

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTER DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

N° ordre :.....

Série :.....

Mémoire

Présenté pour obtenir le diplôme de

MAGISTER

THEME

**INFLUENCE DES TRAITEMENTS DE SURFACE SUR LES
PROPRIETES MECANIQUES**

Option : Construction Mécanique

PAR

DJERIBAA ABDELJALIL

Date de soutenance :.../... ./ 2007

Devant le Jury :

Président	: B. NECIB	Prof	Université de constantine.
Rapporteur	: E. FERKOUS	MC	Université de constantine.
Examineurs :	H. BOUGHOUASS	MC	Université de constantine.
	I. AMARA	MC	Université de constantine.

Introduction

Les traitements thermiques traditionnels font partie d'un processus physique permettant l'amélioration des propriétés des pièces mécaniques et des mécanismes. Le procédé se résume dans la succession des opérations de chauffage, de maintien et suivi d'un refroidissement approprié conformément aux différents diagrammes d'équilibre et d'analyse thermique.

Ces traitements, pour leur élaboration, exigeaient certains paramètres et facteurs de faisabilité, parmi lesquels on peut citer la nature du matériau, le pourcentage de carbone, la température de chauffage et la loi du cycle de refroidissement permettant la sélection de telle ou telle structure composite recherchée. Ils conduisent à l'amélioration des caractéristiques et des propriétés superficielles par changement de structure cristalline ou par changement de composition chimique.

L'industrie moderne ne cesse d'utiliser des matériaux nouveaux, de plus en plus diversifiés (Aciers, fontes, céramiques, composites).

Et donc, ces traitements destinés initialement à l'augmentation des propriétés tribologiques des pièces et des outils de coupe, se sont trouvés, au vu du progrès techniques et l'exigences des besoins de l'industrie mécanique en adéquation avec l'apparition de nouveaux matériaux durs.

C'est ainsi que l'alternative de l'introduction des carbures, caractérisés par une dureté extrêmement élevée, en vertu du caractère covalent très prononcé de leurs liaisons atomiques, font leur première application.

Les carbures de Tungstène WC, de Vanadium, de Molybdène et de Chrome sont actuellement employés pour améliorer la résistance aux frottements et de friction, ainsi que la protection contre les phénomènes de corrosion.

Lors de leur utilisation sur machine outil, et sous l'effet du couple frottement /température, les outils en WC censés supportés de très hautes températures d'usinage, verront leur partie active se confondre avec le matériau à usiner.

Dans son évolution continue, et à l'opposée des carbures, la recherche de nouveaux matériaux conduit aux nitrures permettant l'amélioration des propriétés superficielles par simple couche de revêtement. Les nitrures sont très durs, possèdent une bonne résistance mécanique à l'abrasion et sont hautement réfractaires entre 1800 à 3000°C.

La méthode courante d'élaboration des revêtements en nitrures des différents matériaux (Bore, Si, Al, Ti) se fait généralement dans des fours à chaud ou dans des bains électrolytiques. Alors que d'autres procédés ont fait leur apparition, parmi lesquels on peut citer la déposition des couches par CVD et PVD. La qualité et le niveau des propriétés mécaniques et physiques obtenu, reste attributaire de la façon et des conditions du transfert de la matière à déposer ainsi que du substrat (pièce mécanique, outil de coupe etc. ...).

Le choix des matériaux à outil de coupe et leurs traitements influent fortement sur la durée de vie, sur le coût total et doit être conditionnés par les qualités requises en service.

Malgré le progrès enregistré dans le domaine des sciences des matériaux , le recours aux traitements traditionnels , l'introduction de nouveaux matériaux de carbures et des nitrures , les performances des pièces mécaniques et des outils de coupe restent toujours à un stade d'amélioration et de perfectionnement .De ce fait la recherche de nouveaux matériaux et revêtements de substitution reste un domaine convoité , au vue du fait qu'il fait partie d'un enjeu industriel concurrentiel très important notamment dans le secteur de la mécanique et les centres modernes d'usinage.

Dans ce travail, et sur la base d'une idée comparative, nous avons introduit pour la première fois le plasma comme technique de déposition des couches de revêtements de nitrures de titane sur la partie active des outils de coupe.

Cette technique connue des physiciens pour d'autres applications ,se base sur le phénomène physique de l'ionisation d'un gaz sous l'effet d'un champ électrique (ddp) , donnant par la suite naissance à la pulvérisation qui fonctionne sous vide et à froid sous l'effet de l'éjection et d'arrachement d'atomes .

Les outils de coupe dont la partie active revêtue d'une couche de nitrure de titane, ont été soumis aux différents essais mécaniques et de caractérisation.

Pour la concrétisation des résultats apportés par cette technique des plasmas, nos investigations ont été orientées vers la détermination des principales caractéristiques mécaniques recherchées dans un outil de coupe performant.

L'objectif visé par le biais de cette approche intégrée est l'amélioration des propriétés mécaniques ainsi que l'augmentation de la durée de service des outils de coupe utilisés en tournage.

L'agencement de ce travail de mémoire est structuré en cinq chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons fait un rappel des différents procédés des traitements thermiques traditionnels ainsi que certains traitements de surfaces.

Dans le deuxième chapitre, nous avons introduit les différentes techniques de dépôt de revêtements, tout en mettant en exergue l'application du plasma comme phénomène physique de pulvérisation par arrachement d'atomes.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de l'étude détaillée sur les outils de coupe, leurs caractéristiques géométriques, techniques ainsi que les différents paramètres qui rentrent lors du processus de travail de l'outil de coupe.

Le quatrième chapitre présente des notions sur le Titane comme matériau de revêtement de base , sur les nitrures de titanes , la technique expérimentale de déposition par plasma , et la série d'essais et de caractérisation , dans laquelle il a été procédé à la mesure de l'épaisseur des revêtements obtenus , l'essais de l'adhérence de ces couches , l'évaluation de la dureté des nitrures déposés , la détermination de l'usure et en fin la durée de vie ainsi que l'effet géométrique et état de surface sur les pièces mécaniques usinées .

En fin , les résultats en termes d'évaluation , de comparaison et d'amélioration des propriétés mécaniques enregistrés sur les outils de coupe traités par la technique des plasmas , sont présentés et discutés dans le cinquième et dernier chapitre , suivi par une conclusion .

Chapitre I

Les traitements thermiques

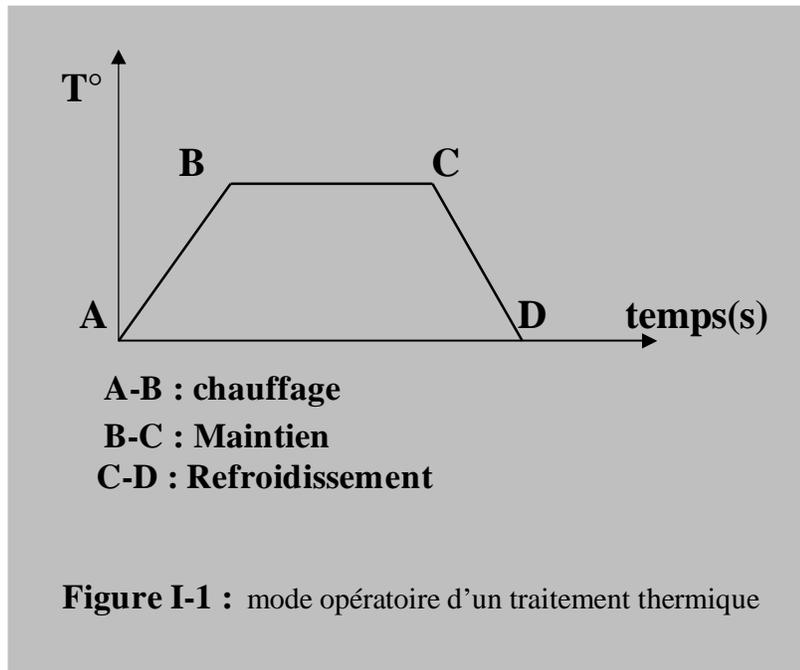
I.1/ GENERALITES SUR LRS TRAITEMENTS THERMIQUES :

I.1.1/ définition :

On désigne par traitement thermique, tout cycle d'opération faite à chaud, destinée à modifier les propriétés mécaniques d'un métal pour lui donner de nouvelles qualités mécaniques.

Les traitements thermiques des métaux et des alliages ont pour but de modifier les propriétés de ces corps, uniquement par variation de la température.

Le mode opératoire du traitement thermique consiste en un chauffage, un maintien et ensuite un refroidissement (figure 1).



Le choix d'un traitement thermique reste étroitement liée à la composition chimique, le pourcentage du carbone (% C) de la pièce mécanique, ainsi qu'à son emploi ultérieur.

L'industrie mécanique utilise dans la fabrication des mécanismes et des éléments de machine des aciers de construction qui sont des aciers au carbone où le plus souvent leur teneur en carbone ne dépasse pas 0.5 à 0.6 % C.

La teneur en carbone est un facteur très important, dans la variation des propriétés mécaniques des aciers, et de ce fait la détermination du traitement thermique à faire subir à la pièce mécanique est basée sur la connaissance du diagramme d'équilibre Fer-Carbone.

I.2/ Diagramme d'équilibre Fer-Carbone :

I.2.1/ éléments de base :

Le diagramme d'équilibre se compose des éléments suivants :

a) Le fer :

Le fer est un métal blanc d'argent, son nombre atomique est 26, sa masse atomique est 55.85, le rayon atomique est 1.27 \AA , la température de fusion du fer est de $1539 \text{ }^\circ\text{C}$.

On connaît deux formes polymorphes du fer, le fer α et le fer γ

Le fer α existe aux températures entre $910 \text{ }^\circ\text{C}$ et $1392 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dans l'intervalle de température entre $1392 \text{ }^\circ\text{C}$ et $1539 \text{ }^\circ\text{C}$ le fer α est souvent désigné par fer δ (Fe δ).

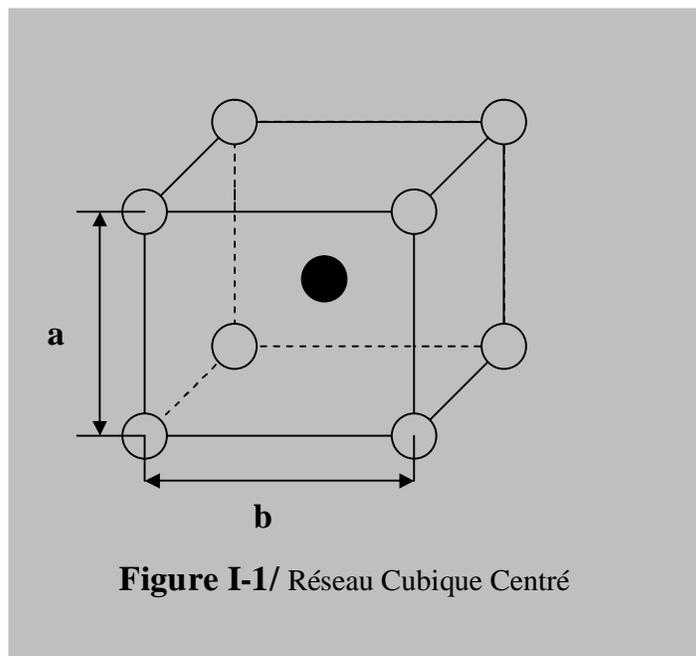
Le fer γ existe entre $910 \text{ }^\circ\text{C}$ et $1392 \text{ }^\circ\text{C}$, il a un réseau cristallin cubique à faces centrées (C.F.C), tandis que le fer α a un réseau cristallin cubique centré (c.c).

b) Le carbone : le carbone est un élément non métallique.

I.2.2/ constituant du diagramme Fer – carbone :

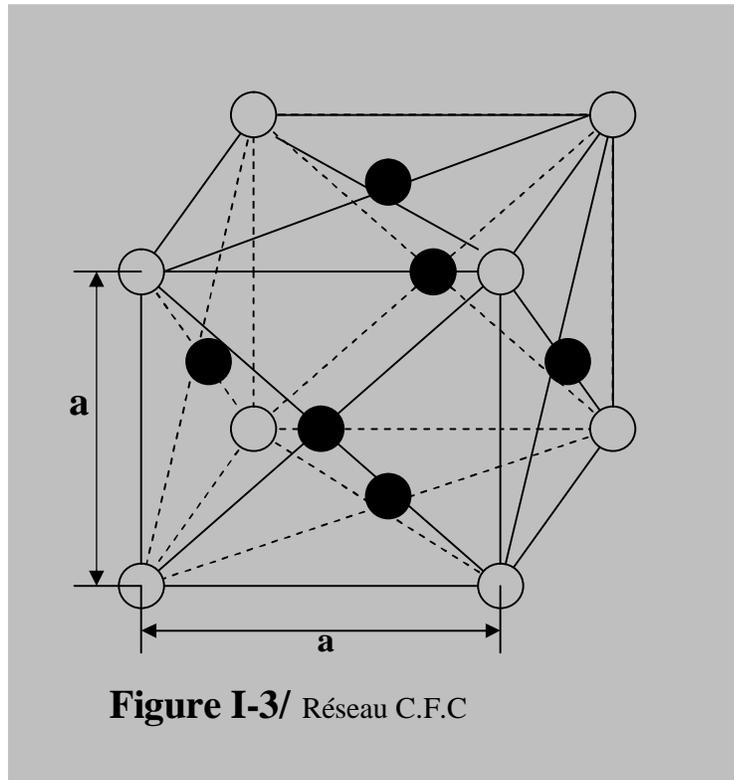
Le diagramme Fer – carbone met en évidence la présence des constituants suivants :

- a) **la ferrite** : c'est une solution solide d'insertion de carbone dans le fer α , elle a un réseau cubique centré (c.c).



b) la perlite : formée d'agrégats intimes de ferrite d'où la composition est 87,6 % de ferrite et de 12,4 % de cémentite.

c) L'austénite : c'est une solution solide d'insertion de carbone dans le fer γ ; elle a un réseau cristallin cubique à faces centrées.



d) la ledeburite :

Les alliages dont la teneur en carbone excède 2,06, donne naissance au refroidissement à un eutectique, mélange de cémentite et d'austénite correspondant à une teneur en carbone de 4,3 % ; c'est la **ledeburite**.

e) la Cémentite :

C'est un composé chimique de dureté élevée, elle représente différents modes de formation :

e-1/ cémentite primaire :

Elle apparaît sur le diagramme Fer- carbone au début de la solidification des alliages hypereutectiques.

e-2/ cémentite secondaire :

Elle est libérée par l'austénite pendant le refroidissement entre 1147° et 723 ° C.

e-3/ cémentite tertiaire :

Elle est libérée par la ferrite pendant le refroidissement au dessus du palier eutectoïde

f) le graphite (carbone pur) :

Le graphite est la forme stable de la phase riche en carbone, il remplace la cémentite dans le diagramme Fer- carbone, et il cristallise dans le système hexagonal. [1]

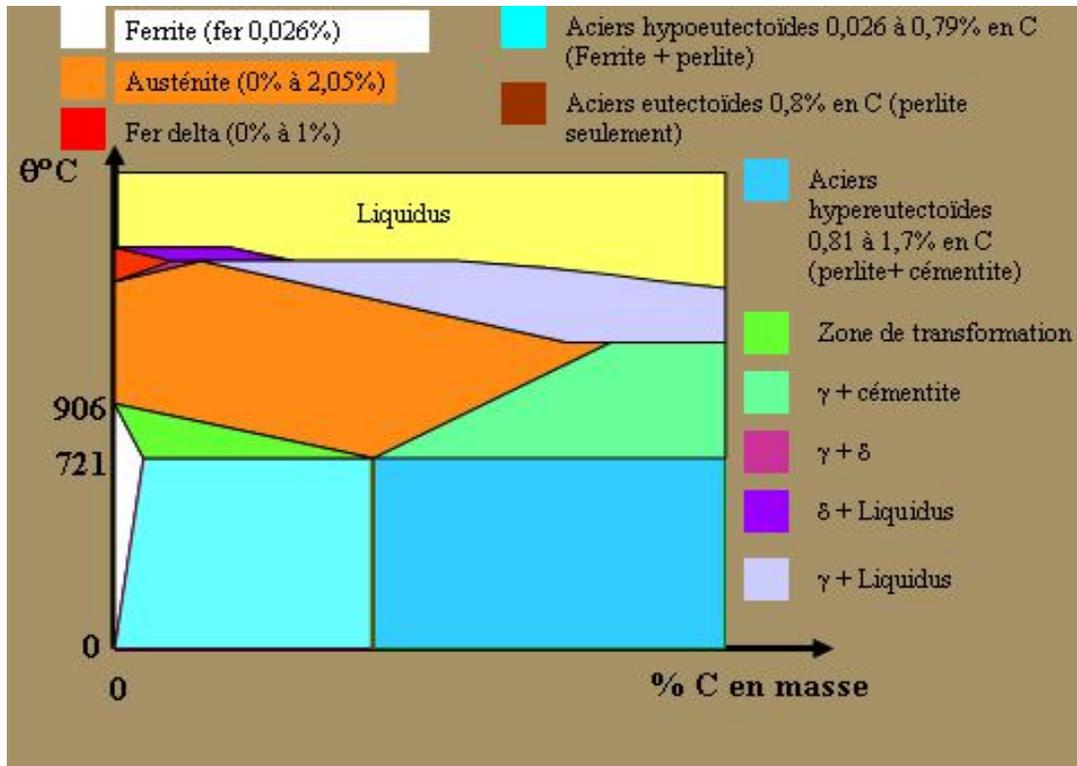


Figure I-4 : diagramme d'équilibre fer- carbone.

I.3/ Notions sur les traitements thermiques :

Les traitements thermiques sont des opérations dont le mode opératoire comporte un chauffage suivi de refroidissement, qui a pour but de donner à une pièce métallique les propriétés les plus convenables pour son emploi ou sa mise en forme.

Ils permettent d'améliorer dans une large mesure les propriétés mécaniques d'un acier de composition déterminée. Le but principalement recherché étant l'augmentation de la limite élastique et la diminution de la fragilité.

Un traitement thermique est définie par la variation de la température du métal en fonction du temps (cycle thermique).

D'une façon générale, un traitement thermique ne modifie pas la composition chimique de l'alliage, mais il peut apporter des modifications relatives aux trois points de vue suivants:

- a) constitution (état du carbone, et forme allotropique du fer) ;
- b) structure (grosseur du grains et répartition des constituants) ;
- c) état mécanique (les différences de température aux divers points de la pièces provoquent des irrégularités de dilatation qui peuvent créer des contraintes propres et causer des déformations externes.

Les principaux traitements thermiques de larges applications sont :

- la trempe.
- le revenu.
- le recuit.

I.4/ La Trempe :

La trempe comme traitement thermique est utilisée pour améliorer la qualité d'emploi de l'acier en lui donnant une meilleure dureté.

I.4.1/Cycle thermique de la trempe : le cycle thermique comporte trois phases successives :

- 1- chauffage à une température θ_t (température de trempe correspondant à un état austénitique. La durée de mise en température est suffisamment prolongée pour que l'homogénéité thermique soit réalisée jusqu'au cœur de la pièce.

- 2- Maintien à cette température de façon à réaliser plus ou moins complètement la mise en solution des carbures dans les fers γ et l'homogénéisation de l'austénite. l'ensemble de ces deux phases est dit (austénitisation).
- 3- Refroidissement par immersion dans un milieu convenable, suffisamment rapide pour assurer la transformation correspondant à la constitution prévue par le diagramme d'équilibre voir la figure I-4.

I.4.2/Facteurs de trempe :

Les transformations subies par l'acier lors du refroidissement dépendent de nombreux facteurs.

En première approximation, pour une pièce de petites dimension, les facteurs de trempe sont au nombre de quatre :

- 1- Composition chimique ;
- 2- Température de trempe ;
- 3- Loi de refroidissement ;
- 4- Effet de masse.

I.4.2.1/ Composition chimique :

Ce facteur est lié au diagramme T.R.C ; (transformation de l'acier au cours d'un refroidissement continu). En général les éléments alliés accroissent la trempabilité, car en leur présence, le refroidissement est de moins en moins rapide pour l'obtention de la martensite. Pour les aciers dont la teneur en carbone est inférieure à 0,85 % ; il est facile d'atteindre l'état austénitique en chauffage juste au dessus du segment G-S du diagramme d'équilibre. [2]

I.4.2.2/ Température de trempe :

Pour que la trempe produise de l'effet, il faut porter le métal à l'état de l'austénite. On doit donc avoir une température suffisamment élevée (régie par le diagramme fer-c) .pour les aciers hypo-eutectoïdes, on réalise le plus souvent une austénitisation complète, il est donc nécessaire de dépasser AC3.

En générale, la température de trempe égale à :

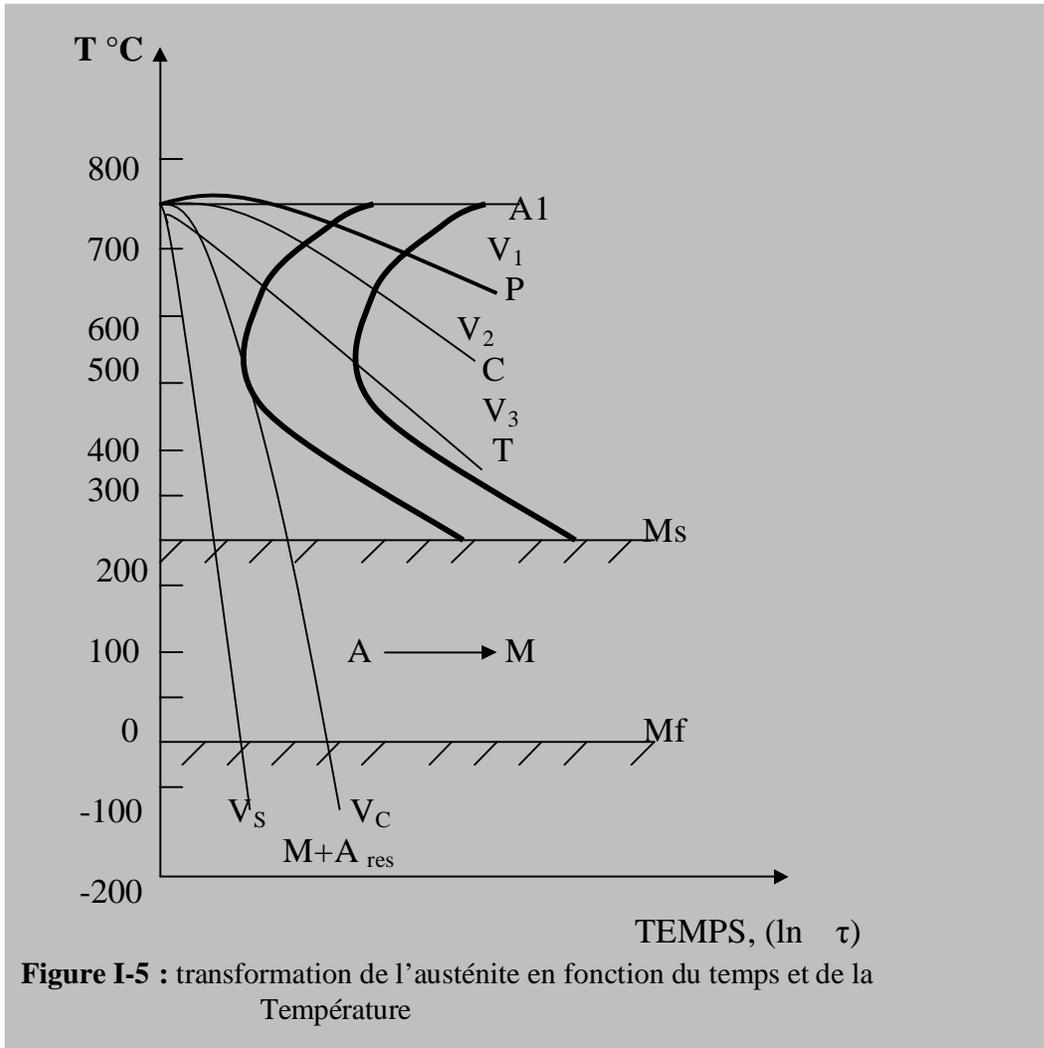
$$\theta_t = AC3 + 30 \text{ à } 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

I.4.2.3/ Vitesse de refroidissement :

La vitesse de refroidissement donne la variation de la température en fonction du temps en un point de la pièce traitée.

En établissant des courbes de refroidissement pour de nombreuses températures, on obtient un diagramme de transformation isotherme de l'austénite ou, diagramme T.T.T ; (transformation en fonction du temps et de la température).

la loi de refroidissement est la relation qui lie la température T (θ) au temps (t) et généralement $\theta = f(\log t)$; l'échelle logarithmique permet un étalement convenable des courbes relatives aux refroidissements rapides.



La transformation martensitique s'amorce dès la température M_s et se déroule non pas dans des conditions isothermes, mais dans un intervalle de température la surfusion de l'austénite jusqu'à la température M_s déclenche la transformation de l'austénite en martensite. Pour assurer la marche de cette transformation, la pièce doit être refroidie d'une façon

continue au-dessus de M_s , car une interruption dans le refroidissement met pratiquement fin à la transformation martensitique.

La quantité de martensite ainsi formée peut être exprimée en fonction de la température et de la vitesse de refroidissement par une courbe dite martensitique.

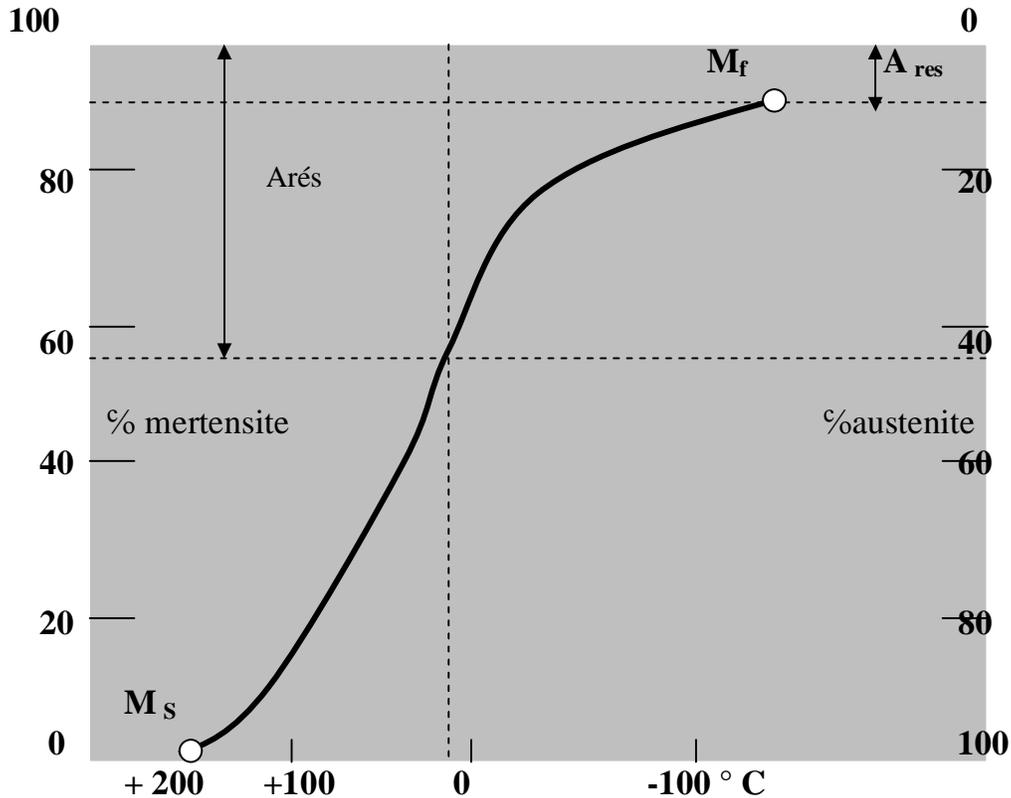


Figure I-6 : courbe de la vitesse de refroidissement

Plus la température est basse avec une vitesse de refroidissement grande, plus il se forme de la martensite. Dans ces conditions, la quantité de martensite augmente sous l'effet de formation des cristaux. Lorsqu'une température déterminée pour chaque acier est atteinte, l'austénite cesse de se transformer en martensite ; cette température est notée : (M_F)

Lorsque le refroidissement est très rapide, la décomposition de l'austénite par diffusion devient impossible, et toute l'austénite subit alors la surfusion jusqu'au point M_s et se transforme en martensite : (courbe V_C) cette vitesse de refroidissement minimal qui correspond à la transformation de toute l'austénite en martensite s'appelle (vitesse critique de trempe). Elle est déterminée par la formule suivante :

$$V_c = \frac{A_1 - t \text{ min}}{1,5 t \text{ min}} \quad [^{\circ}\text{C}/\text{S}]$$

A₁ : la température du point d'équilibre 721° C.

τ min : la durée de stabilité minimale de l'austénite dans le domaine perlitique.

t min : la température de stabilité minimale de l'austénite surfusionnée.

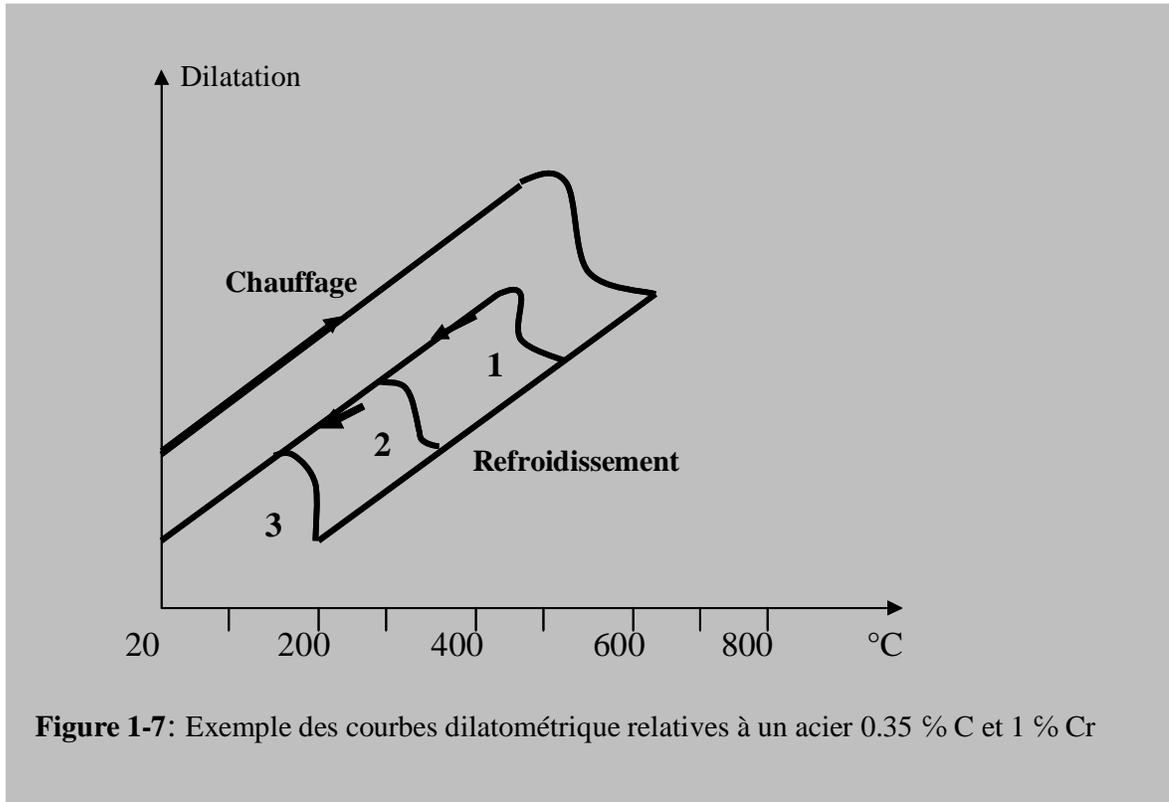
Le tableau I-1 représente la durée approchée du chauffage jusqu'à 800 ou 850 °C dans des fours de différents types prévus pour la trempe des pièces.

chauffage	Durée du chauffage par 1mm d'épaisseur ou de section		
	section ronde	section carrée	section rectangulaire
- Dans un four électrique - Dans un four à flamme - Dans un bain de sel - Dans un bain de plomb	40 à 50 min 35 à 40 min 12 à 15 min 6 à 8 min	50 à 60 min 45 à 50 min 15 à 18 min 8 à 10 min	60 à 75 min 55 à 60 min 18 à 22 min 10 à 12 min

Tableau I-1 : durée de chauffage.

I.4.3/ Etude des transformations de l'austénite :

La méthode la plus employée est la dilatométrie absolue. Pour cela On enregistre la variation de la longueur d'un échantillon en fonction de la température pour diverses allures du refroidissement (trempe à l'eau, air soufflé, air libre, moufles diverses).



- 1- Refroidissement à l'air
- 2- trempe à l'huile.
- 3- trempe à l'eau.

Sur ces courbes, on détermine les températures de début et de fin de transformation.

La considération de ces diagrammes (TRC) permet de suivre le mécanisme de la décomposition de l'austénite en fonction de l'allure du refroidissement.

I.4.3.1/ Cas de l'acier au carbone eutectoïde :

Considérons tout d'abord un acier eutectoïde porté au préalable à 770 °C c'est-à-dire $A_3+50^\circ\text{C}$ à fin qu'il soit à l'état d'austénite et étudions les modalités de la décomposition de l'austénite :

Température de transformation au cours du refroidissement en considérant les courbes $q = f(\log t)$, et constitution finale. Suivant l'allure du refroidissement, on peut distinguer trois cas séparés par deux refroidissements critiques

Figure I-8 : courbe TRC

I.4.3.1.1/ refroidissement lent : de l'ordre de 100° par heure , correspondant à celui d'une pièce à l'intérieur d'un four dont on cesse le chauffage à refroidissement moyennement rapide de l'ordre de 100°C par seconde, correspondant à celui d'une pièce trempée à l'huile. Le diagramme d'équilibre laisse prévoir une courbe de refroidissement présentant un palier à 721°C . En fait, pour les courbes 1 à 4, la transformation austénite vers perlite débute avec certain retard (ligne supérieure) et se poursuit à température décroissante. Le début de la transformation (point Ar_3) s'abaisse progressivement de 715 à 700°C tandis que la fin de transformation (point Ar_1) décroît concomitamment de 705 à 690°C . Le métal est à l'état de

perlite lamellaire (5,7) .Au fur et à mesure que le refroidissement s'accélère, la finesse de la structure croit, ainsi que la dureté qui passe de 200 à 280 HV.

Pour les refroidissements relativement rapides (courbes 5 et 6), les points Ar_3 et Ar_1 s'abaissent en même temps que l'intervalle $Ar_3 \longrightarrow Ar_1$ croit. On est en présence de la troosite, constituant dont la composition physico-chimique est identique à celle de la perlite, mais qui en diffère par la structure. Les lamelles de ferrite et de cémentite sont plus rapprochées et la distance entre deux lamelles consécutives de cémentite est inférieur à 0,2 um. Les modifications constatées sont continues. La distinction entre perlite et troosite, est quelque peu artificielle. Avec les grossissements courants, les lamelles ne sont plus visibles au microscope optique ;

On dit que la troosite est irrésoluble. La troosite est donc un constituant recuit au point de vue constitution chimique, mais trempé au point de vue structurale : le durcissement de la troosite est d'origine structurale.

La troosite attaquée par les réactifs habituels se présente en amas arrondis, de teinte plus foncée que les autres constituants. Avec de forts grossissement, on constate que les lamelles ont tendance à devenir moins parallèles, et l'on aboutit à des structures (en éventail) dans lesquelles les lamelles rayonnent à partir d'un centre.

I.4.3.1.2/ Refroidissements rapides :

De l'ordre de 500° C/S correspondant à celui des petites pièces immergées dans l'eau froide. A partir d'un refroidissement suffisamment rapide dit refroidissement critique de recuit (courbe 7), la transformation de l'austénite s'opère en deux phases successives les courbes 8 et 9

La première transformation est analogue à celle relative au cas d'un refroidissement moyennement rapide ; elle débute vers 650 – 550 °C et s'achève vers 475 °C, mais la transformation austénite – troosite n'est que partielle (15% et 2 % dans le cas envisagé) et est d'autant plus limitée que le refroidissement devient plus rapide.

Le refroidissement se poursuit d'abord sans transformation jusque vers 200 °C et à partir du point où la courbe de refroidissement coupe la ligne M_s il y a apparition d'un constituant très dure, que l'on appelle (martensite) et la transformation martensitique va se poursuivre avec l'abaissement de la température.

I.4.3.1.3/ Refroidissement très rapide :

Il Correspond à ce lui de très petites pièces plongées dans l'eau glacée au l'air liquide si on continue à faire croître la vitesse de refroidissement (on à atteint 14000 °C/S), on constate qu'à partir du refroidissement critique martensitique (courbe 10) la transformation de l'austénite en martensite début à 180°C.

I.4.4/ Effet de masse :

Après trempe on constate qu'une pièce ne se refroidit pas uniformément en tous ses points. Il est évident que le refroidissement s'opère plus rapidement à la surface de la pièce qu'en son intérieur.

L'existence de ce gradient de température entraîne deux conséquences gênantes qui provoquent :

- l'hétérogénéité de la trempe : la constitution du métal et sa dureté varie selon la distance du point considéré à la périphérie de la pièce. L'épaisseur de la couche trempée est de l'ordre du centimètre, et il est impossible d'obtenir la présence de la martensite au cœur de la pièce.

I.4.5/ Propriétés mécaniques obtenues après trempe :

La martensite est caractérisée par une dureté et une résistance élevée. Sa dureté croit avec l'augmentation de sa teneur en carbone (Figure I-9).

Dans un acier hypo-eutectöde à 0.6 ou 0.7 % C, la dureté est de HRC 65 (HV 960). C'est-à-dire sa valeur dans ce cas est six fois supérieure à celle de la ferrite.

La charge de rupture d'une martensite à base carbone (0.01%) est environ 100 gf/mm² et pour une teneur de 0.6 à 0.8% C elle atteint 260 à 270 Kgf / mm²

La plasticité de la martensite à plus de 0.35 ou 0.4 % de carbone ; est faible, c'est pourquoi il est impossible de déterminer exactement la résistance d'un acier trempé à structure martensitique.

En générale le but de l'obtention de cette structure (après trempe) est de donner à l'acier une meilleure ténacité, dureté élevée et une bonne résistance à l'usure.

Propriétés mécaniques	Avant trempe	Après trempe
Dureté	(10) HRC (160) HV	(65) HRC (960) HV
Charge de rupture	100 Kgf / mm ²	260 à 270 Kgf / mm ²

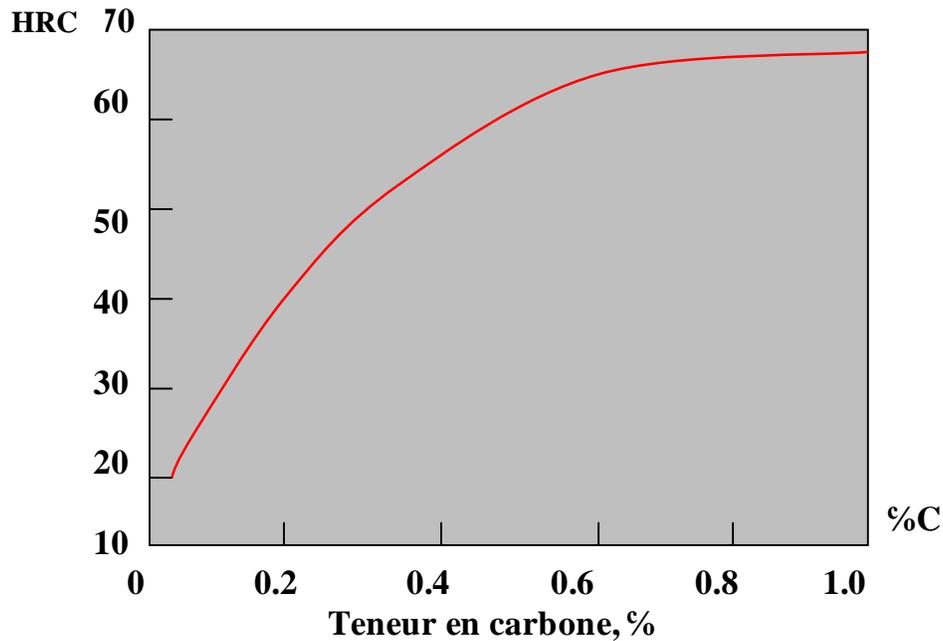


Figure I-9 / variation de la dureté HRC en fonction de la teneur en carbone C %

I.5/ Le Revenu :

I.5.1/ Définition :

L'acier trempé souvent très dure qu'il n'est nécessaire, et généralement trop fragile. Pour pouvoir être mise en service, La trempe est habituellement suivie d'un revenu qui consiste en un chauffage au-dessus à AC_1 avec maintien de durée suffisante, suivi d'un refroidissement relativement rapide.

Le revenu réalise un compromis entre deux exigences contradictoires : Diminution de la fragilité et haute dureté. Il augmente l'allongement et surtout la résilience ; mais il diminue la dureté, la limite élastique et la résistance à la traction. Lors du revenu, le chauffage effectué a un double effet .il tend à réaliser l'équilibre physico-chimique (ferrite + cémentite)

De plus, et c'est l'effet essentiel, il y a atténuation ou disparition des contraintes propres (équilibre mécanique) d'où diminution de la fragilité.

I.5.2/ Facteurs du revenu :

Lors de son application le revenu dépend de trois facteurs essentiels à savoir :

- état initial ;
- temps de maintien ;
- la température du chauffage.

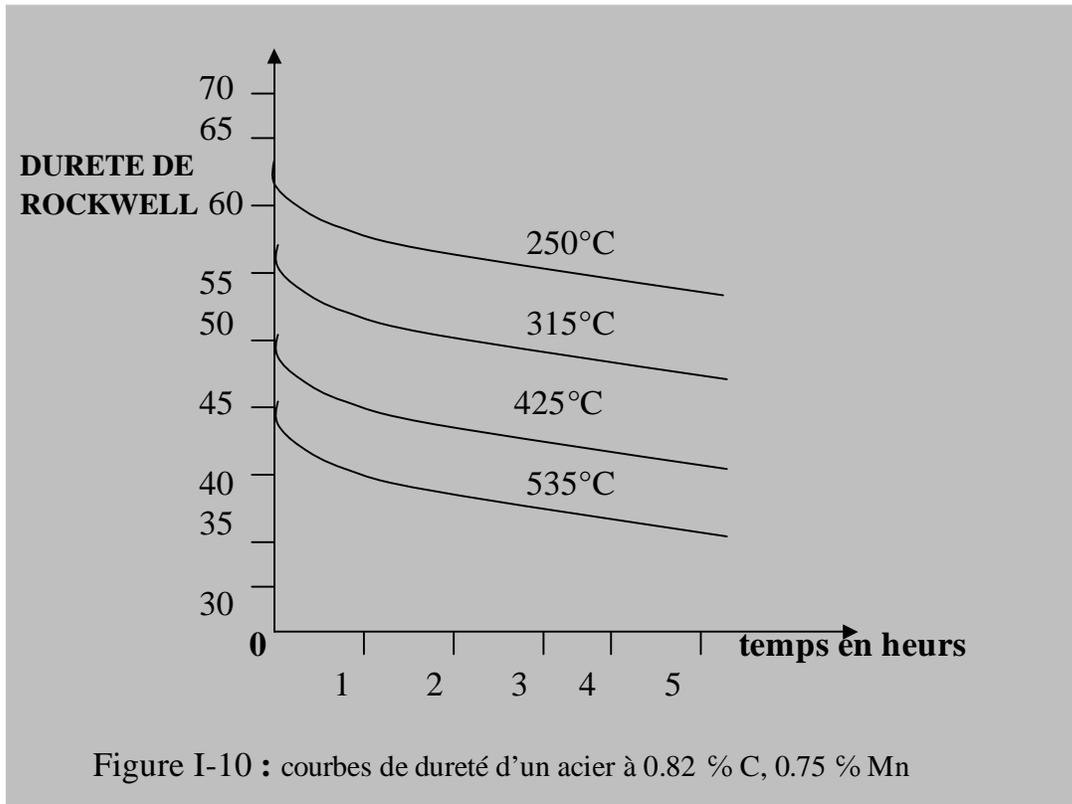
I.5.2.1/ l'état initial :

Pour tous les cas, l'état initial est ce lui de l'après trempe c'est-à-dire l'état martensitique.

I.5.2.2/ durée du revenu :

Pour une température de revenu élevée $\theta > 150$ °C, on constat que la dureté décroît d'abord sensiblement, puis n'éprouve en suite qu'une faible diminution (figure I-10). La plus grande variation de dureté se produit pendant la première demi-heure, et elle est particulièrement rapide lors des dix premières secondes pour les températures de revenu augmente.

Ainsi dans le cas de la figure I-10 la dureté initiale est égale à 67 HRC, et rechute graduellement à 66, 61, 55,49 de début de 10 secondes.



Il y a donc une durée limite du revenu, au de là de laquelle il ne convient pas de prolonger le chauffage pour des raisons économiques, les transformations étant alors très lentes.

I.5.2.3/ Température du revenu :

L'effet du revenu croît en rapidité avec la température, il croît également en intensité. Pour une durée de chauffage égale à la durée limite, la dureté commence à croître légèrement jusqu'à 100 °C pour les aciers ordinaires, ce que peut s'expliquer par la précipitation de particules très fines de carbure ϵ . Ensuite, la dureté décroît notablement à partir de 200 à 300°C jusqu'à un minimum obtenu quand la température de revenu atteint la température critique de trempe correspondant à la vitesse de refroidissement après le revenu. [3]

I.5.3/ Différents types de revenu :

Selon la composition chimique de la pièce et sa destination ultérieure, la pièce mécanique trempée peut recevoir l'un des types de revenu suivants :

- Revenu à basse température : 150 °C.
- Revenu au-dessus de 400 à 500 °C.
- Revenu dans un domaine thermique de 500 à 800 °C. [4]

I.6/ Le Recuit :

I.6.1/ Définition et rôles du recuit :

Il est défini par un cycle thermique dont les étapes sont :

- Un chauffage jusqu'à une température de recuit.
- Un maintien isotherme à cette température.
- Un refroidissement généralement lent, qui s'opère habituellement à l'air où on utilise un milieu assurant une vitesse de refroidissement plus faible (four...).

I.6.2/ Effets du recuit :

Le recuit amène le métal en équilibre physico-chimique initial, et tend à réaliser l'équilibre structural.

Donc, il a pour but de faire disparaître les états hors d'équilibre résultant de traitements antérieurs, thermiques ou mécaniques.

L'état de recuit correspond aux valeurs maximales des caractéristiques de ductilité, et aux valeurs minimales des caractéristiques de résistance. On distingue les principaux recuits:

- Recuit d'homogénéisation qui détruit l'hétérogénéité chimique.
- Recuit de régénération, qui affine le grain.
- Recuit d'adoucissement.

- Recuit de stabilisation.
- Recuit de recristallisation, qui se pratique sur les produits et pièces écrouis.

I.7 / traitements superficiels :

I.7.1/ introduction :

On désigne ces traitements variés qui visent à améliorer les propriétés mécaniques de la couche externe d'une pièce, et surtout sa résistance au frottement et à l'usure.

Il serait évidemment souhaitable qu'un acier de construction soit simultanément de haute caractéristiques de résistance (R , R_e , H limite de fatigue) et de haute caractéristiques de ductilité (A , K), mais ces exigences sont inconciliables avec un métal homogène, puisque, dans ce cas, les caractéristiques varient en sens inverse, la première condition est réalisée par trempe suivie de revenu à basse température et implique un acier riche en carbone. La seconde condition s'obtient à partir d'un acier pauvre en carbone recuit. Il y a donc une double contradiction au point de vue nature de l'acier, et au point de vue traitement thermique.

Le traitement thermique classique appliqué aux aciers au carbone ne fait que réaliser un compromis en donnant une résilience convenable, mais avec une dureté qui peut être insuffisante pour certaines applications, car le titre en carbone dépasse rarement 0.5 %.

Cette amélioration reste souvent insuffisante, et l'intérêt de l'opération est essentiellement d'augmenter la pénétration de trempe.

Le problème posé peut être résolu en partant d'un métal apte à prendre une grande résilience auquel on fera subir un traitement de durcissement superficiel. Ainsi le métal, maintenant hétérogène, comprendra une âme résiliente et une couche superficielle présentant simultanément une grande dureté, une bonne résistance à l'usure et une meilleure résistance à la fatigue.

Cette hétérogénéité est due essentiellement à :

- 1- soit à la modification superficielle des constituants (trempe superficielle)
- 2- soit à la création d'une couche superficielle chimiquement différente par diffusion d'un élément d'alliage à partir de la surface de la pièce (nituration, chromage électrolytique, sulfuration).
- 3- soit à un double traitement successif chimique (par diffusion) puis thermique (cémentation, cyanuration, carbonituration).

Dans tous les cas, le durcissement superficiel est dû à la présence de constituants durs. De plus, quand il y a trempe, la transformation martensitique qui se fait avec dilatation, tend à entraîner une augmentation du volume de la couche superficielle en état de compression. Ainsi le métal résistera mieux aux contraintes ultérieures de traction, et de ce fait la ténacité et la résistance à la fatigue sont améliorées.

On trouve aussi les procédés de durcissement superficiels par écrouissage mécanique (grenailage, galetage, martelage) que l'on emploie surtout pour renforcer les congés, les gorges, les fonds de filets).

I.7.2/ Trempe superficielle :

La trempe superficielle consiste à réaliser une trempe martensitique limitée à une mince couche (1 à 10 mm) sans apporter de modification au métal sous-jacent. Pour ce la, on chauffe très rapidement cette couche au-dessus de AC_3 et on refroidit immédiatement de façon que la chaleur n'ait pas le temps de se transmettre à l'intérieure afin d'y réaliser l'état martensitique superficiellement.

Les aciers utilisés, au carbone au faiblement alliés, ont une teneur en carbone variant de 0.35 à 0.5 %, limitée à 0.5 % afin d'éviter les tapures de trempe dans la couche durcie. Le traitement se fait soit sur un métal recuit, soit sur un métal sorbitique (trempé et revenu).

Les avantages essentiels que présente la trempe superficielle sont :

- l'augmentation de la dureté.
- l'amélioration de la tenue à l'usure, de la résistance de la limite de fatigue des couches superficielles de la pièce.

Le cœur de la pièce reste ductile et résiste bien aux charges dynamiques. Il est fréquent qu'on pratique la trempe superficielle par différentes méthodes :

- par chauffage aux courants de hautes fréquences.

Alors que l'utilisation de la trempe au chalumeau est plus rare, cette trempe convenant surtout pour de très grosses pièces.

La profondeur de pénétration du courant est donnée par la formule :

$$x = 5000 \sqrt{\frac{\rho}{m f}} \quad \text{cm}$$

ρ : la résistivité de l'acier.

μ : la perméabilité magnétique de l'acier.

f : la fréquence du courant.

I.8/ Les inconvénients du traitement thermique :

Parmi les défauts principaux qu'un traitement thermique peut produire, on peut citer les tapures extérieures et intérieures, la déformation et la gauchissement et les microfissures après la trempe.

I.8.1/ les tapures :

Les tapures se forment le plus souvent au cours de la trempe, lorsque les contraintes internes de traction dépassent la résistance de l'acier à décohésion.

L'aptitude à la formation des tapures s'accroît avec l'augmentation de la teneur de l'acier en carbone, l'élévation de la température et l'accélération du refroidissement dans l'intervalle de température de la transformation martensitique.

Les tapures peuvent encore résulter de la concentration des contraintes élastiques locales.

Les tapures sont un défaut incorrigible.

I.8.2/ déformation et gauchissement :

La déformation qui résulte de la modification des dimensions et de forme de la pièce enregistrée au cours d'un traitement thermique, et l'effet des changements de volume provoqués par des transformations de phase non homogène, ainsi que des contraintes thermiques et structurales.

Le gauchissement s'observe surtout lorsque le chauffage est irrégulier ou trop poussé, ainsi que le positionnement défectueux de la pièce immergée et la vitesse de refroidissement trop grande dans l'intervalle de température martensitique. L'élimination de ces causes réduit nettement le gauchissement.

I.9/ influence du traitement thermique sur les propriétés mécaniques :

La trempe suivie de revenu améliore par rapport à l'état normalisé les limites de rupture et d'élasticité, la striction et surtout la résilience.

Traitement thermique	Propriétés mécaniques				
	R (Kgf/mm ²)	R _{0.002} (kgf/mm ²)	A %	Z %	K (kgf/mm ²)
Recuit à 800°C	55	35	20	52	9
Trempe à 800°C et revenu à 300°C	130	110	12	35	3
Trempe à 800°C et revenu à 600°C	62	43	22	55	14

Tableau I.2 : propriétés mécaniques après traitements thermiques [5].

I.10 / traitement de surface :

I.10.1/ Introduction :

Les phénomènes d'usure, de corrosion, et de frottement constituent, au niveau d'un ensemble important d'applications industrielles, une source d'avaries qui sont toujours redoutées tant de part des constructeurs que des utilisateurs des machines et des pièces mécaniques assurant des fonctions diverses.

L'utilisation de règles strictes de conception est très malaisée, vu l'absence de lois générales susceptibles de rendre compte des phénomènes de dégradation des surfaces par usure, grippage, fatigue et corrosion.

Les dimensionnements déduits de la résistance des matériaux, s'ils s'appliquent bien à une structure continue quasi homogène et /ou isotrope, ils ne prennent pas en compte les caractéristiques microstructurelles et microgéométriques des interfaces des systèmes et des pièces mécaniques en mouvement relatif.

I.10.2/ Notion de traitement de surface :

la notion de traitement de surface se ramène souvent dans l'esprit de multiples utilisateurs, à celle d'un traitement (physico-chimique), comme la cémentation ou le chromage. Cette vue est trop restrictive et donc, sous la dénomination (traitement de surface) la norme AFNOR fait référence à toutes les opérations mécaniques, physiques, chimiques ou électrochimiques, qui ont pour résultat de modifier l'aspect ou la structure de la surface des matériaux, en vue de l'adapter à des conditions d'utilisation spécifique. [6]

I.10.3 / But du traitement de surface :

Le but d'un traitement de surface pourra donc être très particulier et concerne en toute généralité la résistance à la corrosion (sèche ou électrolytique), la conductibilité, les propriétés optiques, la résistance au frottement ou à l'usure par frottement.

La synthèse des filières de traitement de surface contre l'usure, peut être considérée en faisant appel à divers conditionnements résumés dans l'organigramme suivant :

ORGANIGRAMME

L'état de surface d'un matériau pourra être définie d'une manière en relation avec les conditions d'utilisation.

En effet, on peut en donner une définition purement physico-chimique si l'on s'intéresse avant tout à la réactivité à la fois physique et chimique de celle-ci : les vitesses de diffusion à l'état solide dans les différentes couches superficielles, la solubilité mutuelle des matériaux en présence, la vitesse d'oxydation, la conductibilité, le pouvoir réflecteur dans l'aptitude à cette réactivité.

Les propriétés de résistance à l'usure, au frottement et à la corrosion sont dans d'autres analyses reliées essentiellement à l'état de surface défini topologiquement. Pour un matériau donné, l'état de surface sera alors décrit par plusieurs paramètres géométriques faisant appel aux notions de profondeur moyenne de rugosité R_p , de rugosité moyenne arithmétique R_a ou encore de rugosité moyenne quadratique R_{ms} .

Plus fréquemment encore, la surface est décrite de manière mécanique par ces caractéristiques de dureté de frottement. On définira ainsi un coefficient de glissement f , valeur de rapport entre la force tangentielle T et la force normale N , agissant sur les surfaces en mouvement.

On introduira également, un coefficient d'adhérence f_0 supérieur à f , correspondant à la mise en mouvement des surfaces.

En fin, dans une approche plus métallurgique, on aura recours à une définition de la surface, en adoptant des critères microstructuraux.

I.10.4 / Facteurs de qualité d'un traitement de surface :

La tenue mécanique d'une surface est un facteur très décisif. La surface supporte non seulement des sollicitations spécifiques de frottement et d'usure mais également des déformations localisées pouvant entraîner des phénomènes de rupture (rupture fragile, rupture de fatigue ou de corrosion sous tension). Il en résulte que la qualité mécanique d'un traitement de surface conditionne souvent son efficacité future, particulièrement en matière de protection.

La résistance à l'usure et au frottement étant fonction des surfaces effectives en contact, une surface (rugueuse) conduira à des effets de frottement très localisés pouvant aboutir à la fusion locale du métal et au (grippage).

Un autre paramètre agissant sur la tenue mécanique de surface est celui des contraintes résiduelles liées aux phénomènes de diffusion avec le substrat (formation d'oxydes de volume moléculaire différent de celui du métal). Les contraintes

résiduelles peuvent cependant être bénéfiques lorsque la surface est soumise à un état de compression qui réduit les phénomènes de développement de défauts.

I.10.5/ Description des principaux traitements :

La connaissance des paramètres de base de traitement de surface, permet d'aborder leur description de vue logique et de regrouper en une même famille des mises en oeuvre mettant en jeu des mécanismes fondamentaux identiques. La classification adoptée est principalement basée sur ces mécanismes. D'autres classifications sont possibles si l'on adopte comme paramètres de similitude, par exemple, le but recherché, la nature du traitement, ou encore le procédé.

I.10.5.1 / Traitement mécanique et thermique de surface :

Ces traitements ont pour objet, soit de préparer la surface pour un traitement postérieur, soit de lui conférer des propriétés mécaniques mieux adaptées que le volume du matériau.

L'écrouissage crée dans les zones les plus superficielles une consolidation du matériau, dont la surface est portée en général dans un état de compression : celle-ci présente en principe une plus grande dureté et une plus grande résistance à la fissuration. Dans d'autres cas, l'écrouissage superficiel peut induire des transformations structurales. La formation de martensite de déformation à la surface des aciers austénitiques métastables, est un procédé efficace de durcissement.

Dans un grand nombre d'applications (pièces d'usure et de frottement , outils de mise en forme) , il est indispensable de réaliser un matériau très ductile dans sa masse et de haute dureté en surface, un simple traitement thermique peut obtenir à un durcissement superficiel suffisant : le chauffage par induction est fréquemment utilisé pour ce type d'utilisation par suite d'un effet pelliculaire que l'on peut parfaitement maîtriser en jouant sur divers paramètres électriques , géométriques ou métallurgiques.

I.10.5.2 / Traitements électrolytiques et chimiques :

Ces traitements concernent non seulement des applications pour résister aux frottements et à l'usure, mais également le domaine de résistance à la corrosion et de la protection contre la corrosion.

Les dépôts par électrolyse sont utilisés en raison de leur grande souplesse car on dispose d'une grande variété de paramètres pour modifier la structure et l'épaisseur des revêtements (composition des bains, densités de courant, tension, temps de dépôts).

En, dehors des métaux précieux, de nombreux revêtements métalliques sont effectués par voie électrolytique : Cu , Ni, Zn, Cr, Sn,... .

Vue la variété des procédés, Une énumération des bains électrolytiques et des conditions de dépôts serait fastidieuse et nécessairement incomplète.

I.10.5.3 /Traitements par diffusion :

Ces traitements font appels à des réactions du type gaz- métal, liquide- métal ou encore soilde-solide. Nous distinguerons, les cas d'applications suivants :

I.10.5.3.1/ La carburation (cémentation) :

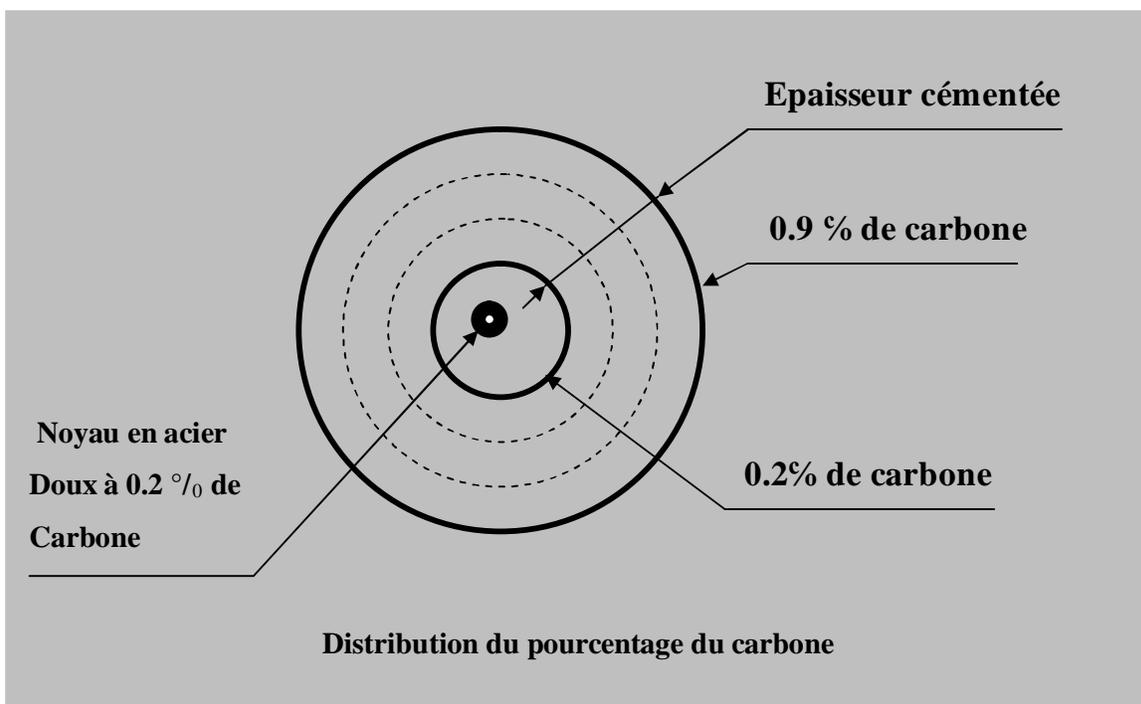
La carburation superficielle des aciers, appelée (cémentation) .s'effectue en phase γ . Le procédé le plus ancien consistait à mettre en contact l'acier avec du graphite ou un carbonate.

Plus récemment des procédés de cémentation en atmosphère contrôlée, (CO , CO_2 , CH_4 , C_3H_8) se sont développés.

La décomposition des hydrocarbures présents à la surface du métal fourni le carbone recherché.

Après traitement de cémentation, l'acier est trempé, ce qui transforme la couche cémentée en martensite de haute résistance mécanique. Les traitements de carburation en phase gazeuses ont été récemment appliqués pour la protection par une couche de carbure, protectrice et très dure pour les métaux réfractaires oxydables.

Donc, on a pour but de faire absorber, superficiellement du carbone par l'acier doux de façon à constituer un alliage hétérogène ayant à la surface une teneur en carbone. [7]



Les différents procédés d'enrichissement en carbone :

C'est l'étape thermochimique du traitement. On forme à la surface de l'acier (teneur initiale en carbone 0.1 à 0.2 %) une couche plus ou moins profonde enrichie en carbone.

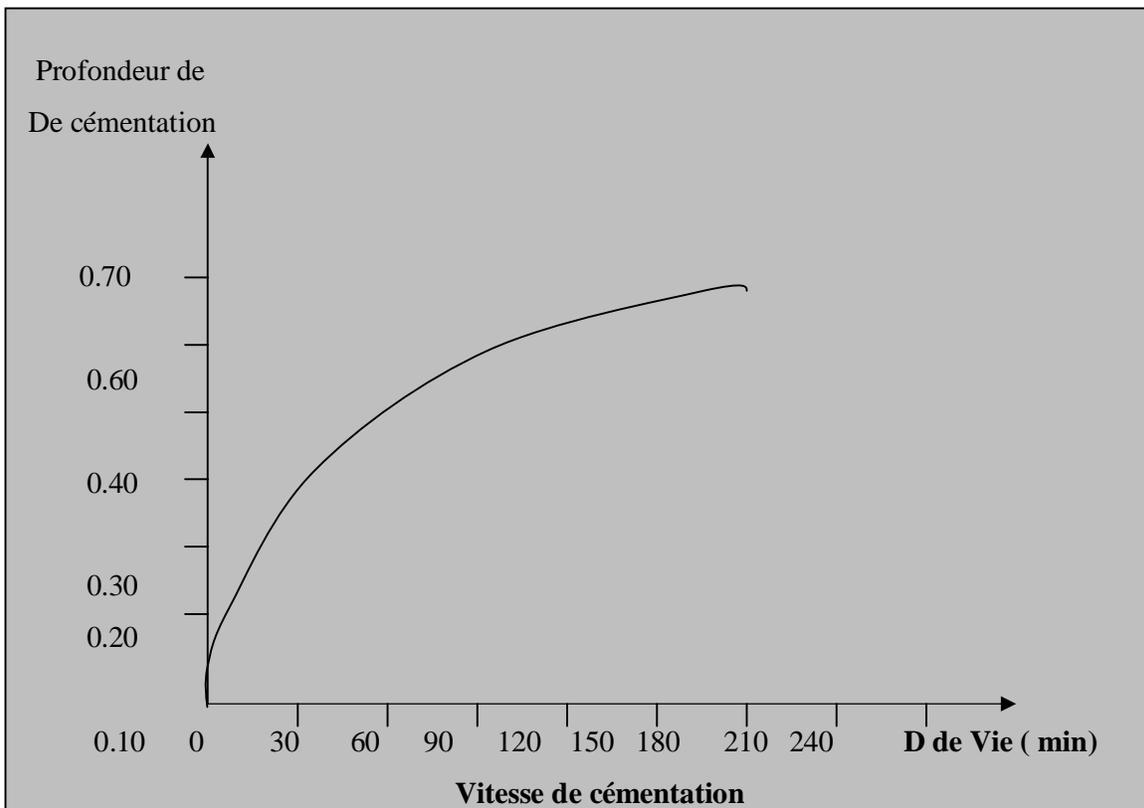
Les teneurs atteintes en surface varient selon les applications de 0.7 à 1.2 % C

Principaux ciments utilisés :

Pour la réalisation de l'enrichissement, les ciments utilisés peuvent être ; solide , liquide ou gazeux .

Etat	Les porteurs de carbone	Les activants
Cément solide	Le coke Le carbone de bois	Carbonate de baryum
Cément liquide	Le cyanure de sodium	Des sels contenant de chlorures alcalins
Cément gazeux	Gaz de ville Gaz naturel Méthane	Propane

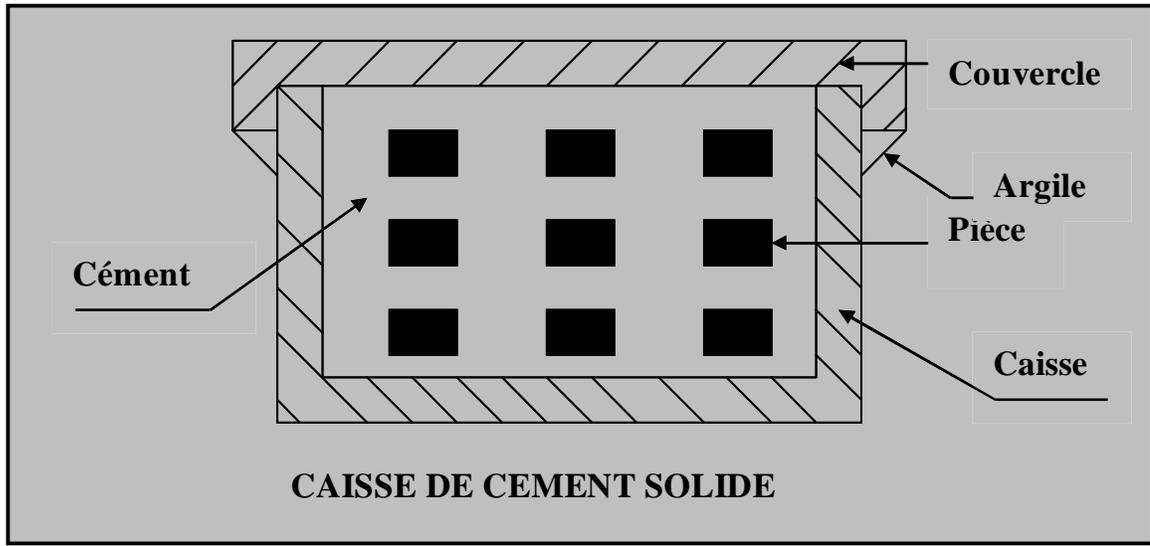
La courbe suivante présente la vitesse de pénétration (vitesse de cémentation)



Cémentation par ciment solide : le ciment le plus utilisé est ce lui de carbone
(60 % de carbone de bois et 40% de carbone de baryum $BaCO_3$).

Mode opératoire

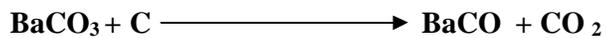
Après décapage préalable des pièces, ces dernières et le ciment sont placés dans des caisses de fer dont les bords des couvercles sont mastiqués avec de l'argile réfractaire, comme le montre la figure ci-dessus .



Dans les conditions précédentes, l'oxyde de carbone se forme par réaction entre le carbone de bois et l'oxygène de l'air occlus dans le ciment,



Le carbone ainsi obtenu est atomique. Au moment de sa formation, il diffuse dans l'austénite. L'addition des carbonates de baryum rend le ciment plus actif et enrichit l'atmosphère en oxyde de carbone :



I.10.5.3.2 / La nitruration :

A la différence de la carburation basée sur une mise en solution, la nitruration des aciers tend à réaliser la formation d'un composé superficiel, de nitrure dont les propriétés mécaniques sont élevées. La nitruration s'effectue à température modérée (500 à 650°) dans des atmosphères contenant de l'azote.

Les avantages et les propriétés des pièces après le traitement de nitruration peuvent être discutés de la façon suivante :

- La dureté des pièces nitrurées est supérieure à celle des pièces trempées.
- La résistance à l'usure par suite de cette dureté s'améliore, la qualité des frottements est améliorée, entraînant une diminution des risques de grippage.
- Les aciers nitrurés sont inoxydables à l'air humide et à l'eau douce.
- La nitruration s'effectuant à température relativement basse, aucune déformation des pièces n'est à craindre.
- La couche nitrurée présente le plus souvent une résistance à la corrosion et à la fatigue.

I.10.5.3.3/ La carbonitruration :

il s'agit d'un traitement mixte qui s'effectue par adjonction d'ammoniac à l'atmosphère de cémentation .Le phénomène principal est la carburation , associée à la nitruration qui intervient pour provoquer un durcissement , ainsi on obtient un complément de protection contre l'usure et la corrosion .

I.10.5.3.4/ La chromisation :

Ce procédé de métallisation est la mise en contact du métal avec une atmosphère d'iodure ou de fluorure de chrome. Celle -ci est régénérée par réaction de l'halogène sur du chrome métallique disposé en granules. Le domaine de travail en température est de l'ordre de (850° à 1100°C).

Dans le cas du fer ou d'un acier doux, il se forme une couche de ferrite chargée en chrome de 10 à 100 microns. Compte tenu des faibles vitesses de diffusion du chrome dans l'austénite, presque tout le chrome reste fixé dans cette couche qui, a pour caractéristique d'être inoxydable, ductile et brillante.

I.10.5.3.5/ La sulfinisation :

La sulfinisation ou cémentation par le soufre, confère, à la surface des pièces traitées une haute résistance à l'usure et à la fissuration sous accroissement de dureté.

Pour sa réalisation, les pièces sont chauffées dans un creuset contenant du cyanure et des sels dévers du soufre, qui sont portés à une température inférieure au point de transformation AC_1 des aciers à traiter. Le refroidissement s'effectue dans de l'eau très chaude (80°C).

Après traitement, les pièces sont recouvertes d'un dépôt rugueux de sels solidifiés que l'on peut enlever par brassage ou sablage.

Ce type de traitement de surface est surtout utilisé pour les pièces de frottement, pièces qui servent de contact mobile. Il peut être aussi appliqué à tous les alliages ferreux, car il ne provoque pas de déformations, et cela en raison de la température moyenne de chauffage.

Chapitre II

Les traitements par revêtement.

II / Les traitements de surfaces par revêtement :

II .1 /Introduction :

La notion de traitement de surface par revêtement est une technique de plus en plus utilisée. Elle consiste à augmenter les propriétés à la surface par dépôt d'un film très mince (de quelque Å à quelques microns). Cette couche mince appelée revêtement, peut être utilisée afin d'augmenter la dureté, d'assurer la protection contre la corrosion ou d'améliorer les propriétés physiques particulières ou, en fin dans un cadre décoratif.

Les qualités recherchées peuvent être très différentes selon l'application considérée et la destination de l'utilisation de la pièce.

Actuellement L'industrie présente de différents procédés et techniques de dépôt de revêtement, parmi les quels on peut citer :

- Revêtement par voie électrolytique.
- Revêtement par voie chimique.
- Revêtement par évaporation.
- Revêtement par pulvérisation.

II.2/ Méthode général de traitement de surfaces par dépôt de revêtement :

II.2.1/ Revêtement par voie électrolytique :

II.2.1.1/ définitions :

II.2.1.1.1/ l'électrodéposition : c'est l'opération qui consiste à recouvrir d'un revêtement métallique, déposé par l'action d'un courant électrique, une pièce immergée dans une solution électrolytique.

L'ensemble des techniques des dépôt électrolytiques est aujourd'hui désigné par le terme général (galvanoplastie).

II.2.1.1.2/ la métallisation : regroupe l'ensemble des opérations permettant de recouvrir la surface d'un objet, même non métallique par un dépôt métallique, par voie thermique, chimique ou électrolytique.

II.2.1.1.3/ l'électrolyse : désigne l'opération qui consiste à décomposer une solution par l'action d'un courant électrique.

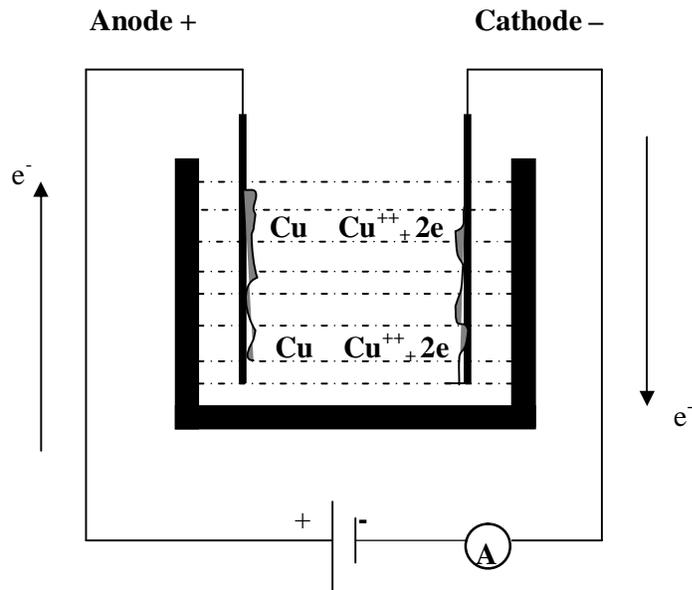


Figure II-1 : schéma du bain d'un revêtement électrolytique.

II.2.1.1.4/ la métallisation par cémentation : c'est la saturation superficielle de l'acier en aluminium, chrome, bore et autres éléments.

II.2.1.2/ Procède du dépôt :

L'électrolyse est utilisée pour déposer une ou plusieurs couches métalliques sur une surface de métal.

Le principe de réalisation d'un dépôt électrolytique est comme suit : la pièce à recouvrir est placée dans un bac à électrolyse, pour jouer le rôle d'une cathode sur laquelle viennent se déposer des ions métalliques.

La couche obtenue a bien évidemment des caractéristiques précises qui dépendent des différents paramètres du mécanisme électrolytique. Et cela, aussi bien en ce qui concerne sa structure que ses propriétés :

Nous pourrions considérer deux sortes de procédés qui sont :

- La galvanoplastie : le dépôt métallique est réalisé sur une cathode métallique qui constitue un moule.
- La galvanisation : la pièce métallique est recouverte par un film de nature différente afin de lui conférer certaines caractéristiques.

Il est évident que les caractéristiques ne seront pas les mêmes pour un dépôt destiné à protéger une masse métallique de la corrosion et un dépôt réalisé en vue de la décoration d'une pièce.

II.2.1.3/ Facteurs d'un dépôt électrolytique :

- Conductibilité des électrolytes
- nature de l'électrolyte.
- Agitation.
- Température.
- Densité de courant.
- PH du bain.
- Concentration du bain.
- Métal sur lequel s'effectue le dépôt.

II.2.1.4/ Le brillant des revêtements :

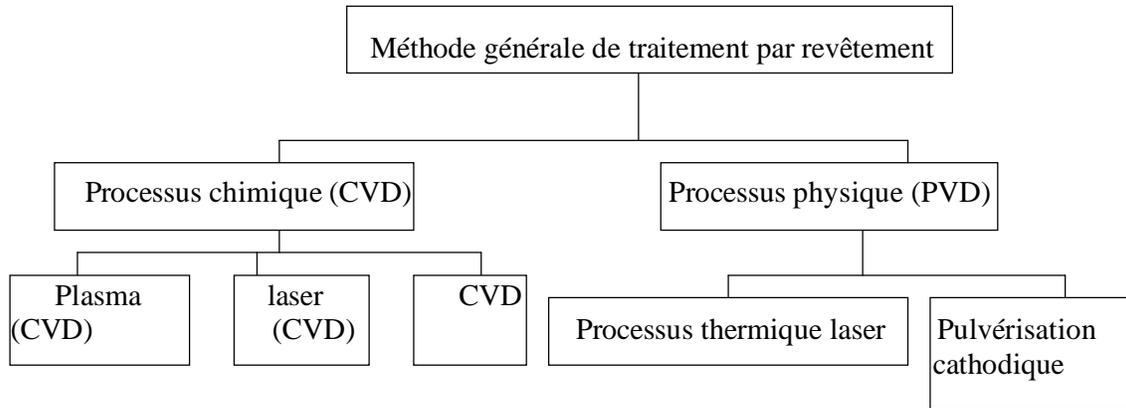
Le brillant est une des qualités fondamentales recherchée d'un dépôt, à plus forte raison s'il s'agit d'un revêtement décoratif. Physiquement, le brillant d'une surface est caractérisé par le fait que la lumière qu'elle reçoit n'est pas uniformément diffusée dans toutes les directions, mais elle est fortement réfléchiée dans une direction déterminée. [8]

II.2.1.5/ Principaux dépôts électrolytiques :

Les principales opérations de métallisation des surfaces sont :

- Cuivrage
- Laitonnage
- Argenture
- Dorure
- Nickelage
- Chromage
- Zincage
- Plombage
- Etamage
- Oxydation anodique de l'Aluminium.

La classification des différents procédés de dépôt de revêtement employés est présentée par le schéma suivant : [9].



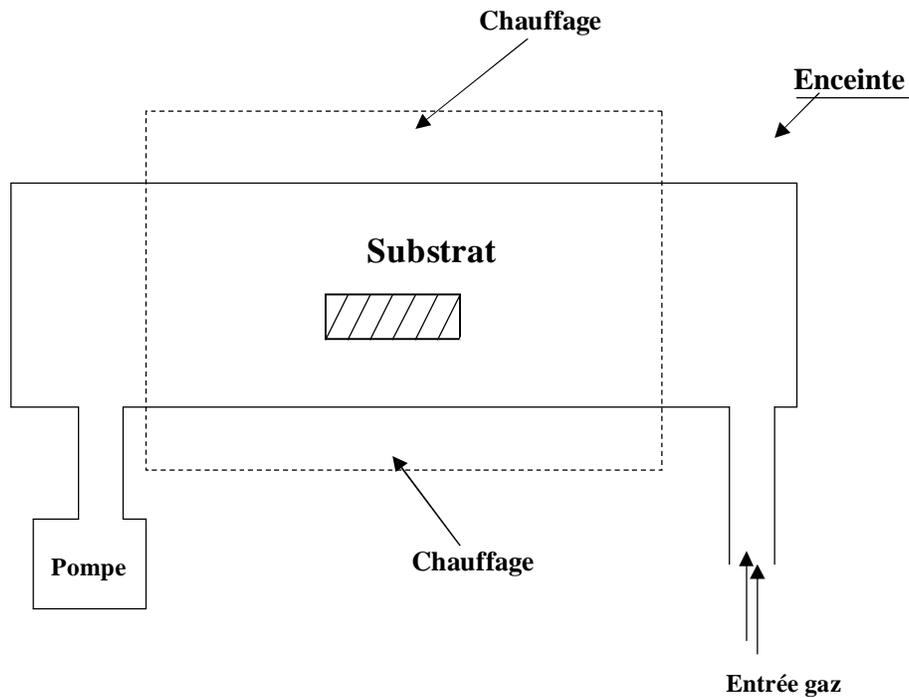
Organigramme II-1 : la classification des différentes méthodes de revêtement

II.2.2/ Dépôt en phase vapeur chimique (CVD) :

Le dépôt en phase vapeur chimique est une méthode dans la quelle le ou les constituants d'une phase gazeuse réagissent pour former un film solide déposé sur un substrat. Les composés volatils du matériau à déposer sont éventuellement dilués dans un gaz porteur et introduit dans une enceinte où sont placés les substrats. Le film est obtenu par réaction chimique entre la phase vapeur et le substrat chauffé. Dans certains cas, une élévation de température est nécessaire pour maintenir la réaction chimique. Le procédé CVD est un domaine interdisciplinaire, il comprend un ensemble de réaction chimiques, un processus thermodynamique et cinétique, un phénomène de transport [10]. La réaction chimique est au centre de ces disciplines : elle détermine la nature, le type et les espèces présents. Pour ce procédé, il existe deux types de réacteurs à savoir :

- 1- le réacteur à paroi chaude.
- 2- le réacteur à paroi froide.

Dans le cas du réacteur à paroi chaude, ce dernier est chauffé directement, ce qui permet d'opérer à plus faible pression : à peu près 75m torr, pour lesquels des dépôts se produisent bien sur les substrats, mais aussi sur les parois (technique LPCVD : low pressure chemical vapor deposition. [11])



FigureII-2 : schéma de principe de dépôt en phase vapeur chimique, Cas du réacteur à paroi chaude

A titre d'exemple, le dépôt d'une couche de tungstène réfractaire, peut se faire à l'aide d'une méthode d'écrite par la réaction suivante :



Cette formule implique que si l'on mélange deux gaz **WF** et **H₂**, une couche de tungstène peut être obtenue. Avec la méthode CVD, il est possible de déposer des matériaux métalliques, diélectriques et composites, comme il est montré dans les tableaux suivants :

Matériaux à déposer	Méthode CVD	Température °C
Al	$3AlCl_3 \rightarrow 2Al + AlCl_3$	
Cu	$CuCl_2 + Fe \rightarrow Cu + FeCl_2$	500-1000
Au	$3AuCl_3 \rightarrow Au + AuCl_3$ décomposition d'AuCl ₃ par chauffage	450 400-1100
Ge	$2GeCl_4 \rightarrow Ge + GeCl_2$ décomposition de GeCl ₄ par chauffage	1100-1400 1200-1500
Ti	$TiCl_4 + H_2$	1100-1400
W	$WF_6 + H_2$ $WCl_6 + H_2$ Décomposition de W(CO) ₆ par chauffage	400-700 600-700 350-600

Tableau II-1 : matériaux métalliques et diélectriques obtenus par CVD.

La réaction chimique peut être activée à l'aide d'un plasma. Dans ce cas, cette méthode s'appelle CVD plasma ou PECVD.

L'obtention de couches minces métalliques grâce à ces méthodes s'est particulièrement développée. Les avantages de ce procédé peuvent être énumérés comme suit :

- facilité d'obtenir un assez grand nombre d'éléments ou de composés chimiques.
- On obtient une bonne qualité des couches.
- Un excellent recouvrement des marches.
- Une bonne adaptabilité dans une chaîne de production.
- Elle offre la possibilité de réaliser des dépôts sélectifs. [12]
- Ce qui permet d'éliminer une étape de graveure et de planarisation de surface.

Par contre, les inconvénients toucheront les films déposés qui sont peu denses, souvent contaminés par des gaz très réactifs issus de la réaction chimique (hydrogène, fluor, chlore), qu'une grande partie des matériaux ne peut-être déposée par CVD, en fin le système de dépôt présente une mise en œuvre relativement lourde.

II.2.2.1/ les techniques de revêtement par CVD:

Mis au point vers 1968, le CVD est un procédé fondamentalement différent des procédés précédents puisqu'il est basé sur une série de réactions chimiques dans une enceinte placée à haute température de l'ordre de 950 à 1000 °C. Le dispositif se compose de la façon suivante : un générateur de gaz porteurs (**Fig.II-3**), une centrale de régulation des gaz comprenant un mélangeur des débitmètres volumiques ou massiques, et un système de purification des gaz, forme de tamis moléculaires et d'assécheurs chimiques ;

Une enceinte de dépôt à parois chaudes en acier réfractaire inoxydable, Un dispositif de chauffage régulé en plusieurs zones afin d'obtenir un contrôle et une homogénéité parfaite en température dans le réacteur de traitement, Un ensemble de distribution des gaz qui permet un écoulement laminaire sur la totalité des surfaces à revêtir, Un système de neutralisation des gaz corrosifs, ces produits pour la plupart chlorés sont issus des réactions chimiques. Ces gaz polluants sont piégés par des absorbants se trouvant à la sortie de l'installation.

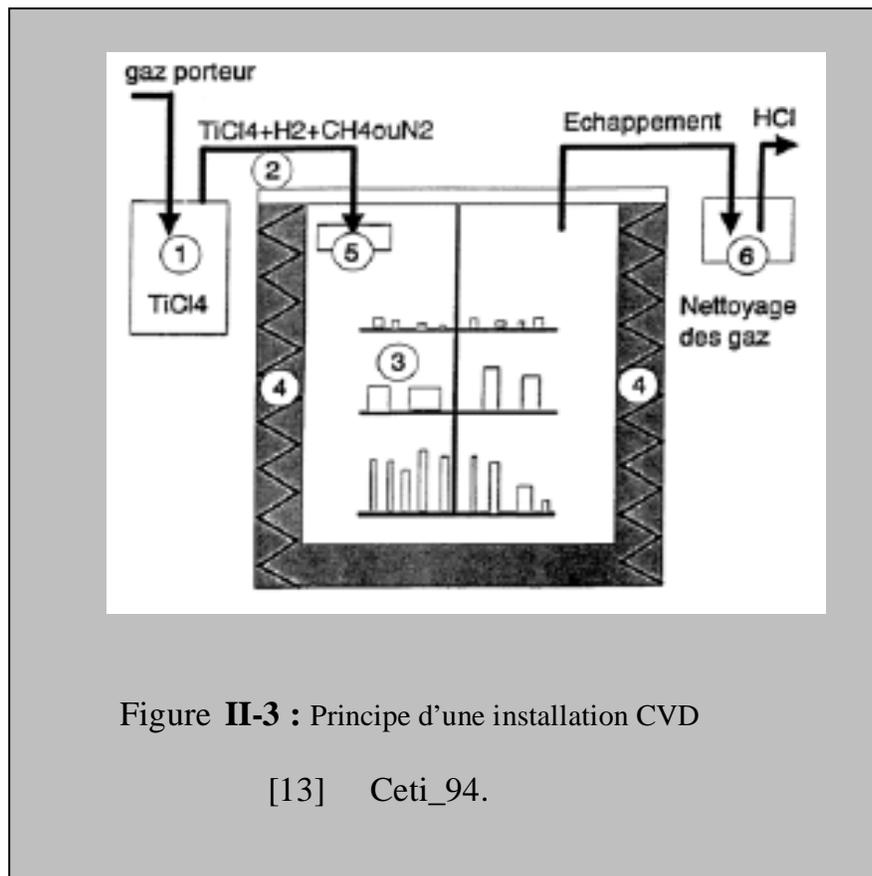
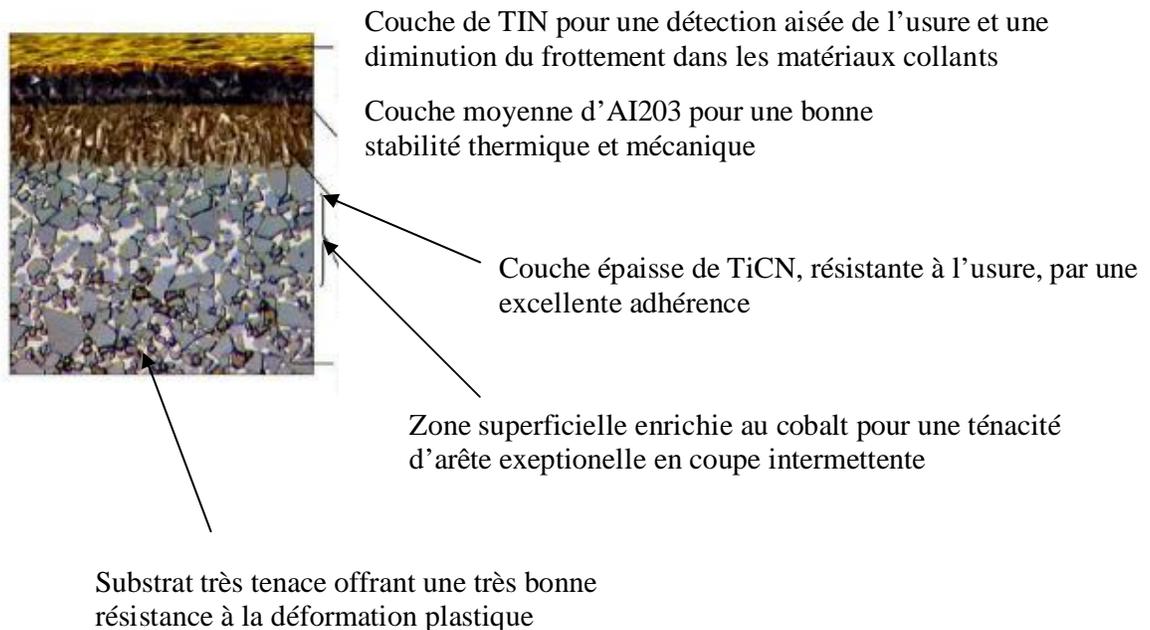


Figure II-3 : Principe d'une installation CVD

[13] Ceti_94.

Les revêtements de la famille des TiC, TiN, Ti(C,N) sont créés par une même famille de gaz mais en proportion variable : H₂, TiCl₄, CH₄, N₂. Les dépôts d'alumine sont quant à eux issus de la réaction des gaz suivants : H₂, AlCl₃, CO₂. Ce procédé permet de réaliser une très grande variété de couches, ainsi que des couches à gradient de composition (passage continu d'une couche de TiC à une couche de Ti(C,N) et enfin une couche de TiN), et des revêtements multicouches en faisant varier dans le temps la composition des gaz (**figureII-4**) : TiC, TiCN, Al₂O₃, TiN). Le contrôle de la stoechiométrie est très simple.



FigureII-4 : Exemple de couche déposée par CVD sur un substrat carbure (NuanceGC4035 de Sandvik).

La première couche déposée sur les substrats carbures est souvent du TiC, car il possède une très grande affinité avec le carbure (même nature chimique que les composés du substrat fritté). Ce procédé est extrêmement utilisé pour le dépôt sur des outils en carbure, mais n'est quasiment pas utilisé pour le revêtement d'outils en acier rapide. En effet, les très hautes températures provoquent un revenu de l'acier rapide, ce qui lui fait perdre ses propriétés mécaniques.

Les hautes températures sont également dommageables à la fragilité de la couche externe des outils carbures, ainsi qu'à l'adhésion des couches. Ceci est dû à la

formation d'un composé externe $\text{Co}_x\text{W}_y\text{C}_z$ [14]. Cela est compensé partiellement en dopant la couche externe du substrat en cobalt.

En CVD, on peut obtenir des couches de structures granulaires colonnaires (**figureII-5**) lorsque l'on dépose à haute température, alors que l'on obtiendra des couches granulaires à basse température. La structure colonnaire est plus fragile car elle a tendance à se décohésionner lors du travail aux chocs. On privilégie les structures granulaires plus fiables.

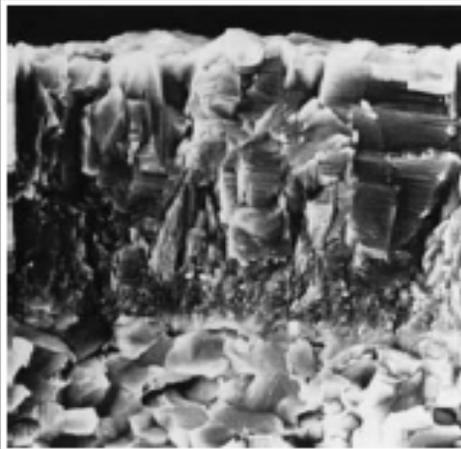


Figure II-5 : Exemple de Revêtement à structure colonnaire
Obtenu par CVD. [15]
[Balz_01].

Les dépôts CVD ont généralement des épaisseurs de 5 à 12 μm . Un des problèmes majeurs du CVD est le manque d'acuité d'arête du fait de l'importante épaisseur de la couche déposée.

Les films déposés par CVD possèdent fréquemment un état de contraintes résiduelles en tension, ce qui les rend sensibles à la fissuration.

II.2.3/ les techniques de revêtement par PVD :

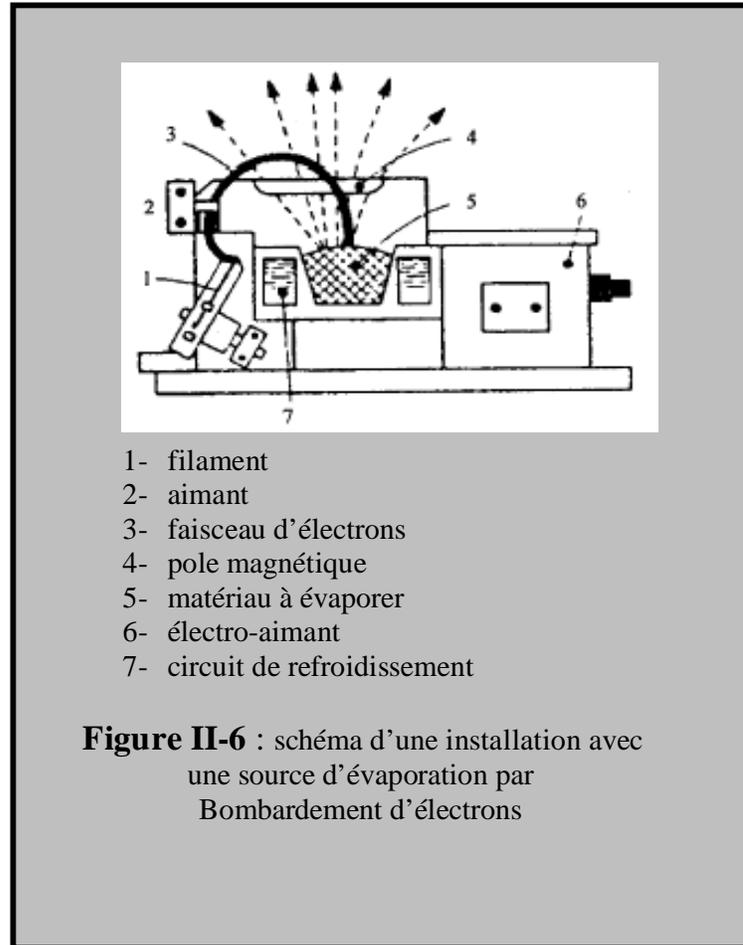
Cette technique consiste à chauffer sous vide le matériau que l'on veut déposer. Les atomes du matériau à évaporer reçoivent de l'énergie calorifique, c'est-à-dire que leur énergie vibratoire dépasse l'énergie de liaison et provoque l'évaporation. Le matériau évaporé est alors recueilli par condensation sur le substrat à recouvrir. Les principales techniques se différencient par le mode de chauffage du matériau. Le processus thermique, lors de l'élaboration de la couche de revêtement, se base sur les différents procédés d'évaporation du matériau.

Le dépôt en phase vapeur physique PVD présente beaucoup d'avantages par rapport au dépôt CVD, par exemple les couches sont denses, le processus est facile à contrôler et il n'y a pas de pollution des couches déposées. Dans ce procédé de dépôt, on distingue les processus thermiques et la pulvérisation cathodique. [17]

II.2.3.1/ Evaporation par bombardement d'électrons

Le matériau à évaporer est placé dans un creuset en cuivre refroidi par eau et bombardé par un faisceau d'électrons de 1 à 10 keV (**figure 1I-6**). Les sources d'évaporation par bombardement électronique les plus couramment utilisées comportent : un filament en tungstène chauffé à haute température (de 2500 °C à 2800 °C), et qui de ce fait, émet des électrons. Ces électrons sont accélérés par un champ électrique de quelques kV/cm créé par une anode placée devant et percée d'un trou pour laisser échapper le faisceau d'électrons. La déflexion du faisceau est contrôlée grâce à des bobines magnétiques qui permettent un balayage de toute la surface du creuset.

Ce procédé permet l'évaporation rapide de tous les types de matériaux, même les plus réfractaires, et offre la possibilité de déposer plusieurs matériaux (pour former des alliages), placés séparément. [18]



II-2-3-2/ Evaporation par effet joule :

Dans ce mode d'évaporation la température de chauffage assurant l'évaporation du matériau à déposer contenu dans un creuset en graphite ou en alumine est obtenue à l'aide d'un filament réfractaire par effet joule.

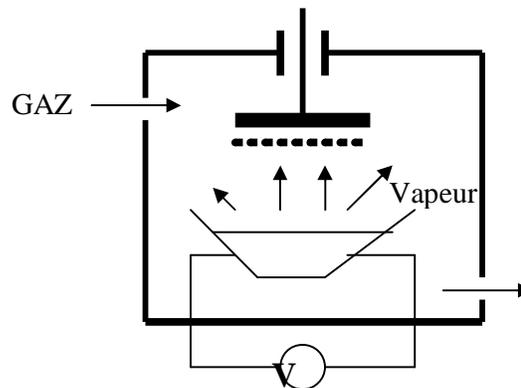


Figure II-7: chauffage par effet joule [19]

II.2.3.3/ Evaporation par arc électrique

L'évaporation est réalisée par une décharge électrique entre le creuset (cathode) et une anode.

II.2.3.4/ Evaporation par induction

Dans ce cas, le matériau à évaporer est placé dans un creuset en matériau diélectrique. Ce creuset est entouré d'une bobine alimentée en courant alternatif haute fréquence, qui induit des courants électriques dans le matériau provoquant ainsi son échauffement.

II.2.3.5/ Evaporation assistée par faisceau d'ions (I.B.A.D)

L'évaporation assistée par faisceau d'ions (Ion Beam Assited Deposition – figure11-8) est un système relativement récent, conçu pour pallier la qualité souvent médiocre des dépôts (mauvais vieillissement, compacité médiocre...) obtenus par simple évaporation. L'évaporation assistée par faisceau d'ions met en jeu des éléments principaux :

- Une source d'ions ;
- Un évaporateur.

Les dépôts réalisés par IBAD s'effectuent sous un vide de 10^{-5} à 10^{-6} Pa.

La technique de dépôt consiste à évaporer le matériau présent dans le creuset.

Le film en cours de croissance est bombardé par le faisceau d'ions énergétiques issu d'une source plasma. L'énergie apportée par les ions est transférée aux atomes issus de l'évaporation et qui s'adsorbent à la surface de la couche [20].

En fonction de la nature des atomes évaporés et des ions plasma du Bombardement, des réactions chimiques peuvent être observées donnant naissance à des composés définis. L'avantage de cette technique est que le dépôt peut s'effectuer à température ambiante ou à toute température si l'on inclut un dispositif de chauffage ou de refroidissement de l'échantillon. Cette technique permet donc de synthétiser une multitude de matériaux ; des structures multicouches peuvent être obtenues par évaporation simultanée et localisée de plusieurs matériaux et par mouvement du substrat. Il n'y a pas de plasma en contact avec la couche en croissance, d'où une pollution minimale.

Un bâti d'évaporation peut facilement être transformé en bâti d'évaporation assistée par insertion d'une source d'ions ; il sera toujours possible d'y réaliser des dépôts par évaporation classique.

Par ailleurs, les couches déposées par évaporation peuvent parfois adopter une structure colonnaire, induisant des contraintes internes en tension. Les propriétés optiques, mécaniques et électriques des couches minces sont donc affectées par cette structure colonnaire des dépôts. Un des buts de l'assistance du dépôt par un bombardement ionique est d'éliminer cette structure colonnaire [21].

Le bombardement ionique influe de façon importante l'arrangement des atomes de la couche en formation. De nombreuses caractéristiques de la couches dépendent de ce paramètre :

- L'adhérence au substrat ;
- Les contraintes internes ;
- La composition (impuretés) ;
- Les caractéristiques optiques ;
- La résistivité électrique.

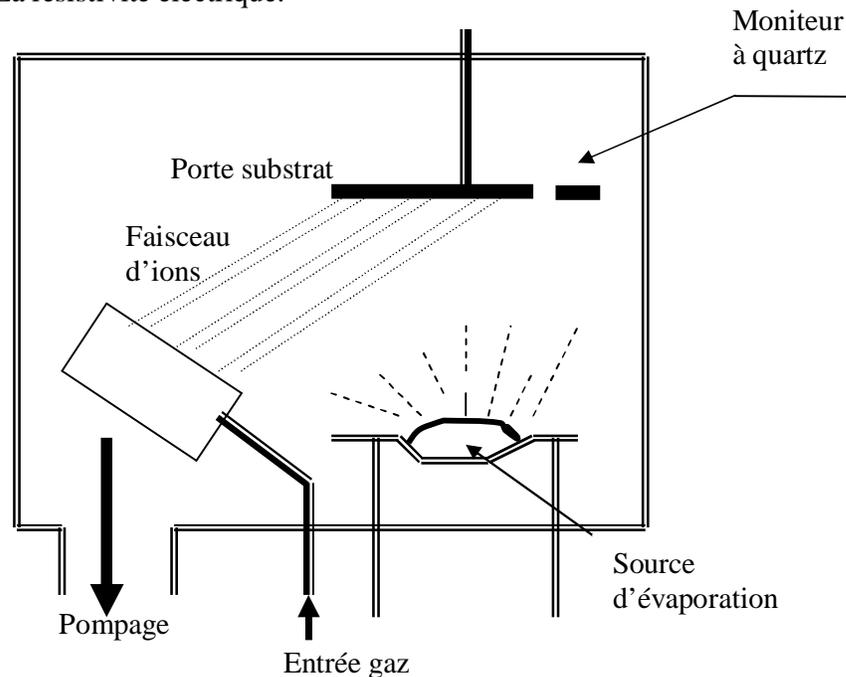


Figure II-8 : Schéma de principe de l'IBAD [SfV94]

Un avantage considérable est de pouvoir utiliser des cibles de très petites dimensions, l'évaporation se produisant sur une surface de quelques mm carrés. Cette

méthode présente l'avantage de ne nécessiter aucune source thermique polluante à l'intérieur de l'enceinte, ce qui est un avantage très significatif pour les dépôts effectués dans un environnement sous vide.

Pour tous les procédés de déposition par évaporation, la vitesse de dépôt dépend de la température de la source, de la distance entre le creuset et le substrat ainsi que du coefficient de collage des espèces évaporées sur le substrat. Cette vitesse de déposition, varie de 1 nanomètre à 10 micromètres par minutes.

Dans ce cas, on peut dire que l'évaporation est la méthode la plus simple, car il n'est pas nécessaire d'injecter un gaz pour créer un plasma, alors que autres méthodes PVD ont besoin du plasma comme intermédiaire. [22]

Cependant, il y a un problème spécifique à l'évaporation de certains matériaux il est difficile de déposer des matériaux très réfractaire ou à faible tension de vapeur.

Cette méthode ne permet pas de maîtriser facilement la composition chimique dans le cas d'un alliage par suite d'un effet de distillation du composant le plus volatil. Les couches peuvent être aussi contaminées par réaction avec le creuset, avec le filament et surtout et par le dégazage des parois induites par l'échauffement ou le bombardement des électrons.

Dans le cas de l'évaporation par faisceau d'électrons, les rayons X mous émis peuvent être à l'origine de défauts cristallins. [23]

L'évaporation reste toutefois une méthode particulièrement appréciée car elle conduit à l'élaboration de matériaux très purs et d'autant plus purs que la pression pendant le dépôt est faible.

La pression dans les systèmes d'évaporation inférieure à 10^{-6} torr pendant le dépôt.

II.2.4 / les techniques de revêtement par La Pulvérisation :

C'est en 1852 que **Grove** et plus tard **Plucker** montrèrent que l'établissement d'une décharge électrique entre deux électrodes conductrices placées dans une enceinte où règne une pression réduite de gaz inerte, entraînait l'apparition à l'anode d'une couche mince du composé constituant l'électrode antagoniste. Ce phénomène, longtemps perçu comme l'effet limitatif de la durée de vie des tubes à gaz, ne fut repris que cent ans plus tard pour être étudié et développé pour la production de couches de revêtement.

Les premiers circuits intégrés ont beaucoup contribué à ce renouveau en raison notamment des excellentes qualités mécaniques des films obtenus par ce qui a été appelé la pulvérisation cathodique. [24]

Les systèmes de pulvérisation bénéficient d'une très grande application en milieu industriel. Ils sont moins performants que le procédé CVD au niveau du nombre de couches traitées simultanément et de la vitesse de dépôt, mais incontestablement, ils sont plus simples à mettre en œuvre et ils permettent le dépôt de n'importe quel type de matériau solide à température ordinaire, surtout des matériaux difficiles à évaporer. La pulvérisation connaît aussi un grand succès dans le domaine de l'élaboration des métaux et des diélectriques. Elle a donné lieu à de nombreuses publications.

La pulvérisation est un procédé de dépôt sous vide fonctionnant à froid, en plasma luminescent, dans un gaz maintenu à pression réduite (10^{-3} à 1 torr). Il permet de déposer tous les types de matériaux, simple ou composés, réfractaire ou non, alliés, conducteurs ou diélectriques.

Tous les types de substrats, conducteurs ou diélectriques, qui acceptent une mise sous vide et un faible échauffement (50^0 à 60^0), peuvent être traités par ce procédé. Lors de la pulvérisation, le matériau à déposer appelé « matériau cible » est introduit dans l'enceinte à vide, sous forme d'une plaque de quelques millimètres d'épaisseur, et de dimension au moins égale à celle de la pièce à recouvrir. Cette cible est fixée sur une électrode refroidie (la cathode), qu'on porte à une tension négative de 1 à 6 Kv.

Une deuxième électrode (l'anode), est disposée parallèlement à la cible à une distance de quelques centimètres.

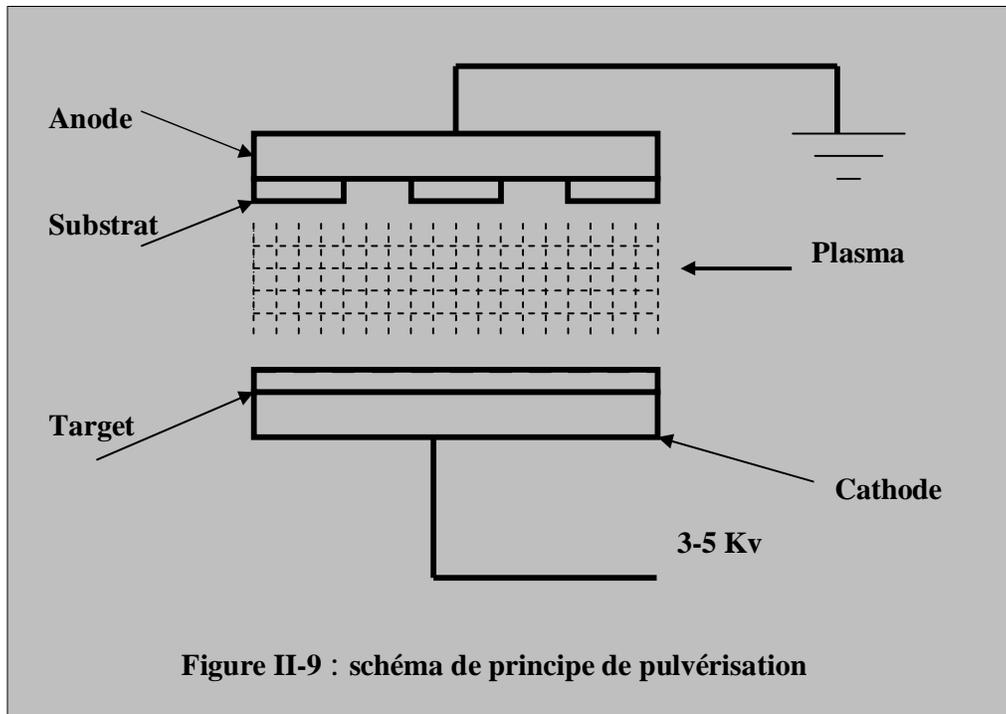
Dans de nombreux cas, l'anode sert de porte substrat, et elle est généralement reliée à la masse, ce qui facilite son utilisation.

Si la pression résiduelle dans l'enceinte est comprise entre 1 Pa et 102 Pa, le champ électrique créé entre les deux électrodes provoque l'ionisation du gaz résiduel. Cette ionisation apparaît sous forme d'un nuage luminescent, localisé entre les deux électrodes. C'est ce phénomène que l'on observe dans les tubes fluorescents. Au même moment, un courant électrique s'établit entre les deux électrodes : le gaz résiduel est devenu conducteur, il contient alors :

- des électrons, qui sont attirés par l'anode,

- des ions positifs qui sont attirés par la cible (cathode).

Si on place une pièce devant la cible, on observe que cette pièce se recouvre progressivement d'une couche du même matériau que celui de la plaque constituant la cible. Le dépôt est dû à la condensation d'atomes provenant de la cible, expulsés de celle-ci sous l'effet de l'impact d'ions positifs contenus dans le gaz luminescent, et attirés par la cible du fait de sa polarisation négative. [25].



II.2.4.1/ aspects et hypothèses de la pulvérisation

Plusieurs hypothèses ont été avancées quand au mécanisme de la pulvérisation cathodique, aucune n'étant totalement acceptable mais on peut toutefois se baser sur la théorie des moments de **Whener** :

le taux de pulvérisation cathodique dépend de la masse des ions autant que de leur énergie, il est très sensible à l'angle d'incidence des ions de bombardement.

Il existe un seuil d'énergie au dessous duquel le phénomène de pulvérisation n'apparaît pas.

Les atomes libérés par les mécanismes de pulvérisation cathodique ont une énergie supérieure à celle des atomes libérés par évaporation thermique sous vide.

Les atomes pulvérisés à partir de cibles monocristallines proviennent des directions de plus grande densité atomique.

Le taux de pulvérisation décroît à très haute énergie du fait de la pénétration plus profonde des ions dans le réseau cristallin.

Le taux d'émission secondaire sous impact ionique est faible.

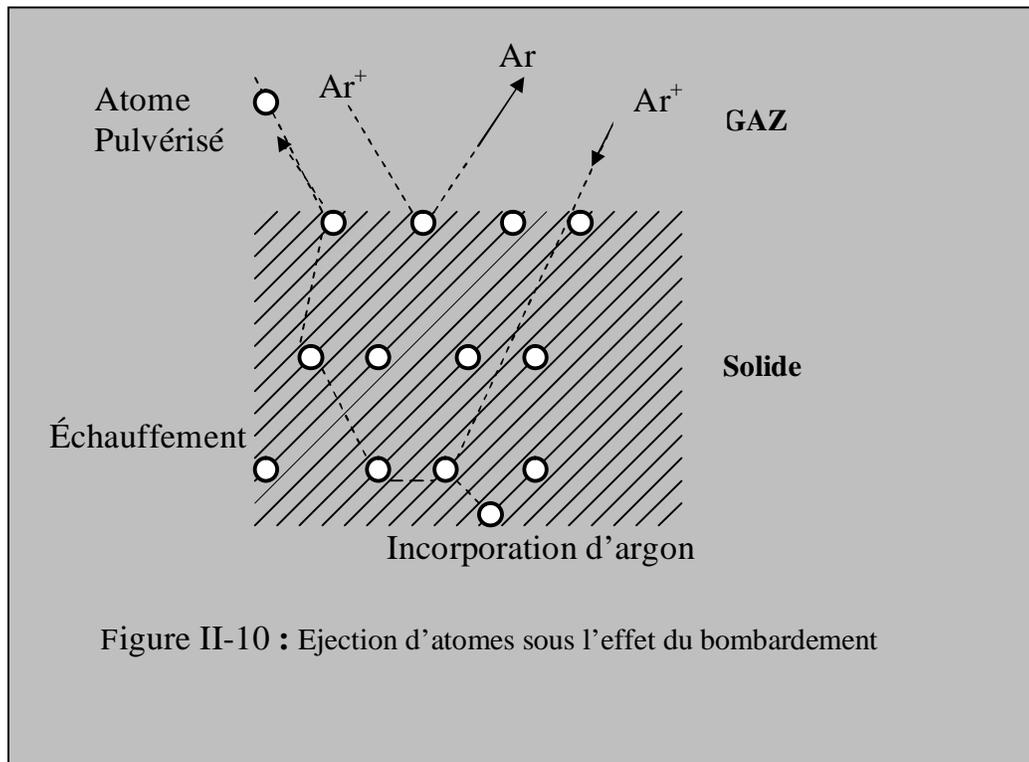
Il n'y a pas de pulvérisation sous impact électronique excepté à très haute énergie.

III.2.4.2/ Mécanisme physique de pulvérisation :

L'éjection d'atomes est un effet purement mécanique dû principalement aux chocs des ions sur le matériau que l'on veut déposer. Il se produit une espèce de sablage à l'échelle atomique. On communique aux atomes du matériau une énergie mécanique par cession de la quantité de mouvement de l'ion incident attiré par la cible.

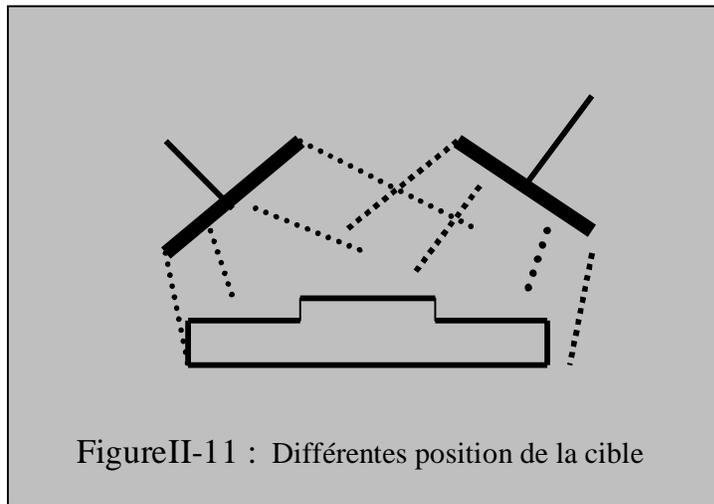
Ce phénomène à l'échelle atomique, est comparable aux chocs entre deux boules de billard, l'une est l'ion incident bombardant le matériau, l'autre est l'un des atomes du solide que l'ion va rencontrer.

Cet atome va communiquer sa quantité de mouvement aux atomes environnants et ainsi de proche en proche, jusqu'à éjecter les atomes de surface. [26]



Ce mécanisme de la pulvérisation dévoile trois caractéristiques très importantes à savoir :

- 1- Le processus étant purement mécanique, la source de dépôt reste froide, on peut donc la monter dans toutes les positions, ou lui donner une forme adaptée à celle du substrat. Dans la pratique, la cible s'échauffe du fait du bombardement ionique. On est obligé de la refroidir car une forte proportion de l'énergie des ions se transforme en chaleur. On est obligé alors de refroidir la cible.



- 2- Le caractère mécanique du processus d'éjection fait qu'un matériau cible composé de plusieurs éléments, se pulvérise aussi bien qu'un corps simple. Il arrive même assez souvent (cas de Ni -Cr) [27], que l'alliage se dépose dans la même composition que celle de la cible.

- 3- L'énergie des particules pulvérisées est en moyenne de 1 à 10 eV, ce qui correspond à des températures d'évaporation supérieures à 10000°C.

Une quantité non négligeable d'atomes est expulsée avec des énergies supérieures à 10 eV. Ils sont donc capables de pulvériser le substrat ou la couche pendant le dépôt. Cette propriété donne aux couches une meilleure adhérence au substrat que les couches par évaporation.

III.2.4.3/ Caractéristiques De la pulvérisation :

III.2.4.3.1/ Le seuil de pulvérisation :

L'effet de pulvérisation n'est sensible qu'à partir d'un certain niveau d'énergie de l'ion incident, appelé seuil de pulvérisation .ce niveau d'énergie dépend de l'ion incident et du matériau bombardé.

Il se situe toujours entre 10 et 30 ev. Comme il est montré dans le tableau suivant :

CIBLE	ION			
	Ne	Ar	Kr	Xe
AL	13	13	15	18
Ti	22	20	17	20
Cr	22	20	18	20
Fe	22	20	25	23
Ni	23	21	25	20
Cu	17	17	16	15
Mo	24	24	28	27
Ag	12	15	15	15
Au	20	20	20	18
Ta	25	26	30	30
W	35	33	30	30

Tableau III-2: Energie des ions incidents bombardant la cible.

III.2.4.3.2/ Le Rendement de pulvérisation (R) :

Le rendement se définit comme le nombre d'atomes éjectés par particule incidente.

Ce rendement va dépendre essentiellement des paramètres :

- de la nature de la cible (matériau, état de surface) ;
- de la nature des ions incidents (gaz rares de masse plus ou moins élevée, ou gaz réactif);
- de l'énergie des ions incidents;
- de l'angle d'incidence.

Il ne dépend pas de la température de la cible, ni du fait que les particules incidentes soient ionisées ou non. [28].

L'expression du rendement :

la théorie de pulvérisation a été établie par P. SINGMUND [29] , pour le cas des matériaux solides amorphes ou des polycristaux à grains très fins .

Pour cela, on considère un ion d'énergie E_0 , de masse M_1 et de numéro atomique Z_1 . cette ion pénètre dans un solide formé d'atomes de masse M_2 et de numéro atomique Z_2 , sous une incidence perpendiculaire à sa surface.

L'expression du rendement de pulvérisation R est la suivant :

$$R = 1,32 \cdot 10^{19} \cdot a \cdot \frac{a \cdot b}{\Gamma} \cdot \frac{Sn(\epsilon)}{U} \quad \text{-----} \rightarrow \quad (1)$$

avec:

$$a = 0,47 \cdot 10^{-10} \cdot [Z_1 + Z_2^{2/3}]^{1/2}$$

$$b = 4 \cdot \frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2}$$

$$\Gamma = 6,95 \cdot 10^8 \cdot \frac{1}{Z_1 \cdot Z_2} \cdot \frac{M_2}{M_1 + M_2}$$

ϵ : est une variable sans dimension déduite de E_0 par :

$$\epsilon = a \cdot \Gamma \cdot E_0 \quad \text{-----} \rightarrow \quad (2).$$

$Sn(\epsilon)$: une courbe universelle déduite de la section efficace de ralentissement.

$$Sn = \Pi \cdot a^2 \cdot \beta \cdot \frac{E_0}{\epsilon} \quad Sn(\epsilon) \quad \text{-----} \rightarrow \quad (3).$$

$\beta(M_2 / M_1)$: est une fonction du rapport M_1 / M_2 .

U : est l'énergie de liaison de surface d'un atome.

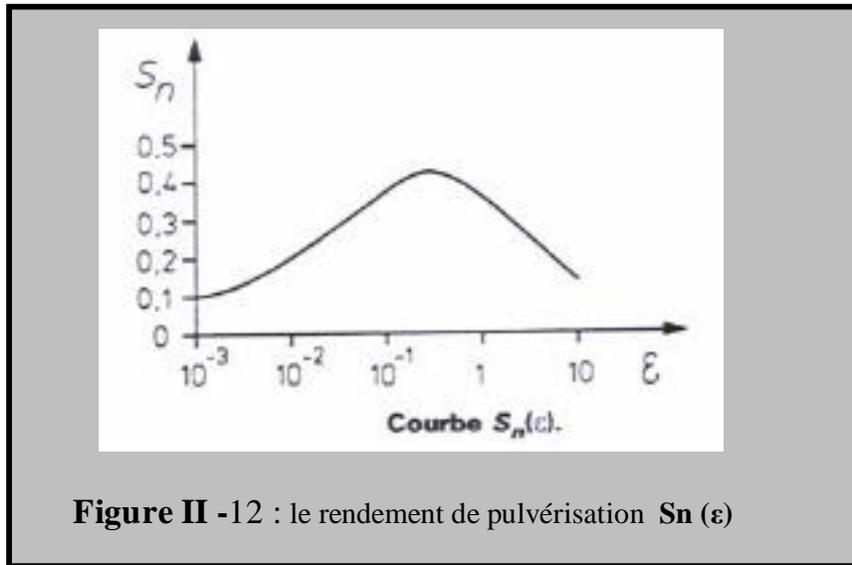


Figure II -12 : le rendement de pulvérisation $S_n(\epsilon)$

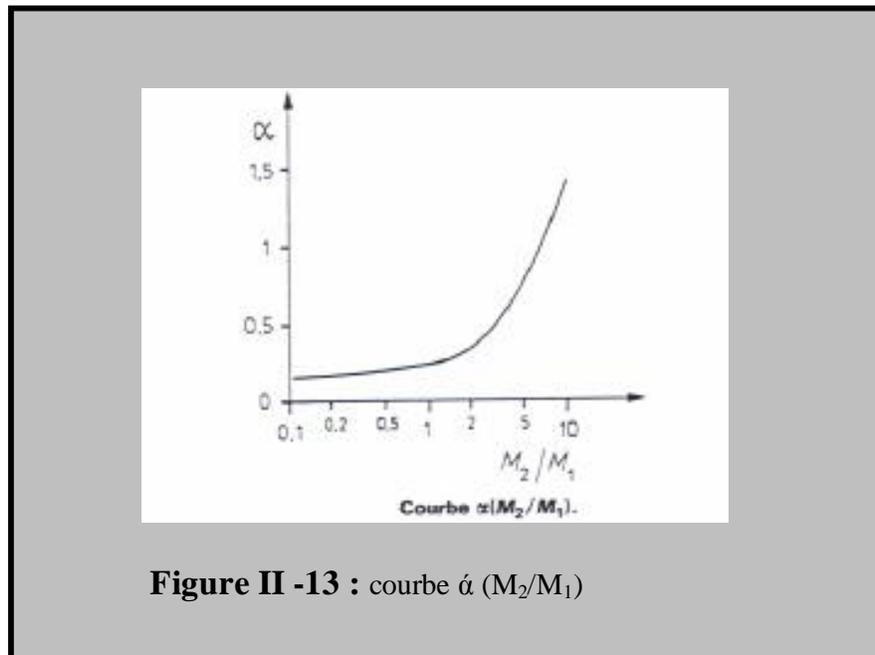


Figure II -13 : courbe $\alpha(M_2/M_1)$

Dans toutes ces expressions, les énergies sont exprimées en eV.

En résumé, le rendement de pulvérisation est proportionnel à la section efficace de ralentissement $S_n(E_0)$ ou S_n et inversement proportionnel à l'énergie de liaison U .

Dans les calculs, on prend pour U l'enthalpie de sublimation du solide.

II.2.4.4/ Nature des particules pulvérisées :

Les particules éjectées sous l'impact des ions, sont des particules électriquement neutres. Ce sont des molécules ou, plus souvent même des atomes (cas des métaux).

Cette propriété permet d'utiliser le procédé pour recouvrir des substrats isolants (céramique, verre, matière plastique). Une partie du flux de particules s'ionise en traversant le plasma, mais cette fraction ne dépasse pas en general 1% .

II.2.4.5/ Energie des particules pulvérisées :

Les vitesses des atomes pulvérisés forment une courbe de distribution dont le maximum est proche de 1Km/S, ce qui correspond à une énergie d'environ 0.2 ev.

Alors qu'en pulvérisation traditionnelle, la vitesse moyenne des atomes éjectés, se situe à environ 3,5 Km/sec, soit en énergie 4 ev, mais une fraction encore non négligeable du flux de particules atteint ou dépasse les 10Km/sec (50 ev), donc les atomes pulvérisés arrivent avec une énergie de 50 à 100 fois supérieure à celle des atomes évaporés (tableau II-3).

Les conséquences de cette grande énergie peuvent être interprétées par :

- 1- l'énergie des atomes pulvérisés est suffisante pour provoquer une désorption des gaz faiblement adsorbés à la surface du substrat, et réaliser ainsi un dégazage partiel de la surface.
- 2- une faible proportion des atomes pulvérisés, hautement énergétique (50-100 ev) est capable de pulvériser le substrat créant ainsi des centres de Nucléation.

cible	Energie moyenne des atomes éjectés par bombardement de Kr ⁺ en ev	Vitesse moyenne des atomes éjectés (*10 ⁵ cm/s)	Energie d'éjection la plus probable (ev)
Be	7,0	11.0	0.3
Al	9,0	9.3	3.5
Si	10,0	8.0	2.6
Ti	13.5	7.4	4.0
V	11.0	6.5	2.5
Cr	13.2	7.1	3.4
Mn	13.5	6.8	1.5
Fe	14.0	7.0	3.8
Co	12.0	6.4	3.2
Ni	17.5	7.5	2.8
Cu	9.2	5.4	1.8
Ge	13.5	6.0	2.6
Zr	22.0	6.8	5.6
Mo	22.0	6.5	4.8
Rh	20.0	6.2	5.0
Pd	14.5	5.3	3.5
Ag	8.5	4.0	1.0
Ta	33.5	6.0	7.0
W	34.5	6.0	7.8
Re	39.5	6.4	9.6
Pt	33.5	5.5	4.5
Au	21.0	4.7	2.5
U	45.0	6.2	12.5

Tableau II-3: Energie et vitesse d'éjection par bombardement d'ions K⁺. [30]

II.2.4.6/mécanisme de Croissance des couches déposées :

Tous les procédés de dépôt de films minces se font en trois étapes :

- la production des espèces ioniques, moléculaires, atomiques appropriées
- le transport de ces espèces vers le substrat
- la condensation sur ce même substrat soit directement soit par l'intermédiaire d'une réaction chimique ou électrochimique afin de former le dépôt solide

La nucléation :

c'est le phénomène qui accompagne les changements de d'état de la matière et qui consiste en l'apparition au sein d'un milieu donné , de points de transformation à partir desquels se développe une nouvelle structure physique ou chimique.

Les espèces pulvérisées arrivant sur le substrat perdent leurs composantes normales au substrat de leur vitesse et sont physiquement adsorbées par la surface du substrat.

Ces espèces ne sont pas thermodynamiquement en équilibre avec le substrat et se meuvent sur toute la surface de celui-ci. Dans cet état, elles interagissent entre elles et forment ce que l'on appelle de "clusters".

Ces "clusters" appelés également nuclei, sont instables et tendent à se désorber. Sous certaines conditions de dépôt, ils entrent en collision avec d'autres espèces adsorbées et commencent à croître. Après avoir atteint une taille critique, ces clusters deviennent thermo dynamiquement stables et la barrière de nucléation est franchie.

L'interface

Les nucleus croissent en taille mais aussi en nombre jusqu'à atteindre une densité maximale de nucléation. Celle-ci ainsi que la taille moyenne de ces nucleus aussi appelés îlots dépendent d'un certain nombre de paramètres tels que l'énergie des espèces pulvérisées, le taux de pulvérisation, l'énergie d'activation, d'adsorption, de désorption, de la diffusion thermique, de la température, de la topographie et de la nature chimique des substrats.

Un noyau peut croître à la fois parallèlement au substrat par un phénomène de diffusion surfacique des espèces pulvérisées. Il peut également croître perpendiculairement au substrat par apport d'espèces pulvérisées. En général la croissance latérale dans cette étape est beaucoup plus importante que la croissance perpendiculaire.

La croissance :

La dernière étape dans le procédé de formation des films est l'étape de coalescence dans laquelle les îlots commencent à se regrouper. Cette tendance à former des îlots plus grand possède la terminologie d'agglomération et est améliorée par la croissance de la mobilité de surface des espèces adsorbées. Cette amélioration est obtenue en augmentant la température du substrat.

Les plus grands îlots croissent encore, en laissant des canaux et des trous sur le substrat. La structure de la couche dans cette étape change en passant d'un type d'îlots

discontinus en un type de réseaux poreux. Une couche continue est formée en remplissant les canaux et les trous. [31]

La pulvérisation cathodique, se divise en deux principaux types:

- la pulvérisation cathodique simple.
- la pulvérisation réactive.

Dans la pulvérisation simple, l'atmosphère de la décharge est chimiquement neutre, c.a.d que l'on produit un vide 10^6 torr, et on injecte ensuite le gaz d'argon pur pour crée le plasma, alors que dans le cas de la pulvérisation cathodique réactive, l'atmosphère du plasma est réactive, c.a.d que l'on introduit un certain pourcentage de gaz actif dans l'argon, par exemple de l'oxygène O_2 ou de l'azote N_2 .

Dans chacun de ces cas, la cible peut être constituée d'un élément simple ou bien d'un composé.

Il existe différents types de pulvérisation cathodique, et cela suivant le mode de réaction du plasma ou de la nature de la cible.

On peut citer :

- la pulvérisation diode à courent continu (DC).
- la pulvérisation triode.
- la pulvérisation diode RF.
- la pulvérisation magnétron.

II.2.4.7/ Méthode de pulvérisation cathodique :

Cette technique consiste à éjecter des particules de la surface d'un solide par le bombardement de sa surface avec des particules énergétiques, en général des ions argon. En première approximation, ce processus mécanique ne dépend donc que de la quantité de mouvement, cédée au moment du choc, de l'ion incident avec l'atome du solide bombardé (**figure II-14**).

L'effet de pulvérisation est dû essentiellement au transfert de moment des ions incidents aux atomes de la surface du matériau bombardé. L'arrachage d'atomes superficiels se produira lorsque l'énergie effectivement transférée dépassera l'énergie de liaison des atomes.

Les paramètres gouvernant le dépôt de couches minces par pulvérisation sont :

- Les pressions résiduelles et de travail de l'enceinte ;
- La composition des gaz résiduels ;

- La puissance appliquée sur la cible ;
- La tension de polarisation du porte substrat ;
- La densité de courant ;
- La géométrie de l'ensemble ;
- La présence ou non des champs magnétiques.

Les ions peuvent provenir soit d'un plasma, soit directement d'une source d'ions. La caractéristique la plus intéressante du procédé de dépôt par pulvérisation est son universalité. Comme le matériau à déposer passe en phase vapeur à la suite d'un processus mécanique (transfert d'énergie de l'ion incident vers l'atome de surface au moment de la collision), on peut déposer pratiquement tous les matériaux inorganiques. La vitesse de dépôt dépend de nombreux facteurs comme la masse atomique du matériau cible ou celle des ions incidents, ou bien encore de l'énergie de ces mêmes ions.

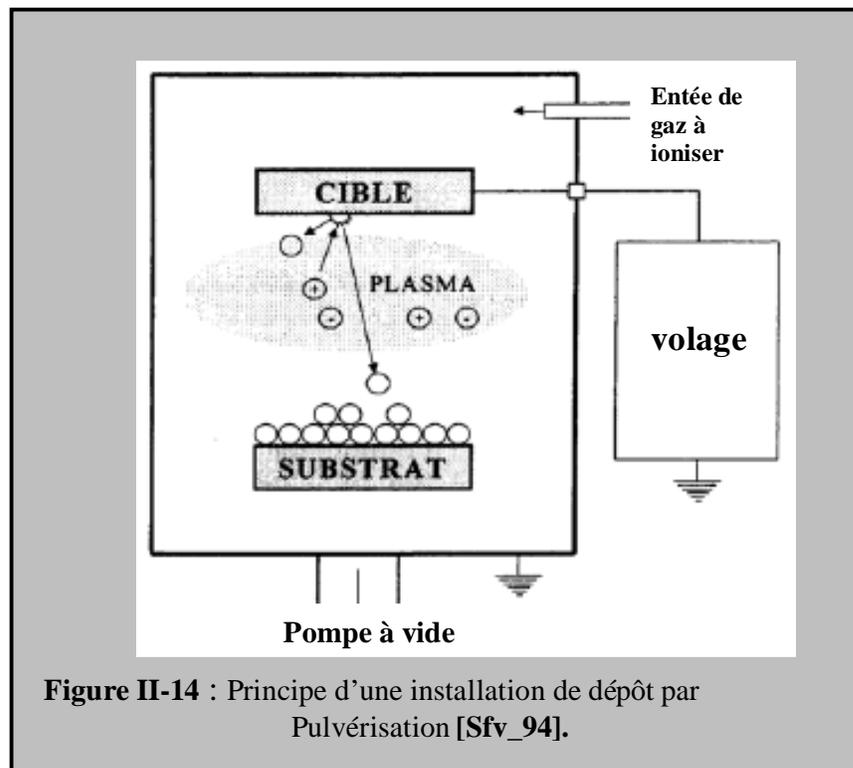


Figure II-14 : Principe d'une installation de dépôt par Pulvérisation [Sfv_94].

Donc ces particules sont généralement les ions d'argon Ar^+ du plasma, accélérés dans le champ électrique de la cible, portée à une tension négative par rapport à celle du plasma. Les particules pulvérisées sont électriquement neutres.

Elles sont diffusées dans toute l'enceinte, et un certain nombre d'entre elles sont recueillies sur un support appelé – substrat –, placé en face de la cible, sur le quel, elles forment une couche mince.

Donc le plasma, est à la base de la pulvérisation cathodique.

Finalement a fin de comprendre la décharge lumineuse, on analyse les mécanismes mis en jeu dans la pulvérisation cathodique diode, car il s'agit de la méthode la plus simple et la plus ancienne pour crée une décharge lumineuse.

II.2.4.7.1/ la pulvérisation cathodique diode en courant continu :

Le plasma est créé par une décharge électrique dans un gaz (l'argon par exemple) maintenu à une pression pouvant aller de $1,3 \cdot 10^2$ à $0,13$ Pa, au moyen de deux électrodes :

Une cathode appelée la cible car c'est elle qui attire les ions positifs, une anode, qui peut être le porte-substrats, placée en face de la cible ou tout autre accessoire au potentiel de la Masse (**figure II-15**). La tension appliquée est de l'ordre de 1 à 5 keV.

1) Le procédé diode D.C :

la tension d'attraction des ions est continue et, par conséquent, le procédé ne permet pas de pulvériser des matériaux conducteurs.

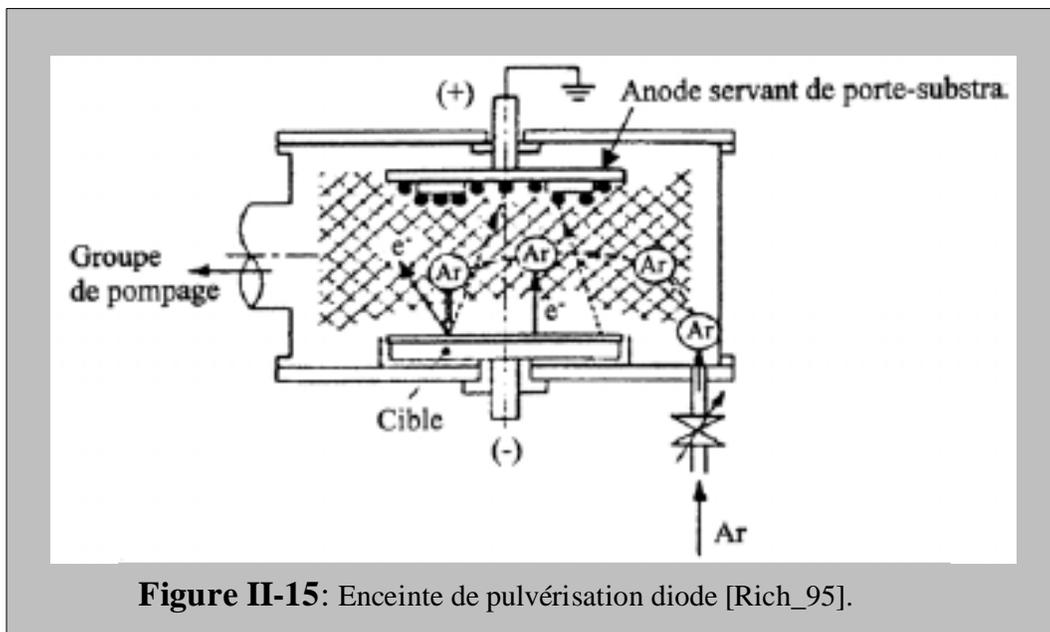


Figure II-15: Enceinte de pulvérisation diode [Rich_95].

2) Le procédé diode RF :

la tension d'attraction des ions est alternative c'est-à-dire qu'on attire alternativement des ions (qui pulvérisent) ou des électrons qui neutralisent les charges apportées par les ions : on peut donc pulvériser des matériaux conducteurs ou diélectriques.

II.2.4.7.2 / Les limites de procédé diode :

le système de pulvérisation cathodique DC diode présente l'avantage d'être très simple à mettre en œuvre , il nécessite l'utilisation d'une pression de travail élevée (10^{-1} à 10^{-2} torr) pour entretenir une décharge stable [32].

II.2.4.8/ la pulvérisation cathodique haute fréquence :

Le dispositif haute fréquence présente la même structure que la pulvérisation diode DC, mais on remplace le champ électrique continu par un champ électrique alternatif à haute fréquence de l'ordre du Mégahertz.

On peut ainsi maintenir la décharge jusqu'à une pression inférieure à 10^{-3} torr. Si l'on ajoute un champ magnétique continu au champ électrique haute fréquence, on peut maintenir dans ce cas une décharge stable jusqu'à 10^{-4} torr.

Ceci est un avantage considérable, car le libre parcours moyen des molécules gazeuses est d'environ 50 cm.

La plupart des atomes éjectés de la cible ne rencontreront pas les molécules du gaz résiduel. L'avantage essentiel du procédé est de permettre la pulvérisation de n'importe quel matériau, qu'il soit conducteur ou isolant [33], car dans des systèmes à courant électrique continu, les charges électriques des ions bombardant la cible s'accumulent à sa surface.

Elles y créent un champ électrique qui repousse les ions du plasma, ce qui a pour effet, de réduire considérablement l'efficacité de la pulvérisation

Pour éviter cela, on choisit d'utiliser un plasma haute fréquence.

Une des applications les plus fréquentes de cette méthode est la réalisation des films multicouches isolants-conducteurs avec des machines équipées de plusieurs cibles hautes fréquences.

Les vitesses de dépôt obtenues grâce à ce procédé sont directement proportionnelles à la puissance dissipée dans la cible.

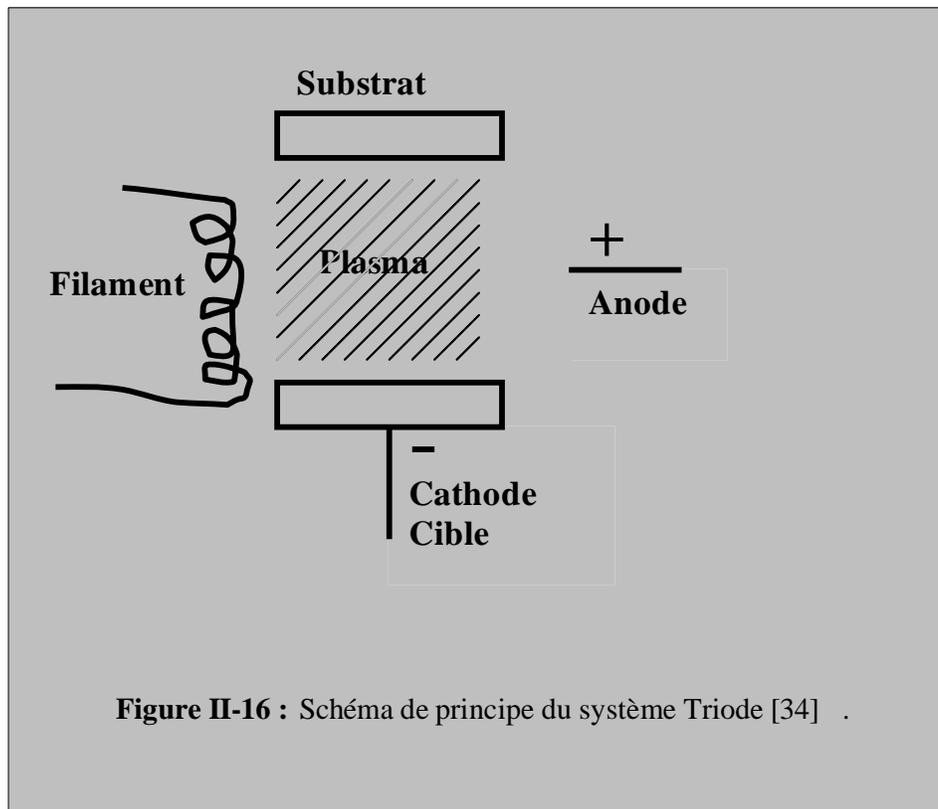
Mais ces procédés nécessitent l'utilisation de générateurs haute fréquence de puissance, de dispositifs d'adaptation d'impédance de cible, et de toute la technologie propre aux ondes haute-fréquence.

II.2.4.9/ La pulvérisation cathodique triode :

Alors que dans le procédé diode, le plasma se faisait entre la cible et le porte substrats [inter], dans le procédé triode, le plasma est créé puis entretenu indépendamment de la cible. Donc dans les procédés DC, le plasma est y produit au moyen d'une décharge à cathode froide, ce procédé de production d'ions, exige l'utilisation de tension relativement élevé, ce qui est un inconvénient dans certain cas.

De plus, il n'y pas assez d'électrons pour ioniser le gaz .Alors que, dans le système de pulvérisation cathodique triode, présenté dans la figure qui suit, on produit la décharge au moyen d'électrons émis à partir d'une cathode chaude, et accélérés dans un champ électrique crée par une anode sous forme de cylindre porté à un potentiel +150 volts.

Ces électrons provoquent l'ionisation d'une faible fraction des particules du gaz se trouvant entre ces deux électrodes.



Le système triode se compose :

- Un générateur de plasma ;
- Une cible avec le porte-substrats placé devant.

Le générateur de plasma est équipé :

- Un filament chaud en tungstène qui émet des électrons ;
- Une anode polarisée qui attire et capte les électrons ;
- Une bobine extérieure dont le champ magnétique a pour effet de spiraler les trajectoires des électrons, retardant ainsi leurs captures par l'anode et augmentant par là même leurs chances de collisions ionisantes avec les atomes du gaz résiduel. Ce système engendre un faisceau de plasma luminescent.

La cathode est un filament de tungstène chauffé par effet joule à une température de l'ordre de 2500°C. La densité de courant d'électrons éjectés de la surface du filament est donnée par la formule suivante :

$$J_e = AT^2 \exp(-E_x / K_B T) \quad \text{en (A/m}^2\text{)}.$$

Ou, on a : A : Constante d'éjection

T : Température absolue (°K).

E_x : le travail de sortie du matériau éjectant les électrons (ev).

Un champ magnétique superposé au champ électrique permet d'allonger les trajectoires électriques, en les spiralant et augmenter ainsi leur probabilité d'ionisation par choc.

Ce champ magnétique a également pour effet de concentrer le plasma dans la zone centrale de l'enceinte. L'ensemble constitué par le filament, l'anode et la bobine générant le champ magnétique, est un dispositif générateur de plasma, indépendant de la cible et du substrat.

Le potentiel de la cible n'ayant aucune influence sur le maintien de la décharge, et dans ce cas, on pourra se contenter de tensions faibles (500 à 1500 voltes), ce qui annule les risques de claquage.

Dans ce système de pulvérisation, la décharge peut être entretenue à une pression plus faible que dans le montage diode (10^{-3} à 10^{-4} torr), ce qui est un avantage du point de vue de la contamination des couches par le gaz utilisé pour former le plasma, de plus, ce système présente une très grande souplesse d'utilisation :

la cible indépendante du plasma, est bombardée à des énergies faibles, ce qui n'est pas le cas dans les systèmes diode.

II.2.4.10/ La pulvérisation cathodique magnétron :

La cathode magnétron est un perfectionnement de la cathode utilisée en pulvérisation diode classique, qui permet de s'affranchir du filament chaud. Ce perfectionnement résulte de la combinaison d'un champ magnétique intense, perpendiculaire au champ électrique créé par la cathode, c'est-à-dire parallèle à la cible (**figure II-17**).

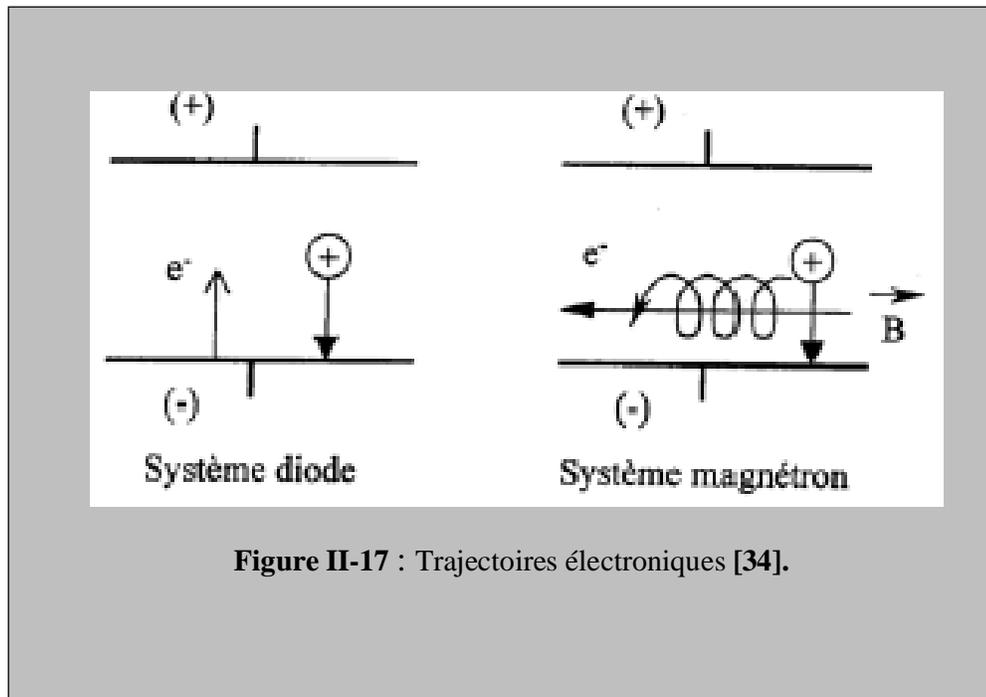


Figure II-17 : Trajectoires électroniques [34].

L'effet magnétron consiste en une décharge diode RC ou RF entretenue par des électrons secondaires éjectés de la cathode sous l'effet du bombardement ionique. Dans ce cas, les électrons qui ne rencontrent pas de molécules de gaz, s'éloignent perpendiculairement à la cathode et sont captés par l'anode. Si on superpose au champ électrique E un champ magnétique B , perpendiculaire à celui-ci, c'est-à-dire parallèle à la cathode et très près de celle-ci, les trajectoires électroniques s'enroulent autour des lignes du champ magnétique, augmentant considérablement les chances d'ioniser une molécule de gaz au voisinage de la cathode.

Le pouvoir d'ionisation des électrons émis par la cathode est augmenté du fait de l'allongement de leur trajectoire. Il s'ensuit une ionisation plus importante des gaz contenus dans l'enceinte.

Il en résulte une augmentation de la vitesse de dépôt et un abaissement de la pression de maintien du plasma. Bien entendu, ce dispositif n'ajoute rien à l'énergie des ions arrivant sur la cible, il ne fait qu'augmenter leur nombre pour une tension de polarisation de la cible donnée.

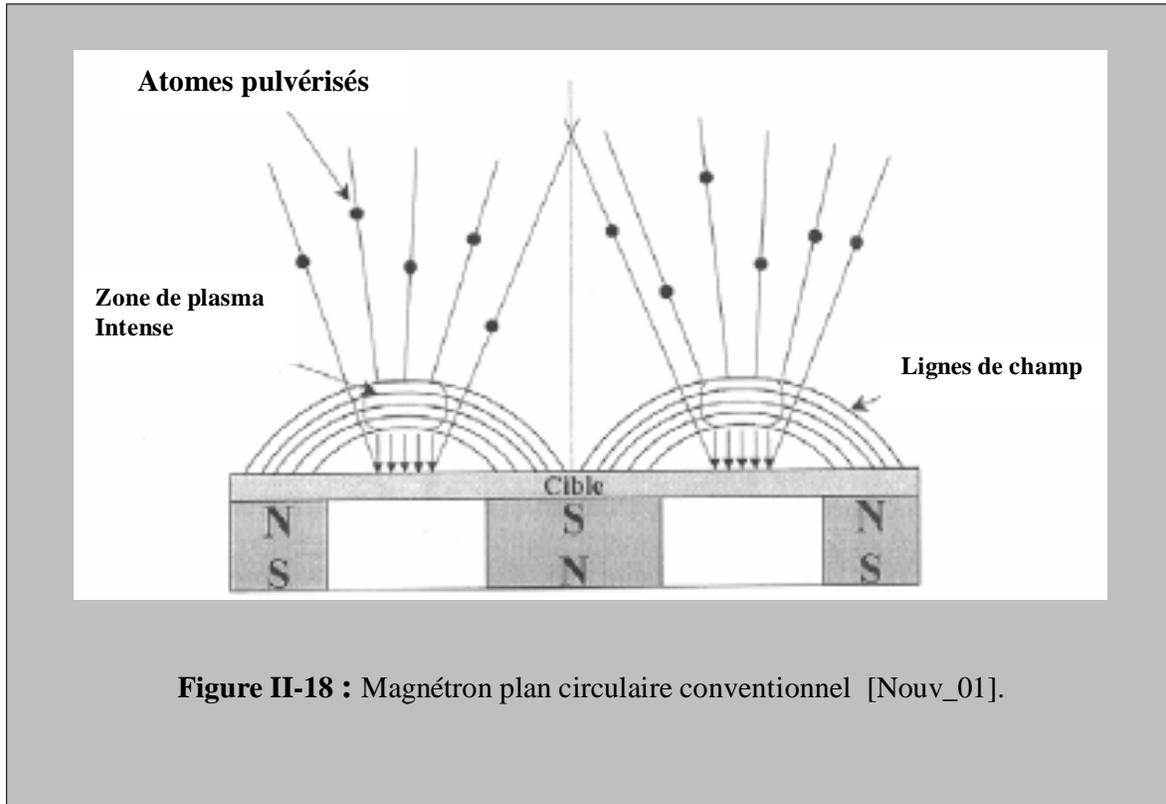


Figure II-18 : Magnétron plan circulaire conventionnel [Nouv_01].

La pulvérisation magnétron peut être effectuée en utilisant une seule cathode ou bien plusieurs cathodes (par exemple une cible de titane et une cible d'aluminium) permet de réaliser des multicouches de composés biphasés (TiN/AlN) et est appelé « dual magnétron ». Actuellement ces techniques de pulvérisation à plusieurs cathodes permettent la synthèse de couches 'superlattices' ou de couches triphasés (Ti,Al)N.

L'effet du champ magnétique sur la trajectoire des électrons bombardant la cible, augmente le nombre d'ionisation, et de ce fait le rendement (**R**) augmente, ce qui se traduit par une grande vitesse de dépôt des couches de revêtement.

II.2.5 / comparaison des modes de déposition PVD :

Les différentes études réalisées montrent que les procédés PVD offrent de loin la plus large variété comparativement aux procédés CVD. Mais toutefois il est difficile de faire un choix optimum a priori. L'analyse de la littérature montre qu'il n'existe pas de procédés universels et que tous offrent leurs avantages et leurs inconvénients. On peut néanmoins faire un comparatif des 4 procédés les plus largement répandus (**Tableau II-5**).

	Avantages	Inconvénients
Evaporation sous vide	<ul style="list-style-type: none"> • vitesse de dépôt élevée • matériel simple • investissement faible • faible température du substrat (dépôt sur plastique) • bien adapté aux applications électriques et optiques 	<ul style="list-style-type: none"> • mal adapté aux dépôts réfractaires • difficultés de déposer des alliages • faible pouvoir de recouvrement • adhérence faible • dépôts poreux et non uniformes
Pulvérisation cathodique (diode)	<ul style="list-style-type: none"> • possibilité de déposer de nombreux métaux, alliages, composés réfractaires, conducteurs ou diélectriques • maîtrise de la stoechiométrie • bonne adhérence des dépôts • bon pouvoir de recouvrement 	<ul style="list-style-type: none"> • faible vitesse de dépôt • investissement élevé • dépôts non uniformes
Pulvérisation	<ul style="list-style-type: none"> • idem système diode 	<ul style="list-style-type: none"> • dépôts non uniformes en épaisseur
magnétron	<ul style="list-style-type: none"> • vitesse de dépôt élevée • faible température de dépôt (plastiques) 	<ul style="list-style-type: none"> • investissement élevé • cibles sensibles à la fissuration • réaction possible de la cible avec l'atmosphère gazeuse
Dépôts ioniques	<ul style="list-style-type: none"> • vitesse de dépôt élevée • bonne adhérence • bon pouvoir de recouvrement • possibilités de déposer de nombreux métaux, alliages, etc. • bien adapté aux applications mécaniques 	<ul style="list-style-type: none"> • investissement matériel élevé • contrôle de la stoechiométrie parfois délicat • dépôts non uniformes en épaisseur

Tableau II-5 : Comparaison des 4 principaux procédés de déposition en PVD [Nouv_01].

Très impressionné par les résultats de ces techniques, et a fin d'élaborer les revêtements sur les outils de coupe et les pastilles pour les soumettre aux différents essais mécaniques de dureté et de détermination de leur durée de vie.

Nous avons fait appel à cette technique pour son application dans le domaine de la mécanique et voir ces effets dans l'amélioration des principales propriétés mécaniques des outils de coupe.

Chapitre III

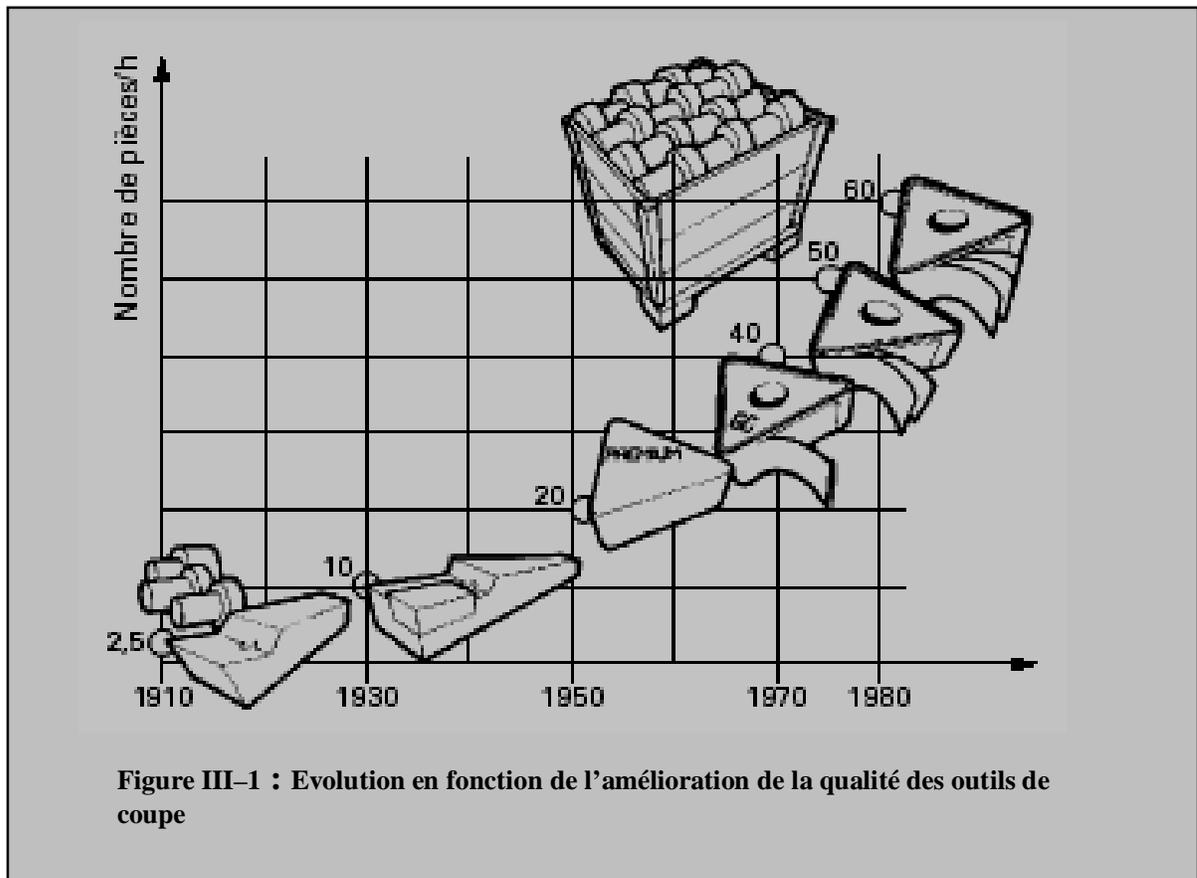
Les outils de coupe

III.1 les outils de coupe

III.1.1/ introduction :

le premier métal à outil de coupe utilisé fut l'acier fondu au carbone (acier fondu au creuset soigneusement dosé) ; puis vinrent les aciers au wolfram ou tungstène vers 1900, augmentent le pouvoir coupant des outils de 3 à 5 fois.

Aujourd'hui les aciers rapides sont couramment remplacés par des alliages en carbures métalliques, utilisés sous forme de pastille ou plaquette brasée constituant le bec de l'outil de coupe. Leur pouvoir coupant est supérieur de 4 à 6 fois celui des meilleurs outils de coupe en acier rapide [35].



Dans l'étude présente, nous nous sommes intéressés à l'amélioration des propriétés mécaniques des outils de coupe destinés aux travaux de tournage sur machine outil.

A fin d'améliorer encore plus les propriétés mécaniques des outils de coupe, à savoir la dureté, la résistance à l'usure et la durée de vie, nous avons essayé d'appliquer la technique des plasmas, phénomène physique, dans le domaine de la mécanique. Le procédé de base, consiste à effectuer des dépôts ou des revêtements pour envelopper la partie active de l'outil de coupe.

Avant la présentation des performances des outils de coupe acquises par les différents procédés de pulvérisation et les dépôts de revêtement, nous avons jugé utile de commencer par la présentation descriptive de l'outil de coupe.

III.1.2/ les différents types des outils de coupe :

Les outils de coupe sont classés en trois catégories [36]:

- Les outils simples à tranchant unique sont les outils de tournage et de rabotage.
- Les outils associés appelés outils à arêtes multiples : outils fraise, foret, alésoir,...etc.
- Les outil - meules : ce sont des outils à arêtes multiples dont le mode d'action est différent de celui des outils du deuxième groupe.

Dans cette étude et vue la diversité de l'outillage utilisé en construction et fabrication mécanique, nous limitons nos investigations aux outils de coupe utilisés lors des opérations de tournage. Ces outils se classent à leur tour en quatre groupes principaux :

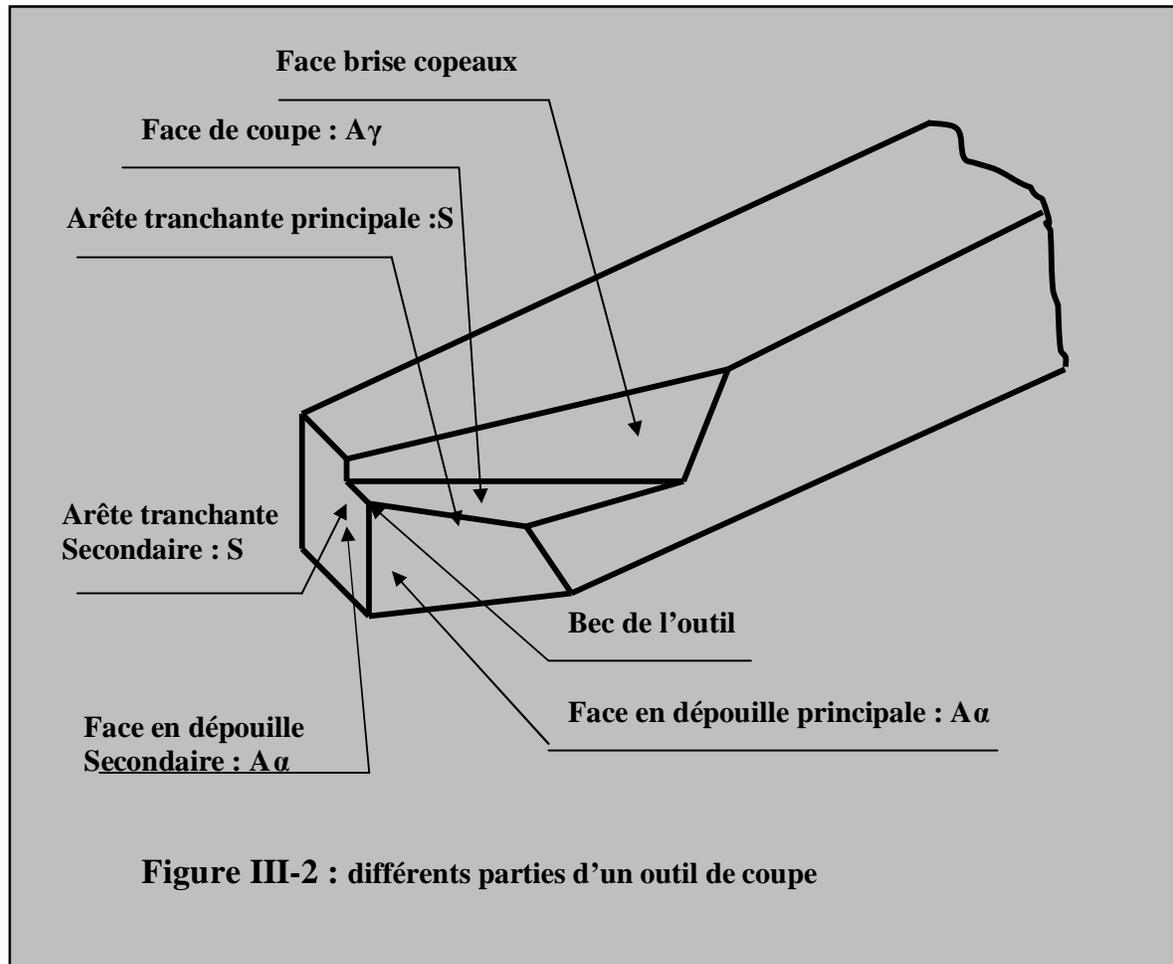
- Les outils de façonnage extérieur.
- Les outils de façonnage intérieur.
- Les outils de forme.

Parmi les outils usuels, on distingue :

- Les outils à charioter
- Les outils à dresser et à retoucher.
- Les outils pelle, à tronçonner.

III.1.3/ Différentes parties de l'outil :

La forme d'un outil de coupe se présente comme un barreau prismatique (Corps passive) terminé par une arête vive ou bien une partie active (arête tranchante), figure III-2



D'après ce schéma, on distingue les parties suivantes :

- 1- **corps de l'outil** : c'est la partie de l'outil qui porte les éléments composants et qui sert à sa fixation et à sa mise en position sur la machine. Elle doit être rigide pour résister aux efforts qui prennent naissance pendant la coupe. Il possède des caractéristiques pour une fixation très facile et très rapide.
- 2- **La partie active de l'outil** : c'est la partie fonctionnelle, composée de la face de coupe, des faces en dépouille et des arêtes tranchantes. La dureté de la partie active doit être plus grande que celle du métal à usiner.
- 3- **La face de coupe ou d'attaque est celle sur laquelle glisse le copeau .**

- 4- **La face en dépouille** est celle qui est placée devant la partie de la pièce qui vient d'être tournée. Il faut distinguer la face en dépouille principale et les faces en dépouille secondaire. La face en dépouille principale est celle dont l'intersection avec la face de coupe donne l'arête tranchante principale.

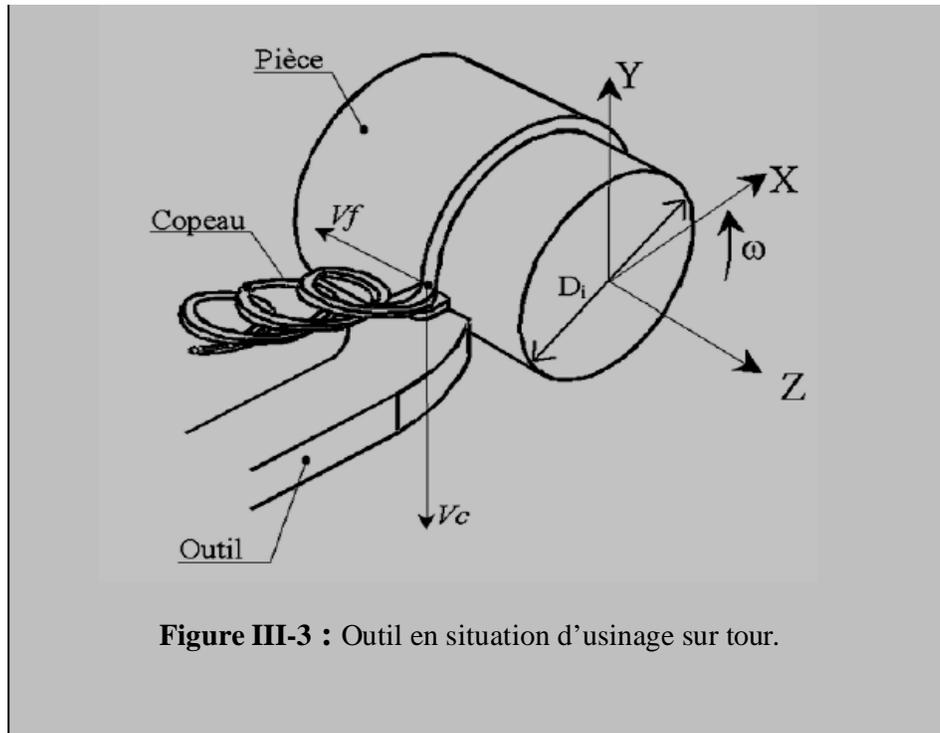
- 5- **La face brise copeau** : cette face résulte d'une modification de la face de coupe ayant pour but de briser le copeau afin d'éviter que celui-ci ne soit trop long et foisonne autour de l'outil.

- 6- **L'arête tranchante principale** : c'est l'arête tranchante destinée à la coupe du matériau. Elle résulte de l'intersection de la face de coupe et de la face en dépouille principale.
- 7- **L'arête tranchante secondaire** : c'est une arête qui commence à l'extrémité de l'arête principale et qui s'étend dans une autre direction. Elle résulte de l'intersection de la face de coupe et de la face en dépouille secondaire. Certains outils possèdent plusieurs arêtes secondaires.
- 8- **Le bec de l'outil** : c'est la partie où se rejoignent l'arête principale et l'arête secondaire. Cette partie peut être vive, arrondie ou droite.
Comportant les mêmes éléments, on trouve les outils de coupe à droite et les outils de coupe à gauche.

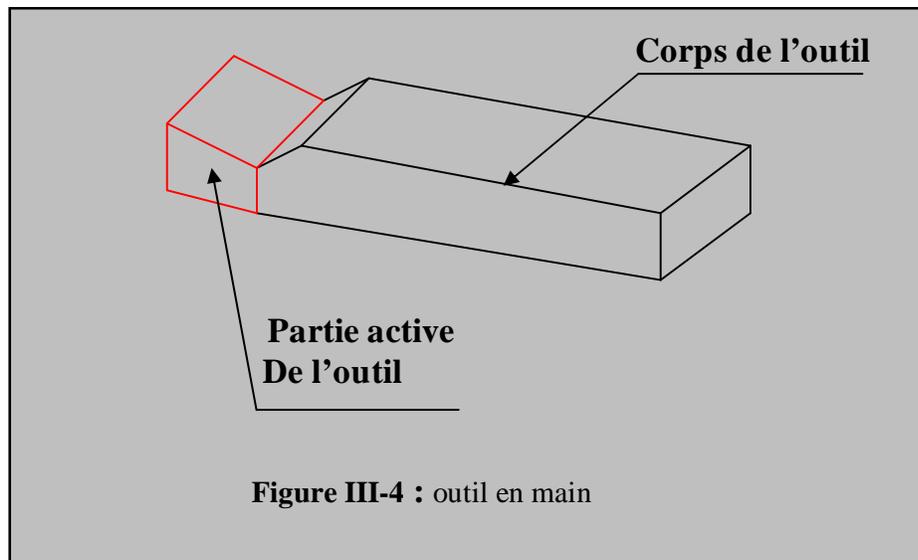
III.1.4 / Géométrie de l'Outil de coupe

La géométrie de l'outil de coupe est définie en fonction de sa situation dans l'espace. On distinguera cette géométrie dans deux repères qui sont :

La géométrie de l'outil en travail : elle dépend des conditions cinématiques de travail, ainsi que de la mise en position de l'outil dans son support lié à la machine.



- La géométrie de l'outil en main : elle est liée aux conditions cinématiques de travail supposées et à la forme du corps solide de la partie active de l'outil. Dans le cas où les conditions cinématiques de travail de coupe seraient complexes, il faut tenir compte des conditions réelles d'usinage et passer obligatoirement par l'étude géométrique de l'outil en travail réel pour déterminer celle de l'outil en main. La connaissance de la géométrie de l'outil en main est nécessaire pour l'exécution de l'affûtage, ainsi que pour la métrologie des différents composants de la partie active de l'outil.



III.1.4.1/ Plans caractéristiques de l'Outil de coupe :

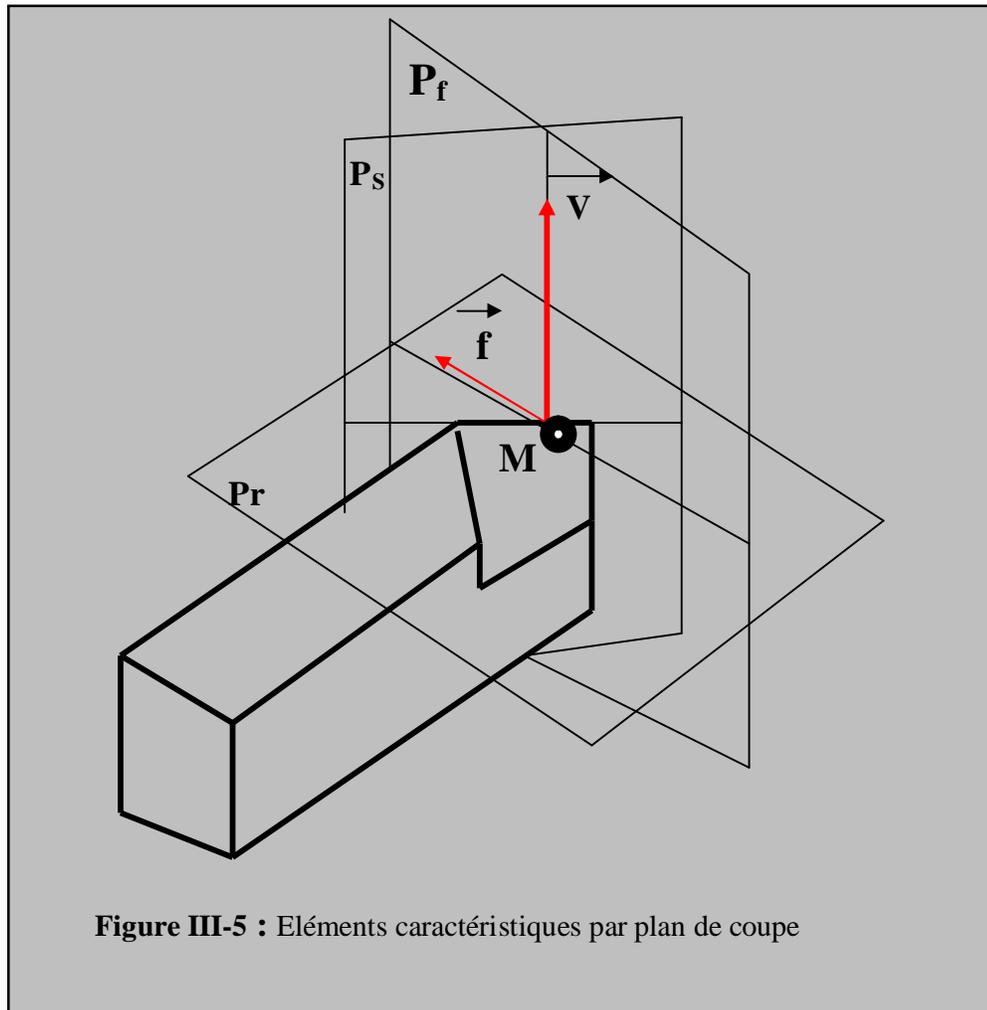


Figure III-5 : Eléments caractéristiques par plan de coupe

Eléments caractéristiques par ordre de définition :

M : point considéré de l'arête.

V : vecteur supposé du sens de coupe

f : vecteur supposé du sens d'avance.

Pb : plan de base, surface d'appui de l'outil.

Pr : plan de référence parallèle à P_b et contenant M et f.

Pf : plan de travail conventionnel perpendiculaire à P_r et contenant M, V, f.

Ps : plan d'arête de l'outil perpendiculaire à P_r et tangent à l'arête en M.

La partie active de l'outil de coupe comporte un certain nombre de plans caractéristiques qui définissent la relation entre les différentes faces de l'outil de coupe et les directions de coupe.

En fonction de la géométrie de l'outil, qu'il soit en main ou en travail, on distingue les différents plans caractéristiques suivants :

III.1.4.1.1/ Pour le système de l'outil en main :

- le plan de référence de l'outil en main \mathbf{P}_r :

C'est le plan qui passe par le point M considéré de l'arrêt, et contenant l'axe de l'outil (pour les outils tournant) ou parallèle au plan de base servant de face d'appui au corps d'outil (pour les outils de tournage et rabotage). Il a pour normal en ce point la vitesse de coupe supposée.

- Le plan d'arête de l'outil \mathbf{P}_s :

C'est le plan tangent à l'arête, au point considéré et perpendiculaire au plan de référence de l'outil.

- Le plan conventionnel \mathbf{P}_f :

C'est le plan perpendiculaire au plan de référence de l'outil \mathbf{P}_r , au point M considéré de l'arête et parallèle à la direction supposée de la vitesse d'avance de l'outil.

- Le plan vers l'arrière de l'outil \mathbf{P}_p :

C'est le plan passant par le point M considéré, qui est perpendiculaire à la fois au plan \mathbf{R}_r et au plan \mathbf{P}_f .

- Le plan orthogonal à la face de coupe \mathbf{P}_g :

C'est le plan qui est perpendiculaire à la fois au point considéré M, à la face de coupe et au plan de référence de l'outil \mathbf{P}_r .

- Le plan orthogonal à la face de dépouille \mathbf{P}_b :

C'est le plan perpendiculaire à la face de dépouille et au plan de référence \mathbf{P}_r ; au point M considéré.

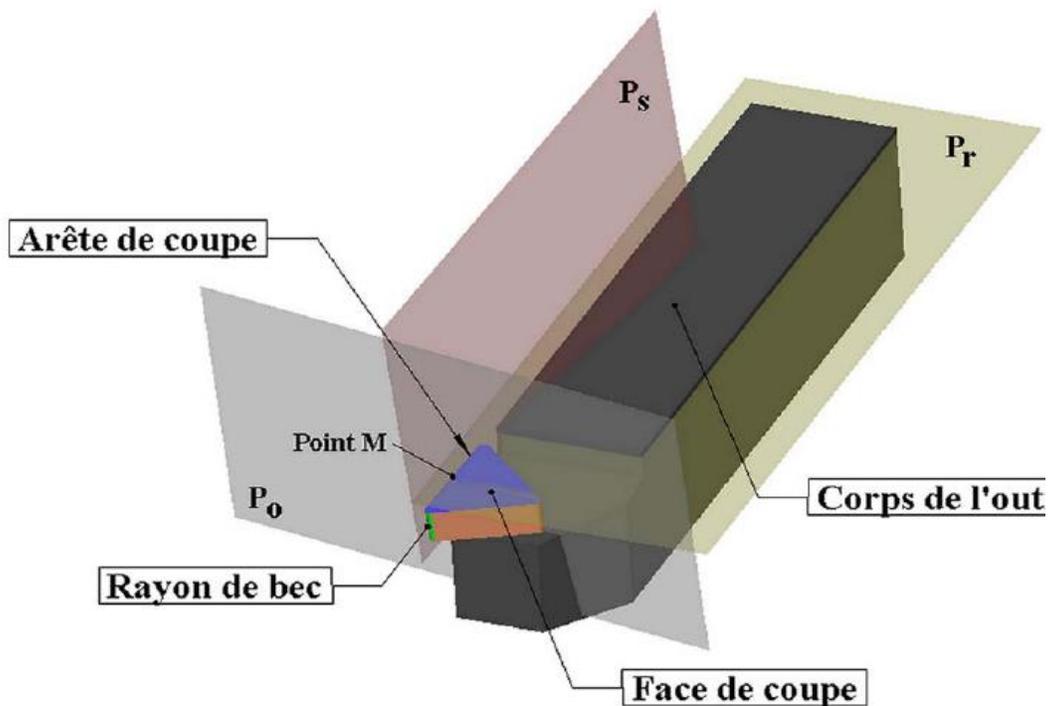
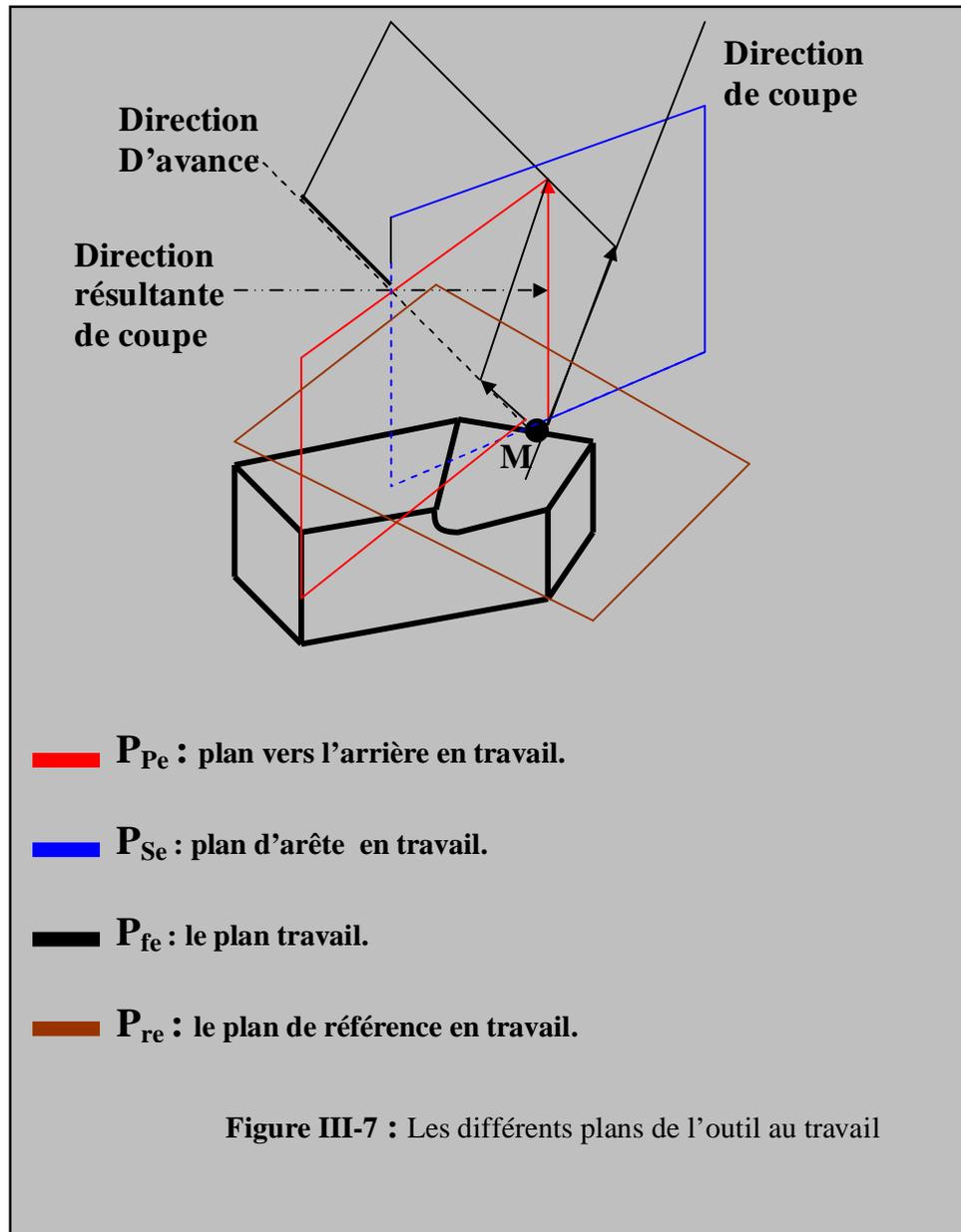


Figure III-6 : Plans caractéristiques de l'outil en main.

III.1.4.1.2/ Pour le système de l'outil de coupe en travail :

- Le plan de référence en travail P_{re} : c'est le plan perpendiculaire à la direction résultante de coupe, au point M de l'arête considérée. Il a pour normal en ce point la vitesse effective de coupe.
- Le plan d'arête en travail P_{se} : c'est le plan tangent à l'arête au point M considéré et perpendiculaire au plan de référence en travail P_{re} . Ce plan contient la direction résultante de coupe.
- Le plan de travail P_{fe} : c'est le plan contenant la direction de coupe et la direction d'avance au point considéré de l'arête, ce plan est perpendiculaire au plan de référence en travail.
- Le plan vers l'arrière en travail P_{pe} : c'est le plan qui, passe par le point considéré M de l'arête, est perpendiculaire à la fois au plan P_{re} et au plan P_{fe} .



III.1.4.2 / Les angles caractéristiques de l'outil de coupe :

Les éléments de la partie active d'un outil sont définis par leurs relations géométriques avec l'élément de référence qui est le plan de base : la face par laquelle l'outil repose sur le support. La notion des angles caractéristiques se rapportera à l'étude des angles limités aux plans caractéristiques précédemment définis pour l'outil en main, à partir des vecteurs vitesse de coupe – supposée- et vitesse d'avance supposée.

La partie active du bec d'un outil est formée par deux angles principaux et qui sont :

- L'angle de dépouille α .
- L'angle de coupe γ .

L'angle de coupe constitue le facteur du rendement de l'outil. il assure une formation et un écoulement du copeau, permettant d'obtenir un fini correct de la surface usinée. Par contre, l'angle de dépouille ne sert qu'à empêcher l'outil de talonner, de frotter par la partie antérieure du tranchant. Donc, s'il peut influencer sur le fonctionnement, il n'influe pas sur le rendement de l'outil.

Ces angles se définissent à partir des plans de l'outil

Pour cela on distingue :

- Les angles de l'arête ;
- Les angles des faces.

III.1.4.2.1/ Angles d'arête:

Pour les angles d'arêtes il y a deux angles nécessaires et qui sont :

- angle de direction d'arête de l'outil λ_r ou angle de direction d'arête en travail λ_{re} : angle aigu mesuré dans le plan de référence $Pr(Pre)$ entre le plan d'arête $Ps(Pse)$ et le plan de travail $Pf(Pfe)$;
- angle d'inclinaison d'arête de l'outil λ_s ou angle d'inclinaison d'arête en travail λ_{se} : angle aigu mesuré dans le plan d'arête $Ps(Pse)$ entre l'arête et le plan de référence $Pr(Pre)$.

III.1.4.2.2/ Angles des faces:

Pour les angles de faces on distingue :

- angle de dépouille α : angle aigu entre la face de dépouille A_α et le plan d'arête $Ps(Pse)$;
- angle de taillant β : angle aigu entre la face de coupe A_γ et la face de dépouille A_α ;
- angle de coupe γ : angle aigu entre la face de coupe A_γ et le plan de référence $Pr(Pre)$
($\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$).

Ces angles sont définis selon le besoin dans un des plans de section suivants :

- $Po(Poe)$: plan orthogonal de l'outil (orthogonal en travail), plan perpendiculaire au plan de référence $Pr(Pre)$ et au plan d'arête $Ps(Pse)$, au point considéré de l'arête ;
- $Pn(Pne)$: plan normal à l'arête, plan perpendiculaire à l'arête au point considéré ($Pn = Pne$) ;
- Pf : plan de travail conventionnel (plan de travail Pfe) ;
- Pp : plan vers l'arrière de l'outil (plan vers l'arrière en travail Ppe).

Pour faciliter l'explication des phénomènes de la coupe, il est nécessaire de définir les angles ayant la plus grande influence sur lesdits phénomènes.

La figure III-8 illustre, dans le système de référence outil en main, les trois angles Principaux du taillant, l'angle de dépouille α , l'angle de taillant β et l'angle de coupe γ .

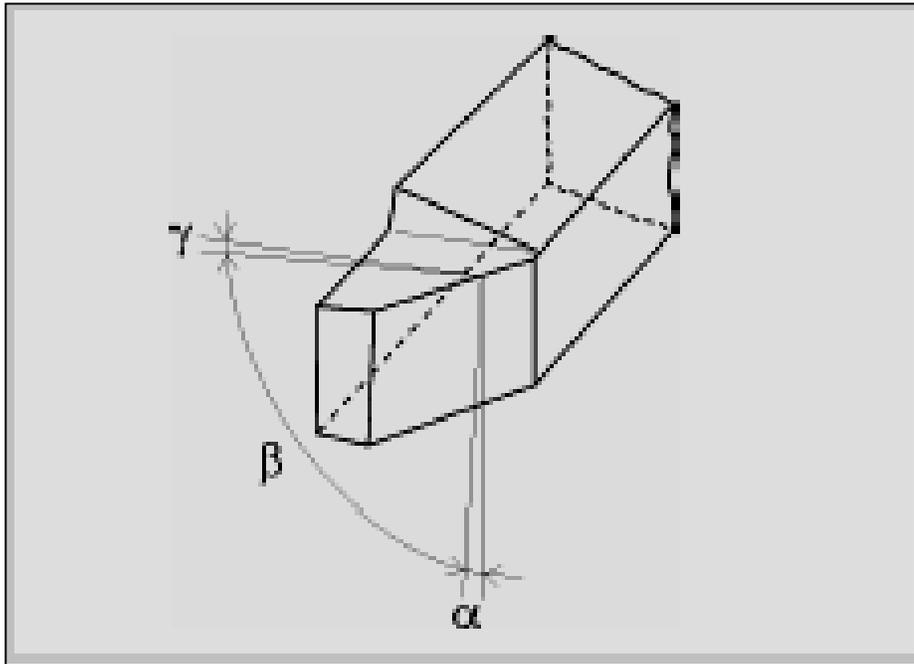


Figure III-8 : Angles du taillant (outil en main)

La figure III-9 illustre ces mêmes angles dans les systèmes de référence outil en travail outil à taille en bout (gauche) et outil à taille de côté ou latérale (droite).

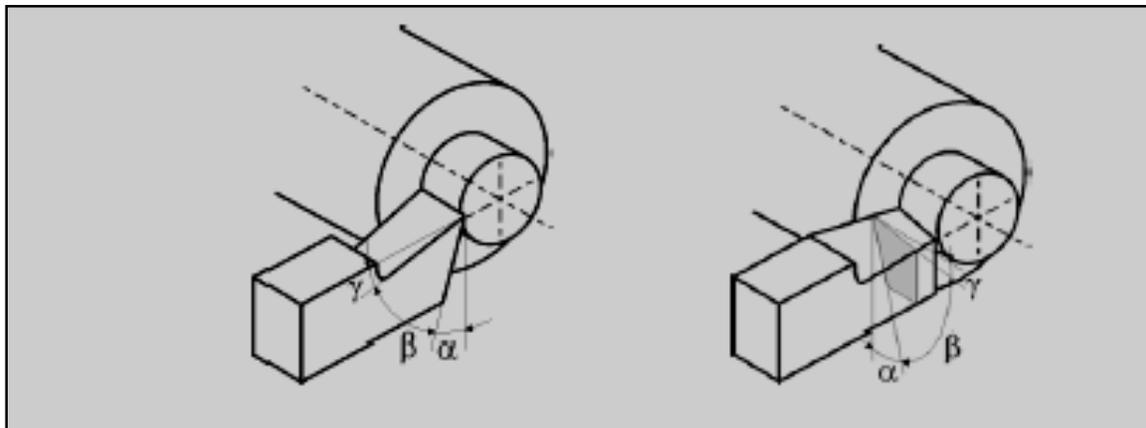
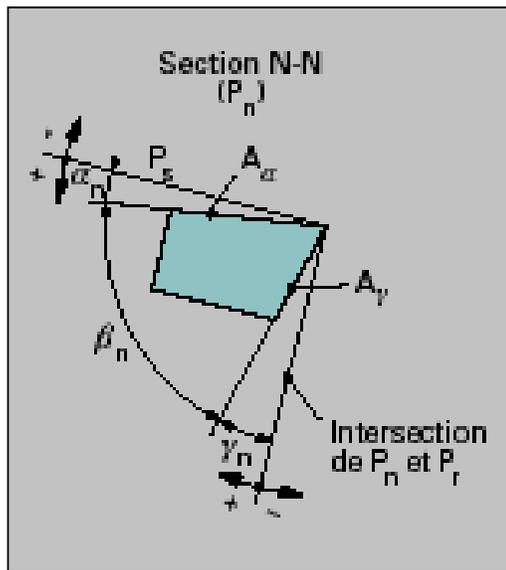
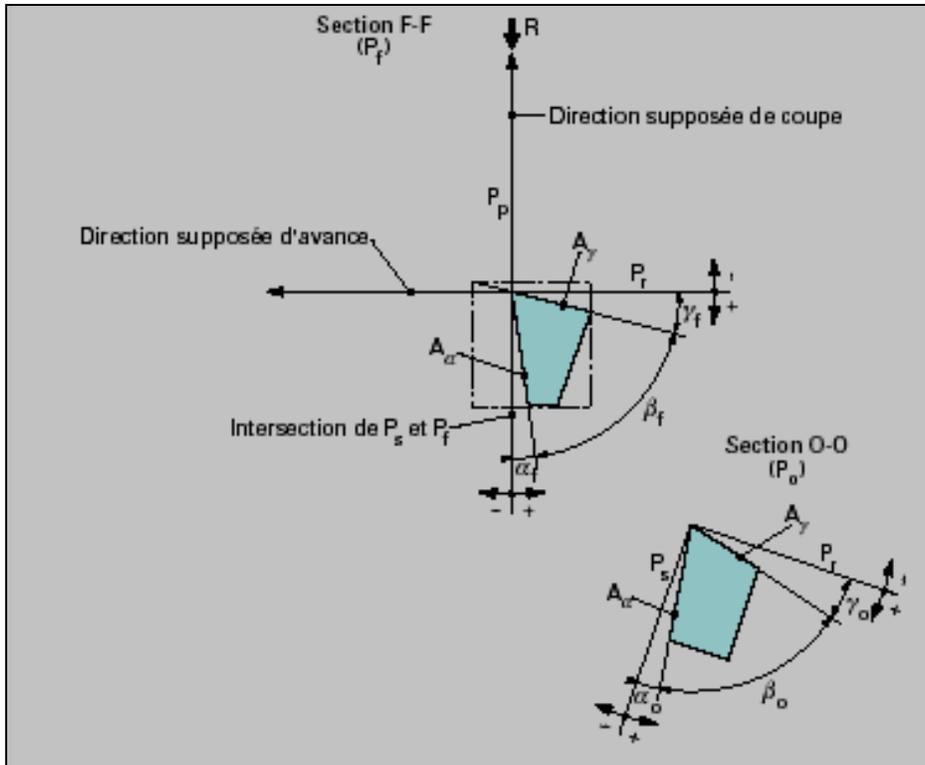


Figure III-9 : Angles du taillant (outil en travail)

Généralement, l'angle de dépouille α influe sur le frottement entre l'outil et la pièce et donc sur la durée utile de l'outil. L'angle de coupe γ a une influence sur la manière dont s'écoule le copeau sur la face de coupe et ainsi les efforts de coupe, la puissance consommée, et les dégagements de chaleur. L'angle de taillant β affecte la résistance à la rupture du taillant. La somme de ces trois angles est toujours égale à 90° .

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ.$$

Section F-F



- vue arrière

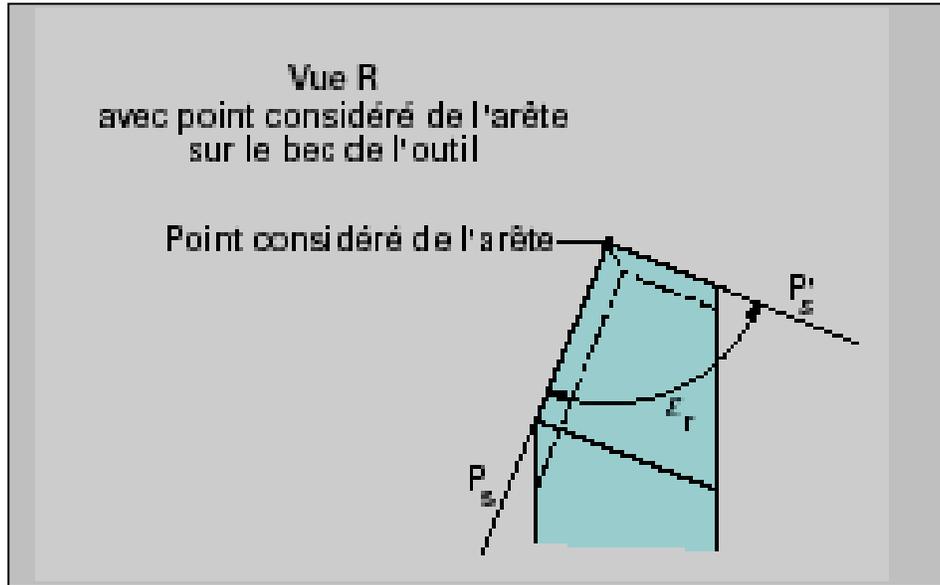


Figure III.10 : Plans et angles en main sur les outils courants : outil à charioter droit sur les différentes section **d'après NF E 66-502)**

III.1.4.2.3 / Évolution de ces angles en travail

Lorsqu'on prend en compte l'outil en travail, la vitesse effective de coupe s'incline d'un angle δ , et δ augmente avec (figure III-11).

$$V_e = v_f + v_c$$

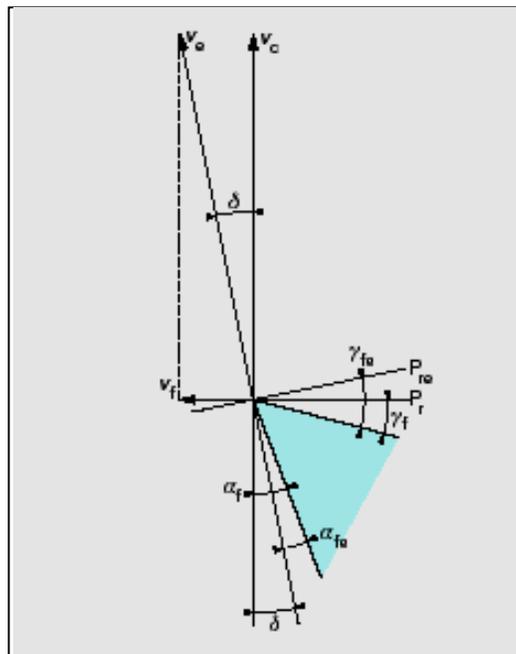


Figure III-11 : Évolution des angles en travail

Les angles latéraux de coupe en travail γ_{fe} et de dépouille en travail α_{fe} se substituent à leurs homologues γ_f et α_f .

Pour v_c fixé, γ_{fe} croît avec v_f , α_{fe} diminue avec v_f , l'angle δ représentant

La différence a pour tangente :

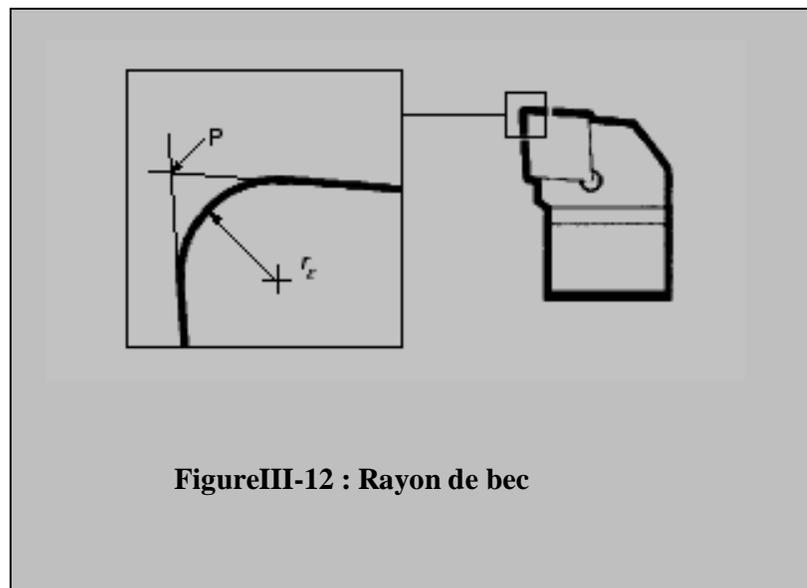
$$\tan \delta = v_f / v_c$$

$$\gamma_{fe} = \gamma_f + \delta.$$

$$\alpha_{fe} = \alpha_f - \delta.$$

III.1.4.3 / Rayon de bec de l'outil de coupe :

Le rayon de bec r_ϵ est tangent aux deux arêtes de coupe se rencontrant en un point théorique P. Il élimine un angle aigu, qui constitue un point faible et ne présente aucun intérêt sur le plan fonctionnel (figure III-12).



FigureIII-12 : Rayon de bec

III.1.5 / influence de la géométrie de l'outil :

Il semble évident que les angles de coupe et de dépouille ont une influence sur la coupe et l'usinage des pièces mécaniques, l'influence des angles d'arêtes semble moins évidente.

En fait, les angles de coupe et de dépouille définis dans les différents plans de section sont liés entre eux par un certain nombre de relations entre leurs lignes trigonométriques.

On démontre, entre autre les relations suivantes :

$$\tan \gamma_{oe} = \tan \gamma_{ne} / \cos \lambda_{se}$$

$$\tan \gamma_{fe} = (\tan \gamma_{ne} / \cos \lambda_{se}) \sin k_{re} - \tan \lambda_{se} \cos k_{re}$$

$$\tan \gamma_{pe} = (\tan \gamma_{ne} / \cos \lambda_{se}) \cos k_{re} - \tan \lambda_{se} \sin k_{re}$$

$$\tan \alpha_{oe} = \tan \alpha_{ne} \cdot \cos \lambda_{se}$$

$$(1 / \tan \alpha_{fe}) = (\sin k_{re} / \tan \alpha_{ne} \cdot \cos \lambda_{se}) - \tan \lambda_{se} \cos k_{re}$$

$$(1 / \tan \alpha_{pe}) = (\cos k_{re} / \tan \alpha_{ne} \cdot \cos \lambda_{se}) + \tan \lambda_{se} \sin k_{re}$$

De ce fait, il est nécessaire d'étudier l'influence des angles de l'arête en même temps que celle des angles de coupe et de dépouille.

III.1.5.1/ influence de l'angle de direction d'arête :

L'angle de direction d'arête K_{re} donne à cette dernière une orientation par rapport à l'axe de rotation de la pièce et influence de ce fait l'épaisseur et la largeur du copeau.

On peut constater sur la figure (III-13), que pour des caractéristiques d'avance et de profondeur de passes identiques, l'épaisseur et la largeur du copeau sont directement liées à l'angle K_{re} . Et comme la puissance nécessaire à la coupe étant principalement liée à l'épaisseur du copeau, l'angle de direction d'arête agit donc directement sur celle-ci. Il est préférable de travailler avec des outils de coupe ayant un angle de direction d'arête inférieur à 90° , de façon à ce que l'orientation de l'arête soit telle que lorsque l'outil entre en contact avec la pièce à usiner, la pointe de l'outil se trouve en arrière du point de contact avec la matière.

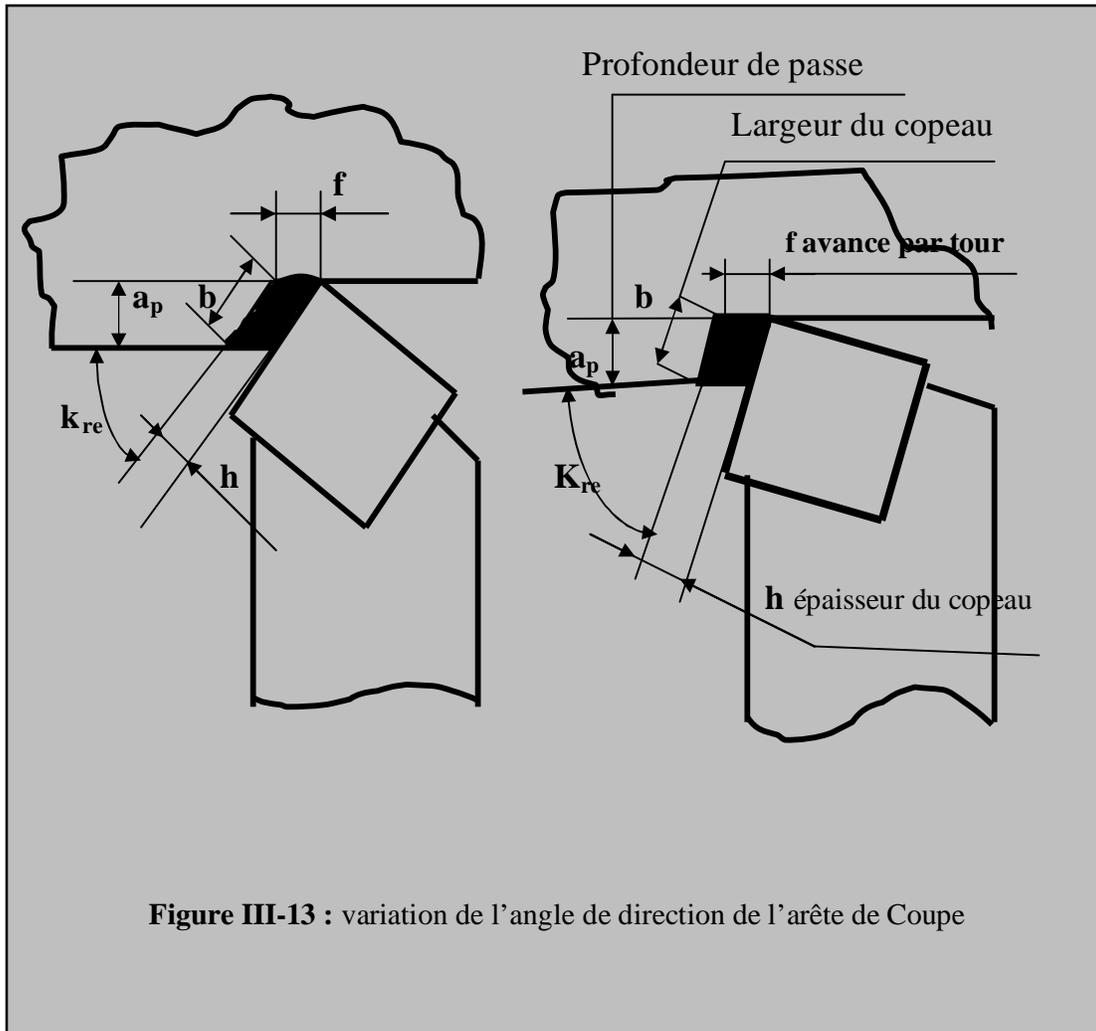


Figure III-13 : variation de l'angle de direction de l'arête de Coupe

III.1.5.2/ influence de l'angle d'inclinaison d'arête :

L'angle d'inclinaison d'arête λ_{se} a plusieurs fonctions. Il agit directement sur la direction d'écoulement du copeau.

L'utilisation des valeurs négatives est surtout employée en ébauche et lors des coupes interrompues. En effet, elles permettent une bonne stabilisation du bec de l'outil par réduction des efforts de flexion et dans le cas d'une coupe interrompue, l'effet de cisaillement du copeau a lieu vers l'arrière de l'outil, donc dans une région moins fragile que la pointe. Par contre, une valeur négative de λ_{se} entraîne les copeaux vers la pièce, ce qui peut provoquer une détérioration de la surface usinée par frottement des copeaux. Les valeurs positives, sont surtout employées pour l'étape de finition, car les copeaux sont dégagés et l'on évite ainsi la

détérioration de la surface. De plus, une valeur positive de l'angle λ_{se} diminue les efforts radiaux et améliore de ce fait la stabilité dimensionnelle.

Généralement en tournage, pour la finition des pièces, on choisira un angle d'inclinaison d'arête compris entre 0° et 10° , alors qu'en ébauche et pour des usinages à coupe interrompue, on choisira un angle d'inclinaison d'arête compris entre -4° et -6° .

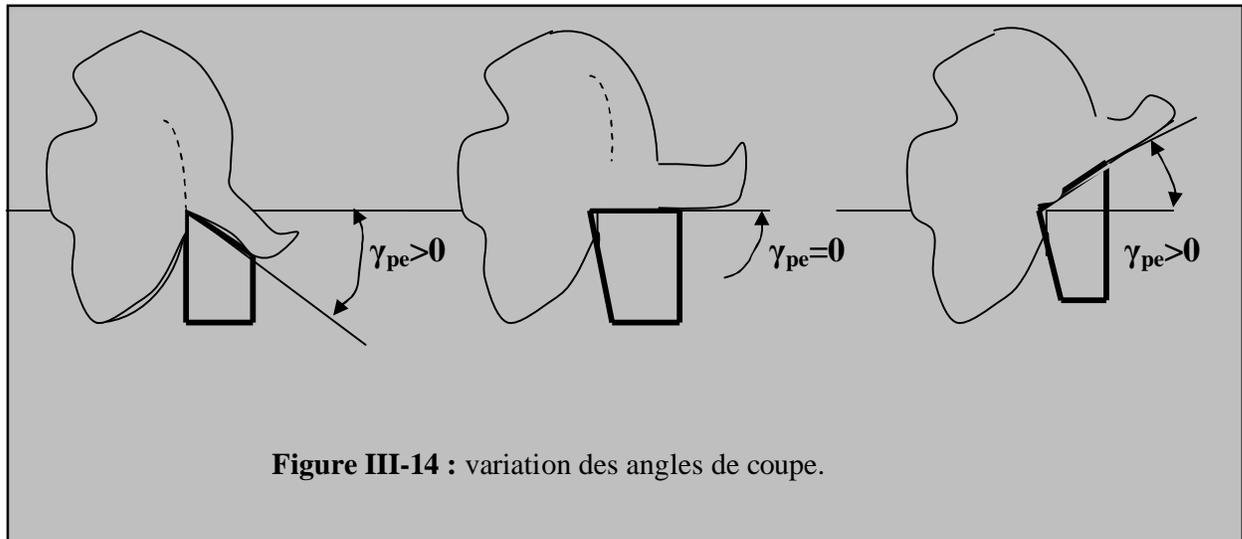
III.1.5.3/ influence de l'angle de coupe :

Il est très important de parler de l'influence de l'angle de coupe, étant donné, qu'il n'y a pas un angle de coupe, mais plusieurs angles, chacun étant défini dans un plan de section déterminée, et qu'ils sont tous liés entre eux par des relations faisant intervenir les angles d'arête. Ils agissant directement sur la qualité de la coupe et sur les efforts de coupe. On observe et d'une façon remarquable, que l'effort de coupe augmente lorsque l'angle de coupe diminue.

Pour l'opération de tournage, on considère généralement l'angle de coupe latéral γ_{fe} et l'angle de coupe vers l'arrière γ_{pe} , ceux-ci étant liés par la relation

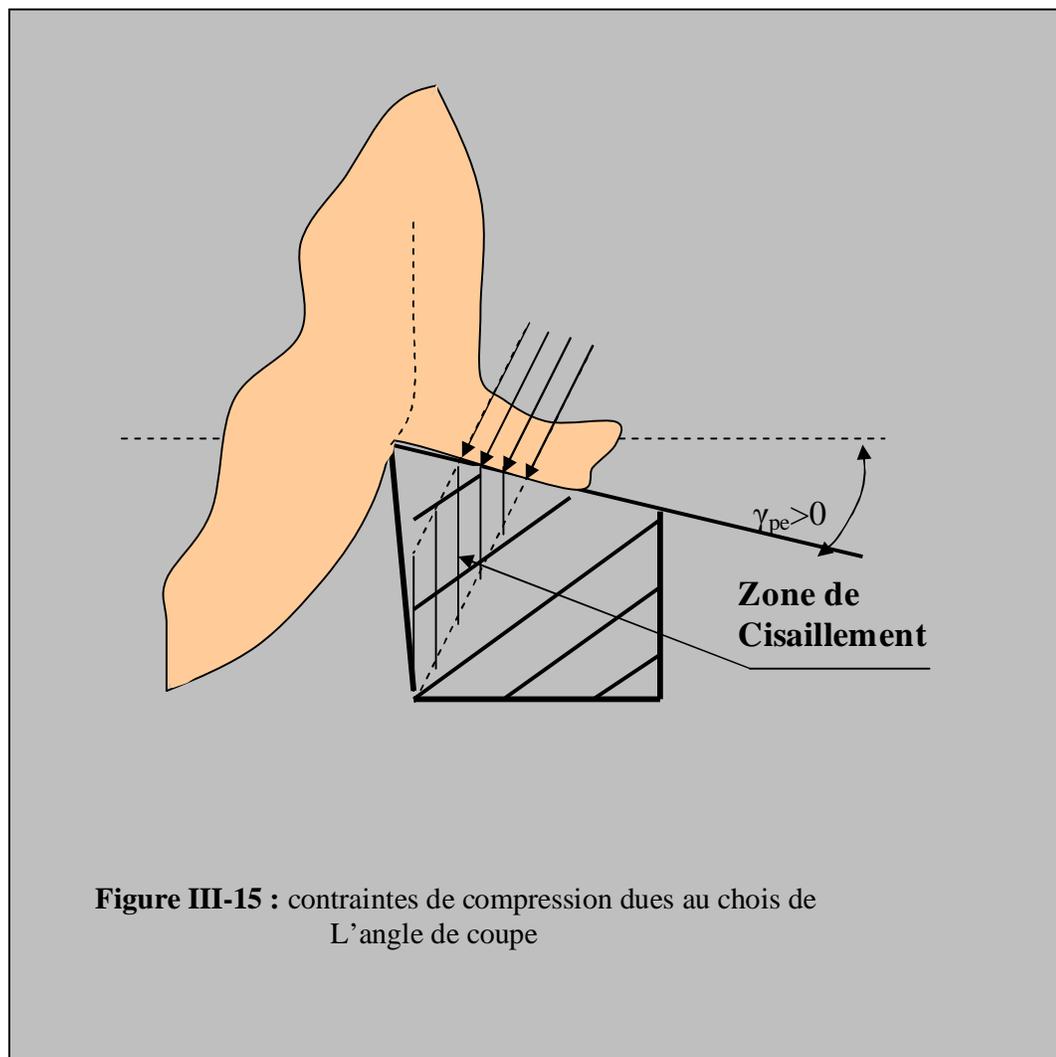
$$\tan g_{pe} = \frac{\tan g_{fe} \cdot \cos K_{re} + \tan I_{Se}}{\sin K_{re}}$$

Dans le processus de séparation du copeau, l'emploi d'un angle de coupe γ_{pe} positif ou négatif influe sur les efforts de coupe et le glissement du copeau sur la face de coupe.



L'emploi d'un angle de coupe positif que la résultante du torseur des efforts copeau-outil, ait une direction telle que la pointe de l'outil est soumise à des contraintes de cisaillement.

Par contre l'emploi d'un angle γ_{pe} négatif, permet de travailler avec des caractéristiques d'avance et de profondeur de passe plus grandes car la pointe de l'outil étant soumise à des contraintes de compression, elle résiste beaucoup mieux. De plus une valeur négative pour cet angle augmente l'angle de taillant et permet ainsi une meilleure diffusion de la chaleur due à la coupe vers le corps de l'outil. Par contre les efforts de coupe sont plus élevés, d'où une augmentation non négligeable de la puissance requise.



III.1.6 /matériaux utilisés pour outils de coupe :

Pour que l'arête tranchante d'un outil de coupe reste toujours vive, elle ne doit pas s'user ; ainsi la matière qui la constitue doit être plus dure que la pièce à usiner [37]. Le corps de l'outil doit résister aux contraintes de flexion et torsion dues à l'effort de coupe. La résilience du corps de l'outil doit être grande car il ne doit pas casser lorsque se produiront de brusques variations de l'effort de coupe.

Comme la dureté d'un métal et sa résilience varient en sens inverse, on voit qu'il faudra prendre des précautions particulières pour le choix des matériaux constituant les outils de coupe.

La recherche sur la coupe conduite à rechercher des nouveaux matériaux à outil dont les performances sont de plus en plus élevées en ce qui concerne :

- la dureté des matériaux susceptibles d'être usinés.
- Les vitesses de coupe utilisables.

Actuellement dans le domaine de la métallurgie, la variété des matériaux de base pour l'élaboration des outils de coupe s'étend de la gamme des aciers rapides, des carbures, des carbures revêtus, des céramiques et des nitrures.

III.1.6.1 /Aciers rapides :

Le mérite de l'invention des aciers rapides revient aux Américains Taylor et Whites en 1903.

Il est important de souligner que pour chaque nuance d'acier rapide, il existe une limite à la qualification à la matière (par exemple, un outil de fraisage en nuance HS 6-5-2 ne pourra pas usiner dans des conditions d'usinage industriellement viable un acier de dureté supérieure à 350 HB). Malheureusement, il est très difficile d'établir des règles par défaut car ces valeurs dépendent du type d'outil (foret, fraise, alésoir...) entre autres ; seuls les essais couple outil/matière peuvent mettre en évidence ces limites.

III.1.6.1.1/ Aciers rapides au tungstène :

Le tungstène a été le premier élément d'addition principal utilisé. L'acier de base HS 18-0-1 a été longtemps le plus employé.

C'est en 1912 que l'Allemand Becker proposa l'addition de 5 % de cobalt et créa la nuance HS 18-1-1-5. Le rôle du cobalt est de stabiliser les carbures à chaud. La dureté à

chaud s'en trouve donc améliorée et par conséquent la capacité à supporter les vitesses de coupe plus élevées.

III.1.6.1.2/ Aciers rapides au molybdène :

Bien que découverts vers 1910, les aciers rapides au molybdène n'ont connu leur développement qu'à partir de 1945, en raison de la pénurie de tungstène durant la Seconde Guerre mondiale.

Ce développement tardif est dû au risque de décarburation et de démolybdénisation de ces aciers, tant au cours de leur fabrication qu'au cours des traitements thermiques, ainsi qu'à leur susceptibilité à la surchauffe due à un domaine de température d'austénitisation très étroit.

Alors que les aciers rapides au tungstène peuvent se traiter dans des fours à air, les aciers rapides au molybdène nécessitent des traitements thermiques en bains de sel ou en four sous vide.

Les avantages des aciers rapides au molybdène par rapport à ceux au tungstène sont importants :

- Le molybdène est plus abondant dans la nature que le tungstène ;
- Le molybdène a une influence double de celle du tungstène sur les capacités de coupe de l'acier : 1 % de molybdène remplace 2 % de tungstène ;
- Il est possible d'obtenir des duretés plus élevées avec les aciers au molybdène et, dureté égale, leur résistance aux chocs est supérieure à celle des aciers au tungstène ;
- Le prix de revient des aciers au molybdène est sensiblement inférieur à celui des aciers au tungstène ;

La nuance HS 2-9-1-8 est, actuellement, la plus employée des nuances d'aciers rapides à l'exception des outils pour opérations axiales (foret, taraud) pour lesquels la nuance HS 6-5-2-5 est également très employée.

III.1.6.1.3/ Aciers rapides sur carburés :

Les aciers rapides sur carburés, c'est-à-dire ceux dont la teneur en carbone est supérieure à 1 %, permettent d'obtenir des duretés allant jusqu'à 70 HRC soit environ 1035 HV. Parmi les nuances d'aciers rapides sur carburés les plus employées, nous citons :

- HS 6-5-4 ou M4 (AISI) ;
- HS 7-4-2-5 ou M41 (AISI) ;
- HS 2-9-1-8 ou M42 (AISI) ;

- HS 12-1-5-5 ou T15 (AISI) ;

À noter que les aciers à teneur en vanadium supérieure à 3 % (HS 6-5-4 et HS 12-1-5-5) sont très difficiles à rectifier ou à affûter. Les meules au nitrure de bore (type Borazon) se révèlent toutefois efficaces dans ce cas.

III.1.6.1.4/ Aciers rapides resulfurés :

Alors que le soufre résiduel est considéré comme une impureté et maintenu à des teneurs inférieures à 0,03 % dans les aciers de base, il peut parfois être ajouté dans certaines nuances d'aciers rapides pour en améliorer l'aptitude à l'usinage et au meulage. Il s'agit en général d'une addition comprise entre 0,10 et 0,20 %. Cette resulfuration permet d'améliorer considérablement l'état de surface après usinage des outils. En revanche, la ténacité s'en trouve défavorablement affectée, surtout dans le sens transversal au fibrage .

Les aciers rapides resulfurés sont utilisés pour la fabrication d'outils à profil constant, pour lesquels un bon état de surface est exigé sans rectification (molettes de tournage, fraises mères à denture non rectifiée, fraises pour entrée de denture, etc.).

III.1.6.1.5/ Aciers rapides élaborés par métallurgie des poudres :

Cette technique permet d'obtenir des compositions chimiques et des finesses de structure non réalisables par les méthodes d'élaboration conventionnelles.

Ce type d'acier rapide est actuellement largement développé. Certaines nuances sur carburées fortement alliées en cobalt et en vanadium comblent le domaine d'application qui séparait les aciers rapides conventionnels des carbures de coupe.

Par rapport aux nuances conventionnelles, les aciers rapides élaborés par la métallurgie des poudres présentent les avantages suivants :

- Moindre déformation au cours du traitement thermique en raison de l'absence totale de ségrégation ;
- Très bonne aptitude à la rectification grâce à la finesse de la structure, notamment des carbures ;
- Grande résistance à l'usure et haute dureté à chaud par la possibilité de réaliser des nuances à haute teneur en vanadium et en cobalt impossibles à élaborer ou à transformer par les procédés conventionnels ;
- Très bonne ténacité et bonne isotropie, même pour des produits de forte section, grâce à la finesse et à l'homogénéité de la structure ;

III.1.6.2 /Carbures métalliques :

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

Vers 1958 ont été créés les outils à plaquettes amovibles (figure III.16). Ce type d'outil a été rapidement adopté car les avantages des plaquettes amovibles sont nombreux :

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

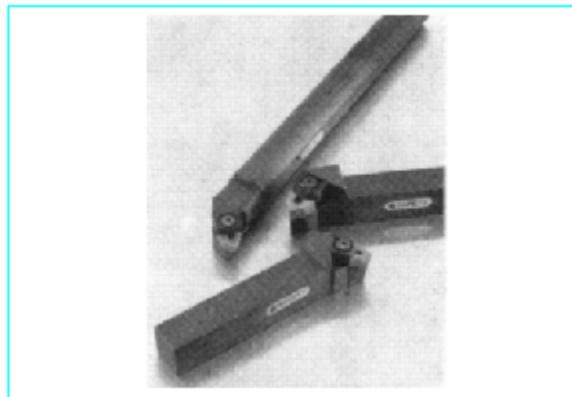


Figure III.16 : outils à plaquette amovible.

III.1.6.2.1/Carbures métallique sans revêtement :

La dureté des carbures métalliques (environ 1500 à 2500 HV), très supérieure à celle des aciers rapides non sur carburés (HRC 66 soit environ 865 HV), jointe à une résistance importante (résistance à la flexion de 800 à 2 200 MPa) (tableau 1) explique qu'ils sont les plus utilisés. Leur dureté à chaud permet l'usinage jusqu'à une température de 1000 °C.

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

- **P** : Métaux ferreux à copeaux longs ;
- **M** : Métaux ferreux à copeaux longs, à copeaux courts et métaux non ferreux ;
- **K** : Métaux ferreux à copeaux courts, métaux non ferreux et matières non métalliques ;

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

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

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

Par contre, les carbures métalliques non revêtus sont de plus en plus employés pour certains types d'outils en remplacement de l'acier rapide. On peut citer : foret en carbure monobloc, foret à insert rapporté en carbure, alésoir à plaquettes, alésoir monobloc, taraud, insert brasé pour les outils de décolletage...).

III.1.6.2.2/Carbures métallique avec revêtement :

À partir de 1969 apparaît un nouveau type de matériau de coupe : le carbure revêtu constitué par une plaquette en carbure métallique recouvert par un film mince (3 à 10 *mm*) d'un matériau plus dur (2000 à 3000 Knoop).

Les couches les plus usuelles sont le carbure de titane, le nitrure de titane, le carbonitrure de titane et l'alumine . Chacune de ces couches apporte à l'outil une amélioration dans un domaine particulier (résistance à l'usure, à l'oxydation, au frottement, etc.). Aussi des dépôts multicouches ont-ils été réalisés afin de combiner leurs différents avantages. Des revêtements à base de nitrure de hafnium et de carbure de chrome ont été également commercialisés .Ces couches sont obtenues généralement par CVD dans des fours entre 800 et 1100 °C, ce qui permet d'obtenir des dépôts de très bonne adhérence.

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

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

III.1.6.3/ Céramiques :

Les céramiques sont des matériaux frittés sans liant métallique. Ils sont très durs et donc sensibles aux chocs thermiques et mécaniques.

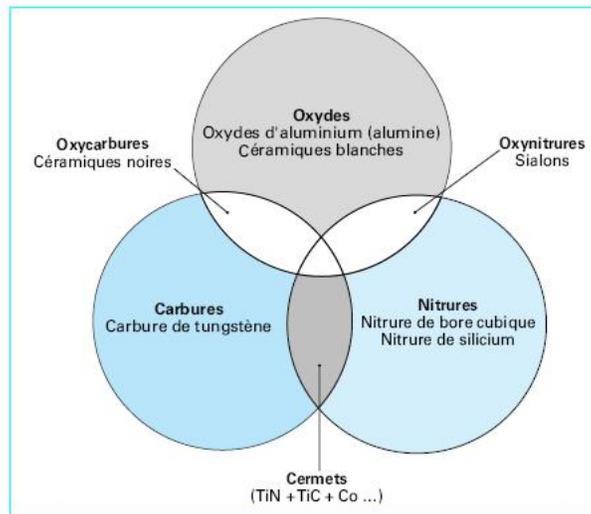


Figure III.17 : Céramiques.

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

Jusqu'aux années 1980, l'alumine a été utilisée pour l'usinage de fontes dont la

dureté ne dépassait pas 250 HB, mais il est possible maintenant d'usiner de l'acier jusqu'à HRC 60 (environ 700 HV) ; c'est le matériau de coupe qui résiste le mieux à la cratérisation.

D'autres céramiques sont également employées.

- **Les céramiques noires :**

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

- **Le nitrure de silicium Si_3N_4 :**

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

- **Les céramiques renforcées par des whiskers :**

(bâtonnets de fibres mono cristallines de carbure de silicium entrelacées) qui leur confèrent une plus grande ténacité, permettent un travail au choc ou dans les matériaux réfractaires.

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

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

III.1.6.4/ Cermets :

Cermet est un terme formé de deux syllabes : **Cer** vient de céramique et **met** de métal. Ce sont des matériaux élaborés par la métallurgie des poudres, constitués par des particules de composés métalliques durs (carbures, nitrures, carbonitrures) liées par un métal (généralement du nickel). Actuellement, les cermets sont composés de TiC, TiN, TiCN, Mo₂C, WC, VC, TaC, NbC, Ni et Co (tableau 1).

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

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

III.1.6.5/ Diamant :

III.1.6.5.1/ Diamant naturel :

Le diamant naturel est issu de la transformation, il y a 100 millions d'années, du carbone sous très haute pression (environ 7 GPa) et à température élevée (environ 2000 °C). Sa haute dureté et sa faible réactivité chimique expliquent qu'il ait pu se conserver à travers les siècles. On le trouve dans des zones géographiques : Afrique du Sud, Zaïre, Russie, Brésil, Australie, etc. Les plus beaux diamants (les plus grands et exempts de défauts) sont destinés à la joaillerie. En 1977, la production mondiale a été de 8 t dont 26 % pour la joaillerie, le reste étant destiné à l'industrie.

Les propriétés remarquables du diamant naturel en tant qu'outil de coupe (tableau 1) sont les suivantes :

- C'est le plus dur des matériaux connus ;
- Sa résistance à la compression est très supérieure à celles des autres matériaux ;
- Son coefficient de dilatation thermique ($3,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), plus faible que celui des autres matériaux d'outils, lui confère une excellente résistance aux chocs thermiques ;
- Sa conductivité thermique, la plus élevée de tous les matériaux 600 à 2000 $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ facilite l'évacuation de la chaleur de la zone de coupe si bien qu'un diamant qui vient d'usiner paraît froid au toucher ;

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

III.1.6.5.2 / Diamant synthétique :

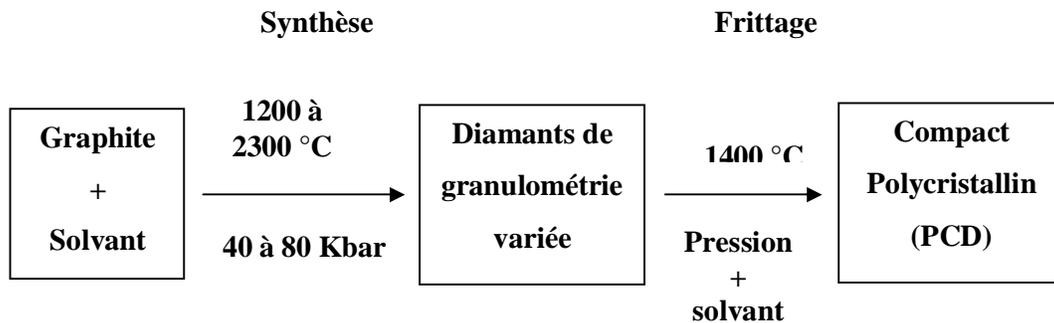
Les premiers furent réalisés en Suède en 1953 par **Von Platen**, puis en 1954 par Hall aux États-Unis, en soumettant du graphite à des températures et pressions très élevées. Les cristaux obtenus étaient petits (< 0,5 mm) et servaient à la fabrication de meules en diamant synthétique.

La production est actuellement forte : de 22 t/an en 1986, elle a peu évolué

jusqu'en 1995, date à laquelle la production semble s'être accélérée.

Pour obtenir des cristaux plus grands, les durées de production sont excessives (> 50 h de synthèse pour créer un monocristal de 1 carat), le diamant naturel est alors plus rentable.

Aussi préfère-t-on réaliser des compacts poly cristallins (PCD) en effectuant un frittage à haute pression et 1400 °C pour agglomérer, sous forme de plaque, les grains de diamant.



La partie diamantée est parfois liée, lors du frittage, à un support à base de carbure de tungstène.

Contrairement au diamant naturel, le PCD est isotrope, il ne présente ni plan de clivage ni variation de dureté. Celle-ci est un peu inférieure à la valeur maximale de celle du diamant naturel. Le PCD est plus résilient (non propagation de criques) et donc plus résistant aux chocs mécaniques. Il est bon conducteur thermique et électrique.

Le PCD, comme le diamant naturel, commence à s'oxyder vers 600 °C à l'air et, à partir de 1000 °C sous atmosphère protectrice, on assiste à un début de déstabilisation de la structure du diamant qui redevient graphite (graphitisation du diamant).

Selon la compatibilité physico-chimique métal usiné/diamant, la conductivité thermique élevée peut favoriser une réactivité chimique qui en limitera les applications.

III.1.6.6 / Nitrure de bore cubique :

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

Suivant les conditions, on obtient deux formes :

- **Nitrure de bore à structure cubique (CBN) :**

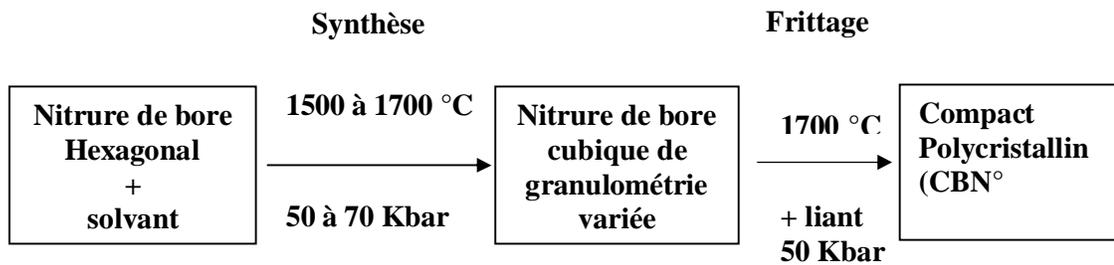
Qui est la forme la plus dure (même structure que le diamant) ;

- **Nitrure de bore à structure hexagonale :**

De faible dureté (même structure que le graphite).

La forme dure est très difficile à obtenir et les techniques sont voisines de celles utilisées pour la synthèse du diamant. Les cristaux obtenus sont très petits (< 0,5 mm, plutôt vers 50 *nm*) utilisables pour la réalisation de meules.

Pour fabriquer des outils de coupe, on réalise par frittage (premier essai vers 1972) un compact polycristallins (analogie avec le PCD) à matrice céramique ou métallique, éventuellement lié à un substrat en carbure de tungstène.



C'est le matériau connu le plus dur après le diamant (tableau 1). Il présente une résistance mécanique élevée dépendant de la nature et de la quantité de liant.

Sa dureté se maintient à chaud (jusqu'à 1000 °C), ce qui permet de travailler à des vitesses de coupe très élevées et d'usiner des matériaux durs.

Comme pour le diamant, la réactivité chimique liée au couple matériau usiné/outil de coupe en limite les applications. [38]

III.2/ Usure des outils de coupe :

III.2.1/ phénomènes provoquant l'usure :

D'après la définition normalisée, l'usure est la perte progressive de la surface active d'un corps par suite du mouvement relatif d'un autre corps sur cette surface.

Dans la formation du copeau lors de l'usinage, la partie active de l'outil en mouvement relatif avec la pièce et le copeau est soumise à des sollicitations mécaniques et thermiques très intenses, ce qui provoque son usure et sa détérioration rapide [39].

L'étude détaillée du phénomène, révèle différentes formes d'usure. L'usure par effets mécaniques et l'usure par effets physico-chimiques. Ces phénomènes dépendent essentiellement de la température de coupe, et selon König, se divisent comme le montre la **figure 4-1**

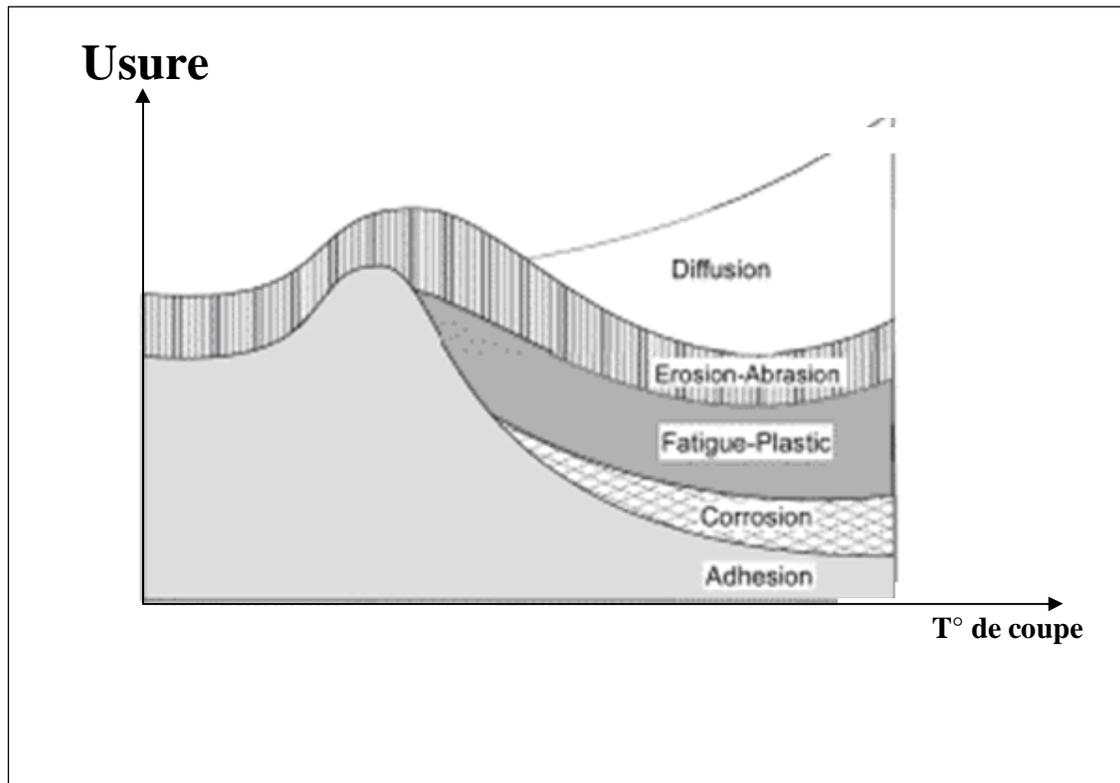
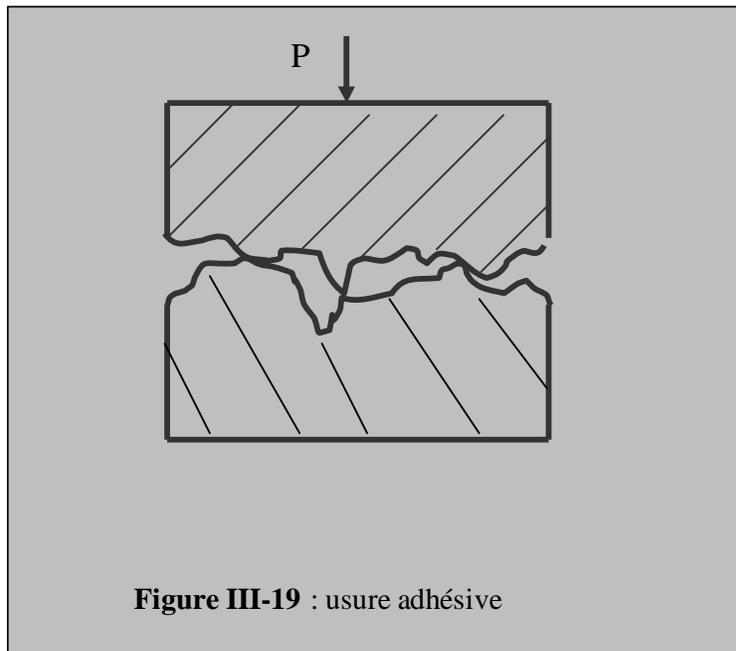


Figure III-18 : schématisation des divers mécanismes d'usure en fonction du Régime de coupe.

III.2.1.1/ phénomènes mécaniques d'usure :**III.2.1.1.1/ usure adhésive :**

Elle se caractérise par deux surfaces :

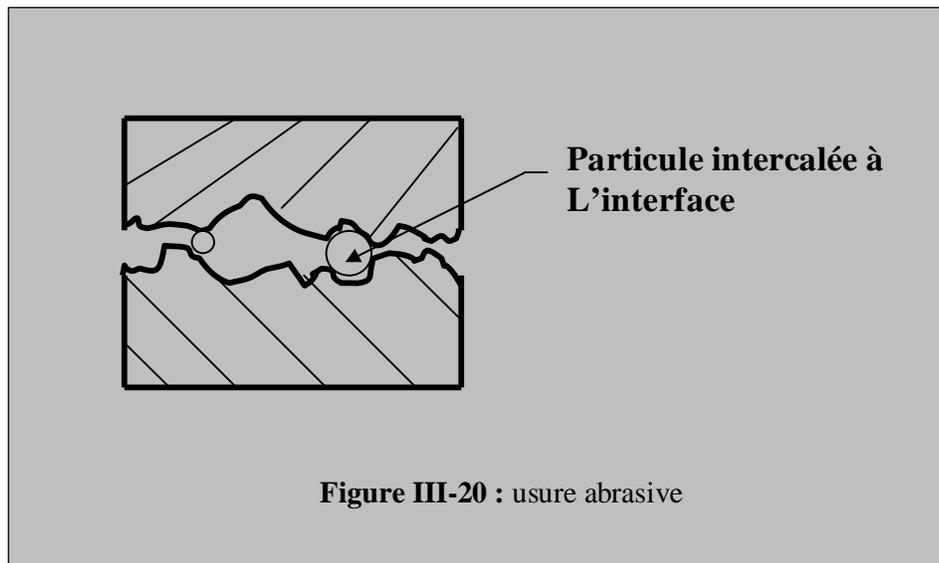
Soit A_r la surface réelle de contact et A_a la surface apparente de contact, on peut avoir le rapport $A_r/A_a = 10^{-5}$ [42], il y a transfert de métal d'une surface à l'autre pendant leur mouvement relatif, dû à un processus de soudure en phase solide (même avec une lubrification)



III.2.1.1.2/ usure abrasive (A sec) :

Dans ce type d'usure, le déplacement de matière est produit par des particules dures contenues dans les matériaux en contact **figure III-20**. L'usure par abrasion est essentiellement due aux frottements copeau/outil et aux frottements outil / pièce [40]. Il est donné par l'expression :

$$U_{\text{abrasive}} = K_g \cdot p \cdot C_f \cdot V_g$$

**III.2.1.1.3/ usure par fatigue:**

Dans ce cas, les particules se détachent par la fatigue, résultant d'une variation cyclique de contraintes .

III.2.1.1.4/ usure par déformation plastique:

L'usure par déformation plastique est due essentiellement à l'affaissement de l'arête de coupe sous l'action des efforts de coupe, et ceci d'autant plus rapidement que la température à proximité du bec de l'outil augmente. La figure ci-dessous, montre, la répartition des températures à proximité du bec d'un outil à plaquette céramique.

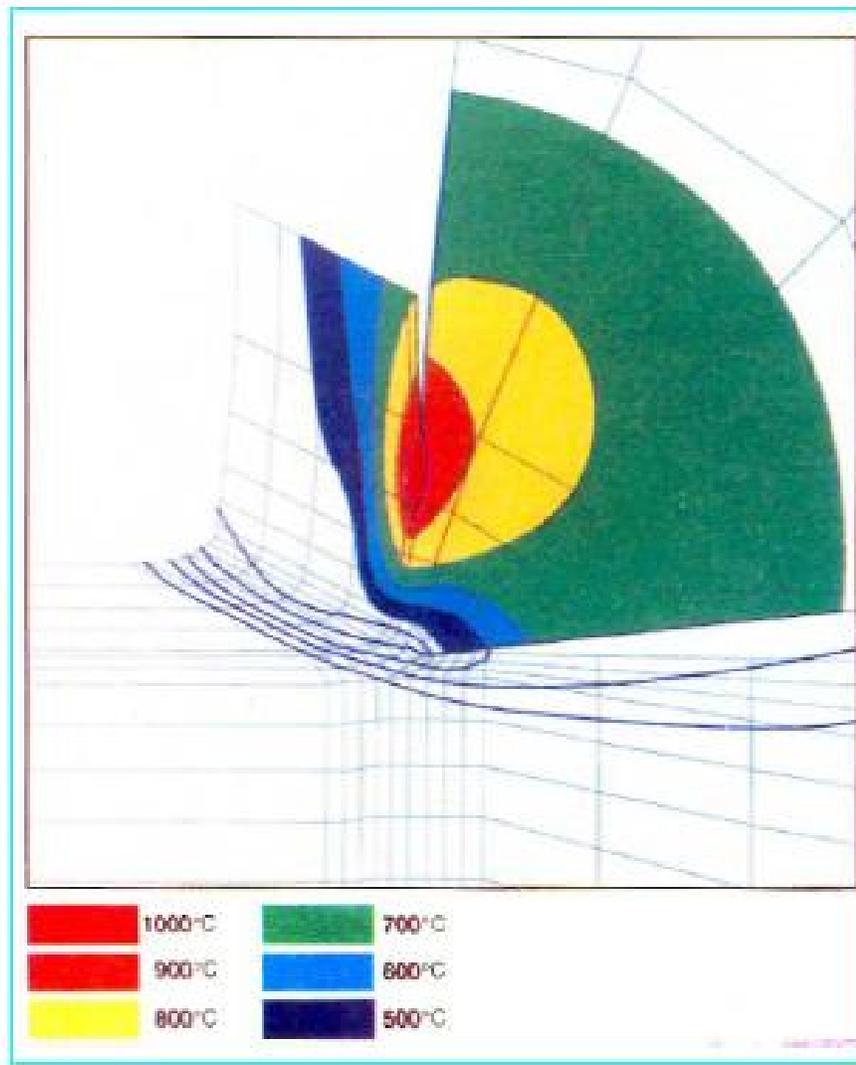


Figure III-21 : Carte de températures dans un copeau et dans l'outil obtenu
Par Modélisation thermomécanique [41]

III.2.1.1.5/ usure érosive :

On constate que le mécanisme est le même que ce lui par déformation plastique, Seulement dans ce cas, les particules dures sont véhiculées par un fluide [39].

III.2.1.1.6/ usure par fissuration

La fissuration de l'arrête tranchante, donc sa fragilisation, apparaît surtout lors du travail sous chocs (coupe discontinue).

III.2.1.2/ phénomènes physico-chimiques d’usure :

III.2.1.2.1/ usure corrosive :

Ce type d’usure est dû au phénomène de la corrosion provoquée par le contact des deux matériaux constituant la pièce et l’outil, particulièrement sous l’effet des lubrifiants . Les types d’usure corrosive sont :

- Corrosion au contact de l’air ou du lubrifiant, du matériau naissant.
- Corrosion chimique au niveau des molécules.
- Corrosion électro-chimique au niveau des ions.

Dans tous ces cas on observe un transfert des particules de l’outil dans le copeau.

III.2.1.2.2/ usure par diffusion:

Ce type d’usure, essentiellement due à l’élévation de température, apparaît lors de l’emploi des vitesses de coupe très élevées [40]. Elle est progressive et continue pour laquelle les éléments constitutifs de l’outil sont emmenés par le copeau par quantités très petites simultanément, elle est due à la diffusion des constituants de l’outil dans le copeau et inversement, des constituants de la matière usinée dans l’outil.

L’enlèvement direct de matière sur l’outil peut être un facteur important de l’usure, mais en outre , la perte de constituants, les réactions provoquées par la diffusion affaiblissent la résistance mécanique de l’outil en surface , ce qui contribue à son usure directement[42] et [43].

III.2.2/étude des différents paramètres influants sur l’usure :

D’une façon générale on étudie l’influence des paramètres fondamentaux. Selon GELIN [40], les conditions de coupe (vitesse de coupe et section du copeau), la lubrification et le couple matériau usiné/matière de l’outil, constituent les principaux paramètres d’usure.

III.2.2.1/ influence des conditions de coupe :

III.2.2.1.1/ influence de la vitesse de coupe :

La vitesse de coupe à une grande influence sur l’usure, car la température à l’interface pièce / outil augmente avec la vitesse, du fait que plusieurs phénomènes sont liés à la température, la vitesse de coupe agit sur ces différents phénomènes. La vitesse de coupe V_C s’exprime par :

$$V_C = \frac{p \cdot D \cdot N}{1000} \dots\dots\dots 1-3$$

III.2.2.2/ influence de la section du copeau :

Plus la section du copeau est grande, plus les efforts nécessaires à la coupe sont élevés et plus la température au voisinage de l'arête tranchante est grande.

III.2.2.3/ influence de la lubrification :

L'influence de la lubrification étant assez complexe, on la caractérise souvent par l'absence ou la présence de lubrification lors des essais. Dans le cas où il y a présence de lubrification, on spécifie si le lubrifiant employé est un lubrifiant de graissage pour faciliter le glissement du copeau sur la face de coupe de l'outil, ou si le lubrifiant est de refroidissement pour diminuer la température dans la région du bec de l'outil [40].

III.2.2.4/ influence du couple pièce / outil :

Le matériau de la pièce intervient par ses propriétés mécaniques surtout par sa résistance à la rupture. Le matériau de l'outil intervient, aussi, par ses propriétés mécaniques, mais aussi, par ses propriétés physico-chimiques, et entre autres par ses propriétés thermiques.

III.2.2.5/ influence des angles sur la face de coupe :

Examinons les fonctions que remplissent les différents angles au cours du travail de coupe. Ils influent sur l'arête tranchante de l'outil comme présenté sur figure III.22

1. si α_n est trop grand, l'arête de coupe est fragile.
2. si α_n est trop petit, il y a risque de talonnage

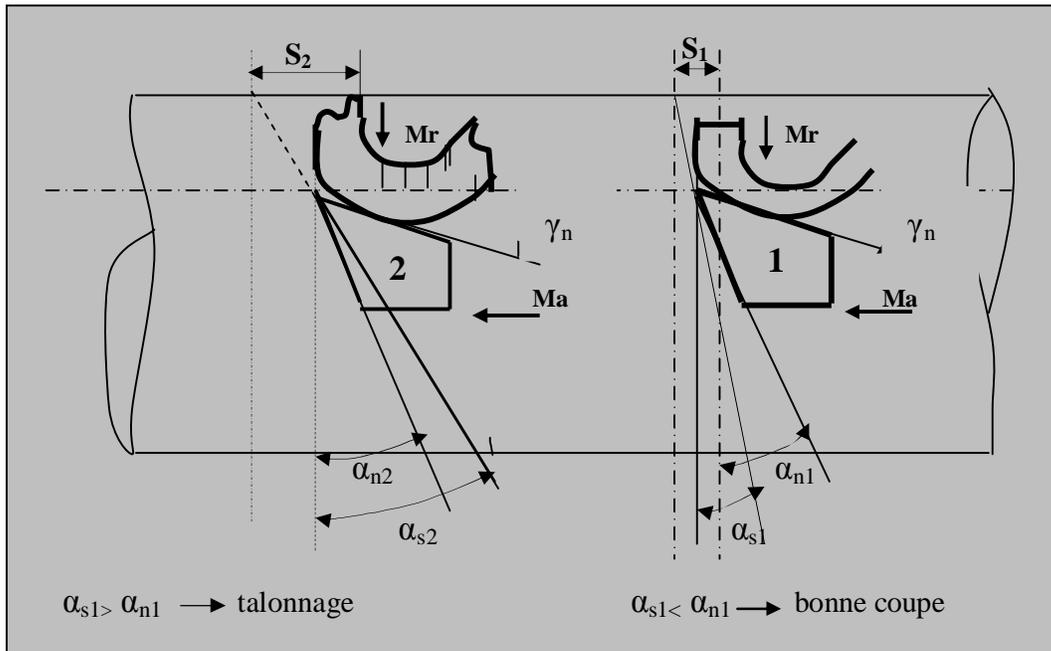


Figure III-22 : Influence de l'angle de coupe sur l'enroulement du copeau [44].

Lorsque l'avance devient trop grande, on est obligé de donner à l'outil une dépouille complémentaire. En effet, du mouvement d'avance de l'outil et du mouvement de rotation de la pièce, résulte un mouvement hélicoïdal dont l'angle d'hélice α_s , doit être inférieure à l'angle de dépouille normal α_n le frottement éventuel de l'outil sur la pièce provoque une détérioration de la surface usinée et de la face frontale de l'outil [42].

Il agit directement sur la qualité de la coupe et sur les efforts de coupe. D'une façon générale, l'effort de coupe augmente lorsque l'angle de coupe diminue.

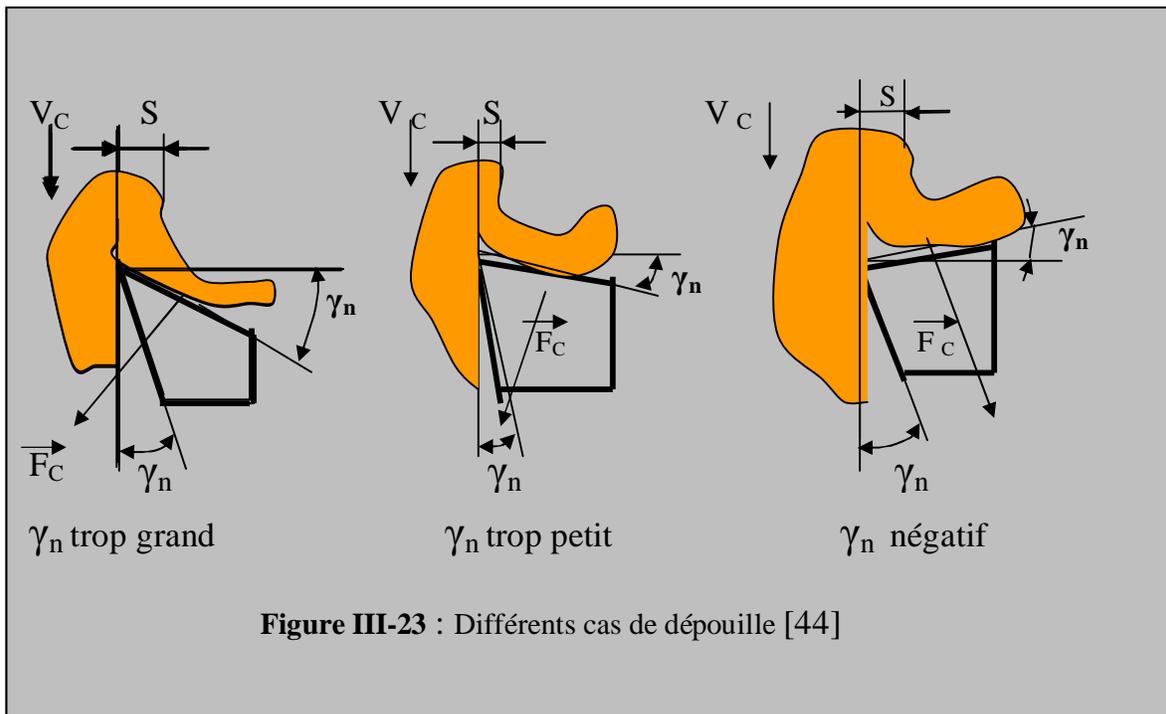
III.2.2.5.1/ influence de l'angle de dépouille γ_n :

1- si γ_n est trop grand, l'arête de coupe est fragile, la caractérisation est de faible profondeur à mi large, l'engagement de l'outil dans la matière est favorisé par l'écoulement du copeau est continue ; il ne se brise pas.

2- si γ_n est trop petit, le frottement du copeau sur la face du coupe est important et celle-ci peut s'affaisser, la caractérisation est profonde mais peu large.

3- si γ_n est négatif, on dit que l'outil a une coupe négative.

L'application de cette valeur négative n'est possible que sur des outils dont l'arête de coupe est en carbure métallique ou en céramique. Dans ce cas, on remarque que le copeau est brisé et que la face de coupe résiste mieux à l'effort de coupe F_C qui est presque normal à celle-ci (figure III.23).



III.2.2.5.2/ influence de l'angle d'inclinaison de l'arête :

L'angle d'inclinaison d'arête peut être positif ou négatif. Il agit directement sur la direction de l'écoulement du copeau [40].

- 1- Si λ_s est positif, il rend fragile l'extrémité de l'arête coupante.
- 2- Si λ_s est négatif, cette fragilité est très atténuée et l'outil attaque le métal
- 3- dans une zone résistante aux chocs et à l'usure

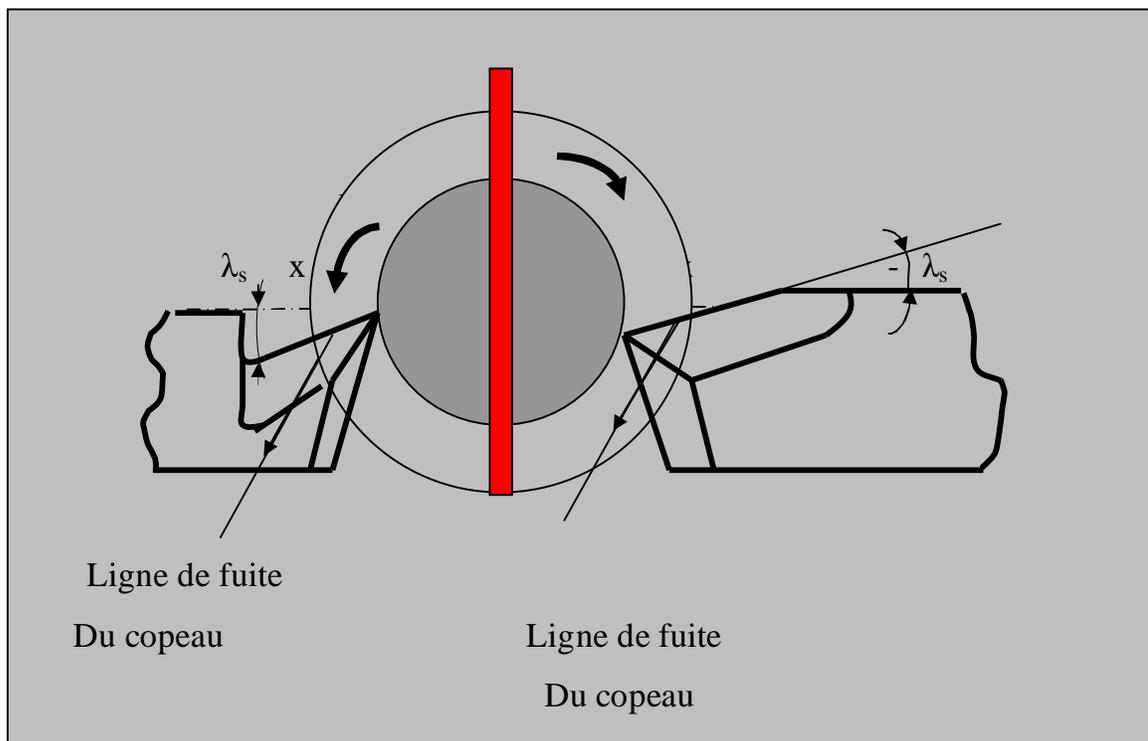


Figure III-24: influence de l'angle d'inclinaison de l'arête [44]

III.2.3/ Effet observable après l'usinage :

III.2.3.1/ variation de masse :

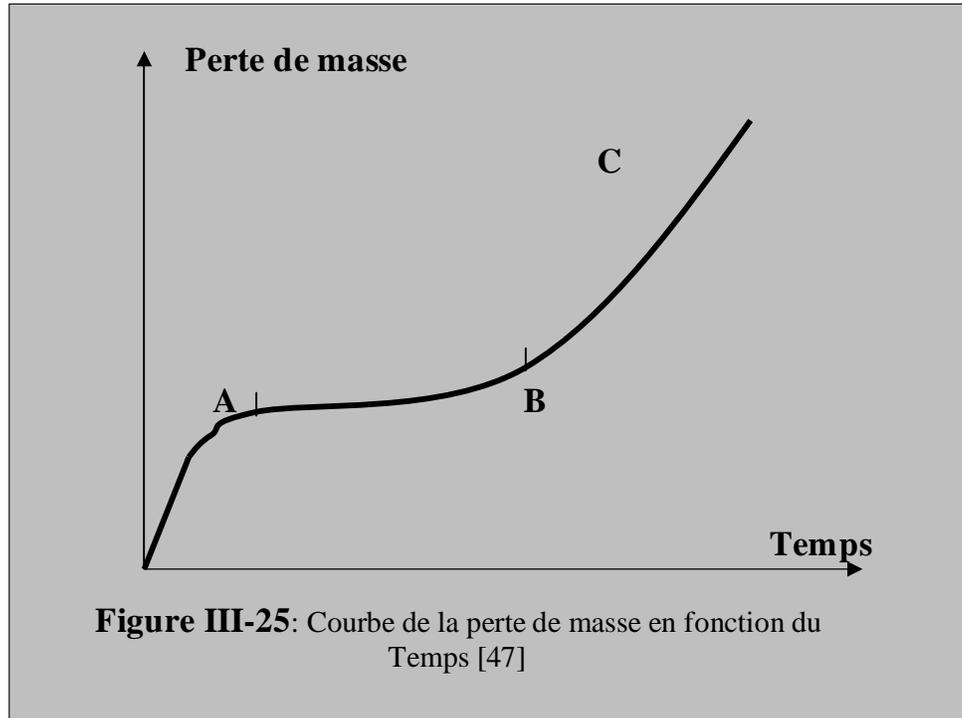
Si l'on trace la courbe qui représente la perte de masse en fonction du temps voir la figure on peut distinguer, dans le cas d'un organe de machine, trois zones distinctes :

- OA : pendent laquelle l'usure est rapide, que l'on appelle plus communément rodage.
- AB : qui correspond à l'utilisation normale de la machine.

- BC : qui apparaît au bout d'un certain temps de fonctionnement et qui conduit sous l'effet de l'augmentation des jeux et des efforts à la disparition des films lubrifiants et à la destruction des éléments de machine.

Classiquement, les pertes de masse peuvent être déterminé à partir des méthodes suivantes :

- Mesures pondérales, par la pesée des pièces à des instants choisis à l'avance.
- Mesures dimensionnelles, où on recherche les variations de dimensions des pièces au cours de leur utilisation.
- Etude de la pollution des lubrifiants. La méthode de la tâche d'huile permet. Par examen de cette dernière sur un papier perméable de connaître la teneur de l'huile en impuretés soit par utilisation de traceurs radioactifs [45]. Soit par mesure de la microgéométrie. [46]



III.2.3.2/ phénomène thermique:

La température de la zone de contact est la somme de la température ambiante et deux termes tous deux de la chaleur engendrée par le frottement. Le premier terme est l'accroissement de la température moyenne dans la masse des éprouvettes, au dessus de la température ambiante, ce terme est généralement faible devant le deuxième (appelé

température éclairée) qui correspond à un accroissement brutal de la température en un point de la surface en mouvement lorsqu'il est sollicité dans la zone de contact. [48] et [49].

III.2.3.3/ transformation géométrique :

Sous l'effet de la charge et du frottement, les aspérités microgéométriques des surfaces des corps en contact sont le siège de déformation élastique ou plastique. On considère en général que l'état de surface microgéométrique s'améliore au cours du rodage. Les aspérités superficielles peuvent être écrasées ou arrachées. Dans certaines circonstances, il y a apparition de rayures, de fissures et émergence de différents plans de glissement.

III.2.3.4/ Transformations mécaniques et tribochimiques :

Les contraintes et les cycles thermiques ont pour effet de transformer les matériaux et plus particulièrement les couches superficielles. Les changements rapides de température peuvent être à l'origine d'apparition des phases qu'il est impossible d'obtenir par d'autres procédés. On observe des oxydations, des changements de composition chimique, des destructions de grains, des écrouissages et des effets triboélectriques.

III.2.4/ manifestation de l'usure de l'outil :

L'observation de la partie active de l'outil fait apparaître des formes d'usure caractéristiques qui correspondent aux conditions dans lesquelles l'outil travaille, selon la nature des matériaux en présence (outil- pièce), selon les conditions extérieures dues à l'environnement et enfin selon le régime de coupe affiché. On peut rencontrer les diverses formes d'usure des faces de l'outil suivantes :

III.2.4.1/ usure de la face de coupe (en cratère) KT :

Ce type d'usure de l'outil est désigné par le terme (usure en cratère) dont le symbole normalisé KT, s'observe sur la face d'attaque de l'outil. Il se présente sous la forme d'une cuvette, obtenue par l'effet du frottement intense du copeau. Cette forme d'usure se manifeste principalement lors de travaux d'ébauche, à faible vitesse de coupe et à une très grande avance, sur des matériaux abrasifs. Il a été constaté que l'effort très important exercé par le copeau sur la face d'attaque entraîne des pressions très importantes qui créent avec le mouvement relatif copeau-outil, des températures élevées favorisant l'usure par diffusion.

L'observation de cette forme d'usure en cratère se rencontre plus fréquemment sur les outils en carbures métalliques et en céramiques qui présentent une structure plus favorable

que les outils en acier rapide. L'usure sur ces derniers se stabilise après sa naissance par un écrouissage superficiel du métal.

L'usure en cratère est caractérisée par la profondeur KT , le rapport KT/KM , ou par l'angle de caractérisation (γ).

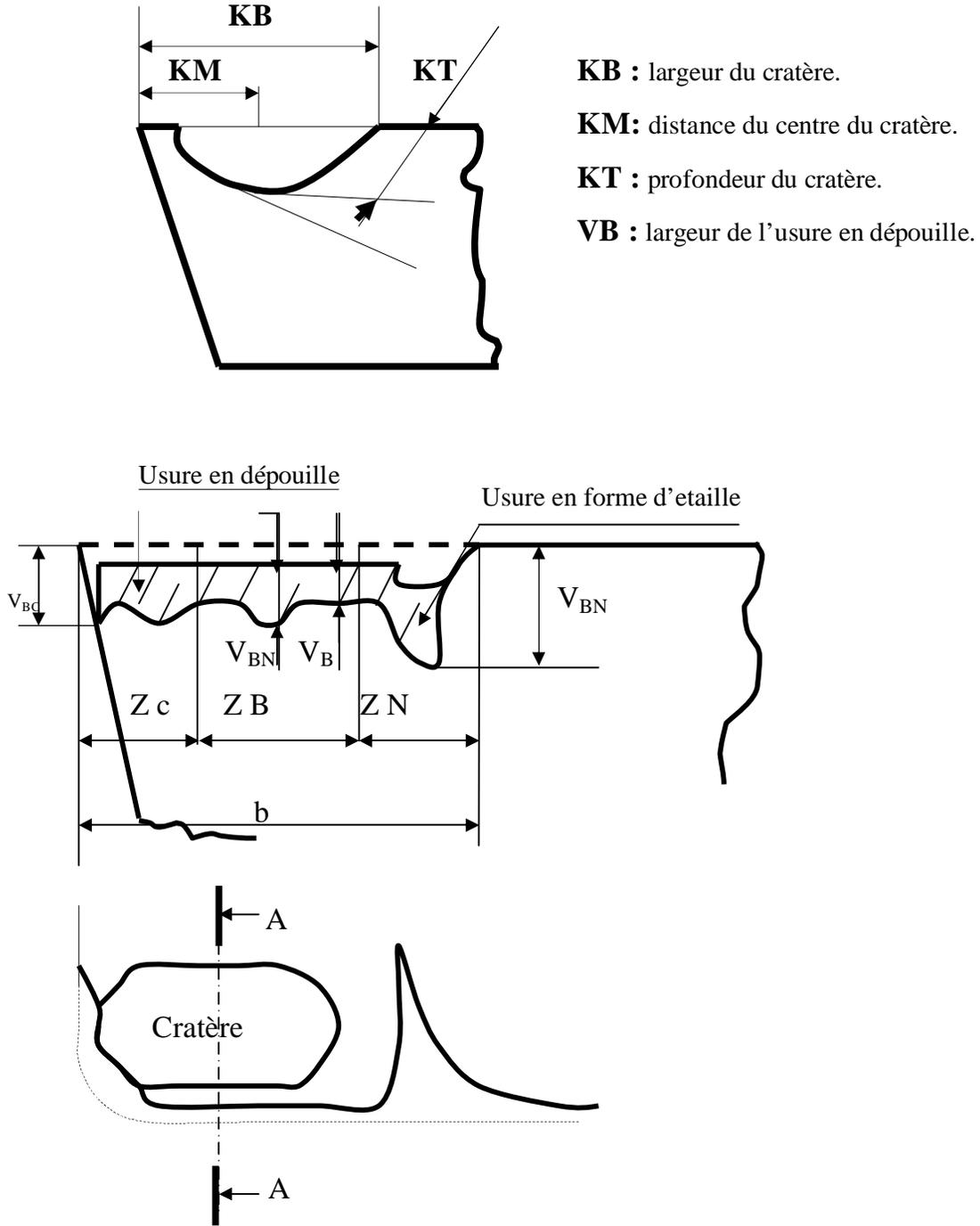


Figure III-26 : Profil de l'usure obtenue.

III.2.4.2/ usure de la face en dépouille (VB) :

L'usure en dépouille ou frontale, se caractérise par l'apparition d'une bande brillante le long de la face en dépouille principale.

Elle est due principalement au frottement de la pièce sur cette face en présence de grandes températures, L'usure frontale est caractérisée par le symbole VB.

Sur le plan pratique. Cette forme d'usure est la plus importante puisqu'elle conditionne simultanément l'état de surface de la pièce usinée et la précision dimensionnelle.

III.2.4.3/ usure en entaille :

C'est une forme particulière de l'usure de la face en dépouille qui se manifeste à l'endroit ou l'arête principale quitte le contact avec la pièce.

III.2.4.4/ usure par écaillage de l'arête de coupe (par fissuration) :

Ce type d'usure se rencontre principalement sur les outils en matériaux fragiles tels les carbures métalliques, lorsqu'ils sont employés dans le cas de coupe interrompue. Elle se manifeste par l'apparition de fissure et d'ébréchures sur l'arête tranchante, ce qui diminue la tenue de l'outil dans le temps.

III.2.4.5/ usure par effondrement de l'arête :

Dans des conditions de coupe très sévères, lorsque la vitesse de coupe est trop importante, et également lorsque la dureté du matériau à usiner est supérieure à celle de l'outil, ou que la structure du matériau à usiner n'est pas homogène et présente des points durs. Elle se produit encore lorsque l'acuité d'arête de l'outil n'est pas suffisante (l'arête est faite d'un arrondi) et que par conséquent, l'outil travaille en dessous de la valeur du copeau minimal.

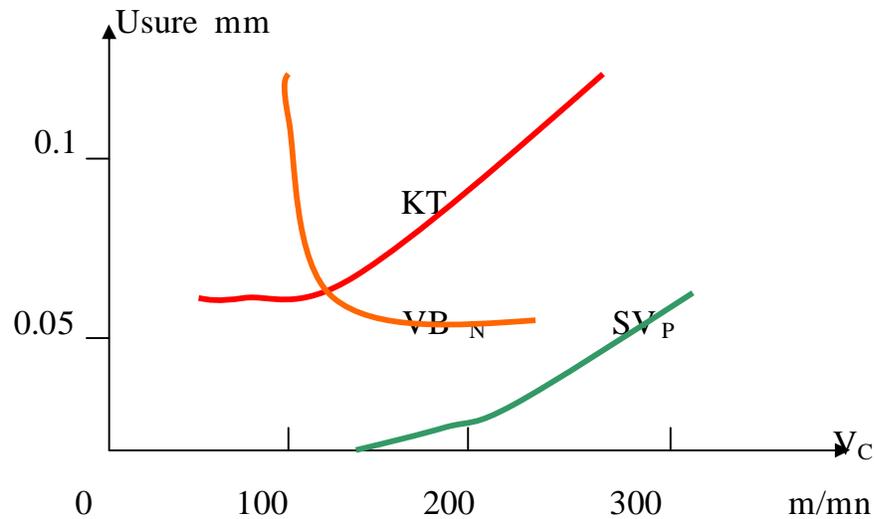


Figure III-27: différentes formes d'usure en fonction de la vitesse de coupe

III.2.5/ les différents mécanismes régissant l'endommagement :

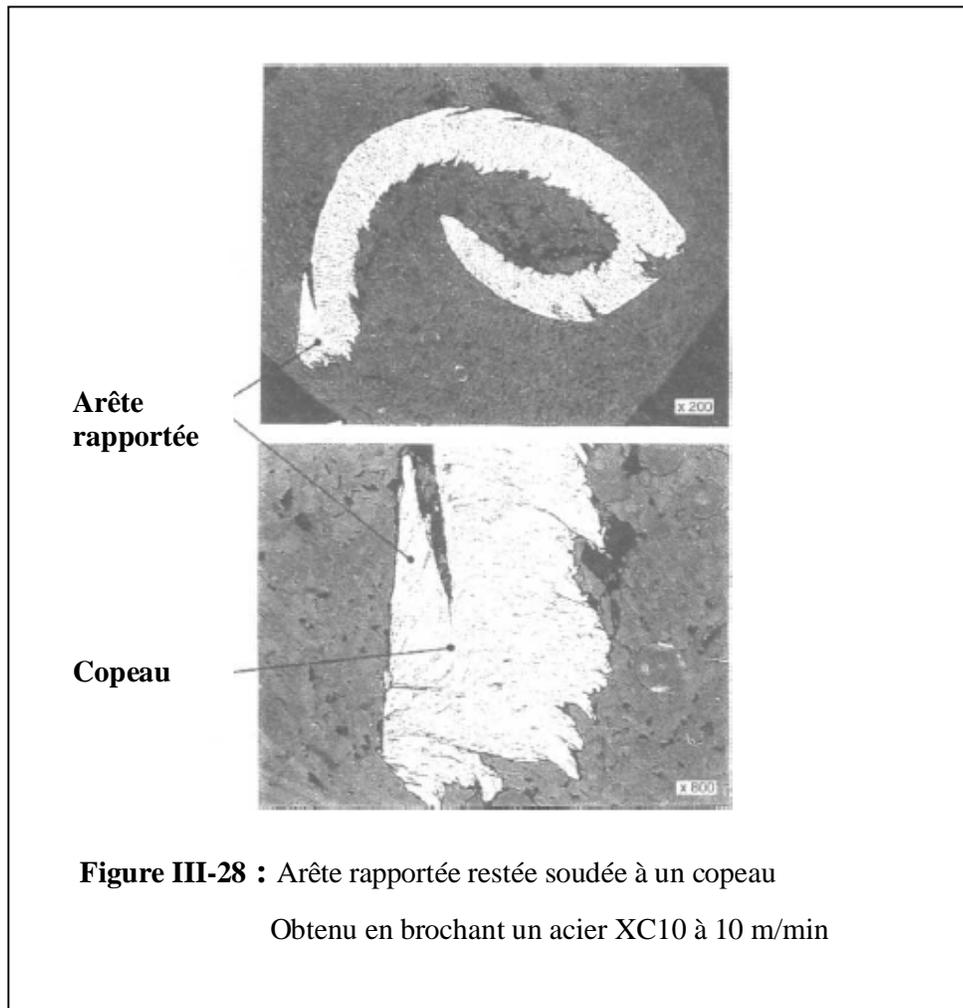
III.2.5.1/ Endommagement induit par les dépôts macroscopiques :

La surface interne du copeau qui frotte sur l'outil est vierge, Exempte de tout corps étranger. Il en est très rapidement de même de la surface de l'outil *nettoyée* par le copeau. Les conditions sont donc favorables pour réaliser des soudures par friction après écrasement des aspérités des deux antagonistes, à moins qu'un film lubrifiant ne vienne s'interposer. Compte tenu des pressions de contact et des vitesses relatives effectives, du confinement de la zone de coupe, l'éventualité d'une lubrification externe hydrodynamique est très faible, mais la possibilité d'une autolubrification existe. Hormis ce cas, les aspérités des deux antagonistes se soudent, mais le défilement du copeau impose de rompre en continu les jonctions qui se forment. Trois cas peuvent se produire :

- Premier cas : (d'effet nul en terme d'endommagement) : la plupart des soudures qui se sont constituées n'ont aucune résistance mécanique ; il en est notamment ainsi si une pollution autogénérée est réalisée. Des matériaux tels que les laitons, les aciers, etc. Peuvent être élaborés de telle manière qu'ils contiennent des particules métalliques de métaux à bas point de fusion (plomb, bismuth, etc.) qui jouent le rôle de poisons des soudures de contact ; les sulfures peuvent avoir une efficacité équivalente.

- **Deuxième cas** : les soudures constituées résistent plus que les aspérités des deux antagonistes. La rupture des jonctions conduit à déposer des fragments du matériau le plus doux sur le plus dur. Il y a *transfert* de l'un sur l'autre. Compte tenu de la nature des corps (1) et (2) , c'est pratiquement toujours sur l'outil que se dépose le corps (3), constitué du corps (1) très écroui. Quand la zone de contact C- O est recouverte, des particules du matériau usiné peuvent continuer à se déposer sur lui-même : un dépôt macroscopique se constitue. La géométrie de la zone de coupe évolue (perte d'acuité de l'arête) et un effort plus important doit être appliqué à l'outil pour poursuivre la coupe. Le dépôt atteint une épaisseur et une forme qui dépendent de la rigidité de la liaison outil-pièce et de la résistance au cisaillement du matériau déposé. Dans les cas les plus spectaculaires, un pédoncule se constitue sur l'outil, appelé arête rapportée

(Figure III-28).



La géométrie des dépôts macroscopiques dépend généralement de :

— la dureté, du polyphasage et de l'écrouissabilité à chaud du matériau usiné ; une compétition se produit entre le durcissement qui renforce la résistance des aspérités du copeau et l'adoucissement.

— la température dans la ZCS et par conséquent de la vitesse de coupe. En règle générale, pour un couple outil-matériau usiné, le dépôt a un volume qui s'accroît puis décroît, lorsque la vitesse de coupe augmente. Le mécanisme de l'adhésion peut être actif à toute vitesse de coupe, mais ne conduit à des dépôts macroscopiques qu'aux vitesses basses (usinages type brochage) ou moyennes. Très souvent des morceaux des dépôts macroscopiques sont évacués, ce qui peut entraîner un régime vibratoire : l'outil se cambre, puis se relaxe. On observe une altération (souvent intolérable) de la qualité des surfaces usinées et un endommagement mécanique de l'outil soumis à des surcharges importantes.

- Troisième cas : l'évacuation d'un dépôt macroscopique constitué comme dans le deuxième cas (en particulier d'une arête rapportée très instable en régime vibratoire) se réalise par arrachement (attrition) d'une partie de la couche superficielle de l'outil sur laquelle s'est constitué le dépôt.

III.2.5.2/ Endommagement induit par les dépôts microscopiques :

Dans les conditions d'usinage à vitesses de coupe élevées (et par conséquent températures élevées), un dépôt du matériau usiné qui se formerait ne serait pas écroui et n'atteindrait pas une taille capable de modifier les efforts de coupe. Seuls peuvent être obtenus :

- des dépôts (corps . d'un frottement sec) du matériau usiné ou d'éléments inclus dans le matériau usiné, dont l'ordre de grandeur d'épaisseur est celui de la microgéométrie de l'outil ;
- des dépôts un peu plus épais du matériau usiné ou d'éléments inclus dans le matériau usiné, dont la rhéologie à la température du contact copeau-outil rend possible une lubrification hydrodynamique.

Dans un cas ou dans l'autre de ces deux types de dépôts qui ne font pas croître les efforts de coupe (et par conséquent ne génèrent pas un endommagement mécanique), deux situations peuvent être rencontrées :

- Ces dépôts sont réactifs avec le matériau de l'outil : ils contribuent alors à un endommagement chimique. [53]

- Ces dépôts ne sont pas réactifs avec le matériau de l'outil et leurs effets endommageants sont assez modestes : étant non durcis, ils ne sont pas abrasifs. Leur évacuation peut toutefois donner lieu à des arrachements de particules de l'outil. [54]

III.2.5.3/ Endommagement induit par les débris :

L'usure abrasive des outils de coupe (deuxième corps) résulte de l'arrachement de petits morceaux par l'impact sur leur surface de particules ayant une dureté équivalente ou supérieure à la leur. Ces débris peuvent provenir du matériau usiné, de grains de l'outil arrachés par rupture de microsoudures, de morceaux d'arêtes rapportées évacuées, de morceaux de l'outil arrachés au moment de l'évacuation de parties de dépôts, de morceaux de l'outil abrasés par l'impact des autres débris. Il apparaît utile de séparer ce mécanisme de celui décrit, qui est consacré à la pollution des outils. Bien souvent les mécanismes sont liés et le matériau de l'outil qui est altéré a une dureté ou une ténacité superficielle qui est amoindrie. L'abrasion a donné lieu à de nombreuses études [55] [56], notamment consacrées à l'usinage par meulage (rectification, affûtage, etc.). Il peut être commode d'appliquer les principales conclusions de ces travaux d'une part au matériau usinant, d'autre part au matériau usiné.

La nature de l'abrasif est le premier paramètre à prendre en compte. Si l'on se place du côté de l'outil, l'échelle de résistance à l'abrasion est sensiblement celle de sa dureté à chaud (article Matériaux pour outils de coupe [BM 7 080] dans le présent traité), soit dans l'ordre croissant :

- carbure de tungstène
- cermet
- carbure de titane
- alumine
- nitrure de bore cubique
- diamant.

Cette échelle des matériaux de coupe n'est pas nécessairement le critère essentiel pour sélectionner un outil. En général, plus une nuance a une grande dureté, plus sa ténacité est faible et plus le coût de fabrication de l'outil est élevé. La dureté à chaud des phases écrouies du matériau usiné détermine, de manière très symétrique, la vitesse d'usure par abrasion des outils. La nature des débris réfractaires inclus dans le matériau usiné peut parfois être contrôlée.

La taille des particules abrasives, qu'elles proviennent des outils ou des matériaux usinés, est le deuxième paramètre dont dépend la vitesse d'abrasion : celle-ci est d'autant plus faible que les particules abrasives sont plus petites. Le contrôle de la taille des inclusions dures d'un matériau usiné est souvent très déterminant. Il en est en particulier ainsi dans le cas d'usinage de matériaux moulés alliés, riches en éléments carburigènes (influence de la taille des carbures dans les fontes).

III.2.6/ méthode de mesure des endommagements :

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

- quantitatif : réduire le coût des pièces usinées ;
- qualitatif : obtenir des surfaces ayant des géométries et microgéométries optimales.

Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire :

- au minimum de pouvoir faire des bilans, c'est-à-dire de pouvoir mesurer, dans des bonnes conditions de précision et de reproductibilité, les conséquences de toute action concernant le trinôme matière usinée-outil-machine ;
- au mieux d'identifier les mécanismes d'endommagement et d'en déduire des innovations ;
- quelle que soit la voie d'étude retenue, il est important de capitaliser les résultats, de les organiser et de les utiliser en production avec l'assistance de l'outil informatique.

III.2.7/ Méthodes d'examen et d'analyse de la surface des outils et des pièces usinées :

Ces méthodes très diverses peuvent être plus ou moins longues, coûteuses, avec des équipements d'ateliers ou de laboratoires très spécialisés. L'examen d'un outil avec une bonne loupe devrait être une pratique courante d'atelier. On peut ainsi assez souvent identifier le ou les mécanismes endommageants. De même, l'examen sommaire du copeau ne doit pas être négligé : la microgéométrie de la surface qui a glissé sur l'outil, de la surface externe, leur couleur, la dureté du copeau, sa fragilité, son épaisseur (comparée à l'avance) sont autant

d'indications quasi gratuites. L'examen de la microgéométrie des surfaces usinées et la comparaison des paramètres de description de celle-ci au profil théorique nécessite des équipements courants de métrologie. Il peut être utile d'identifier aussi l'érouissage superficiel et de mesurer par rayons X les contraintes résiduelles. La quantification des paramètres macroscopiques d'usure, tels que le VB sur la face $A\alpha$ ou le KT sur la face $A\gamma$ peut être faite en atelier avec des équipements d'optique et de métrologie conventionnels.

L'identification de la nature du corps. Nécessite les équipements lourds d'un laboratoire compétent en matériaux. Les analyses fines doivent être faites avec une microsonde sur des outils peu usés. La microscopie électronique à balayage permet d'examiner des outils très usés. L'identification du corps, n'est pas toujours possible à partir de sa seule composition chimique (d'autant que selon la nature du corps, on ne peut pas toujours faire un bilan complet de tous les éléments utiles). Certains auteurs utilisent les rayons X pour avoir une information sur la cristallographie des phases observées.

III.2.8/ Méthodes de mesure des températures de coupe

Les mécanismes très endommageants comme l'usure chimique (par diffusion, par oxydation, etc.) dépendent directement de la température à l'interface copeau-outil : il est donc primordial de pouvoir mesurer celle-ci. Pour cela on distingue trois familles de méthodes et au moins trois stratégies : faire des mesures directes le plus près possible de la zone du contact C-O, valider une modélisation par un maximum de mesures des conditions thermiques aux limites, et faire des mesures indirectes avec un post chauffage.

III.2.8.1/ Mesures pendant l'usinage

On peut utiliser au moins trois effets physiques : le rayonnement, la conduction et l'effet thermoélectrique.

III.2.8.1.1/ Les mesures par lunettes pyrométriques :

Elles se font soit sur la surface externe du copeau, soit sur la surface de l'outil dégagé pendant un court instant. Ces dernières sont délicates, car prises en des instants très courts. Les premières mesures sont utiles pour ajuster un modèle, mais il est très difficile d'extrapoler les températures internes du copeau à partir de mesures sur sa face externe.

III.2.8.1.2/ Les mesures par conduction :

Elles Utilisent des outils instrumentés : un ou plusieurs couples thermoélectriques sont enfoncés dans de très petits trous percés jusqu'au voisinage de la face $A\gamma$. Il faut localiser avec précision la position de leur soudure. L'extrapolation des mesures à la température maximale du contact est d'autant plus imprécise que l'outil est moins conducteur et soumis à un très fort gradient thermique.

III.2.8.1.3/ Les mesures par effet thermoélectrique :

Ces mesures Exploitent le fait que le contact copeau-outil est équivalent à une *soudure* chaude. Si avec les mêmes matériaux on constitue une soudure froide, on doit pouvoir mesurer une force électromotrice. Technologiquement ces mesures sont limitées au cas des outils conducteurs et nécessitent beaucoup de précautions. On peut aussi s'interroger sur leur validité, notamment lorsqu'un troisième corps se constitue à partir d'une phase incluse dans le matériau usiné. [54]

III.2.8.2/ Mesures après l'usinage

Dans ce cas, On utilise le fait que certains outils sont l'objet d'évolutions structurales dans leurs parties portées à haute température. Si l'on sait relier simplement une caractéristique structurale (la taille des grains, par exemple) ou une propriété mécanique (la microdureté, par exemple) à un paramètre d'équivalence temps-température, on doit pouvoir tracer les isothermes des températures atteintes dans l'outil. Ces méthodes sont très longues et ne peuvent s'appliquer qu'à un très petit nombre de matériaux d'outils, notamment les aciers rapides. Le copeau à son tour peut aussi subir des évolutions structurales. Il peut donner des informations sur la température maximale du contact copeau-outil (à condition de connaître les températures auxquelles ont lieu les changements structuraux pour des vitesses de chauffage équivalentes à celles imposées au copeau).

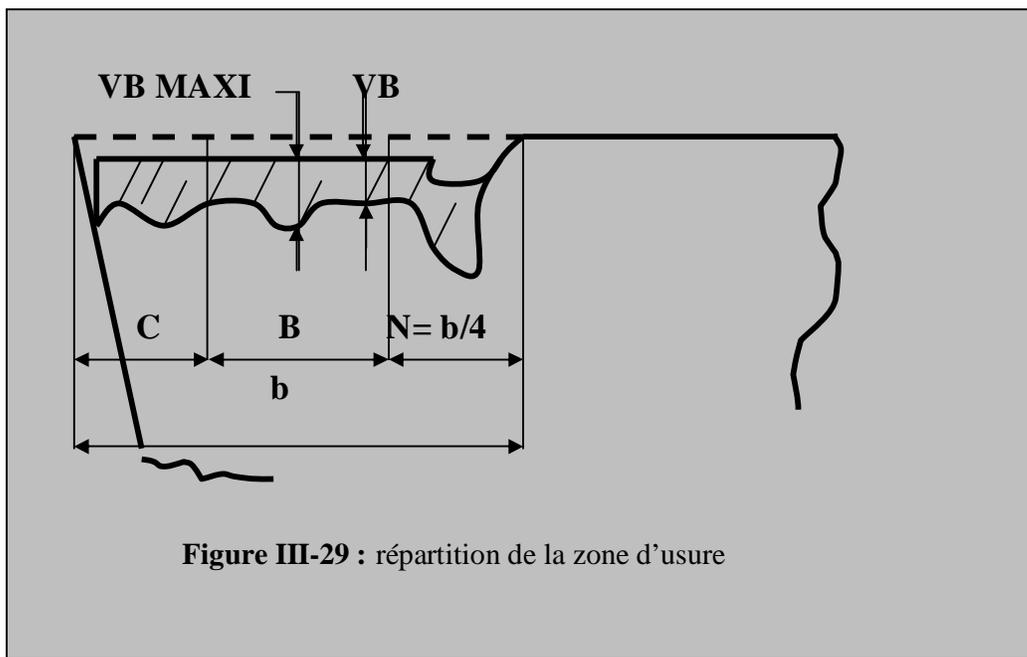
III.2.8.3/ Mesures séquentielles pendant et après l'usinage :

On peut utiliser des outils instrumentés avec des couples thermoélectriques pour donner un repère pendant la phase d'usinage, puis réchauffer ensuite l'outil par une source permettant un chauffage localisé (un rayon laser, par exemple). Quand le signal du couple atteint la valeur repère, on mesure avec une lunette pyrométrique la température en surface de l'outil. Cette méthode indirecte donne de bons résultats, mais nécessite des équipements Complexes. [57]

III.2.9/ lois d'usure et modèles mathématiques :

III.2.9.1/ mesure d'usure :

Suivant la façon dont se manifeste l'usure de l'outil (en dépouille ou en cratère) on utilisera respectivement une lunette macroscopique (40 fois) ou un comparateur à pointe fine. La mesure du paramètre retenu sur la face en dépouille se fera conformément aux prescriptions de la norme. La longueur de l'arête (plaquette) suivant laquelle l'usure apparaît sera divisée comme le montre la **figure III-29**



Zone C : partie courbe de l'arête à la pointe de l'outil.

Zone N : c'est le $\frac{1}{4}$ de la zone b.

Zone B : la partie restante.

III.2.9.2/ établissement des lois d'usure :

La loi d'usure d'un outil de coupe représente la variation du temps effectif de coup T en fonction des conditions géométriques et cinématiques de l'usinage. Le temps effectif de coupe T correspond au temps d'usinage qui conduit à l'usure limite de l'outil définie par le critère [39].

A partir de l'ensemble des courbes $VB = f(T)$, $T = f(V_c)$ correspondant aux différentes vitesses de coupe V_i et pour une valeur limite du critère d'usure observé, on

obtient un ensemble de couple (V_i, T_i) que l'on reporte dans un système d'axes à échelle linéaire. La courbe $T = f(V_c)$, ainsi obtenue traduit la loi d'usure [39].

A titre d'exemple pour $V_B = V_B^* = 0.3$ mm de 4-8-2, on constate que :

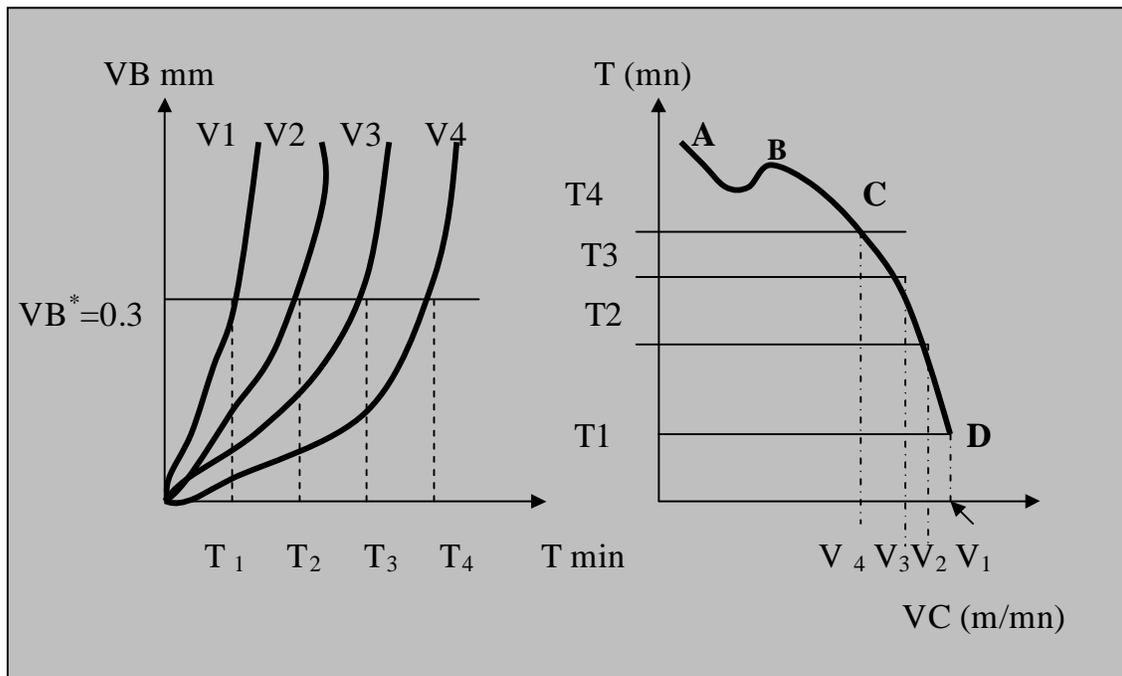
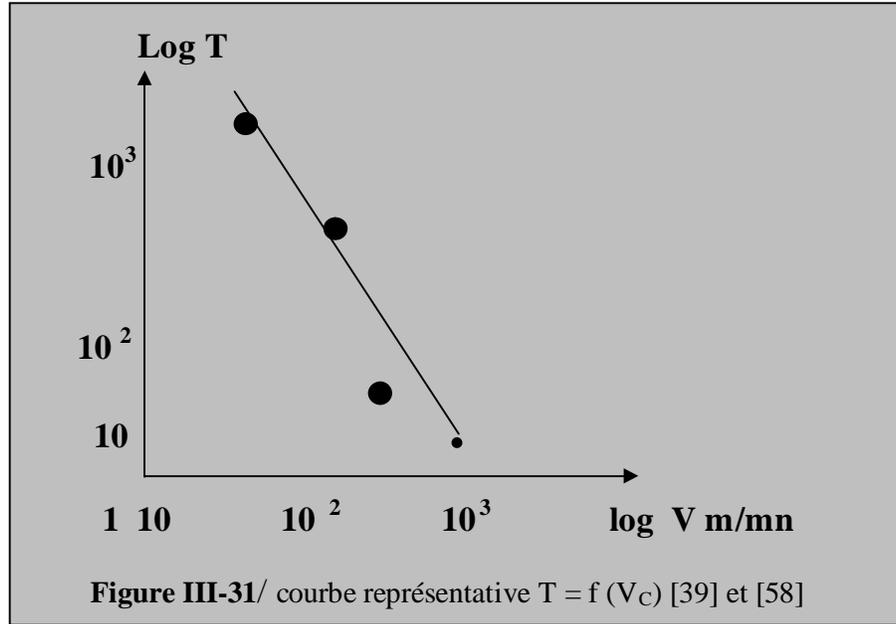


Figure III-30: courbe de la $T = f(V_c)$, $V_B = f(T)$

- dans la zone AB, l'usure augmente avec la vitesse
- dans la zone BC, l'usure se stabilise
- dans la zone CD, l'usure augmente à nouveau

nous allons nous intéresser à la partie CD de cette courbe qui est de loin la plus représentative de l'évolution de l'usure en fonction de la vitesse de coupe.

Tracé dans un système d'axes à l'échelle logarithmique, cette partie de courbe CD est pratiquement une droite comme le montre la **figure III-31**. [39]



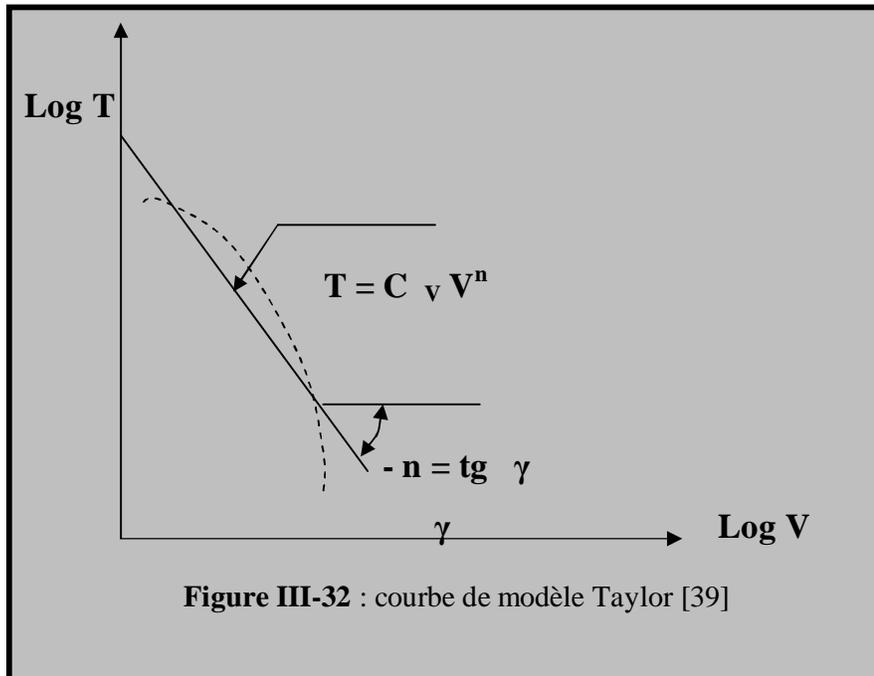
III.2.9.3/ les différents modèles mathématiques associés :

III.2.9.3.1/ Modèle de Taylor :

D'après Taylor : $T = C_v \cdot V^n$(2-4)

En représentation graphique, on a : $\text{Log } T = \text{log } C_v + n \text{ log } V$ (3-4)

Equation qui correspond à la droite associée à la partie CD tracée dans le système d'axes : log T- log V.



III.2.9.3.2/ modèle de GILBERT :

Ce modèle complète le modèle de Taylor en introduisant l'influence de la vitesse d'avance et de la profondeur de passe, en remplaçant la constante CV par $C \cdot a^y \cdot S^x$.

$T = C \cdot S^x \cdot a^y \cdot V^n$ 4-4

La détermination de y, x et n est obtenu à partir des courbes de la figure III-33

(4-4) $\longrightarrow \log T = \log C + x \log S + y \log a + n \log V$ 5-4

- quand S et V sont constante 4-5 devient : $\log T = y \log a + cte$ 6-4.

- si S et a sont constante 4-5 devient : $\log T = n \log V + cte$ 7-4

- enfin si a et V sont constante 4-5 devient : $\log T = \log S + cte$ 8-4

Ces trois équations représentent des droites dont les pentes déterminent n, a, y du modèle.

Il faut noter que le nombre d'essais a pratiqué est plus important que pour le modèle précédent.

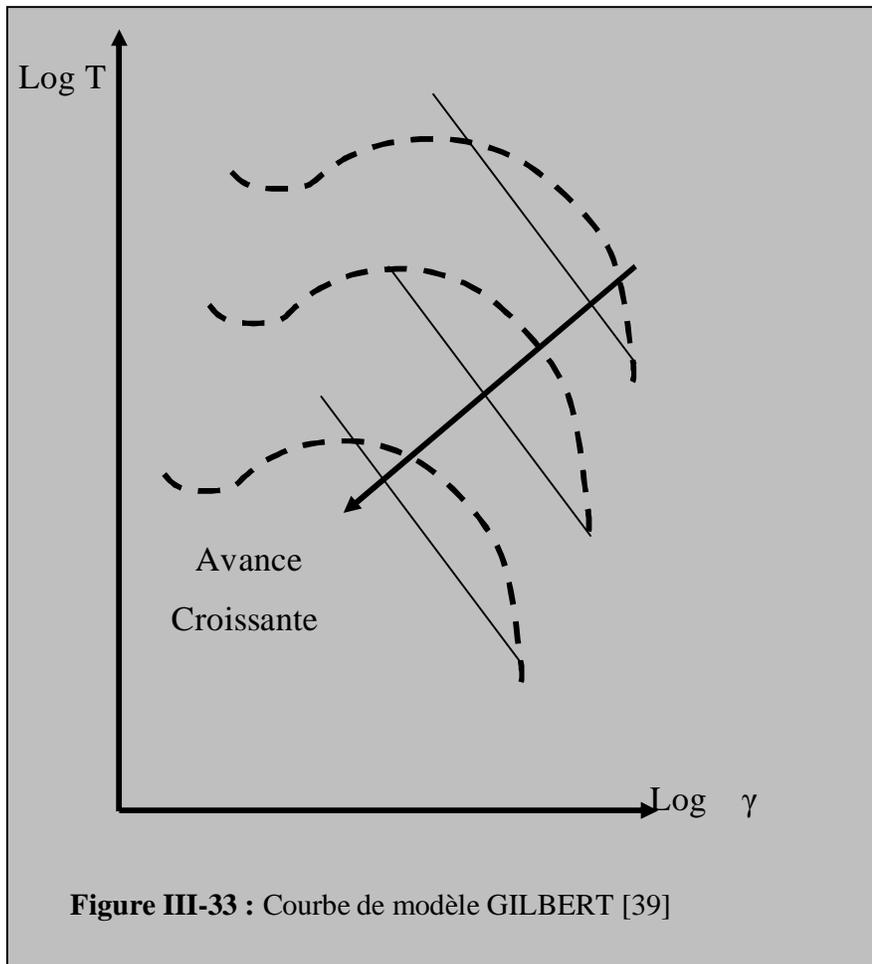


Figure III-33 : Courbe de modèle GILBERT [39]

III.2.9.3.3/ modèle de KRONENBERG :

Ce modèle présente la particularité de donner une valeur finie de la vitesse de coupe pour une durée de vie nulle. On a :

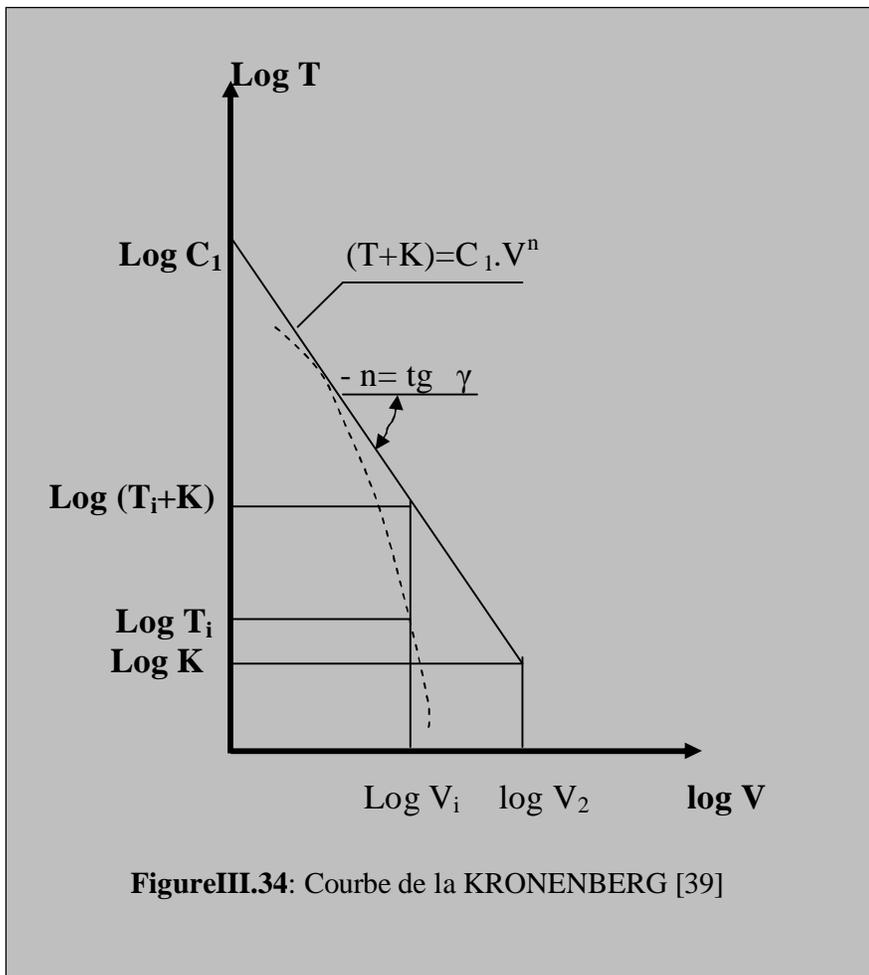
$T + K = C_1 \cdot V^n$ 9-4

La détermination de K se fait avant la détermination de C_1 et de n. par une méthode graphique ou analytique (**figure III.34**). On cherche à faire passer le modèle au milieu des points expérimentaux.

En passant en log, on obtient encore l'équation d'une droite :

$\text{Log}(T_i + K) = \text{log } C_1 + n \text{ log } V_i$10-4

La détermination de K se fait par approximations successives en calcul statistique. Sa valeur correspond au maximum du coefficient de corrélation linéaire ou encore, à chaque point (T_i, V_i) , on fait correspondre le nouveau point $(T_i + K, V_i)$ et on retient la valeur de K qui place les nouveaux points au milieu de la droite.



III.2.9.3.4/ modèle de KONIG – DEPIEREUX :

Ce modèle présente l’avantage de rendre compte des résultats expérimentaux, d’une manière plus précise que les précédents, mais son établissement est délicat et nécessite des moyens de calcul très performants [39]

Il y a deux modèles Principaux à savoir et qui sont :

- modèle général :

$$\mathbf{T} = \exp (-\alpha \mathbf{V}^v - v \mathbf{S}^u - \delta \mathbf{a}^\lambda) \dots\dots\dots 11-4$$

- modèle simplifié :

$$\mathbf{T} = \exp (-\alpha \mathbf{V}^v + \beta) \dots\dots\dots 12-4$$

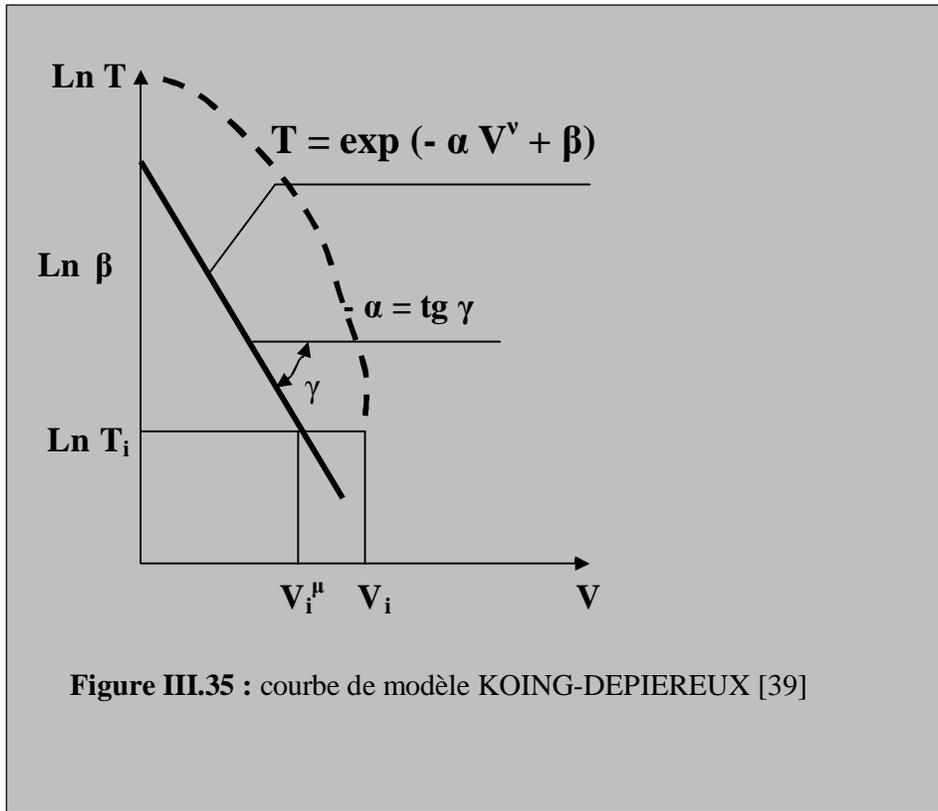
Avec :

$$\beta = - v \mathbf{S}^u - \delta \mathbf{a}^\lambda \dots\dots\dots 13-4$$

De la même façon que précédemment, on cherche à faire passer le modèle au milieu des points expérimentaux. En passant au log on obtient :

$$\mathbf{Log T}_i = - \alpha \mathbf{V}_i^v + \beta \dots\dots\dots 14-4$$

Par approches successives, on détermine la valeur de v, ensuite le calcul de α et β est immédiat **Figure III-35.** [39]



III.2.9.3.5/ modèle du commandant denis :

Le commandant Denis a réalisé des essais systématiques sur le débit des outils [40], il a abouti aux conclusions suivantes :

- toutes les autres conditions de coupe restant les mêmes, le débit de l'outil varie lorsque la vitesse de coupe varie.
- Le débit maximal de l'outil conserve la même valeur lorsque la section du copeau varie seulement si l'avance f, la profondeur de passe a et la vitesse de moindre usure Vmn restent liées par la relation (loi du commandant Denis)

[40] :

$$F_1^2 \cdot a_1 \cdot V_{mn1}^3 = f_1^2 \cdot a^2 \cdot V_{mn2}^3 = \dots = \text{constant} \dots \dots \dots 15-4$$

Cette loi est connue par la loi de débit constant.

III.2.10/ lois expérimentales et courbes d'usure

III.2.10.1/ évolution de l'usure en fonction de temps :

Les mesures de l'usure frontal dans le cas des outils en acier rapide présentent une dispersion due principalement à l'hétérogénéité des aciers à outil et de la matière à usinée, à l'échauffement excessif de la pointe de l'outil lors de l'affûtage et surtout à la présence d'une zone morte au voisinage du bec, celle-ci se traduit parfois par l'apparition d'une arête rapportée (copeau adhérent) sur la face d'attaque de l'outil qui peut, dans certains cas, protéger la face en dépouille de l'outil. Le critère d'usure pour cette matrice à outil est généralement l'effondrement de l'arête.

III.2.10.2/ conditions opératoires pour la détermination des courbes d'usure :

Les conditions des essais de coupe en tournage, nécessaires pour l'établissement des courbes d'usure des différents outils de coupe, sont régies par le projet de norme ISO et la norme AFNOR.

Le respect de ces propositions permettra de comparer les essais faits par différents laboratoires de recherches. Ils précisent entre autre, lorsque l'un de ces paramètres ne constitue pas la variable de l'essai dont on désire observer l'influence de l'usure sur l'outil de coupe :

- La nature de la matière à usiner.
- L'outil à utiliser.
- Les conditions de coupe à afficher.
- Le liquide de coupe à employer.

Les essais se pratiquent sur un tour à variation continue de vitesse, la machine étant réglée à la vitesse de coupe désirée, et on mesure l'évolution de l'usure en fonction du temps.

Pour l'obtention de bons résultats, on doit tenir à ce que, pour chaque essai, il faut observer l'usure pour au moins quatre vitesses de coupe différentes.

III.2.11/ les différents essais d'usure :

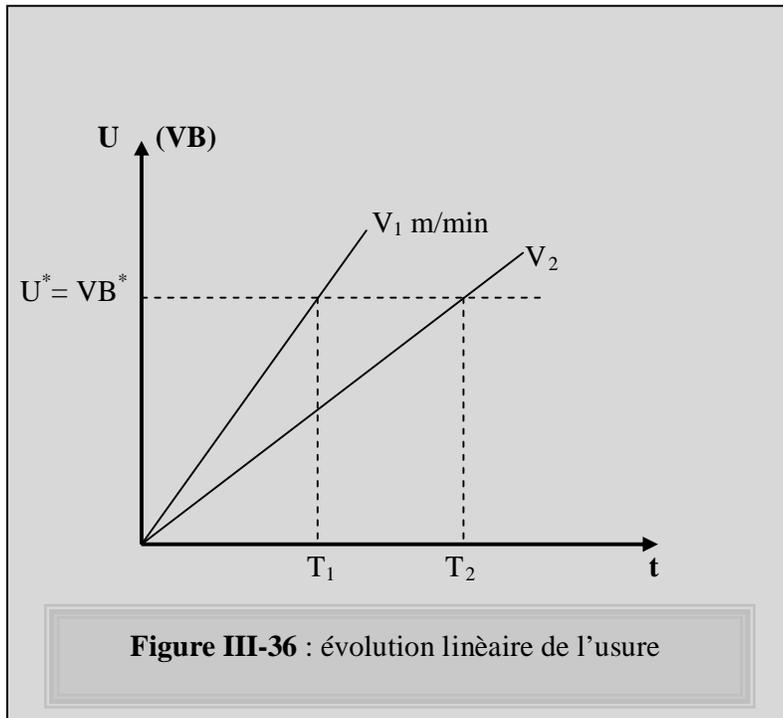
Pour une bonne caractérisation de l'usure des outils de coupe et la détermination de la durée de vie, on effectue de différents essais qui se distinguent par leur mode opératoire.

III.2.11.1 / les essais d'usure accélérée :

Ces essais sont utilisés pour déterminer les coefficients du modèle de Taylor :

$T = C_v \cdot V^n$. Pour ce cas d'usure, on fixe comme hypothèse :

- Evolution linéaire de l'usure en fonction du temps.



Ou on considère :

U : critère de durée de vie de l'outil.

U^* : valeur limite de U .

Pour une vitesse donnée, $\Delta U = U \frac{\Delta T}{T}$.

Sachant que $T = C_v \cdot V^n$ donc $\Delta U = U^* \frac{\Delta T}{C_v \cdot V}$.

III.2.11.2/ les essais d'usure accélérée par paliers (avec $t=\text{constant}$) :

L'essai se pratique sur un tour, et consiste à chariotter une succession de cylindres étagés, animés d'un taux de rotation constant.

La longueur des paliers est telle que le temps de chariotage ΔT de chacun d'eux soit identique, alors que les diamètres des cylindres sont tels que la vitesse de coupe soit en progression géométrique de raison (r).

Le nombre de palier est P .

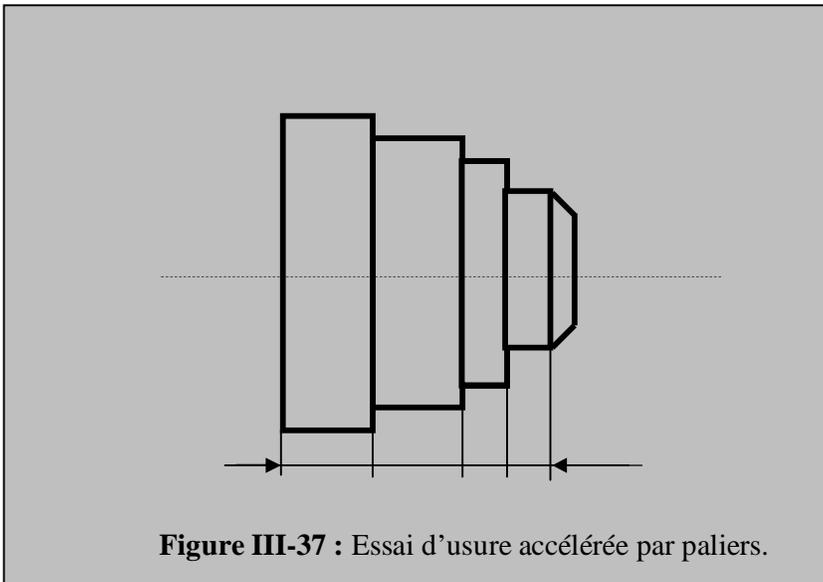
La vitesse initiale est V_0 sachant que $\Delta U = U^* \frac{\Delta T}{C_v \cdot V}$

$$U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \dots + \Delta U_p = \sum_{i=1}^p \frac{U^*}{C_v \cdot V_i^n} \cdot \Delta T_i$$

avec : $V_i = V_0 \cdot r^{(i-1)}$ et $\Delta T_i = t = \text{cte}$

$$U = U^* \sum_{i=1}^p \frac{\Delta T_i}{C_v (V_0 \cdot r^{(i-1)})^n} = \frac{U^* T}{C_v V_0^n} \cdot \sum_{i=1}^p \frac{1}{[r^{(i-1)}]^n}$$

$$U = \frac{U^* T}{C_v V_0^n} \sum_{i=1}^p r^{-n(i-1)}$$



On trouve la méthode de Klong-barrow, qui consiste à réaliser deux essais seulement avec les conditions opératoires suivantes :

$T_1 = T_2$: pour chaque palier.

$r_1 = r_2$: raison identique.

$V_1 = V_2$: vitesse initiale différente

$P_1 = P_2$: même nombre de paliers.

Dans ces conditions, nous obtenons :

$$U_1 = \frac{U^* T_1}{C_V V_{01}^n} \sum_{i=1}^P r^{-n(i-1)} .$$

$$U_2 = \frac{U^* T_2}{C_V V_{02}^n} \sum_{i=1}^P r^{-n(i-1)} .$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \cdot \left(\frac{V_{02}}{V_{01}} \right)^n$$

$$\log\left(\frac{U_1}{U_2}\right) = n \log\left(\frac{V_{02}}{V_{01}}\right) + \log\left(\frac{T_1}{T_2}\right) .$$

Pour obtenir C_V , il suffit de remplacer « n » par sa valeur dans une des équations U_1 ou U_2 .

Cette méthode donne d'assez bons résultats.

III.2.12/ mesure de l'usure des outils de coupe :

Sur la partie active de l'outil de coupe soumis à l'essai, et suivant la façon dont ce manifeste l'usure de l'outil (en dépouille ou en cratère), pour sa mesure, on utilisera en général un comparateur à pointe fine ou à défaut une lunette macroscopique (x 40 fois).

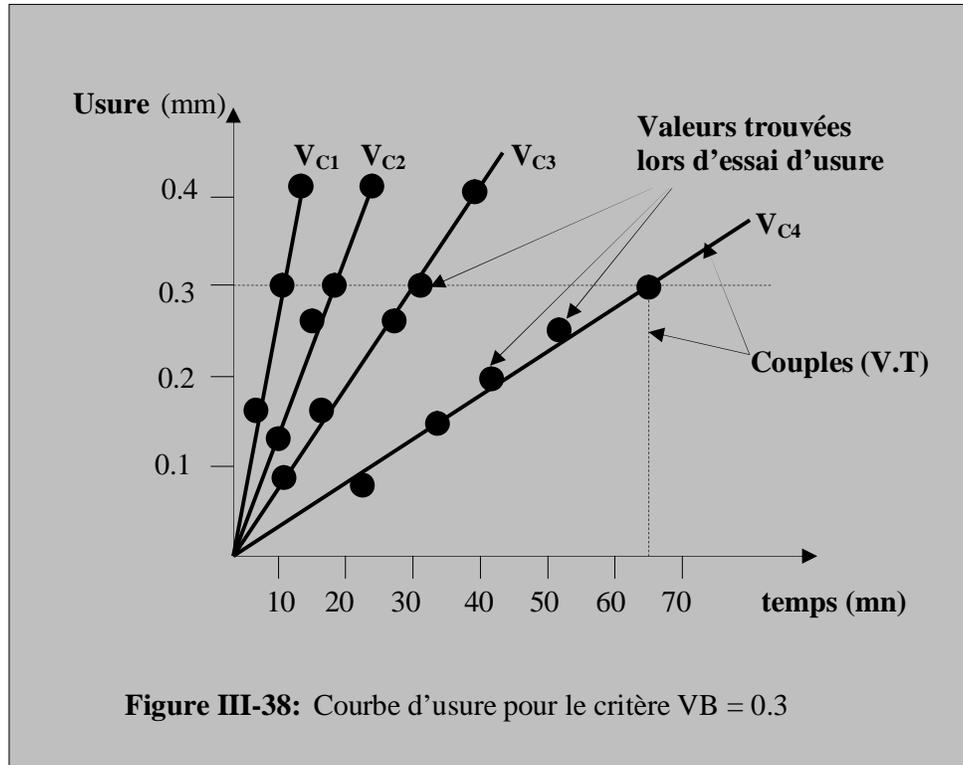
III.2.13 / courbes expérimentales de l'usure :

La nécessité de lier l'usure et les conditions de coupe des outils a permis de traduire les résultats expérimentaux sous forme de lois empiriques établies pour un outil donné selon la nature et la géométrie, d'un matériau à usiné donné.

Ces lois définissent le temps de coupe d'un outil en fonction de la vitesse de coupe

$$T = f(V)$$

A partir de l'ensemble de courbes $U = f_i(T)$ correspondant aux différentes vitesses de coupe V_i et pour une valeur limite du critère d'usure observé, on obtient un ensemble de couple (V_i, T_i) que l'on reporte dans un système d'axes à échelle linéaire.

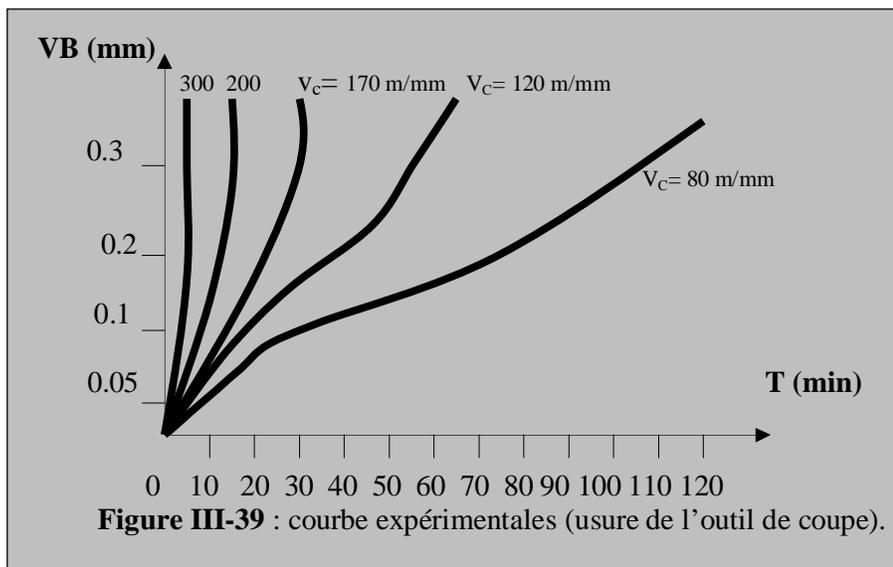


Les courbes ci-dessous correspondent à des essais réalisés en tournage sur un acier de l'outil

A plaquette rapportée dans les conditions de coupe suivants :

$f = 0.1 \text{ mm/tr}$, $a = 1 \text{ mm}$, $V_c = 80 \text{ à } 300 \text{ m/min}$.

le critère d'usure retenu et VB



La norme préconise des valeurs usuelles pour différents critères d'usure. Ainsi pour des travaux d'ébauche, les valeurs admises pour différents outils sont :

outil \ critère	Dépouille VB	cratère	Défaillance brutal
Aciers rapides	VB = 0.3 VB _{max} = 0.6	NON	OUI
carbures	VB = 0.3 VB _{max} = 0.6	0.06+0.3f	NON
céramiques	VB = 0.3 VB _{max} = 0.6	NON	OUI

Fonction de l'avance $KT_{max} = (0.1+0.3 S)$ mm, S : avance / tour.

L'usure en dépouille retenue est VB = 0.3.

Chapitre IV

Préparation des revêtements et leurs essais

IV.1/ introduction

Malgré le succès enregistré par le dépôt des carbures et l'élaboration des outils de coupe présentant une dureté élevée et une meilleure endurance, on remarque, qu'un grand intérêt est porté aux revêtements par dépôt de couches minces des nitrures de titane.

Les applications des couches minces sont multiples. Elles sont généralement basées sur le principe de la modification de la surface d'un matériau pour en faire un composite dont les propriétés de surface sont différentes de celle du matériau massif. Les couches dites dures trouvent des utilisations dans la protection de pièces mécaniques contre l'usure, l'oxydation et la corrosion, et peuvent améliorer d'une façon considérable les propriétés mécaniques des outils de coupe et en particulier leur dureté, leur résistance à l'usure, et par conséquent leur durée de vie.

Le nitrure de titane est le matériau le plus répondeur pour ce type d'application. Les couches minces de nitrures de titane (TiN) produites par dépôt physique en phase vapeur (PVD) sont utilisées pour la protection contre l'usure, comme barrière de diffusion ou comme revêtement décoratif en raison de leur couleur dorée. L'essor des revêtements protecteurs de TiN pour les outils de coupe remonte au début des années 70.

Les outils de coupe revêtus ont envahis les centres d'usinage car ils permettent de maintenir de hauts rythmes de production en réduisant la fréquence d'arrêt des machines pour le remplacement des outils usés. Les revêtements de TiN d'épaisseur de l'ordre de 5 μ m et d'une dureté supérieure à 20 Gpa permettent d'augmenter la durée de vie des outils de coupe d'un facteur 4 à 20 en fonction des conditions d'utilisation.

Ces nitrures ont comme élément de base le titane.

IV.2/ Le titane :

L'élément titane (Ti dans la classification périodique des éléments) a été découvert par le moine anglais Gregor en 1790. Cependant, sa métallurgie extractive étant très difficile, il a fallu attendre les années 1940 pour que des solutions exploitables industriellement soient établies. La généralisation du procédé d'extraction du Ti pur par la méthode Kroll a permis un démarrage de l'industrie du titane vers 1950.

Le titane dans la classification des métaux, se présente sous deux formes de structure cristalline, avec une transformation réversible à 882°C.

- Titane alpha (α): le titane α , est stable jusqu'à 882°C, et cristallise dans le système du réseau hexagonal compact.

- Titane béta (β) : il est stable à partir de 882°C jusqu'au point de fusion, et il cristallise dans le système cubique centré (CC). Il est moins dense que le titane alpha.

On peut classer les propriétés du titane et de ses alliages en deux catégories :

- celle conditionnée par la nature de sa surface : la résistance à la corrosion est en effet excellente et, associée à une bonne souplesse de mise en œuvre, elle permet une utilisation croissante dans l'industrie chimique notamment ;
- celle des propriétés mécaniques qui sont élevées et d'un niveau comparable aux aciers, comme la densité est en revanche plus faible.

IV.2.1/ Propriétés du titane :

Le titane, comme élément métallique, présente les caractéristiques mécaniques et physiques suivants :

- sa masse volumique est environ 60 % de celle de l'acier ($\rho = 4,5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) ;
- sa tenue à la corrosion est exceptionnelle dans de nombreux milieux tels que l'eau de mer ou l'organisme humain.
- ses caractéristiques mécaniques restent élevées jusqu'à une température d'environ 600°C.
- elles restent excellentes jusqu'aux températures cryogéniques.
- il est non magnétisable.
- son coefficient de dilatation, légèrement inférieur à celui de l'acier, est de moitié de celui de l'aluminium.
- son module d'Young (environ 100 GPa).

Tableau 2 – Propriétés physiques du titane		
Propriété	Valeur	Unité
Numéro atomique	22	–
Masse atomique	47,9	g
Masse volumique	4,507	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Température de transformation allotropique	882	$^{\circ}\text{C}$
Température de fusion	1 670	$^{\circ}\text{C}$
Température d'ébullition	3 535	$^{\circ}\text{C}$
Capacité thermique massique	522,5	$\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}^{-1}$
Conductivité thermique	16,7	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Résistivité électrique à 20 $^{\circ}\text{C}$	$47,8 \times 10^{-8}$	$\Omega \cdot \text{m}$
Coefficient de dilatation linéaire à 25 $^{\circ}\text{C}$	$8,5 \times 10^{-5}$	K^{-1}
Susceptibilité magnétique	$3,2 \times 10^{-6}$	$\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$
Module d'élasticité	110 000	MPa
Coefficient de Poisson	0,33	–

Tableau 1-4 : COMBRES (Y.). – Métallurgie et recyclage du titane et de ses alliages.
M 2 355. Traité Matériaux métalliques, volume M8, 1997.

IV.2.2/Les nitrures de titane

- Le TiN a une structure cristalline cubique à faces centrées (**cfc**) de type NaCl qui est stable dans une grande gamme de concentration ($0,6 < \text{N} / \text{Ti} < 1,13$). A cause de sa forte liaison covalente Ti-N, les couches de TiN présentent une dureté importante et un point de fusion élevée de 2950 $^{\circ}\text{C}$.

Il est obtenu par diffusion d'azote dans une atmosphère contrôlée.

IV.3/ Réalisation des revêtements sur les outils de coupe :

IV.3.1/ Système de déposition :

Pour le dépôt des revêtements sur les outils de coupe nous avons utilisé le pulvérisateur magnétron, conçu et réalisé localement au laboratoire de physique des matériaux

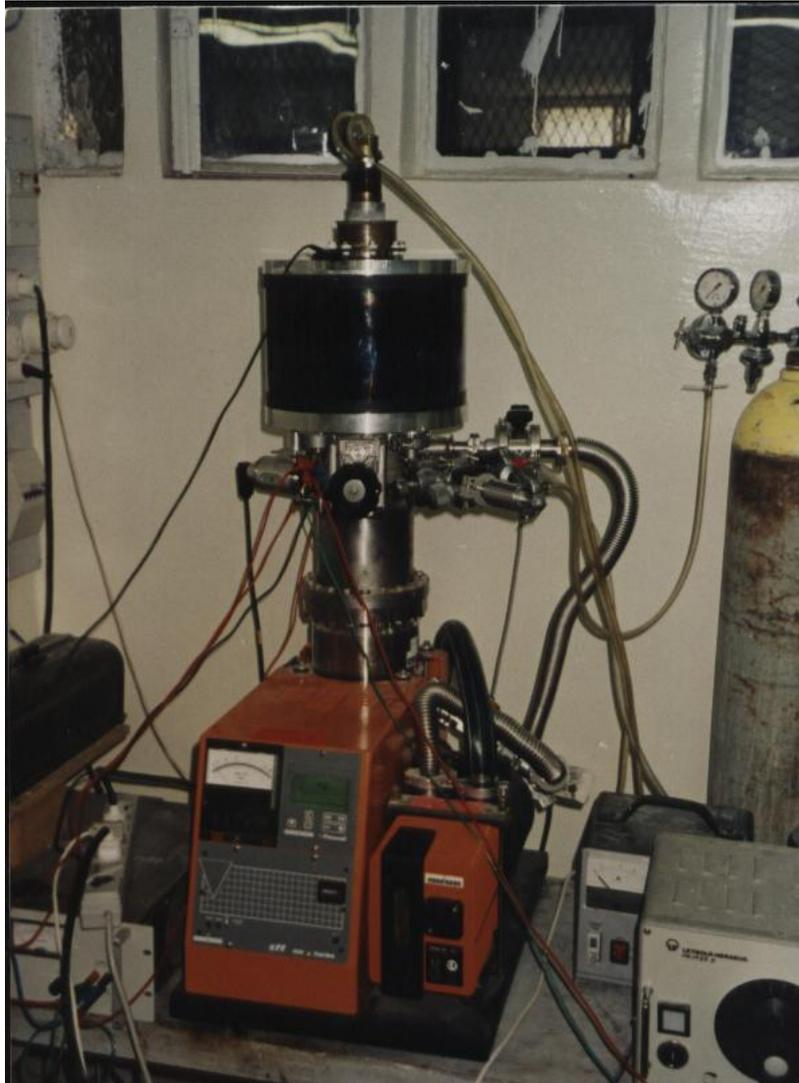


Figure IV-1 : photo du pulvérisateur magnétron à plasma.

Durant cette étude les revêtements de nitrures de titane (TiN) ont été élaborés dans l'enceinte du pulvérisateur magnétron après différentes préparations des outils de coupe.

IV.3.1.1/ préparation des substrats :

Dans cette étape du travail, les revêtements en couche de titane, seront élaborés sur des outils de coupe en aciers rapides.

Avant leur mise en place dans l'enceinte, les outils de coupe et en particulier leur partie active ont subi tout d'abord un traitement de dégraissage au trichloréthylène par ultrasons, ils sont ensuite rincés à l'eau déminéralisée, puis à l'alcool.

IV.3.1.2/ décapage de la cible :

C'est une opération de nettoyage de la cible, qui permet l'élimination des impuretés accrochées à la surface de la cible. Elle est effectuée par bombardement ionique.

IV.3.1.3/ Déposition et mode opératoire :

Après les opérations de préparation des outils de coupe et le décapage de la cible par un flux de bombardement, qui dure quelques minutes, l'écran protecteur est actionné et l'opération de revêtement de nitrures de titane est enclenchée sous les conditions et les paramètres de déposition favorables.

Ces paramètres ont été fixés comme suit :

- Pression partielle du premier gaz = $2 \cdot 10^{-5}$ m bar.
- Pression partielle du deuxième gaz = $8,7 \cdot 10^{-4}$ m bar.
- Pression de travail = $1 \cdot 10^{-2}$ m bar.
- Distance inter cible - substrat = 2,5 cm.
- Haute tension appliquée = 540 volts graduellement à 1500 V.
- Intensité appliquée = 0,3 Ampères.
- Durée du dépôt = 15 minutes.

Pour la réalisation de cette opération de revêtement des outils de coupe, qui seront soumis par la suite aux différents essais mécaniques (essais de dureté, essais de durée de vie) par l'opération d'un tournage à de différentes vitesses de coupe, nous avons effectué un dépôt pour lequel nous avons placé un outil de coupe et effectué un dépôt de revêtement de TiN.

L'opération de cette étude comporte deux étapes sont :

La première étape : dans cette étape il a été procédé à la sélection des outils témoins gardés comme échantillons de référence pour la comparaison ultérieure des propriétés mécaniques initiales.

La deuxième étape : dans cette étape les outils de coupe sur leur partie active ont subi une couche de revêtement en nitrure de titane.

On note les cas des essais d'usure qui se dérouleront à trois vitesses de coupe différents (loi de Taylor).

IV.4/ Les essais réalisés :

Après achèvement de l'opération de revêtement et l'obtention des couches, nous avons procédé à la détermination de certaines propriétés par la soumission de ces outils de coupe aux différents essais, qui sont conditionnés préalablement par les propriétés et la qualité des revêtements

IV.4.1/ Propriétés des revêtements obtenus :

Avant de soumettre les outils de coupe revêtus par TiN aux opérations d'usinage par tournage, nous présentons les méthodes utilisées pour la caractérisation des revêtements de nitrure de titane obtenues sur les outils de coupe.

Parmi les principales caractéristiques mécaniques favorisant les performances des outils de coupe et leur durée de vie, on s'intéresse à la valeur de l'épaisseur de la couche déposée, son adhérence ainsi que sa dureté.

IV.4.2/ épaisseur de la couche déposée :

IV.4.2.1/ les différentes méthodes de mesure de l'épaisseur de la couche :

On distingue trois méthodes de mesure et qui sont :

- a) mesure directe de l'épaisseur : elle comporte deux méthodes :
 - les méthodes mécaniques utilisent un stylet qui se déplace sur la surface de la couche.
 - Les méthodes optiques, sont basées sur les variations du coefficient de transmission ou de réflexion des couches avec leur épaisseur ou sur des phénomènes d'interférence.
- b) mesure en fonction des propriétés physiques, c'est la méthode de la variation d'une propriété physique avec l'épaisseur de la couche, elle est facile à mettre en œuvre dans le cas d'une couche métallique est celle qui relie la variation de la résistance électrique d'un film mince avec l'épaisseur de la couche.
- c) Mesure de l'épaisseur en fonction de la masse : cette méthode utilise le compactage des atomes ou la mesure de la masse déposée. On peut citer les différentes procédures
 - Détecteurs à ionisation.

- L'activation nucléaire ou l'absorption des rayons X

On peut dire d'une façon générale et pratique que la méthode la plus précise de la mesure des couches minces de revêtement c'est l'examen métallographique des coupes polies, ou celle du rugosimètre.

Cette méthode nécessite la création d'une marche qui est réalisée soit en cachant une partie du substrat pendant le dépôt, soit en éliminant une partie du dépôt (solution HNO_3 à 10 %).

Cette mesure peut être obtenue par un profilomètre à palpeur mécanique à pointe en diamant qui se déplace à vitesse constante suivant une ligne définie sur la pièce.

Le palpeur, tout restant en contact permanent dont l'amplitude est enregistrée électroniquement.

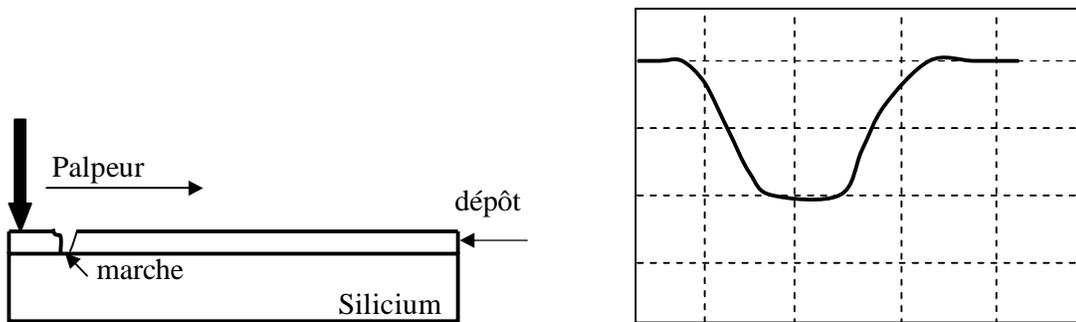


Figure IV-2 : système de mesure de la couche déposée (Perthometre- S10 D) mahr.

IV.4.3/ Adhérence du dépôt :

Ces essais peuvent être réalisés à l'aide d'un scratch-test, ou un stylet dont la pointe en diamant est appliquée normalement à la surface de l'échantillon tout en augmentant progressivement la charge et fin à l'aide d'un palpeur mécanique (Perthometre- S10 D) mahr, avec échelle 5 μm et une course de 5mm en va tracé les graphes (spectre) de la surface et la profondeur de la marche.

Les résultats peuvent être donnés sous forme de courbe ou de diagramme d'adhérence.

IV.4.4/ La dureté :

Pour le cas de la mesure de la dureté des revêtements, les méthodes les plus utilisées, sont la dureté Knoop ou la dureté de vickers.

Dans ce cas, la mesure de la dureté Vickers a été réalisée sur un microduromètre.

Les revêtements de TiN, ont été soumis à ces essais, sous des charges variant de

(25 à 200) gf .elle s'exprime par le rapport de la charge maximale appliquée sur la surface de l'empreinte de contact.

$$H_v = \frac{1,854 \cdot P}{9,81 \cdot d^2}$$

- P : charge appliquée (N).
- La diagonale de l'empreinte en mm.

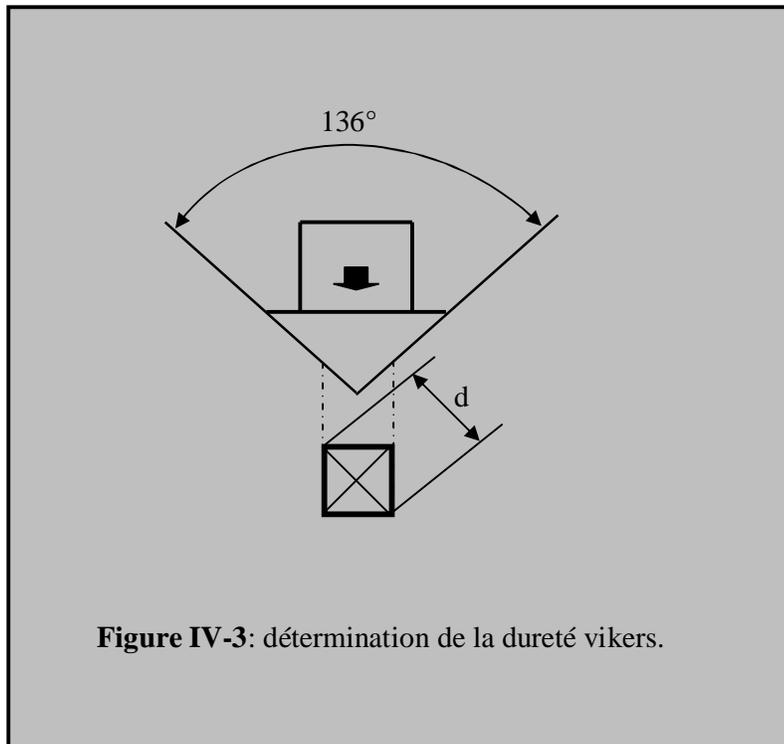


Figure IV-3: détermination de la dureté vikers.

IV.4.5/ l'usure :

Après les essais de la dureté nous avons soumis les outils de coupe revêtus aux essais d'usure et d'endurance par l'application directe des processus d'usinage par enlèvement de copeaux.

Nous avons sélectionné le modèle de Taylor pour l'étude et l'évaluation de l'usure et l'établissement de la relation entre la durée de coupe d'un outil et la vitesse de coupe dans des conditions de travail bien déterminées. Nous avons procédé aux essais de tournage à des

différentes vitesses de coupe et cela conformément à la norme ISO3685 relative aux essais de durée de vie.

Les vitesses sélectionnées sont :

- $V_1 = 80$ m/min.
- $V_2 = 120$ m/min.
- $V_3 = 170$ m/min.

Les conditions de coupe étant les mêmes avec :

- $S = 0,1$ mm avance.
- $a = 1$ mm p de passe.
- Vitesse de coupe variant V_1 à V_3 .
- Critère d'usure VB en mm.
- Sans lubrification.

IV.4.6/ l'état de surface de la pièce usinée :

Dans cette étape nous avons fait un tournage (chariotage) sur une pièce par un outil de coupe en aciers rapides sans revêtement avec des conditions de coupe bien déterminées (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe), et après cette opération nous avons changé les paramètres de coupe (finition), la même opération de chariotage mais par un outil de coupe avec un revêtement par TiN et en fin à l'aide d'un palpeur mécanique (Perthometre-S10 D) mahr, avec échelle 50 μm et une course de 5 mm en va tracé les graphes (spectre) de la surface usinée.

Les paramètres de coupe sont :

- 1) Pour le chariotage :
 - avance : 0.112 mm/tr.
 - Vitesse de coupe : 900 tr/min.
 - P. de passe : 0.5 mm.
- 2) Pour la finition :
 - Avance : 0.045 mm/tr.
 - Vitesse de coupe : 1500 tr/min.
 - P. de passe : 0.25 mm.

Les valeurs de la dureté et les résultats de l'évolution de l'usure et les valeurs de la durée de vie des outils de coupe en fonction des différentes vitesses de coupe, seront présentés et discutés dans le dernier chapitre.

Chapitre V

Présentation et interprétation des résultats.

V / Présentation et interprétations des résultats.

V.1/ Introduction

Après la réalisation de l'opération de traitement de surface par le revêtement de nitrure de titane sur les outils de coupe en acier rapide, nous avons procédé à une série de caractérisation et d'essais mécaniques à ces outils.

La couche de revêtement obtenue d'une dureté considérable influe directement sur le comportement des outils de coupe aux différents phénomènes tribologiques, comme la résistance à l'usure, et l'endurance.

Après l'application des différents essais mécaniques de dureté et d'endurance sur ces outils, nous avons enregistré une nette amélioration de ces propriétés mécaniques. La détermination de la dureté et de la résistance à l'usure, qui s'expriment en terme d'applications mécaniques par la durée de vie de l'outil de coupe après revêtement, et cela en concordance avec les différents paramètres de coupe (vitesse de coupe, la passe du copeau, l'avance) est définie par le système ISO. Ces paramètres sont basés sur les lois et les modèles mathématiques régissant l'étude de l'endurance et de la durée de vie des outils de coupe, pour notre cas, nous avons utilisé le modèle de Taylor.

V.2/ les résultats des différents essais :

Pour l'acquisition de meilleures performances des outils de coupe, il faut agir généralement sur l'amélioration des principales propriétés mécaniques à savoir la dureté et sa résistance à l'usure sous l'effort de coupe. Ces deux propriétés conduisent à définir d'une façon directe à l'endurance et au prolongement de la durée de vie de l'outil de coupe.

Les résultats obtenus, en terme d'amélioration des propriétés mécaniques par ces traitements de surface, sont concrètes et traduits dans cette étude par une nette augmentation de la dureté et de la résistance à l'usure.

Les différents essais, allant de la caractérisation de la couche déposée jusqu'à l'enregistrement de la durée de vie, ainsi que les discussions de leurs résultats sont présentées comme suit :

V.2.1/ épaisseur de la couche :

Ne disposant pas d'un appareil adéquat, nous avons réalisé la mesure de l'épaisseur de la couche déposée à la SONACOME service laboratoire de contrôle.

Le principe de base s'effectue grâce à un palpeur électronique (perthomètre- S10) mahr, avec échelle de $5\mu\text{m}$ et une course de 5 mm.

Le graphe obtenu sous forme d'un spectre est présenté ci-dessous

Figure V-6 : mesure de l'épaisseur de la couche déposée.

La figure v-6 montre que la valeur de l'épaisseur de la couche déposée est de $2.25\ \mu\text{m}$.

V.2.2/ adhérence de la couche :

Parmi les techniques de détermination de l'adhérence des matériaux et des couches des revêtements déposées, on peut citer la méthode du scratch test et la méthode d'arrachement de la couche par polissage.

Pour cette étude, il a été procédé à la deuxième méthode effectuée sur une polisseuse (KNUTH- ROTOR.2 strueers).

Donc à partir d'une épaisseur initiale de $2.25\ \mu\text{m}$, le polissage effectué à une vitesse de 3000 tr/min avec un papier abrasif de 1000, a donné une réduction de l'épaisseur de $1.45\ \mu\text{m}$ pendant une exposition sévère de 55 seconde.

Cette consommation de matière exprimée par la variation de l'épaisseur est représentée par le spectre suivant

Figure V-7 : mesure du profondeur de la couche déposée après 55 sec, 0.80 μm .

Se basant sur les spectres obtenus, et en supposant que la force de contact est maintenue constante, on trace la courbe de l'adhérence des couches déposées

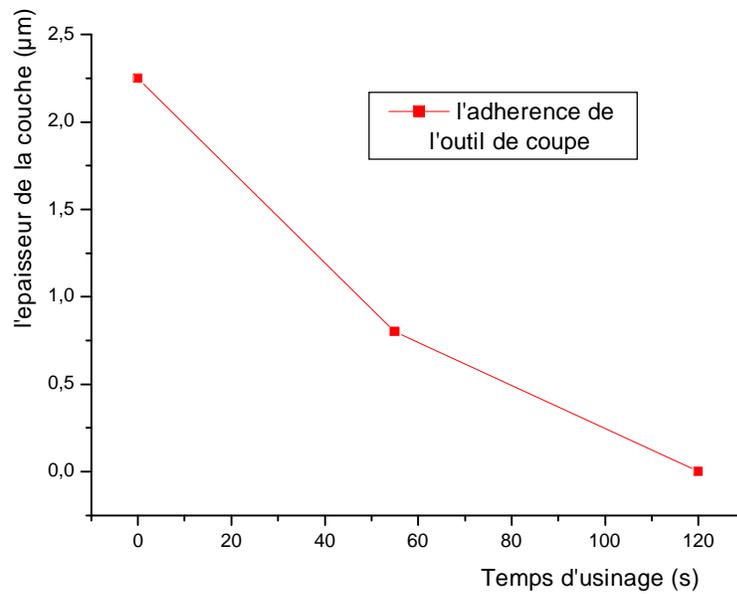


Figure V-8 : variation de l'adhérence de la couche déposée sur l'outil de coupe.

V.2.3/ la dureté :

Comparativement à la valeur de la dureté d'un outil de coupe sans revêtement, les courbes comparatives obtenues, montre une nette augmentation de la dureté. L'évolution de cette dureté est dû à la couche de revêtement en TiN. Cette dureté s'améliore progressivement de l'état initial d'un outil avec un traitement traditionnel de surface (trempe, revenu, recuit...) à l'état de revêtement en nitrure de titane.

La présentation de la variation de la dureté de ces outils de coupe en acier rapide est exprimée sur les graphes suivants :

Le premier graphe : représente la dureté enregistrée sur un outils de coupe en acier rapide soumis aux traitements thermiques obtenus par le processus classiques.

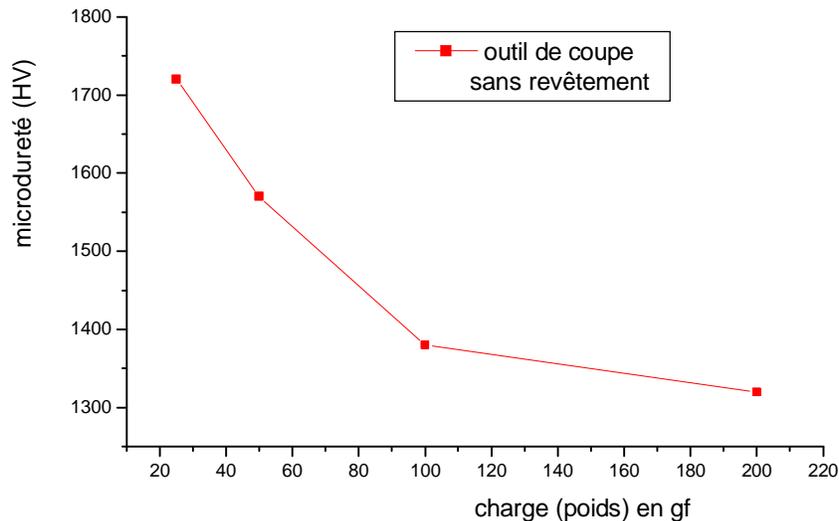


Figure V-9/ La dureté initiale, obtenue sur un outil de coupe sans revêtement

Le deuxième graphe : représente la dureté enregistrée sur un outil de coupe en acier rapide revêtu d'une couche mince de nitrure de titane.

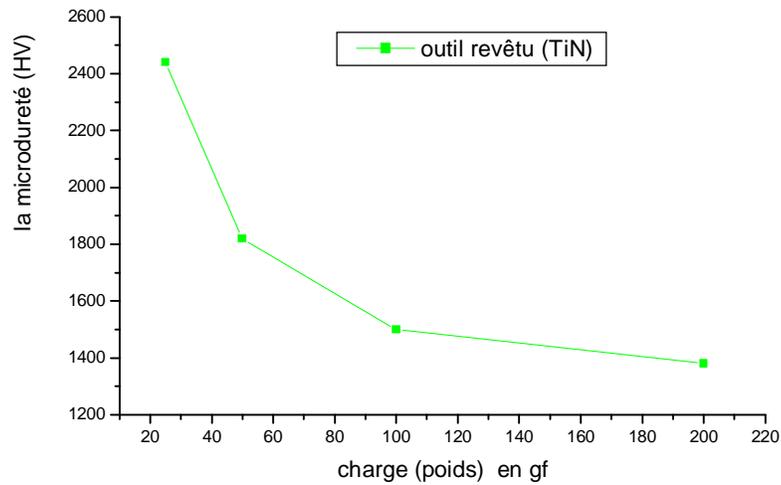


Figure V-10/ la dureté, obtenue sur un outil de coupe avec revêtement

En constate une amélioration par rapport à la dureté d'un outil de coupe sans revêtement.

- **superposition des graphes obtenus**

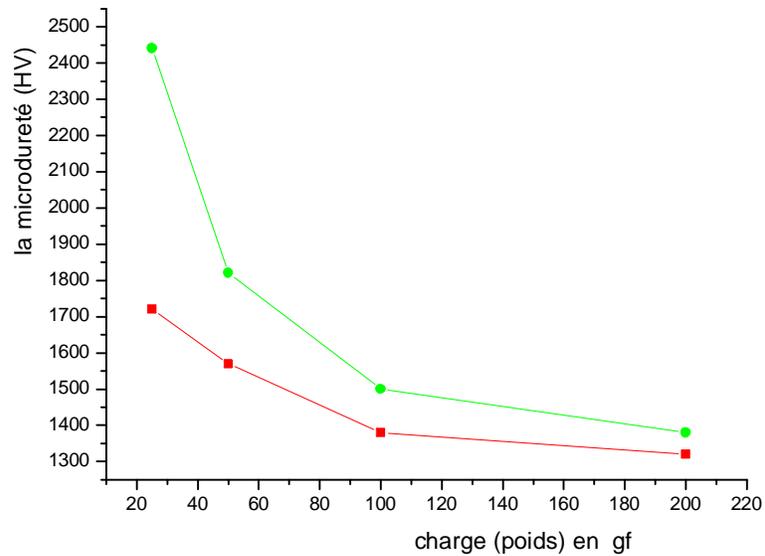


Figure V-11 : comparaison de la variation de la dureté de l'outil avant et après revêtement

La comparaison apportée sur le graphe de la figure V-11, permet de conclure sur une certaine variation positive de la dureté enregistrée par l'apport de la couche de revêtement sur l'outil de coupe, ce que va influencer certainement sur l'évolution des autres propriétés.

V.2.4/ l'évaluation de l'usure (VB) :

Grâce à l'opération de traitement de surface de revêtement par nitrure de titane et après l'obtention d'une amélioration de la dureté, nous avons enregistré l'influence de cette amélioration sur le côté tribologique de l'usure des outils de coupe.

Pour la réalisation de ce but, nous avons soumis les outils de coupe aux essais de tournage avec des vitesses de coupe différentes et sans lubrification (tournage à sec).

Après l'usinage par tournage, nous avons constaté une amélioration considérable de la résistance à l'usure, se traduisant par l'augmentation de la durée de vie des outils de coupe soumis.

Pour mettre en évidence ces propriétés mécaniques et qu'on puisse effectuer une comparaison effective de ces outils, nous avons réalisé une série d'opération d'usinage à de différentes vitesses. Les résultats sous forme de graphes pour les deux types d'outils sont comme suit :

1- pour les outils de coupe sans revêtement

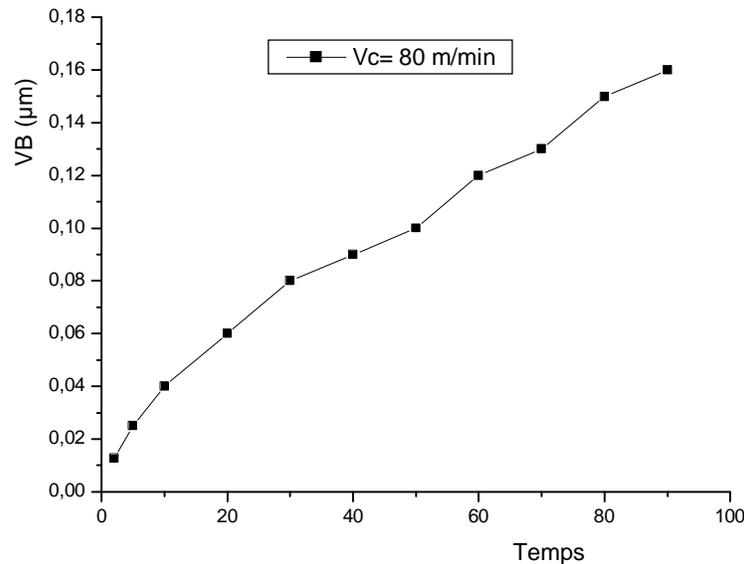


Figure V-12 : courbe d'usure - vitesse de coupe $V_1 = 80$ m/min (outil sans revêtement)

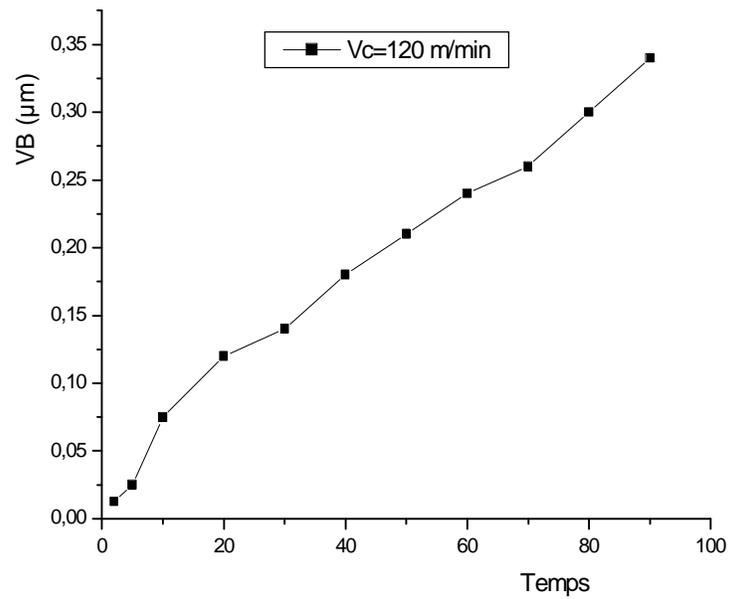


Figure V-13 : courbe d'usure - vitesse de coupe
 $V_2=120\text{m/min}$ (outil sans revêtement)

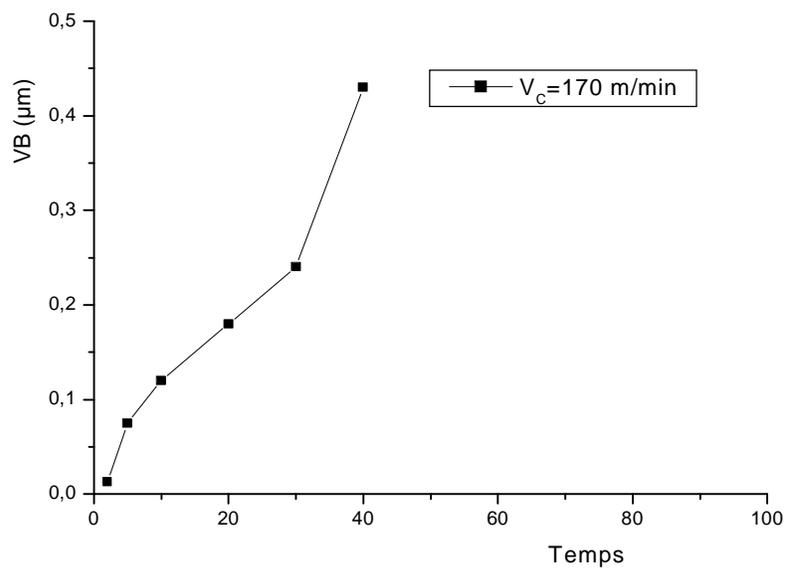


Figure V-14 : courbe d'usure - vitesse de coupe
 $V_3=170\text{m/min}$ (outil sans revêtement)

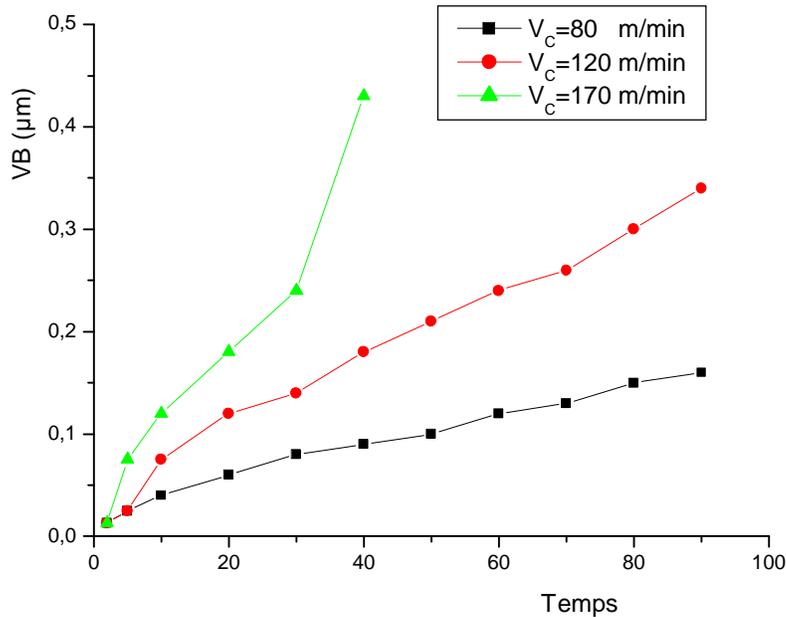


Figure V-15/ regroupement des différentes courbes d'usure pour les outils de coupe sans revêtement.

Le regroupement de ces courbes représentatives de l'usure des outils de coupe normaux montre la durée de vie en temps (min) de remplacement. Il permet aussi ultérieurement de procéder à la comparaison avec des outils similaires dans les mêmes conditions d'usinage mais à la différence de la présence de la couche de revêtement sur la partie active.

2- pour les outils de coupe avec traitement de surface par revêtement. Des opérations similaires d'usinage ont été effectuées sur les outils de coupe ayant été soumis préalablement aux traitements de surface par revêtement.

Les courbes d'usure enregistrées sont comme suit :

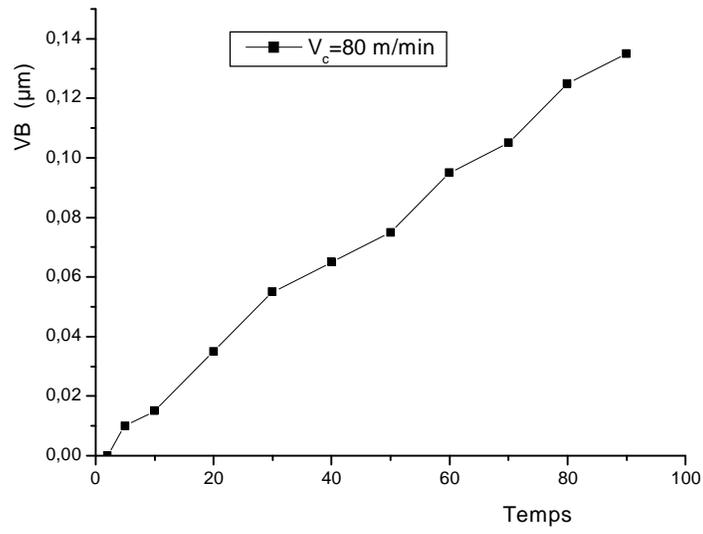


Figure V-16 : Courbe d'usure - vitesse de coupe $V_1=80$ m/min (outil avec revêtement)

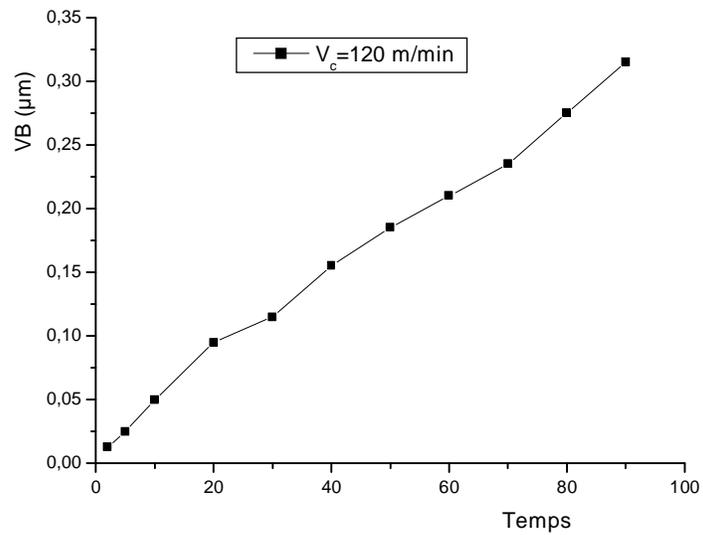


Figure V-17 : Courbe d'usure - Vitesse de coupe $V_2=120$ m/min (outil avec revêtement)

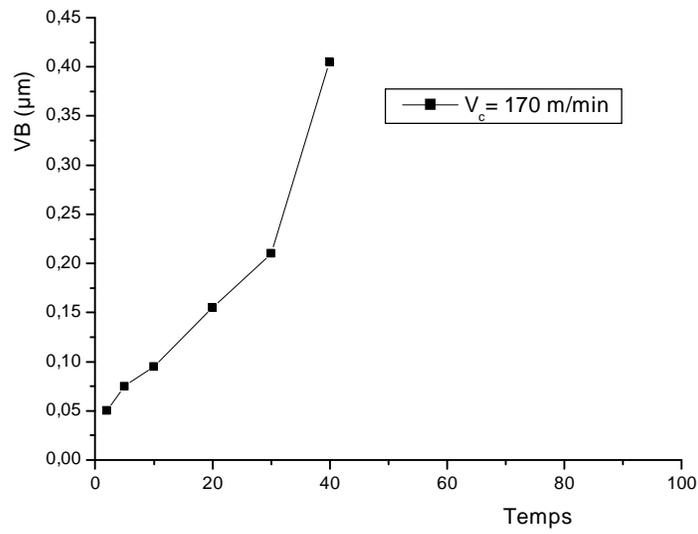


Figure V-18 : Courbe d'usure - vitesse de coupe $V_3=170\text{m/min}$ (outil avec revêtement).

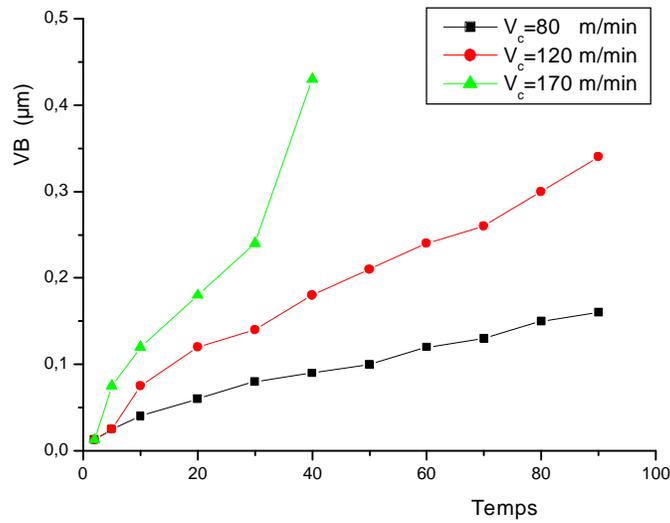


Figure V-19 : regroupement des différentes courbes d'usure relatives aux outils de coupe avec traitement de revêtement.

Ce graphe de regroupement, comparativement à au graphe de la figure V-15 permet de dire et d'une façon signifiante qu'il y a effectivement une amélioration de la durée de vie de ces outils de coupe, se traduisant par un déplacement en bloc de ces courbes vers la droite, réduisant ainsi l'usure et par ce fait augmente la durée de service .

V.2.5/ l'état de surface de la pièce usinée par outil revêtu :

Pour mettre en évidence l'effet et l'influence de ces outils de coupe sur l'état de surface des pièces usinées, nous avons réalisé un chariotage sur toute la longueur de la pièce. Cette longueur a été divisée en quatre pistes de mêmes dimensions affectés des repères X1, X2, X3, X4.

L'opération de chariotage par un outil de coupe avec revêtement a été complétée par des chariotages et des opérations de finition spécifiques aux pistes.

Ce mode d'opération est présenté sur le tableau suivant :

Pièce et pistes	usinage	Nature de l'outil	
		Sans revêtement	Avec revêtement
X1	Finition		
X2	chariotage		
X3	Finition	—	
X4	chariotage		

—

—

—

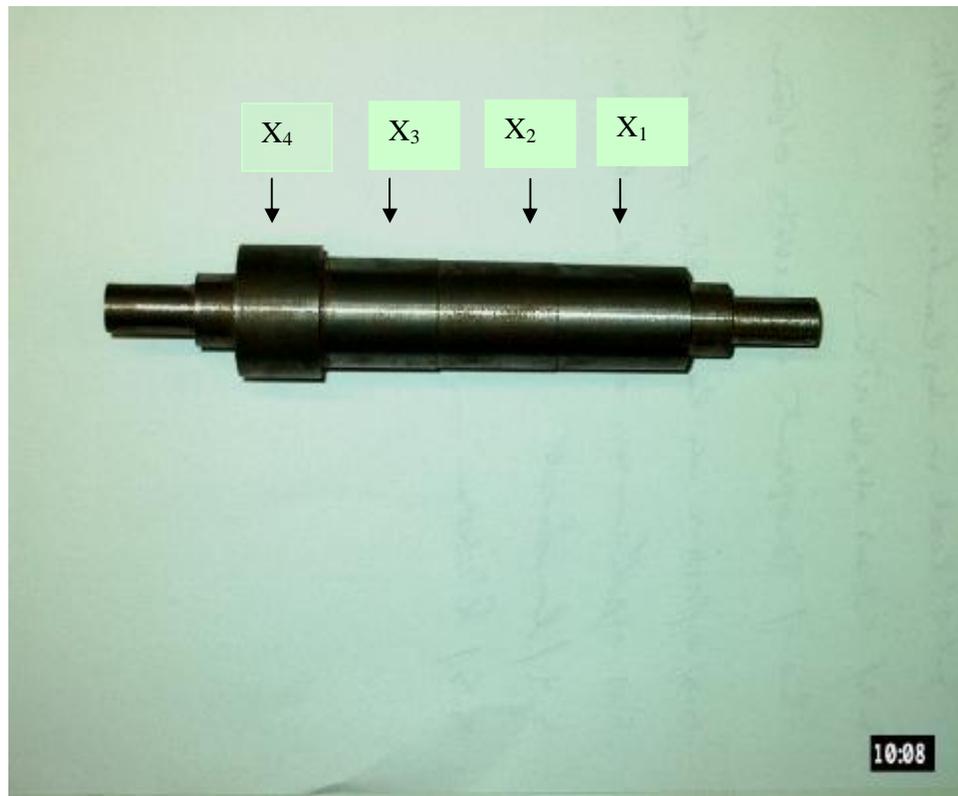


Figure V-1 : la pièce et ces 4 pistes soumises au de chariotage et de finition.

Des prises de photos de l'état de surface de ces quatre pistes sont présentées comme suit :



Figure V-2 : photo de l'état de surface de la piste X_4

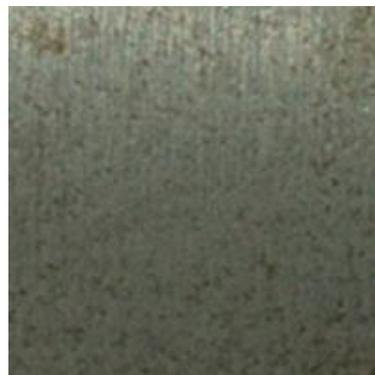


Figure V-3 : photo de l'état de surface de la piste X_3



Figure V-4 : photo de l'état de surface de la piste X_2 .



Figure V-5 : photo de l'état de surface de la piste X_1

La comparaison de ces différentes photos ainsi que les valeurs de la rugosité enregistrée permet de conclure d'une nette amélioration de l'état de surface.

Pour l'interprétation de l'état de surface des différentes pistes de la pièce usinée, nous les avons soumis au (perthomètre - S10 D) mahr.

Les résultats obtenu sous forme de spectres sont présentés comme suit :

Le spectre 1: représente l'état de surface de la piste X2 dont la valeur est de $2.25.8 \mu\text{m}$, Avec outil de coupe à l'état brut (sans revêtement).

Spectre 1 x2

Figure V-6 : spectre de rugosité de la piste X2.

Le spectre 2: représente l'état de surface de la piste X4 dont la valeur est de $225.00\mu\text{m}$

Spectre2 X4

Figure V-7 : spectre de rugosité de la piste X4

Le spectre 3: représente l'état de surface de la piste X3 dont la valeur 216.00 μm

Spectre3 x3

Figure V-8 : spectre de rugosité de la piste X3

Le spectre 4: représente l'état de surface de la piste X1 dont la valeur 217.7 μm

Spectre X1

Figure V-9 : spectre de rugosité de la piste X3

La comparaison de ces spectres relatifs aux pistes usinées avec les outils avec et sans revêtement montre une diminution de la rugosité et confirme l'observation des photos.

Références bibliographiques

- [1] Mir, métallographie et traitements thermiques des métaux, 3^{ième} édition 1982 (page 23).
- [2] Mir, métallographie et traitements thermiques des métaux, 2^{ième} édition 1978 (page 141).
- [3] Mir, métallographie et traitements thermiques des métaux, 2^{ième} édition 1982 (page 157).
- [4] E. Fergag, Mémoire d'ingénieur : traitements des surfaces par revêtements et mise en marche de la couche de dépôt électrolytique 1997.
- [5] Mir, métallographie et traitements thermiques des métaux, 2^{ième} édition 1978
- [6] traitement de surface controlab 1985
- [7] Etude des traitements de surface et technique de mesure du revêtement 1996.
- [8] P. Mazaras . interaction –traitement thermique – traitement des surfaces pyc 1992 paris.
- [9] T. Matsushima université d'osaka, japon 1991 page 49.
- [10] J.L. Vossen et w.kern, thin film processes ed académic press-traité de la pulvérisation.
- [11] D. Bouchier, thèse orsay, 1985 page 122.
- [12] PH. lami et Y. Pauleau. J. solid state science and technologie.
- [13] p. Mazars pyc 1992 paris.
- [14] Nove_ 1
- [15] BALZ _01
- [16] SfV _94
- [17] edpsciences.org/articles/jp4/pdf/2005/02/jp4_412402.pdf
- [18] BALZ _01
- [19] : D. Dicamp, y.M. Min – lee et w.l
- [20] Bura _91.
- [21] Bura _ 91.
- [22] D. Dikamp, y.M. Min – lee et w.l.
- [23] A. Bosseboeuf. thèse orsay, 1989, page 223.
- [24] librecours.org/documents/4/402.pdf
- [25] Ferkouse embarek, thèse, 2004, page 56.
- [26] Ferkouse embarek, thèse, 2004, page 56.
- [27] Technique de l'ingénieur D320.
- [28] librecours.org/documents/4/402.pdf
- [29] P. Sigmund, topic in applied physics (vol 47) sputtering by particule bombardment, Berlin (1981).
- [30] A. Zozime, these orsay villetaneuse, 1977, page 3.

- [31] edpsciences.org/articles/jp4/pdf/2005/02/jp4_412402.pdf
- [32] Ferkous embarek, these 2004, page 67.
- [33] R. Happop et ps thinn solide films, 3109 (1969).
- [34] Nove -01.
- [35] Journal technomogie: outil de coupe développements recents et nouvelles performances.Thésame 2002.
- [36] Usinage technologie et pratique j .vergnas génie mécanique.
- [37] Technique de l'ingenieur D320.
- [38] Technologie pour mécanismes A campa tome II.
- [39] L. mathien, M. Raboyeau : production mécanique edition dundee. Dépôt légal mars (1986).
- [40] D.gelin, M. vincent : element de fabrication. Edition markiting copyright (1995) ISBN 2-7298-9556-6.
- [41] Technique de l'ingenieur.
- [42] G. M. bartenave and V.V. lavirntev: friction and wear of polymers tribologie, serie 6.
- [43] E. rabinowic : friction and wear of materials, j. wiley and sons, INS, (1965).
- [44] J. vergnas : usinage technologie et pratique dumod bordas, paris (1982).
- [45] J. thiery : quelques applications récentes des radiotracteurs a l'étude de l'usure Rev. G. A. M. I (F), N° 3 mai- jum (1961).
- [46] H. chrisstensen : l'effet de l'usure modérée sur la topographie superficielle. Mécanique. Materiaux. Electricité N° spécial usure tome 1 1972, N° 256-1 page 9-26.
- [47] Jean. Blouet : usure. Technique de l'ingenieur, traitement mécanique et chaleur BI-P. B 585.
- [48] Bowden, leben: proc. Royalsa. London (GB) (1969) N° 58 pages 91-371.
- [49] J. Pomey: le frottement lubrifie sous conditions sévères ref ; inst France. Pétrole juin 1957.
- [50] D. M. Tolstoi: significanse of the normale degree of friction and natural vibration in contact friction and wear CR(10). 1967 pages 199-213.
- [51] A.Bittes: these universite de Toulon et du VAR 1993.
- [52] Technique de l'ingenieur cd rom.
- [53] E.M.trent : metal cutting. Butterworths. Londers (1973).
- [54] F. Leroy : endommagement des outils de coupe (article : technique de l'ingenieur BII. Page B 7042.
- [55] B.M.karmer: a comprehensive tools wear mode annais of cirp, volum 35/1. 1986 page 67.
- [56] A.magnee: mécanismes de l'endommagement par abrasion. Les référentiels dunod. Pratique des materiaux industriels chap- 9/5/1 1992.
- [57] G. Bittes : mesure de température à l'interface outil-copeau 1993.

[58] J. pierre.J.P.pierozak : coupe des métaux, ecole nationale polytechnique alger. Techonologie d'exécution I(O.P.U) novembre 1988.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
-------------------	---

CHAPITRE I

Les traitements thermiques

I.1 généralités sur les traitements thermiques	4
I.1.1 définition	4
I.2 diagramme d'équilibre fer- carbone	5
I.2.1 éléments de base	
I.2.2 constituants du diagramme fer – carbone	
I.3 notions sur les traitements thermiques	8
I.4 la trempe	8
I.4.1 cycle thermique de la trempe.....	8
I.4.2 facteurs de trempe	
I.4.2.1 compositions chimiques	
I.4.2.2 température de trempe	
I.4.2.3 vitesse de refroidissement	
I.4.2.4 effet de masse	
I.4.3 Etude des transformations de l'austénite.....	13
I.4.3.1 Cas de l'acier au carbone eutectoïde.....	14
I.4.3.1.1 refroidissement lent	
I.4.3.1.2 Refroidissements rapides	
I.4.3.1.3 Refroidissement très rapide	
I.4.4 Effet de masse	
I.4.5 propriétés mécaniques obtenues après trempe	
I.5 le revenu	17
I.5.1 définition	17
I.5.2 facteurs du revenu	18
I.5.2.1 l'état initial	
I.5.2.2 durée du revenu	
I.5.2.3 température du revenu	
I.5.3 différents types du revenu	19
I.6 le recuit	19
I.6.1 définition et rôles du recuit	
I.6.2 effets du recuit	
I.7 traitements superficiels	20
I.7.1 introduction	20
I.7.2 trempe superficiel	21
I.8 les inconvénients du traitement thermique	22
I.8.1 les tapures	
I.8.2 déformation et gauchissement	
I.9 influence des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques.....	23
I.10 Traitement de surface contre l'usure	24
I.10.1 introduction	
I.10.2 notion de traitement de surface	
I.10.3 but du traitement de surface	
I.10.4 facteurs de qualité d'un traitement de surface	

I.10.5 description des principaux traitements	27
I.10.5.1 traitement mécanique et thermique de surface	
I.10.5.2 traitements électrolytiques et chimiques	
I.10.5.3 traitement par diffusion	28
I.10.5.3.1 la cémentation	
I.10.5.3.2 la nitruration	
I.10.5.3.3 la carbonitruration	
I.10.5.3.4 la chromisation	
I.10.5.3.5 la sulfinisation	

CHAPITRE II

Les traitements par revêtement

II Les traitements de surfaces par revêtement.....	34
II.1 Introduction.....	34
II.2 Méthode général de traitement de surfaces par dépôt de revêtement.....	34
II.2.1 Revêtement par voie électrolytique	34
II.2.1.1 définitions.....	34
II.2.1.1.1 l'électrodéposition	
II.2.1.1.2 la métallisation	
II.2.1.1.3 l'électrolyse	
II.2.1.1.4 la métallisation par cémentation	
II.2.1.2 Procède du dépôt.....	35
II.2.1.3 Facteurs d'un dépôt électrolytique.....	36
II.2.1.4 Le brillant des revêtements	
II.2.1.5 Principaux dépôts électrolytiques	
II.2.2 Dépôt en phase vapeur chimique (CVD)	37
II.2.2.1 les techniques de revêtement par CVD.....	
II.2.3 les techniques de revêtement par PVD	43
II.2.3.1 Evaporation par bombardement d'électrons	
II.2.3.2 Evaporation par effet joule (résistance)	
II.2.3.3 Evaporation par arc électrique	
II.2.3.4 Evaporation par induction	
II.2.3.5 Evaporation assistée par faisceau d'ions (I.B.A.D)	
II.2.4 les techniques de revêtement par La Pulvérisation	47
II.2.4.1 aspects et hypothèses de la pulvérisation	49
II.2.4.2 Mécanisme physique de pulvérisation	50
II.2.4.3 Caractéristiques De la pulvérisation.....	52
II.2.4.3.1 Le seuil de pulvérisation	
II.2.4.3.2 Le Rendement de pulvérisation (R)	
II.2.4.4 Nature des particules pulvérisées	54
II.2.4.5 Energie des particules pulvérisées.....	55
II.2.4.6 mécanisme de Croissance des couches déposées.....	56
II.2.4.7 Méthode de pulvérisation cathodique	58
II.2.4.7.1 la pulvérisation cathodique diode en courant contenu	
II.2.4.7.2 Les limites de procédé diode	
II.2.4.8 la pulvérisation cathodique haute fréquence.....	61
II.2.4.9 La pulvérisation cathodique triode.....	62
II.2.4.10 La pulvérisation cathodique magnétron.....	63
II.2.5 comparaison des modes de déposition PVD.....	66

CHAPITRE III

LES OUTILS DE COUPE

III.1	les outils de coupe.....	70
III.1.1	introduction	
III.1.2	les defirants type des outils de coupe.	
III.1.3	les defirants parties de l'outil de coupe	
III.1.4	géométrie de l'outil de coupe	
III.1.4.1	plans caractéristiques de l'outil de coupe.....	76
III.1.4.1.1	pour le système de l'outil en main	
III.1.4.1.2	Pour le système de l'outil en travail	
III.1.4.2	Les angles caractéristiques.....	79
III.1.4.2.1	Angles d'arête	
III.1.4.2.2	Angles des faces	
III.1.4.2.3	Evolution de ces angles en travail	
III.1.4.3	Rayon de bec de l'outil de coupe	85
III.1.5	Influence de la géométrie de l'outil de coupe	85
III.1.5.1	Influence de l'angle de direction d'arête	
III.1.5.2	Influence de l'angle d'inclinaison de l'arête	
III.1.5.3	Influence de l'angle d'inclinaison de coupe.....	87
III.1.6	Matériaux utilisés pour outils de coupe	
III.1.6.1	Aciers rapides.....	90
III.1.6.1.1	Aciers rapides au tungstène	
III.1.6.1.2	Aciers rapides au molybdène	
III.1.6.1.3	Aciers rapides sur carbures	
III.1.6.1.4	Aciers rapides resulfurés	
III.1.6.1.5	Aciers rapides élaborés par métallurgie des poudres	
III.1.6.2	Carbures métalliques.....	93
III.1.6.2.1	Carbures métalliques sans revêtement	
III.1.6.2.2	Carbures métalliques avec revêtement	
III.1.6.3	Céramiques	95
III.1.6.4	Cermets.....	96
III.1.6.5	Diamant.....	97
III.1.6.5.1	Diamant naturel	
III.1.6.5.2	Diamant synthétique	
III.1.6.6	Nitride de bore cubique.....	99
III.2	usure des outils de coupe	100
III.2.1	Phénomènes provoquant l'usure	100
III.2.1.1	Phénomènes mécaniques	101
III.2.1.1.1	Usure adhésive	
III.2.1.1.2	Usure abrasive	
III.2.1.1.3	Usure par fatigue	
III.2.1.1.4	Usure par déformation plastique	
III.2.1.1.5	Usure érosive	
III.2.1.1.6	Usure par fissuration	
III.2.1.2	Phénomènes physico-chimiques.....	104
III.2.1.2.1	Usure corrosive	

III.2.1.2.2	Usure par diffusion	
III.2.2	Etude des différents paramètres influants sur l'usure.....	104
III.2.2.1	Influence des conditions de coupe.....	104
III.2.2.1.1	Influence de la vitesse de coupe	
III.2.2.1.2	Influence de la section du copeau	
III.2.2.1.3	Influence de la lubrification	
III.2.2.1.4	Influence de couple pièce /outil	
III.2.2.2	influence des angles sur la face de coupe	
III.2.2.2.1	influence de l'angle de dépouille γ_n	106
III.2.2.2.2	influence de l'angle d'inclinaison de l'arête.	107
III.2.3	effet observable après l'usinage.....	107
III.2.3.1	variation de masse.	
III.2.3.2	phénomène thermique	
III.2.3.3	Transformation géométrique	
III.2.3.4	Transformations mécaniques et tribochimique	
III.2.4	Manifestation de l'usure de l'outil.....	109
III.2.4.1	Usure de la face de coupe (en cratère) K_T	
III.2.4.2	Usure de la face en dépouille (VB)	
III.2.4.3	Usure en entaille	
III.2.4.4	Usure par écaillage de l'arête de coupe (fissuration)	
III.2.4.5	Usure par effondrement de l'arête	
III.2.5	Les différents mécanismes régissent l'endommagement.....	112
III.2.5.1	Endommagement induit par les dépôts macroscopiques	
III.2.5.2	Endommagement induit par les dépôts microscopiques	
III.2.5.3	Endommagement induit par les débris	
III.2.6	Méthode de mesure des endommagements.....	116
III.2.7	Méthode d'examen et d'analyse de la surface des outils et des pièces usinées.....	117
III.2.8	Méthode de mesure des températures de coupe.....	118
III.2.8.1	Mesure pendant l'usinage	
III.2.8.1.1	Les mesures par lunette pyrométrique	
III.2.8.1.2	Les par conduction	
III.2.8.1.3	Les mesures par effet thermoélectrique	
III.2.8.2	Mesure après l'usinage	
III.2.8.3	Mesure séquentielles pendant et après l'usinage	
III.2.9	Loi d'usure et modèles mathématiques.....	119
III.2.9.1	Mesure de l'usure	
III.2.9.2	Etablissement des lois d'usure	
III.2.9.3	Les différents modèles mathématiques associés.....	121
III.2.9.3.1	Modèle de Taylor	
III.2.9.3.2	Modèle de Gilbert	
III.2.9.3.3	Modèle de Kroneberg	
III.2.9.3.4	Modèle de Koking – Depiereux	
III.2.9.3.5	Modèle du commandant Denis	
III.2.10	Loi expérimentales et courbes d'usure.....	126
III.2.10.1	Evolution de l'usure en fonction de temps	
III.2.10.2	Conditions opératoires pour la détermination des courbes d'usure	
III.2.11	Les différents essais d'usure.....	126
III.2.11.1	Les essais d'usure accélérée	
III.2.11.2	Les essais d'usure accélérée par paliers (avec $t = cte$)	
III.2.1.2	Mesure de l'usure des outils de coupe.....	129
III.2.1.3	Courbes expérimentales de l'usure.	129

CHAPITRE IV

Préparation des revêtements et leurs essais

IV.1	introduction.....	133
IV.2	Le titane.....	133
IV.2.1	Propriétés du titane	
IV.2.2	Les nitrures de titane	
IV.3	Réalisation des revêtements sur les outils de coupe.....	136
IV.3.1	Système de déposition	
IV.3.1.1	préparation des substrats	
IV.3.1.2	décapage de la cible	
IV.3.1.3	Déposition et mode opératoire	
IV.4	Les essais réalisées	138
IV.4.1	Propriétés des revêtements obtenus	
IV.4.2	épaisseur de la couche déposée	
IV.4.2.1	les différentes méthodes de mesure de l'épaisseur de la couche	138
IV.4.3	Adhérence de dépôt	139
IV.4.4	La dureté	139
IV.4.5	l'usure.....	140
IV.4.6	l'état de surface de la pièce usinée.....	141

CHAPITRE V

Présentation et interprétations des résultats

V	Présentation et interprétations des résultats	143
V.1	Introduction.....	143
V.2	les résultats des différents essais	143
V.2.1	épaisseur de la couche	
V.2.2	adhérence de la couche.....	144
V.2.3	la dureté	146
V.2.4	l'évaluation de l'usure (VB)	148
V.2.5	l'état de surface de la pièce usinée par outil revêtu	153
	Conclusion	158
	Références bibliographiques	
	Résumé.....	

Conclusion

Cette étude est pour un but d'amélioration des propriétés mécaniques des outils de coupe. Nous avons utilisé la pulvérisation magnétron pour l'obtention des couches de revêtement en nitrures de titane.

L'élaboration des revêtements des outils de coupe est réalisée après le calibrage et la mise en marche du pulvérisateur magnétron.

Les couches obtenues sont en nitrures de titane.

Cette étude nous a permis la comparaison et l'évolution des propriétés mécaniques entre les outils de coupe revêtus et non revêtus (objectif de ce mémoire).

Les résultats obtenus en terme de l'amélioration de ces derniers sont présentés et commentés au cinquième chapitre.

Les résultats de la dureté montrent une amélioration très claire de celle-ci dans le sens de l'évolution de la structure de revêtement.

Quant à la deuxième caractéristique importante à savoir la résistance à l'usure, en terme de la détermination de l'endurance et la durée de vie des outils de coupe, nous avons enregistré après comparaison des outils revêtus par des outils non revêtus soumis aux travaux de d'usinage par tournage à sec, une nette amélioration de la résistance à l'usure.

Les opérations de tournage réalisées à des différentes vitesses de coupe, montrent que le critère d'usure $VB(mm)$ ne peut être atteint qu'à des temps d'usinage $T (min)$, largement considérables comparativement aux temps d'usure des outils de coupe sans revêtement.

Finalement pour une large étude, nous avons étudié l'amélioration de la signature de ces outils revêtus sur la surface de la pièce à usinée, dans cette étape la pièce soumise au tournage (ébauche), et chaque fois nous avons tracé les spectres de la rugosité de la surface de la pièce à l'aide d'un perthometre, et les spectres montrent une nette amélioration dans ce domaine et à partir de ces spectres la rugosité diminue progressivement parallèlement à l'amélioration des propriétés mécaniques des outils de coupe.

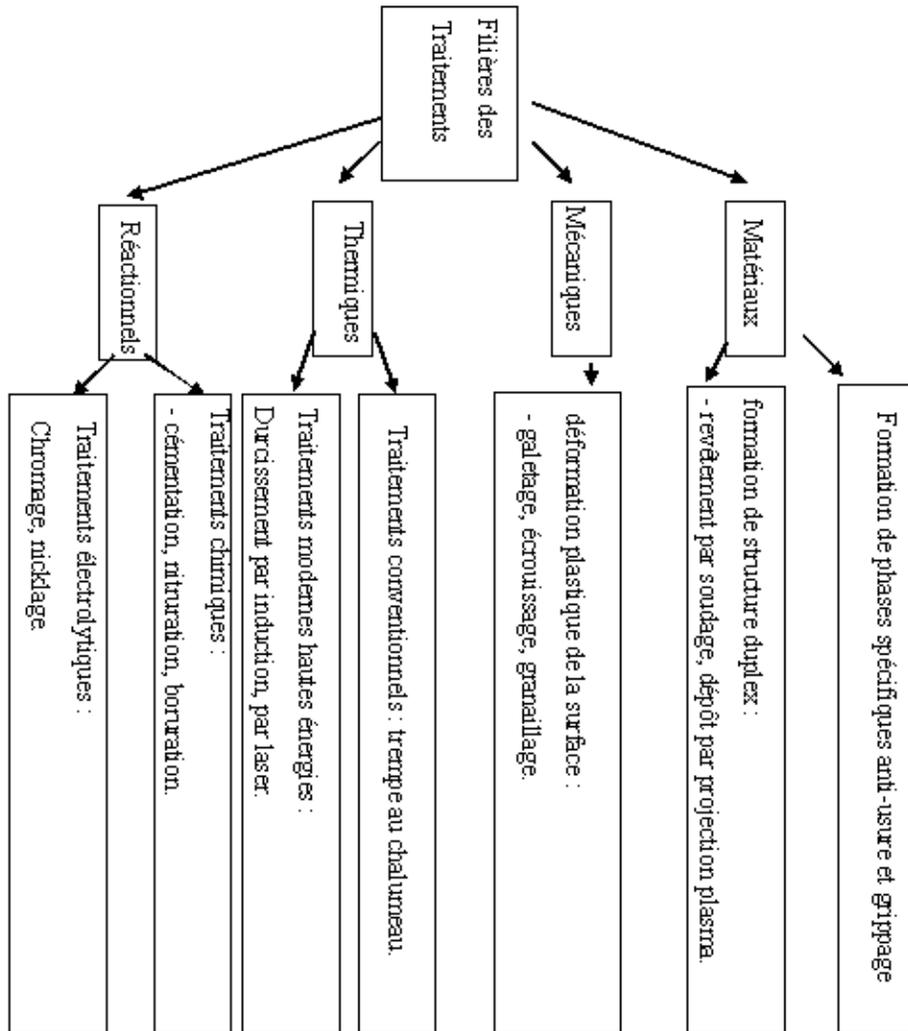


Figure I.11 : Organigramme des différentes filières des traitements

De surface.

المخلص

بالرغم من النجاح و النتائج المحققة بالمعالجة الحرارية على صعيد تحسين المميزات لدى القطع الميكانيكية وذلك بإدماج مواد و خلائط جديدة إلا أن إدخال طرق المعالجة جديدة باتت ضرورة ملحة. القطع المعدنية المعرضة إلى التآكل و الإعياء يجب أن تكون ذات صلابة عالية و لكن المعادن لصلبة تتعرض للكسر بسهولة و صعوبة الاستعمال . الحل في هذا السياق يتجسد في وضع قطع ميكانيكية بخلائط صلبة نسبيا و مقاومة ثم تغير مميزات السطحية بإدخال معالجات مناسبة. إن ادخال معالجات سطحية عن طريق مختلف طرق التلبيس بالنثر يسمح بتحقيق تحسين معتبر في الخصائص سيما المقاومة ضد التآكل و الإعياء .زيادة فترة الحياة لدى القطع الميكانيكية.

Résumé :

Influence des traitements de surface sur les propriétés mécaniques

Malgré le succès et les résultats enregistrés par les traitements thermiques au niveau de l'amélioration des propriétés des pièces et mécanismes mécaniques, avec l'introduction de nouveaux matériaux alliés et composites, il s'avère que l'introduction d'autres techniques de traitements s'imposent.

Les pièces de métal soumises à l'usure doivent être dures, mais les métaux durs peuvent s'avérer cassants, fragiles et difficiles à travailler.

Une solution à ce dilemme peut consister à fabriquer les pièces dans un alliage relativement doux et résistant et de modifier ensuite sa surface par l'action d'un traitement approprié.

L'application des traitements de surfaces par les différentes techniques de revêtement par pulvérisation permet de concrétiser un apport considérable sur les propriétés de résistance à l'usure, au frottement et l'augmentation de vie des pièces mécaniques.

Mots clés: Trempe, Usure, Pulvérisation, Plasma, Revêtement.

Abstract

Influence surface treatments on the mechanical properties

In spite of success and the results recorded by the heat treatments on the level of the improvement of the properties of the parts and mechanical mechanisms, with the introduction of new materials allies and composites, it proves that the introduction of other techniques of treatments are essential.

The metal parts subjected to wear must be hard, but hard metals can prove to be breakable, fragile and difficult to work.

A solution with this dilemma can consist in manufacturing the parts in a relatively soft and resistant alloy and to then modify its surface by the action of a suitable treatment.

The application of the surface treatments by the technical deferent's of coating by pulverization makes it possible to concretize a considerable contribution on the properties of wear resistance, to the friction and the increase in life of the machine elements.

Key words: soak, wear, pulverization, plasma, coating.