L'angle de frottement,  $\varphi$ , au niveau de S1 suit le modèle de Coulomb et sa distribution est uniforme.
- 3) La distribution des contraintes normales et tangentielles est uniforme sur S2.
- 4) L'outil est d'acuité parfaite, avec un rayon de pointe négligeable.
- 5) Le copeau est continu, régulier, et sa courbure est négligée.
- 6) Aucune arête rapportée n'est présente.
- 7) Le cisaillement se limite à un plan très étroit.
- 8) Aucune considération n'est donnée à l'influence de la vitesse de déformation.
- 9) Les conditions de déformation sont planes.
- 10) Le matériau est considéré comme parfaitement plastique.

#### 4.3.1- Equation d'équilibre du copeau

L'équation d'équilibre du copeau est donnée par :

$$\sum \vec{f}_{ext} = \vec{0} \quad \Rightarrow \quad \int_{s1} \vec{df} + \int_{s2} \vec{dn} + \int_{s2} \vec{dt} = \vec{0}$$

L'intégrale de la résultante générale du torseur des efforts outil/copeau sur la surface S1 est représentée par  $\int_{s1} \vec{df}$ . Cette grandeur est exprimée en fonction de  $\varphi$  et  $\gamma_{fe}$  dans la direction spécifiée.

L'intégrale de la projection sur la surface S2 de la résultante générale du torseur des inter/efforts pièce/outil, notée  $\int_{s2} \vec{dn}$ , représente la composante perpendiculaire au plan de cisaillement. La direction de cette grandeur est connue, étant perpendiculaire au plan de cisaillement.

L'intégrale de la projection sur la surface S2 de la résultante du torseur des inter/efforts pièce/copeau, symbolisée par  $\int_{s2} \vec{dt}$ , représente la composante dans le plan de cisaillement. La direction de cette grandeur est connue, étant située dans le plan de cisaillement.

$$\vec{dt} = \tau ds_2 \vec{t}_2 \quad \Rightarrow \quad \int_{s2} \vec{dt} = \frac{\tau f a p}{\sin \varphi} \vec{t}_2$$



Où :

✧  $\tau$  : contrainte de cisaillement dans le plan  $ab$ .

Le copeau se trouvant en équilibre sous l'effet de trois forces coplanaires, dont une est connue en direction et en sens, la résolution du problème peut être réalisée à l'aide de la statique graphique. Consultez la figure 4.4 pour visualiser le funiculaire des forces.

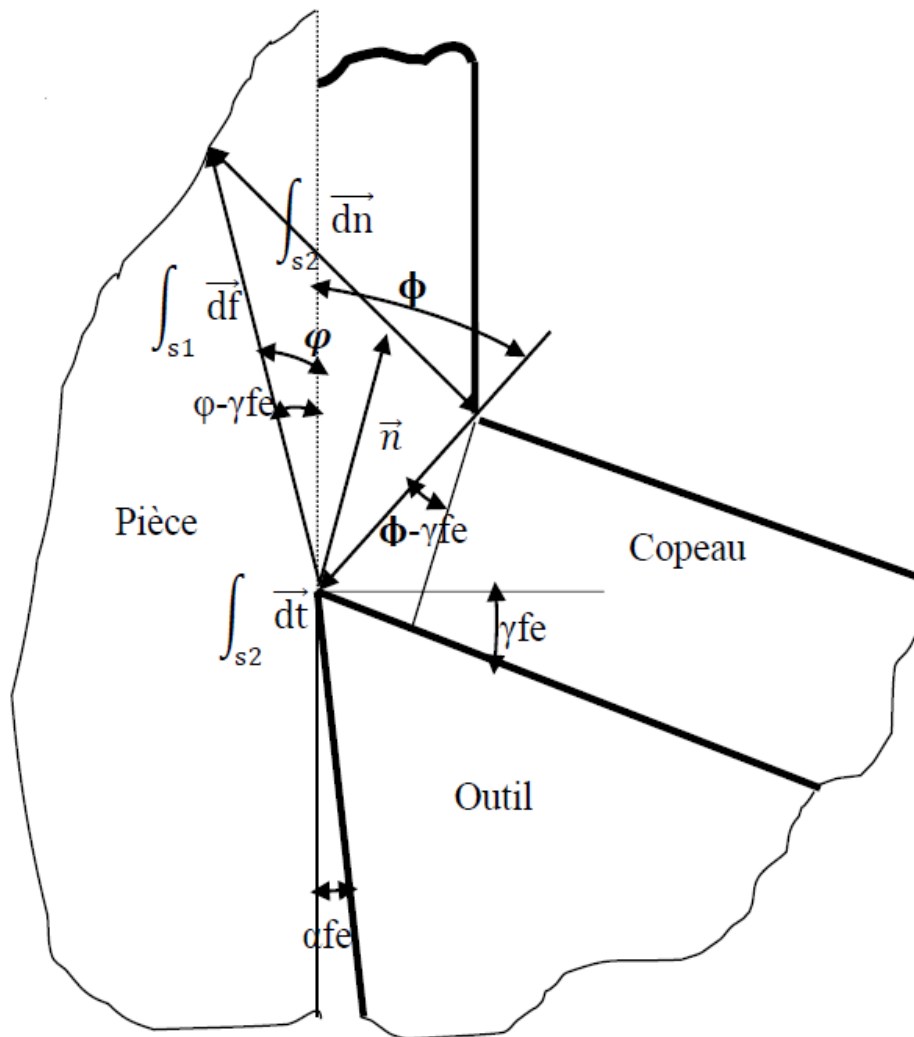
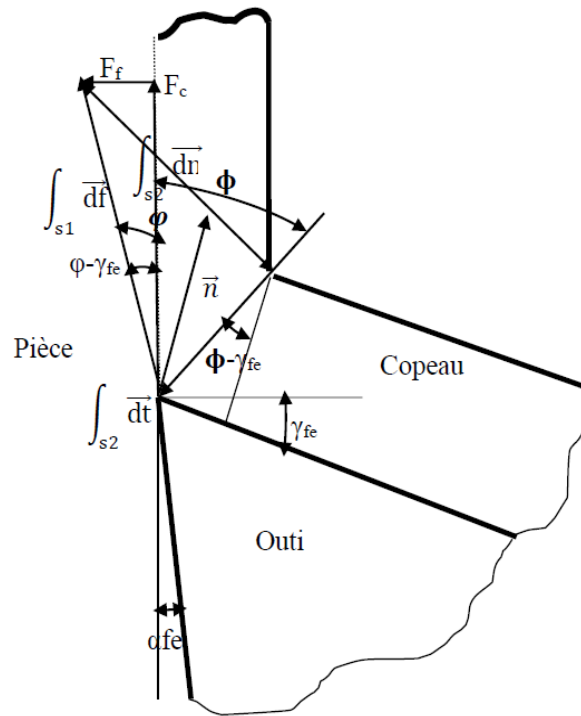


Figure 4.4- Funiculaire des forces.

#### 4.3.2- Détermination de $F_c$ et $F_f$

L'effort de coupe,  $F_c$ , est calculé en projetant l'intégrale de la résultante du torseur des efforts outil/copeau  $\int_{s_1} d\vec{f}$  dans la direction de coupe. De même, l'effort d'avance,  $F_f$ , est obtenu en projetant  $\int_{s_1} d\vec{f}$  dans la direction d'avance (voir figure 4.5).



**Figure 4.5-** Projection de  $F_f$  sur la direction d'avance.

Détermination algébrique de  $F_c$  et  $F_f$  :

$$F_c = \int_{s1} df \cos(\varphi - \gamma_{fe}) \int_{s1} \vec{df} = \frac{1}{\cos(\varnothing + (\varphi - \gamma_{fe}))} \int_{s2} \vec{dt}$$

$$\int_{s1} \vec{df} = \frac{\tau f a p}{\cos(\varnothing + (\varphi - \gamma_{fe})) \sin\varnothing} \Rightarrow F_c = \frac{\tau f a p \cos(\varphi - \gamma_{fe})}{\cos(\varnothing + (\varphi - \gamma_{fe})) \sin\varnothing}$$

$$F_f = \int_{s1} \vec{df} \sin(\varphi - \gamma_{fe}) F_f = \frac{\tau f a p \sin(\varphi - \gamma_{fe})}{\cos(\varnothing + (\varphi - \gamma_{fe})) \sin\varnothing}$$

**Remarque :**

Si nous connaissons  $F_c$  et  $F_f$  à partir de l'expérience, il devient possible de calculer les composantes normale et tangentielle de la résultante totale du torseur des forces inter pièce/copeau.

$$\int_{s2} \vec{dt} = F_c \cos \varnothing - F_f \sin \varnothing$$

et :

$$\int_{s_2} \overrightarrow{dn} = F_c \cos \varnothing + F_f \cos \varnothing$$

#### 4.3.3- Recherche de la puissance minimale nécessaire à la coupe

Dans la pratique, il est avantageux de travailler avec une puissance minimale. En général, la puissance requise pour la coupe est déterminée par la relation suivante :

$$P_c = F_c V_c + F_f V_f + F_a V_a$$

Pour une coupe orthogonale,  $F_a = 0$  et  $V_a = 0$ , donc :

$$P_c = F_c V_c + F_f V_f$$

En utilisant les résultats précédents, nous obtenons :

$$P_c = \frac{\tau f a p}{\cos(\varnothing + (\varphi - \gamma_{fe})) \sin \varnothing} (V_c \cos(\varphi - \gamma_{fe}) + V_f \sin(\varphi - \gamma_{fe}))$$

Il est évident que  $P_c$  sera minimal lorsque le dénominateur sera maximal. Ainsi, la fonction  $F(\varnothing) = \sin \varnothing \cos(\varnothing + (\varphi - \gamma_{fe}))$  prendra la valeur minimale lorsque sa dérivée ( $\dot{F}(\varnothing)$ ) est égale à zéro.

$$\dot{F}(\varnothing) = \cos \varnothing \cos(\varnothing + (\varphi - \gamma_{fe})) - \sin \varnothing \sin(\varnothing + (\varphi - \gamma_{fe}))$$

$$\dot{F}(\varnothing) = \cos(2\varnothing + (\varphi - \gamma_{fe}))$$

$$\dot{F}(\varnothing) = 0, \text{ pour } 2\varnothing + (\varphi - \gamma_{fe}) = \frac{\pi}{2}, \text{ soit } \varnothing_0 = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi - \gamma_{fe}}{2}$$

1<sup>er</sup> cas : frottement nul

$$\varphi = 0^\circ \Rightarrow \varnothing_0 = \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma_{fe}}{2} \Rightarrow \varnothing_0 = \frac{\pi + 2\gamma_{fe}}{4}$$

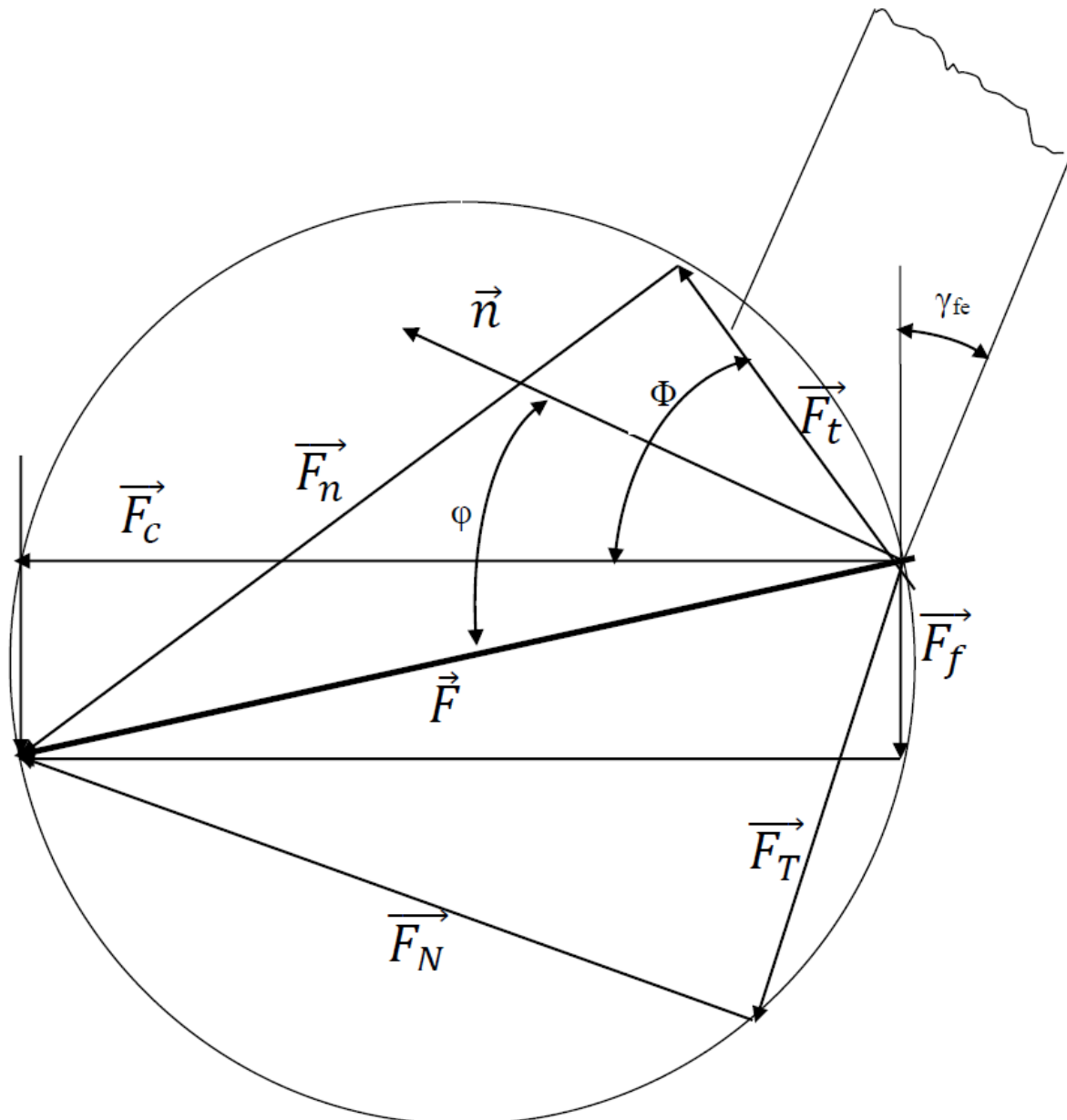
2<sup>ème</sup> cas : frottement maximal

$$\varphi = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \varnothing_0 = \frac{\gamma_{fe}}{2}$$

**Note importante :**

En pratique, l'angle  $\phi$  se situe entre ces deux valeurs. Les conditions optimales sont obtenues lorsque  $\phi$  est de petite valeur, ce qui correspond à un faible coefficient de frottement.

Merchant a défini une construction géométrique appelée cercle des efforts de Merchant. Cette méthode permet de déterminer, par la projection du vecteur  $\vec{F}$  représentatif du torseur des actions de contact sur le copeau, les différentes forces résultant de la coupe (voir figure 4.6).



**Figure 4.6-** Cercle des efforts d'Ernst et Merchant.

#### 4.3.4- Calcul des contraintes $\tau$ et $\sigma$ et du coefficient de frottement $f$

Les équations pour le calcul des contraintes  $\tau$  et  $\sigma$ , ainsi que du coefficient de frottement  $f$ , sont fournies par :

$$\tau = \frac{F_t}{S}$$

et

$$\begin{cases} S_o = f \cdot a_p \\ S = \frac{S_o}{\sin\phi} \\ F_t = F_c \cdot \cos\phi - F_f \cdot \sin\phi \end{cases}$$

Donc :

$$\Rightarrow \tau = \frac{(F_c \cdot \cos\phi - F_f \cdot \sin\phi)}{S_o} \cdot \sin\phi$$

$$\Rightarrow \tau = \frac{F_c \cdot \sin 2\phi - F_f (1 - \cos 2\phi)}{2S_o}$$

$$\sigma = \frac{F_n}{S}$$

et

$$F_n = F_c \cdot \sin\phi + F_f \cdot \cos\phi$$

Donc :

$$\Rightarrow \sigma = \frac{(F_c \cdot \sin\phi + F_f \cdot \cos\phi)}{S_o} \sin\phi$$

$$\Rightarrow \sigma = \frac{F_c (1 - \cos 2\phi) + F_f \cdot \sin 2\phi}{2S_o}$$

A cet égard, le coefficient de frottement  $f$  est calculé par :

$$f = \tan\phi = \frac{F_T}{F_N} = \frac{F_c \cdot \sin\gamma_{fe} + F_f \cdot \cos\gamma_{fe}}{F_c \cdot \cos\gamma_{fe} - F_f \cdot \sin\gamma_{fe}} = \frac{F_c \cdot \tan\gamma_{fe} + F_f}{F_c - F_f \cdot \tan\gamma_{fe}}$$

## CHAPITRE 5 :

### Usinage des matières plastiques et des matériaux composites

#### 5.1- Introduction

L'usinage des matières plastiques et des matériaux composites représente un domaine crucial dans l'industrie moderne, offrant des solutions innovantes pour la fabrication de pièces légères, résistantes et aux propriétés mécaniques spécifiques. Les matières plastiques, caractérisées par leur diversité et leur adaptabilité, sont largement utilisées dans de nombreux secteurs, de l'automobile à l'aérospatiale. De même, les matériaux composites, résultant de l'association de renforts et de matrices, connaissent une utilisation croissante en raison de leur légèreté et de leurs performances exceptionnelles.

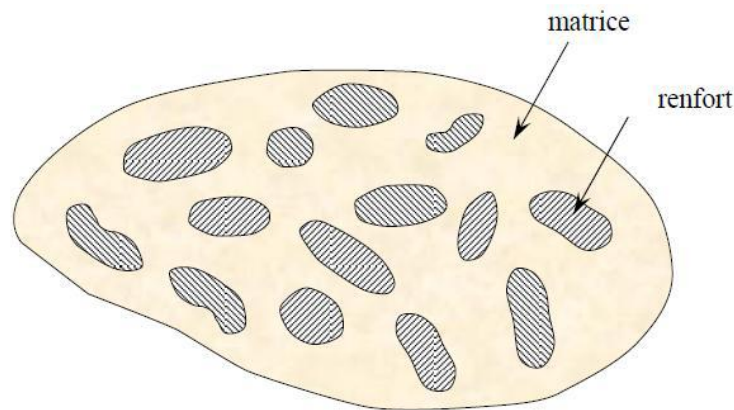
L'usinage de ces matériaux présente des défis uniques en raison de leurs caractéristiques thermiques, mécaniques et chimiques particulières. Les techniques traditionnelles peuvent être limitées, et c'est là que des méthodes spécialisées, telles que la découpe au laser, l'usinage par ultrasons et d'autres technologies avancées, jouent un rôle crucial. Cette introduction explorera les principes fondamentaux de l'usinage des matières plastiques et des matériaux composites, mettant en lumière les technologies émergentes qui façonnent l'avenir de la fabrication légère et résistante.

#### 5.2- Généralités sur les matériaux composites

##### 5.2.1- Définition

Un matériau composite est constitué au moins deux matériaux différents dotés de propriétés physiques et chimiques différentes. Les composites offrent des propriétés nettement supérieures à celles de leurs matériaux constitutifs initiaux. Il est essentiel de noter que l'un des matériaux agit comme renfort, tandis que l'autre joue le rôle de matrice (composite = matrice + renfort). Ces deux composants, la matrice et le renfort, sont les principaux constituants du composite (voir figure 5.1). Les fonctions de la matrice dans les composites comprennent :

- ❖ Protéger les matériaux de renfort,
- ❖ Répartir uniformément la contrainte au sein des matériaux de renfort,
- ❖ Faciliter l'obtention de la forme finale de la pièce composite.

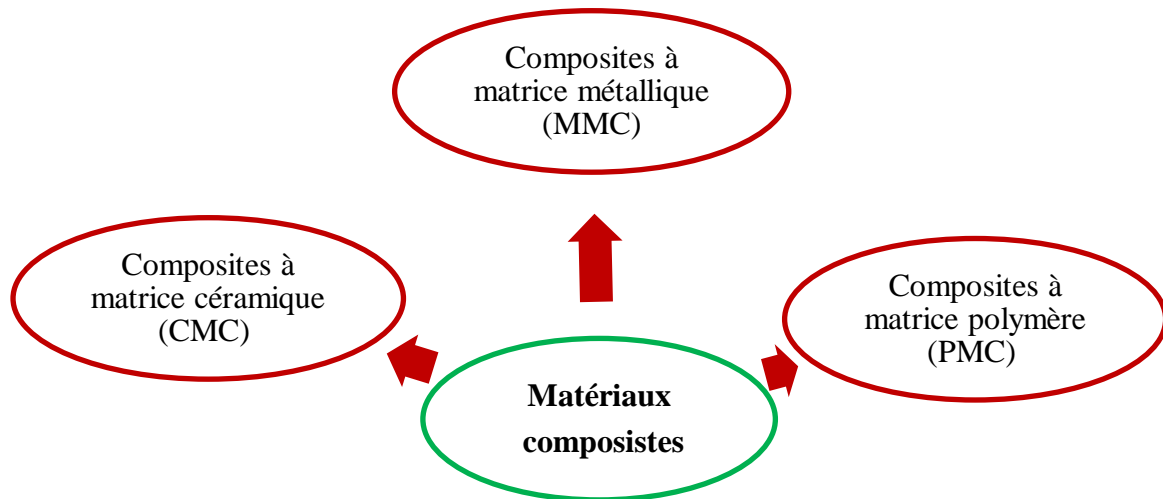


**Figure 5.1-** Schéma illustratif d'un matériau composite.

Le renfort, sous forme de particules et/ou de fibres dans les matériaux composites, vise plusieurs objectifs, notamment :

- ◆ Réduire le poids, avec une priorité pour des caractéristiques légères et une consommation d'énergie minimale,
- ◆ Atteindre les propriétés mécaniques maximales (résistance et dureté),
- ◆ Renforcer la matrice dans toutes les directions,
- ◆ Assurer la résistance à la fatigue et aux chocs thermiques à des températures élevées,
- ◆ Améliorer la résistance à la corrosion et à l'usure.

Les propriétés physiques, mécaniques et chimiques des matériaux composites dépendent du type de renfort, du matériau de matrice et de leur proportion. Les matériaux composites sont classés en fonction du type de matrice utilisé (voir figure 5.2), tels que les composites à matrice polymère (PMC), les composites à matrice métallique (MMC) et les composites à matrice céramique (CMC). L'usinage des MMC représente un défi en raison de multiples variables telles que le matériau de la matrice, le type de renfort et son orientation, l'environnement de coupe, les paramètres de coupe, le matériau de l'outil et sa forme, ainsi que la rigidité de la machine-outil, ...etc. Le contrôle de ces variables permet de réduire les forces de coupe, la consommation d'énergie, la durée de vie de l'outil et de maintenir l'intégrité de la surface. Les MMC sont largement utilisés dans divers secteurs tels que l'aviation, l'armée et l'industrie automobile.



**Figure 5.2-** Types des matériaux composites.

Actuellement, les composites à matrice organique représentent plus de 99% des matériaux composites utilisés. Cependant, il existe également des composites à matrice inorganique, tels que les composites métalliques ou céramiques, bien que leur utilisation soit encore limitée.

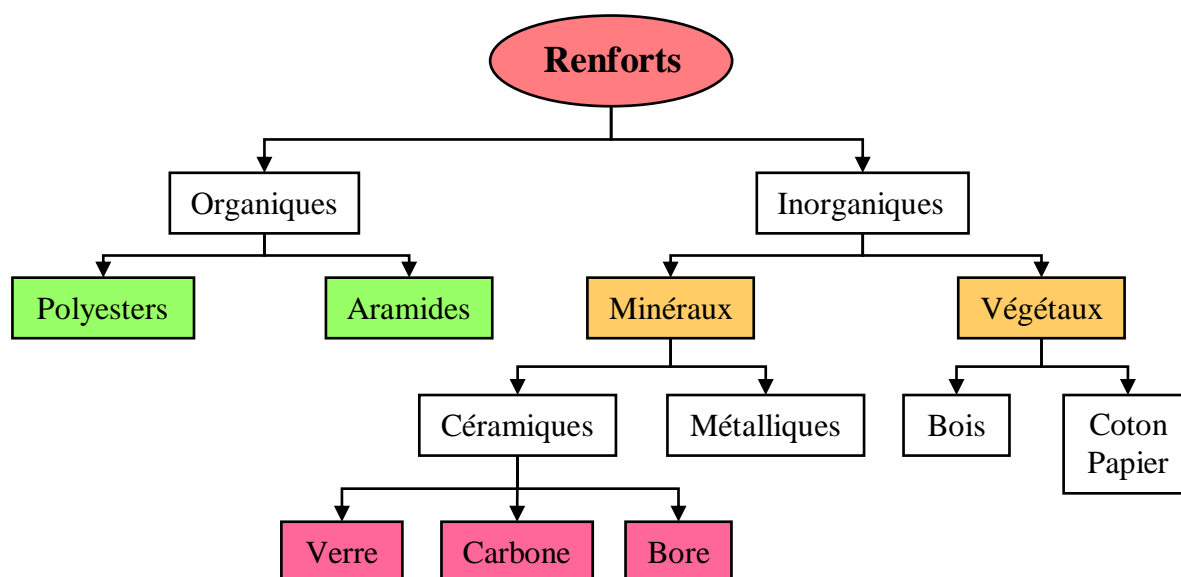
Ces matériaux se composent d'une matrice organique, pouvant être une résine thermoplastique (TP) ou thermodurcissable (TD), associée à une structure de renfort constituée de fibres. Ces fibres, qui peuvent être en verre, en carbone, en aramide, ou en fibres naturelles comme le lin, le chanvre, ou le sisal, sont mélangées avec les deux principaux composants. Des additifs ou charges sont introduits pour garantir une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice. Ces additifs permettent également de modifier l'apparence ou les caractéristiques du matériau final, incluant des pigments de coloration, des agents anti-UV, des charges ignifugeantes, ainsi que des propriétés d'isolation thermique ou acoustique.

### 5.2.2- Renforts

Les renforts jouent un rôle essentiel dans l'amélioration de la résistance mécanique et de la rigidité des matériaux composites. Ils se présentent sous forme filamentaire, allant de particules de forme allongée à des fibres continues qui confèrent au matériau un effet directionnel. La figure 5.3 illustre les deux types de renforts, organiques ou inorganiques. Les fibres de renfort présentent plusieurs caractéristiques :

- \* La nature de la fibre, qui peut être minérale ou organique,
- \* L'architecture du renfort, qui peut être unidirectionnelle (UD) ou en tissu, ... etc.





**Figure 5.3-** Principaux matériaux de renfort.

Les fibres de verre sont fabriquées à partir de silice et d'additifs. Pour les produire, le verre est fondu à une température de 1250 °C et coulé à travers une filière en platine rhodium. Une fois refroidis, les filaments sont étirés pour obtenir des fibres continues. Selon leur application spécifique, les fibres de verre sont classées en trois catégories :

- ❏ Les fibres E sont utilisées pour les composites à grande diffusion (GD),
- ❏ Les fibres D sont destinées aux applications dans la construction électrique, telles que les circuits imprimés,
- ❏ Les fibres R sont réservées aux composites à haute performance (HP).

Les fibres de verre sont le renfort principal utilisé dans plus de 90% des matériaux composites, surtout dans les produits à grande diffusion (GD) en raison de leur excellent rapport qualité-prix. Elles offrent plusieurs avantages, notamment :

- ❖ Une adhérence efficace entre les fibres et les résines (matrices),
- ❖ Des propriétés mécaniques satisfaisantes, bien que légèrement inférieures à celles des fibres de carbone,
- ❖ Des propriétés d'isolation électrique acceptables pour la plupart des applications.

En Europe, les fibres de verre trouvent leur utilisation principale dans la fabrication de la plupart des composites de "grandes diffusions" utilisés dans des secteurs tels que l'automobile, la construction mécanique et électrique. L'utilisation des fibres de verre dans les composites est principalement limitée par :

- Une rigidité insuffisante pour certaines applications, notamment les pièces de structure primaire en aéronautique,
- Un vieillissement accéléré en cas de contact prolongé avec l'eau, une exposition aux rayonnements UV ou des températures élevées.

Les fibres de verre utilisées dans les composites ont un diamètre d'environ  $10\ \mu m$ , ce qui est significativement supérieur au diamètre critique d'environ  $3\ \mu m$ . Ce seuil garantit que les fibres ne présentent pas de risque respiratoire susceptible de causer des cancers.

L'utilisation de la fibre de carbone reste limitée à certains secteurs tels que l'aéronautique, les sports et les loisirs en raison de son coût élevé. Cependant, les fibres de carbone présentent des inconvénients techniques qui limitent également leur utilisation dans certains composites :

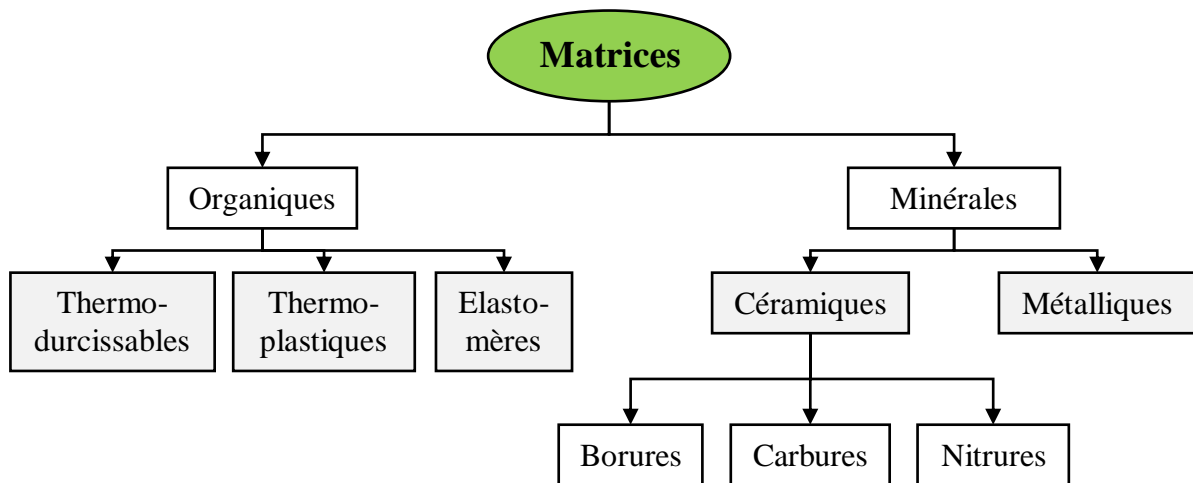
- Un allongement à la rupture insuffisant (inférieur à 2 %) par rapport à celui des fibres de verre et d'aramide (3 à 4 %),
- Une caractérisation encore insuffisante pour permettre une conception fiable à un prix raisonnable.

Les fibres d'aramide sont issues de la chimie organique des polyamides aromatiques, également appelés polyaramides, qui sont synthétisés à basse température. Leurs propriétés diffèrent de celles polyamides classiques, tels que le PA 6, communément appelé "Nylon".

Les composites renforcés de fibres d'aramide offrent une stabilité thermique notable (jusqu'à  $200\ ^\circ C$ , en fonction de la matrice utilisée), mais présentent également quelques inconvénients, notamment une adhérence moyenne entre la matrice et la fibre, ainsi qu'un coût encore jugé élevé.

### 5.2.3- Matrices

La matrice permet de lier les fibres de renfort, de répartir les contraintes, d'assurer la stabilité chimique de la structure et de donner la forme souhaitée au produit final. Les divers types de matrices sont illustrés dans la figure 5.4 de l'organigramme.



**Figure 5.4-** Différentes familles de matrice.

Parmi les résines, deux types sont actuellement largement utilisés :

1. Les résines thermodurcissables (TD) sont généralement associées à des fibres longues. Elles adoptent une structure tridimensionnelle qui se solidifie de manière permanente lors de la polymérisation par réticulation (par double liaison de polymérisation). Le durcissement est irréversible et se produit lorsque la résine est chauffée selon la forme souhaitée.
2. Les résines thermoplastiques (TP) sont renforcées avec des fibres courtes, parfois également avec des fibres longues. Ces polymères ont une structure linéaire et peuvent être modelés par chauffage (les chaînes se plient). Le durcissement a lieu lors du refroidissement (les chaînes se figent), et cette transformation est réversible.

Selon Maurice Reyne, les principales distinctions entre les matrices thermoplastiques (TP) et les matrices thermodurcissables (TD) sont les suivantes :

#### **Résines thermodurcissables (R-TD) :**

Les résines thermodurcissables les plus couramment utilisées comprennent :

- ✧ Les polyesters insaturés, largement répandus dans les applications grand public. Ils se présentent sous forme d'une solution polyacide et polyalcool, durcissant grâce à un catalyseur et à la chaleur. Cependant, ils émettent des vapeurs de styrène pendant la polymérisation et sont difficiles à stocker.
- ✧ Les vinylesters, variantes des polyesters obtenues à partir d'acide acrylique. Ils offrent une bonne résistance à la fatigue et à la corrosion, mais sont combustibles.

- ✧ Les résines époxy (ou époxydes), référence pour les composites haute performance
- ✧ Les résines phénoliques, issues de la polycondensation du phénol et du formol, offrant une excellente résistance au feu, mais étant fragiles, sensibles à l'humidité et difficiles à mettre en œuvre.
- ✧ Les polyuréthanes, caractérisés par une faible viscosité facilitant le remplissage du moule.
- ✧ D'autres résines TD sont utilisées pour des applications spécifiques, telles que les silicones (pour leurs bonnes qualités électriques, thermiques et chimiques) ou les polyimides (pour leur stabilité à haute température dans les composites haute performance). En Europe, les composites à matrices TD représentent 70 % de l'ensemble des composites transformés.

### **Résines thermoplastiques (R-TP) :**

Les thermoplastiques (TP) présentent initialement de bonnes propriétés mécaniques. Toutefois, lorsque renforcés par des fibres courtes, ils bénéficient d'une amélioration de leur résistance mécanique et thermique, ainsi que d'une stabilité dimensionnelle accrue. Malgré cela, l'usage du terme "composite" n'est pas uniforme, et certains industriels n'incluent pas les thermoplastiques renforcés de fibres courtes dans la catégorie des composites, bien que ces derniers représentent 90 % des composites à matrice thermoplastique. Les principales résines thermoplastiques utilisées dans la fabrication de ces composites comprennent :

- Les polyamides (PA) 6, 6-6, 12,
- Les poly téréphtalates éthylénique (PET) et butylénique (PBT),
- Les polycarbonates (PC),
- Les polyoxides de phénylène (PPO ou PPE),
- Les polyoxyméthylène (POM),
- Le polypropylène (PP),
- Le polyamide-imide (PAI),
- Le polyéther-imide (PEI),
- Le polyéther-sulfone (PES),
- Le polytéréphtalate d'éthylène (PET),
- Le polyméthacrylate de méthyle (PMMA),
- Le polyéther-éther-cétone (PEEK).

## 5.3- Usinage des matières plastiques et des matériaux composites

### 5.3.1- Introduction

La croissance significative de l'utilisation des matériaux composites dans la production industrielle a contraint les ingénieurs spécialisés dans l'usinage à explorer de nouvelles techniques. Les méthodes traditionnelles utilisées pour les métaux se révèlent insuffisamment performantes, polluantes pour le personnel des ateliers de fabrication, agressives pour les machines-outils, parfois totalement inefficaces pour certains composites, et potentiellement dangereuses pour les structures des matériaux usinés. Ainsi, il devient impératif de rechercher des alternatives aux outils conventionnels en acier rapide ou en carbure métallique.

### 5.3.2- Problème à résoudre

- ✗ Réaliser toutes les formes couramment demandées par le bureau d'études pour les pièces métalliques,
- ✗ Atteindre des temps d'usinage égaux ou inférieurs à ceux requis pour les pièces métalliques.
- ✗ Assurer la protection des travailleurs et du matériel contre l'émission de poussières pendant les opérations d'enlèvement de matière.
- ✗ Prévenir la dégradation structurale des matériaux due à l'utilisation des outils.
- ✗ Usiner les pièces à sec tout en les préservant contre les projections d'huile.

### 5.3.3- Outils de coupe

#### Outils de groupe I :

- ◆ Les outils traditionnels en acier rapide ou en carbure métallique sont souvent évités en raison de leurs multiples inconvénients :
  - Ils risquent de provoquer un effet d'entaille sur le matériau usiné, ce qui peut endommager sa surface,
  - Leur usure rapide entraîne une perte d'efficacité de coupe, susceptible de provoquer des déformations dans les profils usinés.
  - Ces outils ne facilitent pas une aspiration efficace des poussières produites pendant l'usinage, engendrant des conditions de travail médiocres pour le personnel et une usure prématurée des glissières des machines-outils.

Cependant, il peut arriver que les outils classiques à arête tranchante soient employés dans les composites non stratifiés, en particulier en nuance K10. Cette approche est préconisée dans les situations suivantes :

- Lorsque des conditions de coupe interrompue sont imposées, même dans des conditions sévères ;
- Lorsque la profondeur de passe excède 3,8 mm, car la plupart des outils à bout diamanté ont une arête tranchante utilisable sur une longueur maximale de 3,8 mm.
- ◆ Les meules classiques de rectification en carbure de silicium sont systématiquement évitées en raison de plusieurs inconvénients :
  - Elles ont tendance à se colmater rapidement et à chauffer, notamment lorsqu'il est nécessaire de travailler sans arrosage ;
  - Elles s'usent rapidement, nécessitant ainsi un remplacement fréquent ;
  - Elles ne conviennent pas aux rectifieuses conçues pour fonctionner à sec et avec des gros volumes d'enlèvement de matière ;
  - Il existe un risque d'inclusions de corps étrangers dans les composites, provenant des meules elles-mêmes.

### **Outils de groupe II :**

#### ◆ **Meules diamantées**

- Par dépôt électrolytique,
- Avec liant résinoïde,
- A liant métallique.

#### **Avantages :**

- Pas de risque de délaminage,
- Usinage discontinu possible (tournage aux chocs et tous travaux de fraisage),
- Réduction des risques au débouché d'usinage,
- Bon état de surface final,
- Usure négligeable,
- Excellente protection des personnes et des matériels,
- Aspiration très efficace des produits de l'usinage.

#### **Inconvénients :**

- Très onéreux (environ 10 à 20 fois le prix d'un outil de tour),
- Utilisation impossible dans les alésages de diamètre supérieur à 80 mm,

- Pas d'angles vifs possibles ( $r_{min} = 0.2$  mm),
- Obligation d'équiper toutes les machines (tours et fraiseuse) de broches tournant entre 3000 et 6000 tr/min,
- D'utilisation difficile, voire impossible, pour perçage et taraudage,
- Profondeur de passe relativement limitée ( $\leq 4$ mm),
- Poussières produites très fines d'où colmatage des aspirateurs,
- Temps de montage très important,
- Domaine d'application préférentiel,
- Finition et semi finition.

#### ◆ Outils à plaquettes diamant

Deux types :

- Diamant naturel monocristallin
  - Excellente résistance à l'usure, mais très sensible aux chocs,
  - Très grande variation des performances suivant l'orientation de la structure de l'outil,
- Diamant naturel polycristallin
  - Résiste aux chocs,
  - L'orientation aléatoire des cristaux empêche le développement des fissures et uniformise l'usure.

**Avantages :**

- Facilité de montage sur les machines-outils classiques,
- Très bonne précision d'usinage,
- Usure négligeable,
- Possibilité d'angles vifs,
- Utilisable dans les petits alésages,
- Utilisable en perçage,
- Autorise des profondeurs de passe jusqu'à 3.8 mm.

**Inconvénients :**

- Très fragile et couteux (prix moyen 120 euros),
- Encore difficile d'utilisation en fraisage,

- Utilisation pratiquement impossible dans le cas des A.F.R.P (il est difficile, voire impossible de donner à leurs arêtes de coupe la configuration appropriée).

### **Outils du groupe III :**

Ces outils possèdent des arêtes tranchantes spécifiquement conçues pour l'usinage du Kevlar (fibre d'aramide).

### **Rappel :**

Contrairement au verre ou au carbone, le Kevlar est un matériau relativement résistant. Toutefois, ses fibres d'aramides ont une faible résistance en compression et ont tendance à se rétracter à l'intérieur de la matrice pendant l'usinage, échappant ainsi au cisaillement de l'outil. Afin d'obtenir un usinage de haute qualité et d'éviter le floconnage, il est essentiel que les fibres subissent une précontrainte de traction avant d'être coupées par cisaillement. Dans le cas d'outils rotatifs, cela signifie que les fibres doivent être dirigées vers le centre à partir de la surface du diamètre extérieur.

Pour accomplir ce mouvement, une arête de coupe soigneusement affûtée et une vitesse de coupe élevée sont essentielles pour empêcher le retrait des fibres à l'intérieur de la matrice. Le choix d'outils appropriés et une évaluation minutieuse des conditions de coupe sont également cruciaux pour prévenir tout dommage au matériau. En résumé, obtenir un usinage de qualité du Kevlar demande une grande précision et une attention particulière aux propriétés du matériau.

### **Avantages :**

- Pas de floconnage,
- Pas de délaminage,
- Grandes vitesses d'usinage,
- Prix similaire à celui d'un outil en carbure classique.

### **Inconvénients :**

- Vitesses de coupe élevées (150 m/min soit une vitesse de rotation de 10500 tr/min pour une forêt de diamètre 5 mm), d'où la nécessité de s'équiper de machines-outils spéciales.



**Conditions de coupe :**

## 1) Perçage

- Plaques minces ( $V_c > 150 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.05 \text{ mm/tr}$ ).
- Cependant, si ces vitesses de coupe ne peuvent pas être atteintes, on peut essayer ( $V_c = 30 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.2 \text{ mm/tr}$ ) qui donne encore des résultats correctes,
- Plaques épaisses ( $V_c = 40 \text{ à } 50 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.2 \text{ mm/tr}$ ).

## 2) Contournage

- Kevlar mince ( $V_c \geq 180 \text{ m/min}$ ,  $f \geq 300 \text{ mm/min}$ ),
- Kevlar épais ( $V_c \geq 150 \text{ m/min}$ ,  $f \leq 250 \text{ mm/min}$ ).

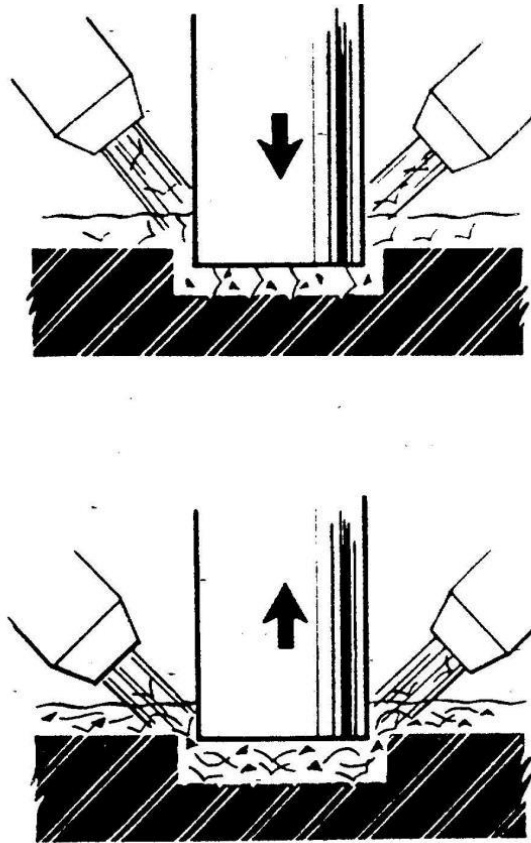
**Outils du groupe IV :**

La diversité des matériaux composites, la quête de caractéristiques mécaniques et thermiques élevées, ainsi que la nécessité de réduire les temps d'usinage rendent les outils mentionnés précédemment parfois inefficaces. Pour relever ce défi, des techniques modernes sont envisagées, mais leur adoption implique des investissements considérables, et leurs applications restent actuellement limitées. Dans l'ordre croissant des coûts d'installation, trois techniques sont actuellement disponibles : les ultrasons, le jet d'eau haute pression (avec une pression supérieure à 4000 bars) et le laser.

**1) Usinage par ultrasons**

L'usinage par ultrasons est une méthode d'enlèvement de matière où des particules abrasives sont mises en mouvement à l'aide d'un poinçon vibrant, comme illustré dans la figure 5.5. Le poinçon s'enfonce dans la pièce à usiner grâce à une poussée constante, généralement créée par le poids de la masse mobile. Cette technique permet de reproduire la forme de l'extrémité du poinçon, qui sert d'outil, dans la pièce à usiner.

L'abrasif est délivré par deux buses d'arrosage alimentées par des pompes qui récupèrent la boue d'abrasif après l'opération. Le carbure de bore est couramment choisi comme abrasif en raison de sa résistance à la fragmentation. Dans certaines situations, le diamant peut également être utilisé, mais son coût élevé limite son adoption, étant donné que les carbures usagés sont généralement irrécupérables. Les vibrations nécessaires sont générées dans un transducteur ultrasonique par effet magnétostrictif.



**Figure 5.5-** Principe de l'usinage par ultrasons.

Le processus d'usinage par ultrasons est rendu possible grâce à l'utilisation d'un noyau de nickel, qui possède le coefficient de magnétostriction le plus élevé. Ce noyau est excité par un enroulement alimenté par un générateur d'ultrasons (voir figure 5.6). Le noyau subit des compressions et des allongements dus à l'effet de magnétostriction à la même fréquence que la tension d'excitation, mais à une amplitude très faible. Pour vibrer à des amplitudes de l'ordre de  $1/100^{\text{ème}}$  de  $mm$  nécessaires pour effectuer le travail de rodage, un effet de résonance est produit dans la pièce qui sert de support à l'outil. C'est pourquoi la bride d'attache du poinçon présente un profil en exponentiel, dont la masse propre, variable en fonction du travail à effectuer, intervient dans l'obtention de l'effet de résonance. Pour chaque tête d'usinage, la fréquence d'excitation doit être réajustée pour obtenir la résonance. Des brides d'attache avec des fréquences propres différentes sont disponibles pour recevoir des poinçons de différentes tailles en fonction des applications envisagées.

Application : perçage de trous de petits diamètres.

**Avantages :** seul moyen efficace dans les composites très durs, coût d'installation modeste (10 à 15000 euros).

**Inconvénients** : procédé cher, grand consommateur de poudre diamantée, géométrie incertaine des trous.

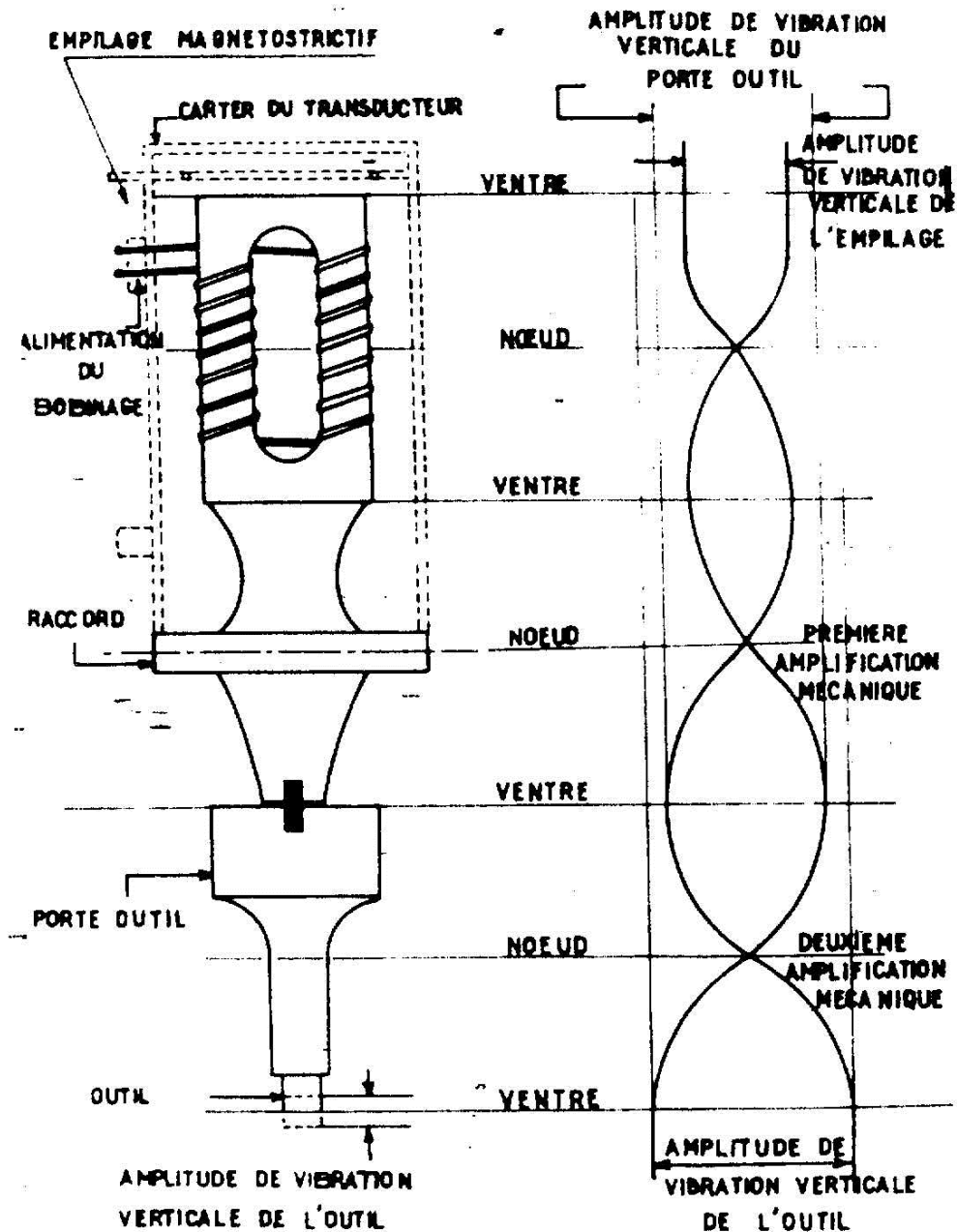
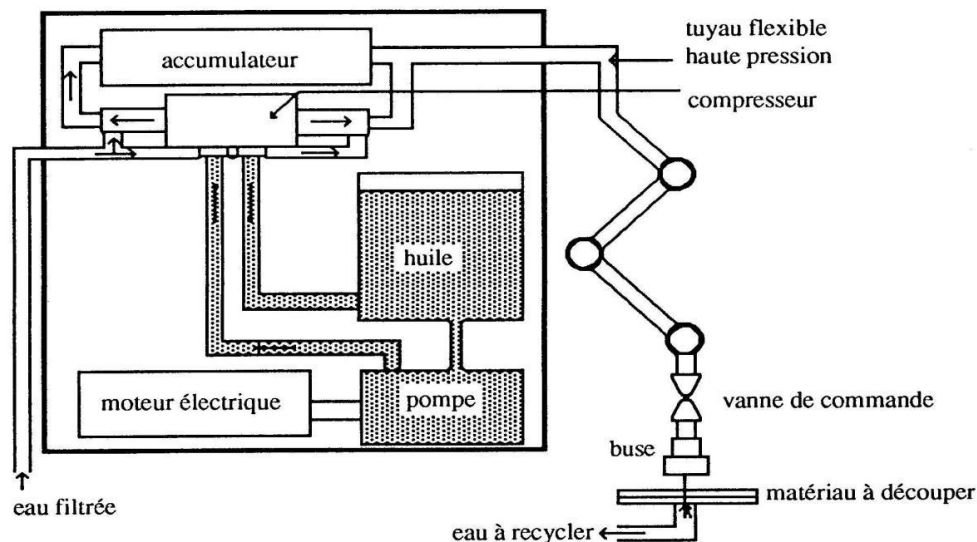


Figure 5.6- Transducteur d'ultrasons de nickel.

## 2) Usinage par jet d'eau

### a) Principe

Cette technique exploite l'action mécanique d'un jet de liquide à forte pression et grande vitesse. Le matériau est découpé en dépassant sa limite élastique (voir figure 5.7). Actuellement, ce procédé est limité à la découpe et au perçage.



**Figure 5.7-** Principe de découpe au jet d'eau.

La machine de découpe se compose de :

- Un multiplicateur hydraulique de pression d'eau (l'eau étant éventuellement traitée),
- Une conduite de distribution à très haute pression,
- Une ou plusieurs têtes de travail comportant une buse,
- Un dispositif de récupération et de traitement de l'eau après découpe.

Le local où se trouve l'installation doit être muni d'un système d'aspiration des vapeurs d'eau, de l'équipement électrique nécessaire et d'une enceinte pour contenir le bruit. Elle est reliée à une alimentation en eau du réseau standard.

### **b) Appareillage**

- ❖ Générateur de très haute pression

La pression est générée par un système à deux étages :

- Un étage de moyenne pression oléo-hydraulique, dans lequel l'huile est sous une pression de 100 à 200 bars et agit sur une grande section du piston (puissance 30 à 75 kw).
- Un étage de haute pression, avec un vérin à double effet pour générer la pression souhaitée. Un rapport de surface de 40, associé à une pression d'huile de 100 bars, permet de générer une pression de 4000 bars. Le principe de cet étage est très simple, mais la technologie est complexe, en particulier en raison des étanchéités nécessaires.

Les tuyaux sont en acier ou en kevlar, avec des articulations à joint tournant. Le bruit émis par l'installation est de 90 dB pour l'eau traitée et de 120 dB pour l'eau chargée.

#### ❖ Buse

La buse, en saphir synthétique, est l'élément qui focalise le jet d'eau à haute pression sur la pièce à découper. La pression du jet avoisine de 4000 bars et la vitesse de l'eau est d'environ 1000 m/s. L'avance de la découpe peut être réalisée de plusieurs façons :

- La buse est fixe et la pièce se déplace,
- La buse se déplace en Y et la pièce est déplacée en X,
- La buse se déplace en X-Y,
- La buse se déplace en X-Y-Z avec orientation pour suivre un contour 3D.

L'électronique de pilotage est de type CNC, très rapide, avec la possibilité d'être couplée aux systèmes CAO- CFAO classiques. Le débit en litres par minute (*l/min*) et la puissance en kilowatts (*Kw*) varient en fonction de la pression et du diamètre de la buse. Un même groupe peut alimenter plusieurs buses. Par exemple, un débit de 4.5 *l/min* peut alimenter deux buses de diamètre 0.25 *mm* ou huit buses de 0.12 *mm*.

Lorsqu'on utilise des particules abrasives pour la découpe, celles-ci sont introduites au niveau de la buse qui comporte une chambre de mélange.

#### ❖ Fluide

Le fluide utilisé est principalement de l'eau. Ce même principe est également utilisé dans le domaine médico-chirurgical, où l'on utilise des bistouris à des pressions plus faibles (entre 3 et 7 bars), en remplaçant l'eau pure par des compositions salines compatibles avec le corps humain. Pour éviter d'endommager les différents circuits, l'eau est filtrée (à environ 1 micromètre, voire moins pour les applications alimentaires), car des particules trop grandes pourraient causer des dommages.

#### **Avantages :**

- ❖ Absence de poussière, de bords cotonneux ou de délaminage, ainsi que d'usure des outils.
- ❖ Permet une augmentation de la vitesse de coupe sans nécessiter le changement d'outil pour différents composites.

- ✧ Aucun trou de départ requis.
- ✧ Niveau sonore faible.

**Limites :**

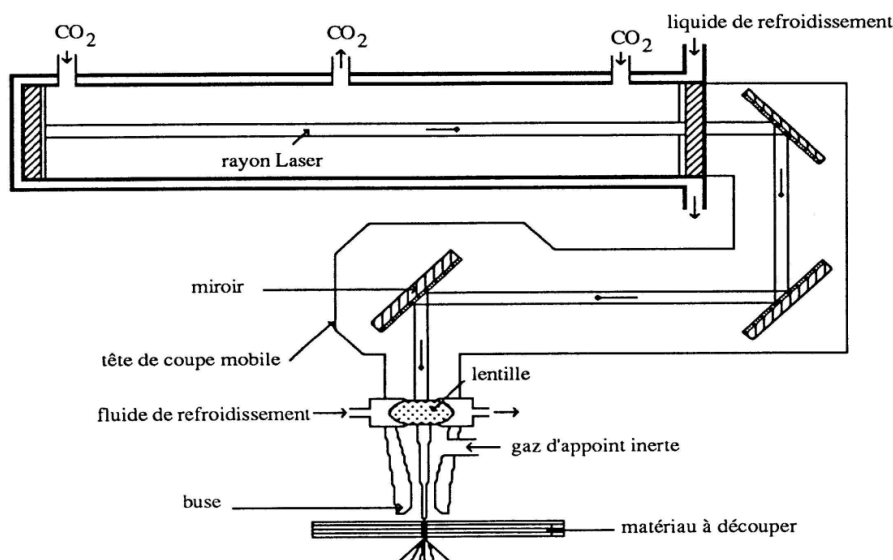
- ✧ Le jet a une stabilité assez faible perpendiculairement à son axe, ce qui peut causer une déviation à l'intérieur du sillon de coupe.
- ✧ Le front de coupe peut être courbé dans une direction opposée à la direction d'avance.
- ✧ Si l'avance est très rapide, le jet ne peut éroder que les parties les plus molles et sauter les fibres.
- ✧ Il peut y avoir un arrachement côté sortie, car la capacité d'usinage du jet a été absorbée par les couches supérieures.
- ✧ L'eau peut avoir un effet néfaste sur le processus.

**3) Le Laser****a) Principe**

Le principe du laser, acronyme de "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", repose sur une décharge électrique de plusieurs millions de volts entre deux électrodes, activant un mélange gazeux tel que le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) sous une pression de plusieurs millibars. Ce dispositif est enfermé dans un tube en verre qui ne laisse échapper qu'un faisceau d'une longueur d'onde précise, par exemple  $10,6 \mu\text{m}$  dans le cas du laser  $\text{CO}_2$ . Le faisceau est dirigé par un jeu de miroirs vers une tête de coupe mobile, puis focalisé par une lentille sur le matériau à usiner (voir figure 5.8). La focalisation du rayon donne un diamètre de foyer d'environ 0,1 à 0,3 mm, correspondant approximativement à l'épaisseur du trait à couper. Les lasers utilisés comprennent généralement des lasers à gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) à flux rapide, à flux lent ou à flux transversal, ainsi que des lasers YAG (YAG, Yttrium Aluminium Garnet, cristal utilisé pour amplifier les lasers agissant sur des milieux solides). Les caractéristiques clés du laser pour la découpe incluent le mode, la puissance, la stabilité et la polarisation.

Les variables les plus cruciales pour la découpe au laser comprennent la lentille de focalisation, la position focale, la vitesse et le gaz d'assistance. Afin d'obtenir des résultats optimaux, il est impératif de bien ajuster ces paramètres. Une installation complète de découpe au laser intègre plusieurs éléments essentiels, tels que la source laser, la structure de support, le système de déplacement du faisceau, l'armoire de contrôle, le dispositif

d'aspiration des fumées et les écrans de protection. L'utilisation d'un dispositif d'aspiration des fumées est cruciale pour éliminer les gaz et les particules nocifs générés pendant la découpe, tandis que l'utilisation d'écrans de protection protège les opérateurs contre les rayonnements dangereux.



**Figure 5.8-** Principe du laser CO<sub>2</sub>.

L'usinage est le résultat de l'effet thermique du rayon laser qui vaporise la matière en quelques fractions de seconde, nécessitant une électronique de commande précise. Une zone affectée thermiquement se forme, avec une largeur variable selon la nature de la matière et les paramètres du processus, entre la zone où la matière a été vaporisée et la zone restée froide. Dans cette zone intermédiaire, une carbonisation partielle de la matière organique peut se produire, généralement sur les bords de la découpe. Par conséquent, rester trop longtemps au même endroit, notamment lors de la découpe de fortes épaisseurs, peut entraîner une carbonisation ou une inflammation des bords de la zone usinée. Il est donc essentiel de respecter une vitesse d'avance minimale en fonction de l'énergie et de la nature de la matière. Souvent, les pièces en plastique de couleur claire nécessitent une finition après découpe, car le laser laisse une trace de carbonisation visible sur les bords de coupe. Les variables les plus significatives pour le processus de découpe restent la lentille de focalisation, la position focale, la vitesse et le gaz d'assistance. Une installation complète comprend la source laser, la structure de support, le système de déplacement du faisceau, l'armoire de commande, le dispositif d'aspiration des fumées et les écrans de protection.

**Avantages :**

- ✗ Capacité de coupe multidirectionnelle.
- ✗ Absence de poussière, de bords cotonneux et d'usure d'outils.
- ✗ Augmentation de la vitesse de coupe.
- ✗ Pas besoin de changer d'outil pour usiner différents composites.
- ✗ Pas de nécessité de faire un trou de départ.
- ✗ Niveau sonore bas.

**Inconvénients :**

- ✧ Résultat surtout intéressant pour les fibres d'aramide qui dissipent rapidement la chaleur (par opposition aux fibres de verre),
- ✧ Mauvais résultat pour les composites à fibres de carbone : les fibres de carbone ont une trop grande conductivité thermique et nécessitent une température élevée pour atteindre le point de décomposition,
- ✧ Coût de fonctionnement élevé (en plus du coût élevé à l'achat).



## Référence bibliographie

- [1] J. Paulo Davim : Machining: Fundamentals and recent advances. Book, ISBN 978-1-84800-212-8, University of Aveiro, Portugal, 2007.
- [2] A. Hamdi : Fabrication mécanique. Polycopie de cours, 2<sup>ème</sup> année génie mécanique (S4), Département des sciences et de la technologie, Université de Tissemsilt, 2019.
- [3] G.C. Manjunath Patel et al : Machining of hard materials: A comprehensive approach to experimentation, modeling and optimization. Book, ISSN 2191-530X, Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland, 2020.
- [4] M.E.L. Bennegadi : Coupe des métaux en fabrication mécanique et productique. Master 1 FM&P, Département de génie mécanique, USTO, 2018.
- [5] J. Paulo Davim : Optimization methods in engineering. Book, ISBN 978-981-15-4549-8, Department of Mechanical Engineering, University of Aveiro, Aveiro, Portugal, 2019.
- [6] Christian Pagès : Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage a sec de finition. Thèse de doctorat, École centrale de Lyon, 2003.
- [7] D.A. Stephenson, et J.S. Agapiou : Metal cutting theory and practice. Book, ISBN 978-1-4665-8754-0, Boca Raton CRC Press, 2016.
- [8] J.P. Cordebois : Fabrication par usinage, Editeur(s) : Dunod, l'usine nouvelle, collection : Technique et ingénierie - Mécanique et matériaux, 2013.
- [9] H. El-Hofy : Fundamentals of machining processes: conventional and nonconventional processes. Third Edition, Book, ISBN 9780429443329, Boca Raton CRC Press, 2018.
- [10] S. Gara : Procédés d'usinage, tournage fraisage perçage rectification, Editeur(s) : Ellipses, Collection : Technosup, 2014.
- [11] M.D. Kaoutoing : Contributions à la modélisation et la simulation de la coupe des métaux: vers un outil d'aide à la surveillance par apprentissage. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2020.
- [12] C. Barlier : Industrialisation & Mécanique - Usinage des matériaux métalliques, Editeur : CASTEILLA, Collection : Mémotech plus , 2006.
- [13] B. Benmohammed : Coupe des métaux 2. Cours, Département de génie mécanique, Université de Batna 2, 2023.
- [14] E. Felder : Modélisation de la coupe des métaux. Technique de l'ingénieur, Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF) UMR 7635 CNRS – École des Mines de Paris, 2006.