



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE «Abbés LAGHROUR» DE KHENCHELA
FACULTE DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE



Département de Génie Mécanique

N° de série :.....

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

**Caractérisation des couches binaires sur un forêt
cylindrique.**

Réalisé par :

-BOUSSAADA SALAH EDDINNE

-DJAMEL RAHALI

-Devant le jury composé de:

Mr:FELLAH MAMOUN

Mr:Abde ANNOURE SAOUDI

Dirigé par :Dr: CHERMIME Brahim

Présenté le:/09/2020

Remerciements

En tout premier lieu, nous remercions Allah, tout-puissant, de nous avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Nous adressons nos vifs remerciements à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à élaborer cet ouvrage.

Nous remercions en particulier notre encadreur Dr.CHERMIME BRAHIM, pour sa disponibilité et la confiance qui 'il nous accordée ainsi que nous professeurs qui nous ont enseigne durant nos étude.

Un grand remerciement aux membres de jurys.

A la fin nous tenons à remercier tous nos collègues particulièrement les gens qui nous ont donné le vrais sens d'amitié.

Dédicace

Je dédie ce mémoire a :

A mes parents

A mes frères et tous les professeures qui m'ont
enseigné dans ma carrière universitaire.

A toute ma famille et mes amis .

SOMMAIRE

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE :	1
CHAPITRE I : LES REVETEMENTS ET LEUR APPLICATIONS SUR LES OUTILS DE COUPE.	
I - Introduction générale sur les revêtements:.....	3
I-1- Méthode général de traitement de surfaces par dépôt de revêtement :.....	3
I-1-1- Revêtement par voie électrolytique :.....	3
I-1-1- 1- Définitions :.....	3
I-1-1-1-1- L'électrodéposition :.....	3
I-1-1-1-2- La métallisation :.....	4
I-1-1-1-3-L'électrolyse :.....	4
I-1-1-1-4- La métallisation par cémentation :.....	4
I-1-1- 2- Procédé du dépôt :.....	4
I-1-1- 3- Facteurs d'un dépôt électrolytique :.....	4
I-1-1- 4- Le brillant des revêtements :.....	5
I-1-1- 5- Principaux dépôts électrolytiques :.....	5
I-1-2- Dépôt en phase vapeur chimique (CVD):.....	6
I-1-2-1- Les techniques de revêtement par CVD:.....	7
I-1-3 - Les techniques de revêtement par PVD:.....	8
I-1-3 -1- Evaporation par bombardement d'électrons:.....	9
I-1-3 -2- Evaporation par effet joule:.....	9
I-1-3 -3- Evaporation par arc électrique:.....	10
I-1-3 -4- Evaporation par induction:.....	10
I-1-3 -5- Evaporation assistée par faisceau d'ions (I.B.A.D):.....	10
I-1-4 - Les techniques de revêtement par La Pulvérisation:.....	12
I-1-4 -1- Aspects et hypothèses de la pulvérisation:.....	14
I-1-4 -2- Mécanisme physique de pulvérisation:.....	14
I-1-4 -3- Caractéristiques De la pulvérisation:.....	16
I-1-4 -3-1- Le seuil de pulvérisation:.....	16
I-1-4 -3-2- Le Rendement de pulvérisation (R):.....	17
I-1-4 -4- Nature des particules pulvérisées:.....	17
I-1-4 -5- Energie des particules pulvérisées:.....	17
I-1-4 -6- Mécanisme de Croissance des couches déposées:.....	19
I-1-4 -7- Méthode de pulvérisation cathodique:.....	20
I-1-4 -7-1- La pulvérisation cathodique diode en courant continu:.....	22
I-1-4 -7-2- Les limites de procédé diode :	22
I-1-4 -8- La pulvérisation cathodique haute fréquence:.....	22
I-1-4 -9- La pulvérisation cathodique triode:.....	23

I-1-4 -10- La pulvérisation cathodique magnétron:.....	24
I-1-5 - Comparaison des modes de déposition PVD.....	26
I -1-6-Application des Procédés PVD & CVD sur les outils de coupe:.....	27
I-1-6-1 - Outillage et revêtements d'outils:.....	27
I-1-6-2 - Matériaux d'outils utilisés en usinage:.....	28
I-1-6-3 - Amélioration d'outils de coupe par des couches anti-usure:.....	29
I-1-6-4 - Fonctions d'un revêtement en usinage:.....	30
I-2- Définition d'un traitement binaire VN (Nitrure de Vanadium):	33
I-2-1- Introduction:.....	33
I-2-2- Revêtements de VN:.....	33
I-2-3- Caractéristiques du Vanadium:.....	35
I-2-3-1- Découverte:.....	36
I-2-3-2- Origine:.....	36
I-2-3-3- La Chimie du Vanadium:.....	37
I-2-4- Applications Industrielles:.....	42

CHAPITRE II : LES TYPES DES OUTILS DE COUPE

II-Introduction	43
II-1- Type (classification) des outils coupants.....	43
II. 2-Type des outils de tournage.....	44
II. 2.1.Outils pour l'usinage extérieur.....	44
II-2.1.1- Outil à charioter coudé.....	44
II-2.1.2- Outil à charioter droit.....	45
II.2.1.3 Outil charioté à couteau	47
II.2.1.4 Outil à dresser d'angle.....	48
II.2.1.5 Outil à saigner droit.....	48
II.2.1.6 Outil à tronçonner	50
II.2.1.7 Outil à gorge.....	51
II.2.1.8 Outil à fileter extérieur	52
II.2.1.9. Outil pelle.....	54
II.2.1.10 Outil à moleter.....	55
II.2.2 Les Outils pour l'usinage interne.....	57
II.2.2.1 Outil à aléser.....	57
II.2.2.2 - Outil à aléser dressé.....	58

II.2. 2.3 - Outil à Chamberer.....	58
II.2.2.4 - Outil à fileter inter.....	59

CHAPITRE III : LES MATERIAUX DES OUTILS DE COUPE

III. Matériaux des outils	62
III.1.Introduction.....	62
III.2.Classification des aciers.....	63
III. 2.1. Aciers de construction.....	63
III.2.2. Aciers de construction d'usage général (aciers au carbone).....	63
III.2.3. Aciers de construction ordinaires (aciers courants).....	63
III.2.4. Aciers de construction de qualité.....	64
III.2.5. Aciers de décolletage.....	64
III.2.6. Aciers d'amélioration.....	65
III.2.7. Aciers alliés au chrome.....	65
III.2.8. Aciers alliés au chrome-manganèse.....	66
III.2.9. Aciers alliés au chrome-silicium-manganèse (chromansil).....	66
III.2.10. Aciers alliés au chrome-nickel.....	66
III.2.11. Aciers de cémentation.....	67
III.2.12. Aciers alliés au chrome.....	68
III.2.13. Aciers alliés au chrome-vanadium.....	68
III.2.14. Aciers alliés au chrome-nickel.....	68
III.2.15. Aciers alliés au chrome-manganèse.....	68
III.2.16. Aciers de nitruration.....	69
III.2.17. Aciers pour constructions soudées.....	70
III.2.18. Aciers à roulements.....	72
III.2.19. Aciers à haute résistance (Maraging).....	73
III.2.20. Aciers à haute tenue à l'usure.....	74
III.2.21. Aciers austénitiques au manganèse.....	74
III.2.22. Aciers à haute tenue à la corrosion (aciers inoxydables).....	75
III.2.23. Aciers inoxydables au chrome.....	75
III.2.24. Aciers inoxydables au chrome-nickel.....	76
III.2.25. Aciers inoxydables ferritiques.....	77
III.2.26. Aciers inoxydables austénitiques.....	78
III.2.27. Aciers inoxydables martensitiques.....	78
III.3.2. Aciers à outils.....	78

III.3.2.1 Aciers à outils de la classe 1.....	79
III.3.2.2 Aciers à outils de la classe 2.....	81
III.3.2.2.1 Aciers au manganèse et au manganèse-vanadium.....	81
III.3.2.2.2 Aciers au chrome.....	81
III.3.2.2.3 Aciers au chrome-molybdène.....	81
III.3.2.2.4 Aciers au chrome-tungstène.....	82
III.3.2.2.5 Aciers au nickel-chrome.....	82
III.3.2.3 Aciers à outils de la classe 3.....	82
III.3.2.4 Aciers à outils de la classe 4.....	83
III.3.2.4.1 Matériaux des outils acier rapide.....	83
III.3.2.4.2 Aciers rapides courants.....	84
III.3.2.4.3 Aciers rapides au tungstène-molybdène.....	84
III.3.2.4.4 Aciers extra-rapides.....	84
III.3.2.4.5 Aciers rapides spéciaux au cobalt.....	84
I.3.2.4.6 Aciers rapides à haute teneur en vanadium.....	85
III.3.2.4.7 Aciers au molybdène-cobalt.....	85
III.3.2.4.8 Carbures métalliques à outils.....	85
III.3.2.4.9 Aciers et alliages spéciaux.....	86
III.3.2.4.10 Aciers magnétiques doux.....	87
III.3.2.4.11 Aciers et alliages pour éléments chauffants.....	88
III.3.2.4.12 Alliages aux propriétés dilatométriques.....	88
III.4 Angle des outils de tour	89
III.4.1 Les partie de L’outil	90
III.4.2 les plans de l’outil.....	91
III.4.3 Détermination des angles de coupe.....	92
III.4.3.a Angles de coupe positifs.....	96
III.4.3.b Angles de coupe négatifs.....	97

CHAPITRE IV : Comparaison entre forêt revêtu et un autre non revêtu

IV.1. Généralités sur les revêtements des outils de coupe.....	99
IV.2. Comportement tribologique des revêtements des outils de coupe.....	100
IV.3. Comportement mécanique.....	100
IV.4. Comportement thermique.....	101
IV.5. Comportement à l'usure des couches de revêtement	103
IV.6. Comparaison entre forêt revêtu et un autre non revêtu.....	104
IV.7. RESULTATS OBTENUS.....	105
CONCLUSION GENERALE :	106
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:	107

**LISTE
DES FIGURES**

CHAPITRE I

LES REVETEMENTS ET LEUR APPLICATIONS SUR LES OUTILS DE COUPE

	Page
Figure I.1. Schéma du bain d'un revêtement électrolytique.....	4
Figure I.2. La classification des différentes méthodes de revêtement.....	5
Figure I.3. Schéma de principe de dépôt en phase vapeur chimique,..... Cas du réacteur à paroi chaude.	6
Figure I.4. Principe d'une installation CVD.....	7
Figure I.5. Exemple de Revêtement à structure colonnaire Obtenu par CVD.....	8
Figure I.6 Schéma d'une installation avec une source d'évaporation par bombardement..... d'électrons.	9
Figure I.7. Chauffage par effet Joule.....	10
Figure I.8. Schéma de principe de l'IBAD.....	11
Figure I.9. Schéma de principe de pulvérisation.....	14
Figure I.10. Ejection d'atomes sous l'effet du bombardement.....	15
Figure I.11. Différentes position de la cible.....	15
Figure I.12. Principe d'une installation de dépôt par Pulvérisation.....	21
Figure I.13. Enceinte de pulvérisation diode.....	22
Figure I.14. Schéma de principe du système Triode.....	24
Figure I.15. Trajectoires électroniques.....	24
Figure I.16. Magnétron plan circulaire conventionnel.....	25
Figure I.17. Comparaison des matériaux d'outillage selon leurs propriétés..... et leur rapport avec les paramètres de coupe.	28
Figure I.18. Diagramme d'équilibre de VN (A) et CrVN (B).....	34
Figure I.19. Représentation schématique de la structure de coquille du vanadium.....	38

CHAPITRE II

LES TYPES DES OUTILS DE COUPE

	Page
Figure. II -1 : 5 outil à charioter.....	44
Figure. II -2 : Outil à charioter coudé.....	45
Figure. II -3 : Outil à charioter coudé.....	45
Figure. II -4 Outil à charioter droit.....	46
Figure. II -5 : Outil à charioter droit.....	46
Figure. II -6 : Outil à charioter droit.....	46
Figure. II -7 : Outil charioter à couteau.....	47
Figure. II -8 : Outil charioter à couteau.....	47
Figure. II -9 : Outil à dresser d'angle.....	48
Figure. II -10 Outil à dresser d'angle.....	48
Figure. II -11 : Outil à saigner droit.....	49
Figure. II -12 : Outil à saigner droit.....	49
Figure. II -13 : Outil à saigner droit et gauche.....	49
Figure. II -14 : Outil à tronçonner.....	50
Figure. II -15 : Outil à tronçonner.....	50
Figure. II -16 : Outil à tronçonner.....	51
Figure. II -17 : Outil à gorge.....	51
Figure. II -18 : Outil à gorge.....	52
Figure. II -19 : les défèrent outils a gorge.....	52
Figure. II -20 : Outil à fileter extérieur.....	53
Figure. II -21 : Outil à fileter extérieur.....	53
Figure. II -22 : les défèrent outils de filetage extérieur et enterreur.....	53
Figure. II -23 : Outil pelle.....	54
Figure. II -24 : Outil pelle.....	54
Figure. II -25 : Outil pelle.....	55

Figure. II -26 : Outil à moleter.....	55
Figure. II -27 : Outil à moleter.....	56
Figure. II -28 : les outils et opération de tournage extérieur.....	56
Figure. II -29 : Outil à aléser.....	57
Figure. II -30 : Outil à aléser.....	57
Figure. II -31 : Outil à aléser dressé.....	58
Figure. II -32 : Outil à aléser dressé.....	58
Figure. II -33 : Outil à Chambrer.....	59
Figure. II -34 : Outil à Chambrer.....	59
Figure. II -35 : Outil à Chambrer.....	59
Figure. II -36 : Outil à fileter inter.....	60
Figure. II -37 : Outil à fileter inter.....	60
Figure. II -38 : Outil à fileter inter.....	60
Figure. II -39 : les outils et opération de tournage intérieur.....	61

CHAPITRE III

LES MATERIAUX DES OUTILS DE COUPE

Figure III -1 : diagramme de carbure métallique.....	86
Figure III -2 : Angles du taillant (outil en main).....	89
Figure III -3 : Angles du taillant (outil en travail).....	89
Figure. III -4 : La partie la plus importante de l'outil.....	91
Figure. III -5 : les plans de l'outil (en main).....	91
Figure. III -6 : définit les angles.....	92
Figure III -7 : les plans de l'outil (en main).....	92
Figure. III -8 : La fragilité en pointe de l'outil.....	93

Figure. III -9 : La direction de dégagement du copeau.....	93
Figure. III -10: La robustesse et la réversibilité de la plaquette.....	94
Figure III -11 : L'angle de direction d'arête κ	94
Figure III -12 : L'angle de direction d'arête κ	95
Figure III-13 : choix de l'angle de coupe.....	96
Figure III -14 : Angles de coupe positifs	97
Figure III -15: Angles de coupe négatifs.....	97

CHAPITRE IV

Comparaison entre forêt revêtu et un autre non revêtu

Figure IV-1 : Image réalisée avec un MEB d'un outil revêtu avec trois	104
couches de revêtement (a) puis une seule couche	
Figure IV-2 : L'évolution de VBc pendant le perçage avec des forets	105
revêtus et sans revêtement	

LISTE

DES TABLEAUX

	Page
Tableau I.1. Energie des ions incidents bombardant la cible.....	16
Tableau I.2. Energie et vitesse d'éjection par bombardement d'ions K+.....	18
Tableau I.3. Comparaison des 4 principaux procédés de déposition en PVD.....	27
Tableau III.1. les principales nuances des aciers alliés d'amélioration et leurs.....	67
caractéristiques	
Tableau III.2. les principales nuances d'aciers alliés de cémentation et leurs.....	69
applications	
Tableau III.3. rapporte les principales nuances de nitruration et leurs caractéristiques....	70
Tableau III.4. L'emploi des aciers à ressorts est très varié.....	72
Tableau III.5. Quelques nuances d'aciers pour roulements et leurs principales	73
applications...	
Tableau III.6. Les caractéristiques mécaniques après recuit et vieillissement.....	74
Tableau III .7. les caractéristiques mécaniques l'acier "Hadfeld".....	75
Tableau III.8. deux types des aciers inoxydables.....	76
Tableau III.9. Les caractéristiques de quelques nuances d'aciers.....	77
inoxydables Cr-Ni, après trempe à l'eau à 1150°C	
Tableau III.10. Les caractéristiques de quelques nuances.....	77
d'aciers inoxydables ferritiques	
Tableau III.11. Les caractéristiques de quelques nuances	78
d'aciers inoxydables austénitiques	

Tableau III.12. Les caractéristiques de quelques nuances78

d'aciers inoxydables martensitiques

Tableau III.13. Quelques nuances d'aciers à outils.....80

de la classe 1, avec des exemples d'applications

Tableau III.14. Quelques nuances d'aciers à outils pour travail à chaud.....82

sont mentionnées, à titre d'exemple

INTRODUCTION

Introduction

Le choix des matériaux à outil de coupe dont le foret cylindrique et leurs revêtements influents fortement sur la durée de vie, sur le coût total et doit être conditionnés par les qualités requises en service. Le recours aux revêtements, 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. Les matériaux en films minces choisis doivent présenter des propriétés exaspérées par rapport à la pièce métallique initiale à revêtir.

Les outils de coupe sont maintenant presque tous munis de revêtements qui sont devenus l'un des principaux facteurs de leur efficacité. Pour assurer un usinage efficace il ne suffit plus de savoir choisir la meilleure forme d'outil pour la fabrication envisagée, il faut aussi déterminer le revêtement le mieux approprié. IL ne suffit pas que l'outil enlève des surépaisseurs de métal, il faut aussi qu'il laisse derrière lui une surface utilisable et que l'opération soit aussi peu coûteuse que possible. UN bon revêtement doit limiter les échauffements, éviter les soudures à froid, augmenter les vitesses de coupe et les profondeurs de passe, diminuer les efforts de coupe et contribuer à l'obtention d'un bon état de surface. Il doit aussi s'user lui-même très peu.

Dans ce travail, nous avons entamé à caractériser les effets d'un revêtement binaire.

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.

Notre travail a pour but d'élaborer et de caractériser d'une part, des couches minces binaire sur un foret cylindrique, et d'autre part, des couches minces de Molybdène en mélange avec le Vanadium déposées sur un foret en acier contenant 1% (en masse) de carbone sous différent pourcentage de vanadium dans la mixture de la pression du gaz utilisé. Il se forme donc des nitrures de Molybdène et des nitrures de Vanadium.

CHAPITRE I

LES REVETEMENTS ET LEUR APPLICATIONS
SUR LES OUTILS DE COUPE

I - Introduction générale sur les revêtements.

Le revêtement est une technologie qui améliore la capacité et la performance des outils Coupants. L'outil n'est pas modifié chimiquement, mais revêtu d'une fine couche de Quelques μm . Parmi les procédés d'exécution de revêtement, on peut citer le PVD (Physico Vapor Déposition). Il est réalisé sous vide à une température inférieure à 600°C . C'est une méthode très répandue pour la déposition d'un revêtement en métal Dur. Un revêtement correctement appliqué et adapté à la matière usinée permet D'augmenter la durée de vie et la performance de l'outil ainsi que les caractéristiques Des pièces usinées. Il permet de :

- Réduire le coefficient de frottement,
- Créer une barrière thermique en diminuant le coefficient de conduction entre l'outil et la pièce à usiner,
- Constituer une surface inerte chimiquement.

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

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

I-1- Méthode général de traitement de surfaces par dépôt de revêtement :

I-1-1- Revêtement par voie électrolytique :

I-1-1- 1- Définitions :

I-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 dépôts électrolytiques est aujourd'hui désigné par le terme général (galvanoplastie).

I-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.

I-1-1-3- l'électrolyse : désigne l'opération qui consiste à décomposer une solution par l'action d'un courant électrique.

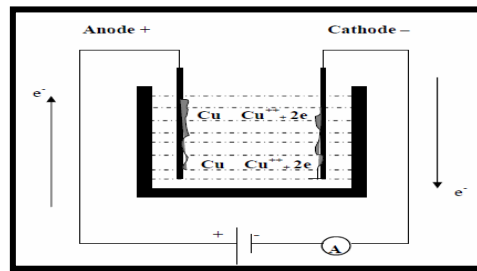


Figure I.1. Schéma du bain d'un revêtement électrolytique.[1]

I-1-1-4- La métallisation par cémentation : c'est la saturation superficielle de l'acier en aluminium, chrome, bore et autres éléments.

I-1-1- 2- Procédé 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 pouvons 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.

I-1-1- 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.

I-1-1- 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.

I-1-1- 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 :

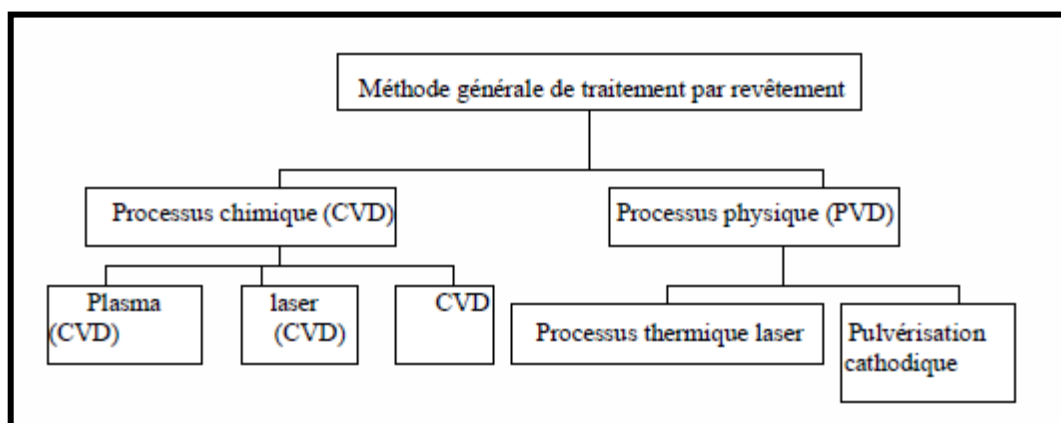
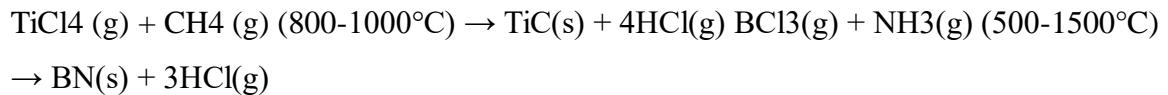


Figure I.2. La classification des différentes méthodes de revêtement.[2]

I-1-2- Dépôt en phase vapeur chimique (CVD).

La substance à déposer se forme directement sur la surface du substrat ou à son voisinage immédiat par réaction entre deux ou plusieurs espèces gazeuses introduites dans le réacteur. Le substrat doit être maintenu à température élevée pour activer thermiquement la réaction. Comme un exemple les réactions suivantes permettent de déposer du carbure de titane, du nitrure de bore.



La nécessité de maintenir le substrat à température élevée constitue un condition désavantage des procédés CVD, sous leur forme classique, par rapport aux techniques PVD. Si le substrat est une céramique, il peut supporter des températures élevées sans dégradation de ses propriétés. Si le substrat est un acier à outils, il subit une dégradation de ses propriétés et devra être retraité pour restaurer sa dureté et sa ténacité initiales.

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 Déposition)).

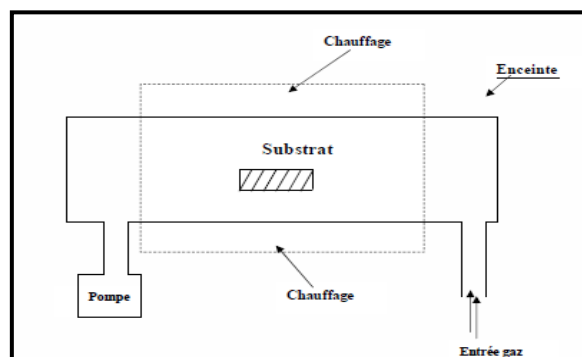


Figure I.3. Schéma de principe de dépôt en phase vapeur chimique, Cas du réacteur à paroi chaude.[3]

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.
- ✓ 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.

I-1-2-1- 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, 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.

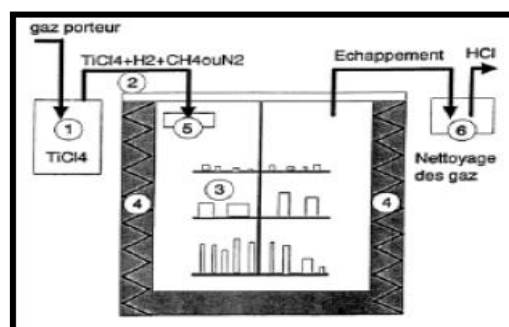


Figure I.4. Principe d'une installation CVD.[4]

En CVD, on peut obtenir des couches de structures granulaires colonnaires 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.

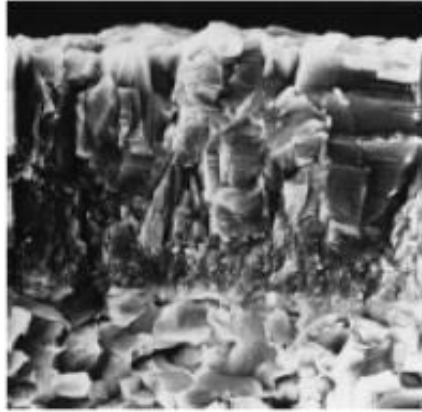


Figure I.5. Exemple de Revêtement à structure colonnaire Obtenu par CVD.[5]

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.

I-1-3 - 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.

I-1-3-1- 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 . 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 créée 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.

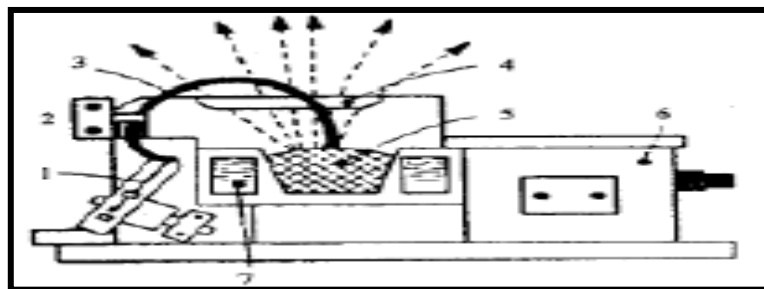


Figure I.6. Schéma d'une installation avec une source d'évaporation par Bombardement d'électrons.[5]

- 1- Filament
- 2- Aiment
- 3- Faisceau d'électrons
- 4- Pôle magnétique
- 5- Matériau à évaporer
- 6- Electro-aimant
- 7- Circuit de refroidissement

I-1-3-2- 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.

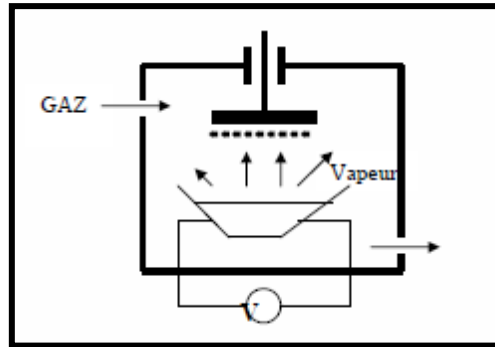


Figure I.7. Chauffage par effet Joule.[6]

I-1-3-3- Évaporation par arc électrique

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

I-1-3-4- Évaporation 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.

I-1-3-5- Évaporation assistée par faisceau d'ions (I.B.A.D)

L'évaporation assistée par faisceau d'ions (Ion Beam Assited Deposition) 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.

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.

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.

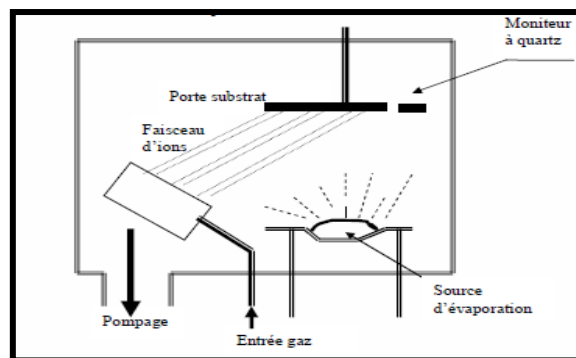


Figure I.8. Schéma de principe de l'IBAD.[6]

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.

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.

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.

I-1-4 - 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.

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 (500 à 600), 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.

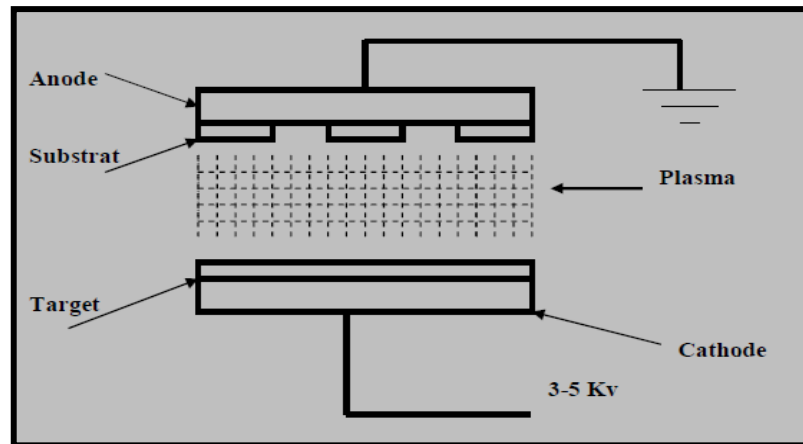


Figure I.9. Schéma de principe de pulvérisation.[7]

I-1-4 -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.

I-1-4 -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.

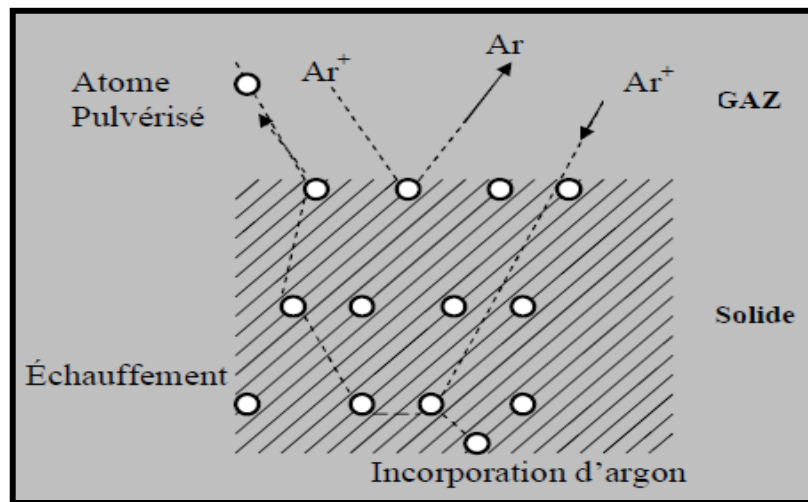


Figure I.10. Ejection d'atomes sous l'effet du bombardement.[7]

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.

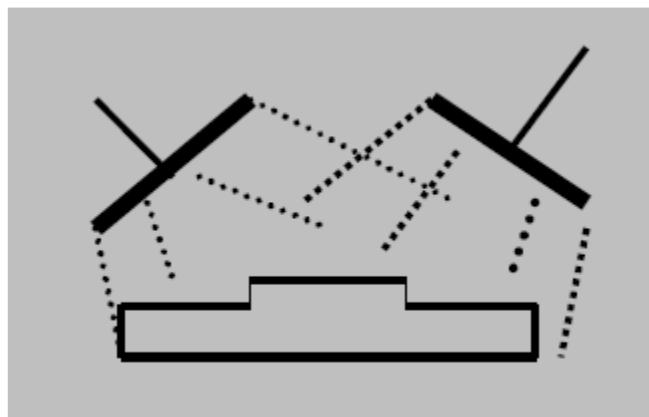


Figure I.11. Différentes position de la cible.[7]

- 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), 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.

I-1-4 -3- Caractéristiques De la pulvérisation.

I-1-4 -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	1	15	15	15
Au	20	20	20	18
Ta	25	26	30	30
W	35	33	30	30

Tableau I.1.Energie des ions incidents bombardant la cible.

I-1-4 -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.

I-1-4 -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 général 1.

I-1-4 -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.

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 en (ev)
Be	7	11	0,3
Al	9	9.3	3.5
Si	10	8	2.6
Ti	13.5	7.4	4
V	11	6.5	2.5
Cr	13.2	7.1	3.4
Mn	13.5	6.8	1.5
Fe	14	7	3.8
Co	12	6.4	3.2
Ni	17.5	7.5	2.8
Cu	9.2	5.4	1.8
Ge	13.5	6	2.6
Zr	22	6.8	5.6
Mo	22	6.5	4.8
Rh	20	6.2	5
Pd	14.5	5.3	3.5
Ag	8.5	4	1
Ta	33.5	6	7
W	34.5	6	7.8
Re	39.5	6.4	9.6
Pt	33.5	5.5	4.5
Au	21	4.7	2.5
U	45	6.2	12.5

Tableau I.2. Energie et vitesse d'éjection par bombardement d'ions K⁺

I-1-4 -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 nucléé, sont instables et tendent à se résorber. 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 grands 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.

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 créer 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 O₂ ou de l'azote N₂.

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 courant continu (DC).
- ✓ la pulvérisation triode.
- ✓ la pulvérisation diode RF.
- ✓ la pulvérisation magnétron.

I-1-4 -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. 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.

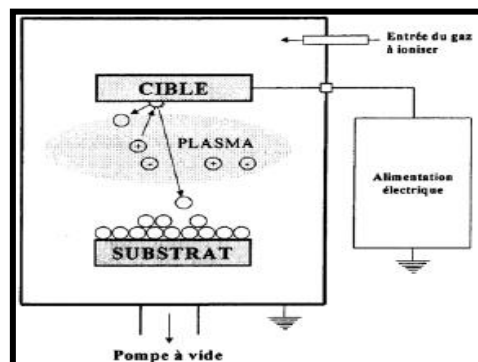


Figure I.12. Principe d'une installation de dépôt par Pulvérisation.[3]

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 luminescente, 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 créer une décharge lumineuse.

I-1-4 -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 .

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.

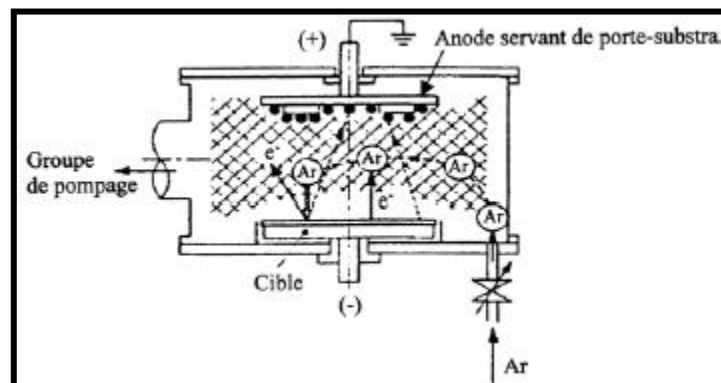


Figure I.13. Enceinte de pulvérisation diode.[3]

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.

I-1-4 -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.

I-1-4 -8- La pulvérisation cathodique haute fréquence.

Le dispositif haut 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, car dans des systèmes 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.

I-1-4 -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 élevée, 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.

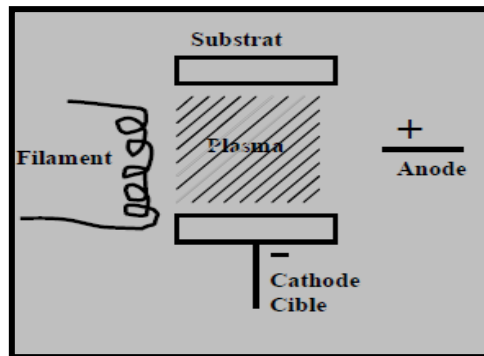


Figure I.14. Schéma de principe du système Triode.[4]

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.

I-1-4 -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.

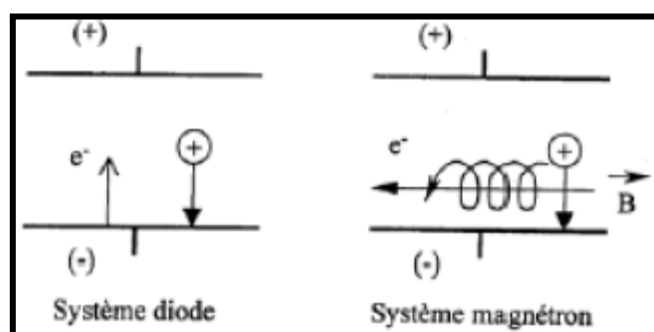


Figure I.15. Trajectoires électroniques.[4]

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.

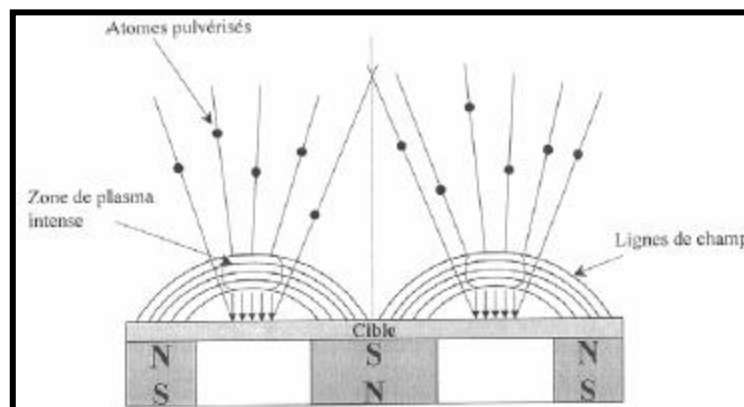


Figure I.16. Magnétron plan circulaire conventionnel.[5]

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.

I-1-5 - 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.

	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 stœchiométrie. ▪ 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"> ▪ Possibilité de déposer de nombreux métaux, alliages, composés réfractaires. ▪ Maîtrise de stœchiométrie. ▪ Bonne adhérence des dépôts. ▪ Bon pouvoir de recouvrement. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dépôts non uniformes en épaisseur.
Magnétron	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vitesse de dépôt élevée. ▪ Faible température du dépôt (plastique). 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Investissement élevé. ▪ Cibles sensibles à la fissuration.

		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 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 ▪ Possibilité de déposer de nombreux métaux, alliages, etc..... ▪ Bien adapté aux applications mécaniques. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Investissement matériel élevé. ▪ Contrôle de la stœchiométrie parfois délicat. ▪ Dépôt non uniformes en épaisseurs.

Tableau I.3. Comparaison des 4 principaux procédés de déposition en PVD.

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.

I-1-6-Application des Procédés PVD & CVD sur les outils de coupe.

I-1-6-1 - Outillage et revêtements d'outils

Un outil est constitué de deux parties distinctes ou non et pouvant être composées du même matériau. On a : un corps et une ou plusieurs parties tranchantes.

Le corps de l'outil doit présenter :

- ✓ La résistance à la fatigue
- ✓ La ténacité
- ✓ Etre brasable si la fixation des parties tranchantes l'exige.

La partie tranchante doit être :

- ✓ Résistante à l'usure
- ✓ Non fragile
- ✓ Résistante à la corrosion

I-1-6-3 - Amélioration d'outils de coupe par des couches anti-usure

Comme nous l'avons vu précédemment, les matériaux d'outils ne sont pas universels pour toutes les applications en usinage. Leurs propriétés mécaniques, tribologiques et thermo-physiques déterminent leurs emplois. Actuellement, les recherches dans le domaine des outils de coupe pour le bois sont focalisées sur la modification des surfaces afin d'obtenir des outils présentant une durée de vie supérieure à celle des outils en matériaux classiques (aciers, carbures...) et une sensibilité aux chocs plus faible que les outils PCD.

Il existe deux types de modification surfacique de matériaux métalliques :

- le premier utilise le principe de saturation réactive de la surface par des atomes donnant avec le substrat des composés durs (par exemple nitruration).
- le deuxième consiste à déposer une couche mince (un revêtement de quelques microns) de matériau présentant des caractéristiques intéressantes pour l'application.

Dans le domaine de l'usinage de métaux, les revêtements permettent d'augmenter significativement la durée de vie des outils.

Dans le cas présent, les revêtements pour l'usinage, déposés industriellement, sont obtenus principalement par deux techniques :

- PVD : Physical Vapor Deposition
- CVD : Chemical Vapor Deposition

Nous allons rappeler brièvement les principes généraux d'obtention de revêtements par ces deux techniques. Avant déposition les substrats subissent un cycle de nettoyage préalable composé d'un nettoyage organique (enlevant les contaminants du type organique - graisses, résines) et d'un nettoyage chimique (permettant d'éliminer des contaminants non organiques - oxydes, métaux).

- PVD - Dépôt physique en phase vapeur

Le processus de fabrication d'un dépôt PVD est composé de trois étapes :

- ✓ Obtention de la phase vapeur du matériau à déposer
- ✓ Transport des espèces à déposer vers le substrat
- ✓ Dépôt sur le substrat et croissance de la couche

L'ensemble de ces processus se fait dans une enceinte, sous pression réduite, proche du vide, en présence d'un plasma ionisé orienté électriquement.

Les différents types de procédés PVD sont définis selon le mode mis en jeu pour créer la vapeur du matériau à déposer. De cette façon, on peut distinguer trois catégories :

- ✓ L'évaporation sous vide
- ✓ La pulvérisation cathodique

✓ Dépôts ioniques (Ion Plating)

Chacune de ces trois catégories connaît également des sous-familles basées sur des moyens techniques différents afin d'obtenir de la phase vapeur du matériau source.

- CVD - Dépôt chimique en phase vapeur

C'est un procédé fondamentalement différent des procédés précédents puisqu'il est basé sur une série de réactions chimiques. Le matériau à déposer est fourni à l'enceinte de réaction sous forme gazeuse (mixture de plusieurs types de gaz selon le dépôt désiré), le substrat est chauffé à une température allant jusqu'à 1000°C, telle que lorsque la molécule du composé gazeux le touche, elle se décompose en un matériau solide, celui recherché. Le gaz résiduel est pompé par un système d'échappement.

Ce procédé permet de réaliser une grande variété de couches. Le contrôle de composition du mélange de gaz dans le temps, rend possible d'obtenir des revêtements multicouches, ainsi que de couches de transition (par exemple passage d'une couche de TiC par une couche de Ti(C,N) pour aboutir à une couche de TiN).

Les gaz utilisés pour les revêtements actuellement rencontrés en usinage sont de type : H₂, TiCl₄, CH₄, N₂, AlCl₃, CO₂, etc.

Le procédé CVD est utilisé principalement sur les substrats en carbure de tungstène, c'est à cause des températures élevées, qui dans le cas des aciers provoque un revenu et les pertes de propriétés mécaniques.

La méthode classique CVD connaît des variantes comme PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapor Déposition) ou MTCVD (Medium Température Chemical Vapor Deposition). Ces variantes permettent d'abaisser la température du travail vers 850°C. De nombreux développements sont menés afin d'abaisser encore la température et de pouvoir de réaliser des dépôts sur les aciers.

I-1-6-4 - Fonctions d'un revêtement en usinage

- Types d'usure des outils coupants

La fonction générale d'un revêtement d'outil est d'augmenter sa durée de vie. Le revêtement est appliqué pour minimiser les mécanismes de l'usure des outils pendant la coupe.

L'usure des outils d'usinage est un processus complexe résultant des interactions de plusieurs phénomènes élémentaires se déroulant dans des conditions de températures et de pressions surfaciques élevées. On peut distinguer cinq principaux mécanismes de l'usure : mécanique, adhésion, diffusion et chimique.

L'usure mécanique se produit par abrasion conduisant à une perte de la matière de l'outil et un changement de la géométrie de l'arête de coupe.

L'usure par l'adhésion se développe lors d'un "collage" local entre la matière usinée et l'outil suivi par sa destruction avec de l'enlèvement des particules de l'outil.

La diffusion, ce type d'usure apparaît dans l'environnement des températures élevées. Les atomes du matériau de l'outil se détachent et pénètrent dans le matériau usiné. Le transfert dans le sens inverse peut aussi avoir lieu.

L'oxydation est le principal mécanisme de l'usure chimique. Ce processus se produit avec des températures du même ordre que pour la diffusion. L'oxydation surfacique du matériau de l'outil conduit à l'apparition d'une couche fragile enlevée durant le frottement du copeau.

Nous pouvons remarquer que les mécanismes de l'usure sont occasionnés et redoublés par les effets thermiques (augmentation de la température) dans la zone de coupe. Ce comportement est bien évident, vu que la puissance mécanique mise en œuvre lors de la coupe est pratiquement complètement dégradée sous forme de chaleur.

L'intérêt de déposer un revêtement sur un outil est donc de limiter tous ces facteurs d'usure.

- Effets d'un revêtement apportés au procédé d'usinage

Parmi l'ensemble des facteurs de l'usure, les phénomènes tribologiques et thermiques aux interfaces pièce-outil-copeau semblent d'avoir la responsabilité la plus importante. La diffusion et l'oxydation apparaissant avec des températures élevées, sont donc indirectement dépendantes des interactions mécaniques et thermiques de l'outil et de la matière. C'est pourquoi, la majorité d'auteurs dans la littérature dédie plus d'attention à ces phénomènes. Les actions des revêtements en tant qu'une protection de l'outil sont regardées principalement de deux points de vue : mécanique et thermique.

- Aspects mécaniques

Les recherches réalisées jusqu'à présent, principalement en coupe métallique ont démontré l'influence de revêtements sur les aspects mécaniques. Les résultats présentés par les différents auteurs divergent beaucoup et ne peuvent pas conduire à une conclusion unique. En effet, ces résultats dépendent fortement des paramètres de l'usinage et du type de la paire tribologique outil-pièce.

Grzesik dans conclut que certains revêtements peuvent réduire considérablement la pression spécifique k_c de coupe définie par le rapport de la force de coupe F_c avec l'aire A de la section non déformée du copeau :

$$k_c = F_c/A$$

Selon lui ce phénomène est observable surtout pour des vitesses d'avance importantes.

Beer dans son travail a testé le coefficient de frottement de différents types de revêtements en contact avec le bois, il a constaté que certains dépôts le réduisent considérablement.

Monaghan par modélisation des éléments finis d'un outil revêtu démontre la diminution des contraintes dans l'outil résultant d'une réduction du coefficient de frottement entre l'outil et le copeau obtenue par déposition d'un revêtement de nitrure du titane.

Dans Grzesik a testé le comportement tribologique de l'interface : la surface d'attaque et le copeau. Il a constaté que les revêtements durant ses expériences donnent lieu à des changements de surface de contact outil-copeau de l'ordre de 25%. Ils permettent aussi de réduire le frottement et par conséquent les contraintes mécaniques à l'interface. Par contre dans son étude de frottement, il trouve le coefficient de frottement similaire pour tous les revêtements testés ainsi que pour le carbure de tungstène non revêtu lorsque la vitesse de frottement est élevée. Par ailleurs, la résistance à l'usure a été améliorée par ces revêtements.

Dans le travail l'examen de la force de frottement (tangentielle à la surface de coupe) ne révèle pas un constat unique, cependant le rapport avec la surface de contact a démontré que les contraintes normales et tangentielles à l'interface sont plus importantes pour un outil revêtu. Grzesik trouve que les revêtements avec une couche intermédiaire isolante modifient significativement le frottement.

Ces revêtements isolants diminuent la force de frottement lorsqu'on coupe de l'acier inoxydable et l'augmentent pendant l'usinage de l'acier carbonique. Pour les mêmes types de matière usinée, il confirme dans qu'effectivement une couche isolante peut réduire le frottement avec l'acier inoxydable, dans le cas de l'acier carbonique l'influence des revêtements apparaît beaucoup moins évidente.

Rech et al. Montrent que le revêtement ne réduit pas la force normale à la surface de coupe, par contre il influence significativement la force tangentielle. Dans il constate une réduction des efforts normaux et tangentiels par des revêtements pendant la coupe à vitesses modérées.

A l'issue de ces travaux on peut constater que la modification de la valeur de la surface de contact est bien évidente, et que l'influence sur les efforts de coupe est remarquable.

- Aspects thermiques

L'influence de revêtements sur le comportement thermique des outils en usinage a fait l'objet de travaux pour certains auteurs. Néanmoins, cette question reste très délicate étant donné que réaliser une métrologie thermique de la zone de coupe n'est pas facile. Dans la littérature scientifique, comme dans le cas précédent concernant plutôt la coupe métallique, on retrouve plusieurs approches expérimentales, analytiques, ainsi que numériques pour expliquer le rôle d'un revêtement de point de vue thermique.

Grzesik, dans ses travaux a mis en œuvre un thermocouple naturel outil-pièce, conduisant à la valeur de la température moyenne l'interface.

il conclut que la température à l'interface outil-copeau ainsi que le ratio de la chaleur transférée dans l'outil et dans le copeau sont influencés par les propriétés thermiques de la pièce et du revêtement. Pour analyser les tribo-thermo phénomènes à la zone de frottement il utilise la densité de flux chaleur par frottement :

$$q_f = F_f v_c / A_c$$

défini à partir du produit de la force tangentielle F_f et de la vitesse du copeau v_c rapporté à la surface réelle de contact outil-copeau A_c . Dans [40], il indique que plus.

le revêtement a une faible conductivité thermique, plus la température à l'interface est grande et plus la chaleur évacuée par le copeau est importante.

Une autre approche expérimentale, consiste à mesurer le champ de températures à l'aide d'une caméra IR-CCD localisée sur la face latérale du système outil-pièce. Dans son travail il montre que l'usinage avec un outil revêtu de TiN conduit à une réduction de température seulement de 30-35°C.

Il montre également une réduction de la zone de contact outil-copeau, ce qui résulte en diminution de la source de chaleur et de sa diffusion dans l'outil.

Les mesures réalisées pendant des essais de perçage révèlent une baisse significative de température de l'arête pour tous les types de revêtements utilisés comparativement à l'outil non revêtu.

I-2- Définition d'un traitement binaire VN (Nitrure de Vanadium)

I-2-1- Introduction

Le revêtement trouve des applications dans différents domaines (usinage des matériaux durs, électronique, optique, décoration...). Des études récentes ont montré que l'addition d'un deuxième élément au système binaire améliore considérablement leurs propriétés stœchiométriques, structurales, mécaniques et tribologiques.

I-2-2- Revêtements de VN.

Le vanadium a été utilisé ainsi que l'aluminium pour améliorer les propriétés mécaniques et tribologiques des systèmes binaires. Bien que les couches binaires de CrN et VN aient été longuement étudiées, peu de recherches ont été effectuées sur les couches minces binaires de VN.

Comme pour le système CrAlN nous avons étudié les diagrammes d'équilibre de V-N et Cr-V-N afin d'avoir une idée sur les différentes phases pouvant se former dans nos dépôts de CrVN.

Le mélange V-N donne trois phases différentes : V avec une structure cubique centrée (bcc) existant sur un domaine très étroit en pourcentage d'azote (< à 1% at.) et ayant un paramètre

de maille a de 0,30572 nm, V₂N avec une structure hexagonale (hcp) présente sur une plage de 30 à 35% en azote et ayant comme paramètres de maille $a = b = 0,4917$ nm et $c = 0,4568$ nm, et enfin VN avec une structure cubique à faces centrées (fcc) qui peut être obtenue pour un taux d'azote entre 45 et 50% et ayant un paramètre de maille a de 0,41347 nm.

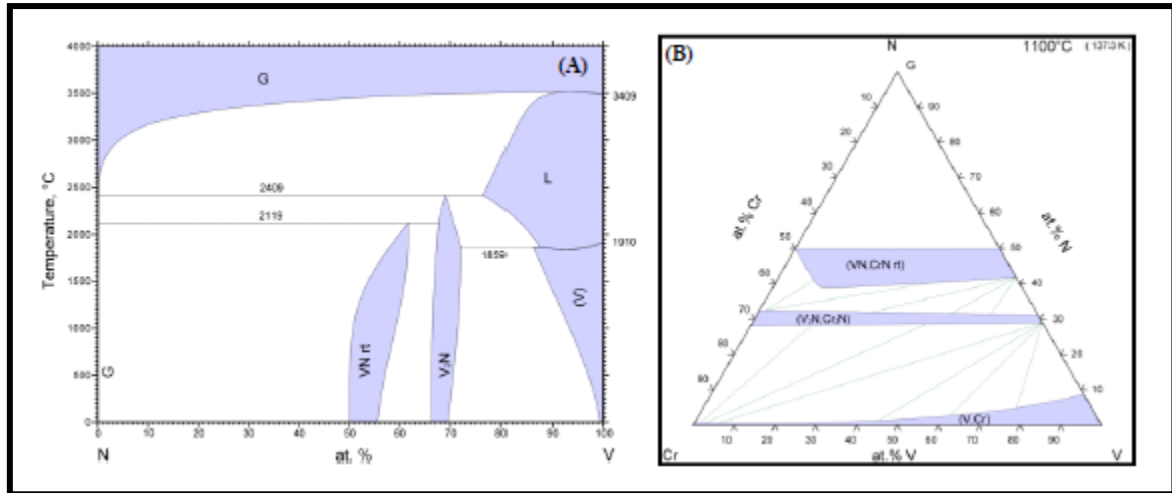


Figure I.18. Diagramme d'équilibre de VN (A) et CrVN (B).[6]

Le diagramme d'équilibre de Cr-V-N montre la présence de trois phases différentes : VCr avec une structure cubique centrée (bcc) et un paramètre de maille a de 0,29435 nm et des mélanges biphasés : soit constitués de V₂N et Cr₂N formant une structure hexagonale (hcp) et ayant comme paramètres de maille $a = b = 0,4752$ nm et $c = 0,4429$ nm, soit constitués de VN et CrN formant une structure cubique à faces centrées (fcc) et ayant un paramètre de maille a de 0,414 nm. Les études ont montré que les couches de VN présentent une dureté de l'ordre de 24 GPa inférieure à celle des couches de TiN (36 GPa). Dans une comparaison entre le VN et le TiN menée par Wiklund et al. [116], il a été constaté que les films de VN présentaient une dureté de 11 GPa et une charge critique de 40 N, inférieures à celles de TiN (20 GPa et 70 N respectivement). Cependant leur coefficient de frottement contre des billes (d'acier, de Cr et de Ni) est plus faible que celui de TiN.

Le vanadium a pour rôle de réduire le coefficient de frottement en formant des oxydes de vanadium V₂O₅ lors des essais de frottement contre des billes en acier. Ouyang et Sasaki ont étudié les propriétés tribologiques de couches de TiVN où il a été constaté que leur coefficient de frottement sous lubrification est de l'ordre de 0,2 et varie entre 0,57 et 1,24 sans lubrification. De plus, l'usure des revêtements se fait, d'une manière générale, par oxydation et pour toutes les conditions d'essais, le TiVN présente une usure plus faible que celle de la bille en acier. Ouyang et Sasaki ont obtenu des valeurs de coefficient de frottement des

couches de TiVN contre une bille en alumine variant entre 0,68 et 1,08 à température ambiante. De plus, l'usure de la couche est supérieure à celle de la bille pour les différentes conditions de tribométrie. Selon Ouyang et Sasaki des oxydes de V, de Ti et d'Al ont été trouvés sur les débris analysés ce qui indique que l'usure des revêtements de TiVN contre une bille en alumine se fait par tribo-oxydation.

L'effet du pourcentage de vanadium sur les propriétés mécaniques de TiVN a été étudié par Latella et al. qui ont montré que la dureté et le module d'Young augmentent en fonction du pourcentage de V. La dureté et le Module d'Young de TiN sont de 20 et 395 GPa respectivement, ils augmentent en ajoutant du V jusqu'à 32 et 410 GPa à 13 et 23% de V, puis diminuent pour atteindre 15 et 361 GPa à 78% de V.

Le VN présente une dureté de 5,6 GPa et un module d'Young de 307 GPa. L'augmentation de la dureté des couches est expliquée par les dislocations induites par la substitution des atomes de V par des atomes de Ti.

Le vanadium est également ajouté pour améliorer les propriétés mécaniques et tribologiques du CrN. Weng et al. ont réalisé des couches de CrVN par implantation ionique de V+2 dans le système CrN. Ils ont alors constaté que la dureté des films de CrVN atteignait une valeur de 41 GPa tandis que celle de CrN est de l'ordre de 30 GPa. De plus, le coefficient de frottement a diminué de 0,7 à 0,5, les contraintes résiduelles étaient de l'ordre de -2,45 GPa et la résistance à l'usure a augmenté de 10 fois par rapport à celle de CrN lors de tests de frottement. Ces performances ont été expliquées par la formation de solutions solides dans le système CrVN.

I-2-3- Caractéristiques du Vanadium



I-2-3-1- Découverte

La découverte du vanadium s'est produite "deux fois".

La découverte du vanadium a été réclamée d'abord par Andres Manuel del Rio (un minéralogiste espagnol) à Mexico en 1801.

Il a préparé un certain nombre de sels de vanadium à partir d'un composé contenu en "fil brun" (maintenant appelé la vanadinite, d'une mine près de Hidalgo au Mexique nordique). Il a trouvé des couleurs réminiscentes de ceux montrés par le chrome, ainsi il a appelé cet élément le panchromium ("quelque chose qui peut prendre ou a n'importe quelle couleur").

Il l'a plus tard retiré l'erythronium ("rouge") après avoir noté que la plupart de ces sels tournaient au rouge avec le chauffage.

Cette découverte fût contestée par un Français, Collett-Desotils.

En 1831, Nils Gabriel Sefström (un chimiste suédois) travaillait avec quelques minerais de fer et a isolé un nouvel oxyde contenant le vanadium.

Ces travaux ont permis d'obtenir de nombreux composés aux couleurs variées d'où le nom en l'honneur de la déesse des tribus Nordique-Germaniques Vanadis (Vanadis, déesse de la beauté et à la fertilité).

La même année, Friedrich Wöhler est entré à la possession du fil "brun" de del Rio et a confirmé la découverte de del Rio du vanadium.

Néanmoins le nom de vanadium a été retenu plutôt que la suggestion de del Rio, l'erythronium.

Le vanadium métallique n'a pas été réalisé qu'en 1867 où Henry Enfield Roscoe a réduit le chlorure de vanadium (VCl_3) avec le gaz hydrogène.

I-2-3-2- Origine

Le vanadium n'est pas trouvé comme métal libre naturellement. On le trouve cependant dans beaucoup de minerais, desquels les plus importants sont la Carnotite [$K(UO_2)(VO_4) \cdot 1.5H_2O$], la Roscoelite [un mica : (de Mg $2K_2O \cdot 2Al_2O_3$, $4H_2O$ $10SiO_2$ de Fe) $O_3V_2O_5$], la vanadinite [$Pb_3(VO_4)_2PbCl_2$], la mottramite [$(Pb, Cu)_3(VO_4)_2$], et la patronite. Elle est également présente dans quelques pétroles bruts.

Le vanadium a été identifié dans les éventails du soleil et d'autres étoiles.

Le vanadium est un métal rencontré dans le monde entier, et qui constitue 0,015% de l'écorce terrestre.

Les principaux gisements naturels se trouvent en Afrique du Sud (42,2%), en Russie (39,2%) et en Chine (12,7%). La concentration géogène dans l'eau varie, selon les sites, entre 0,2 et 100 $\mu g/l$ pour l'eau douce et entre 0,2 et 29 $\mu g/l$ pour l'eau de mer. Le fond des océans

Structure de coquille: 2.8.11.2

Symbole de limite: 4F3/2

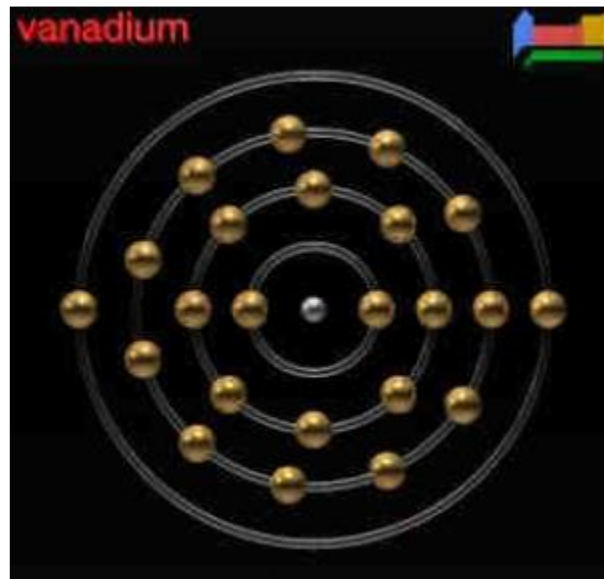
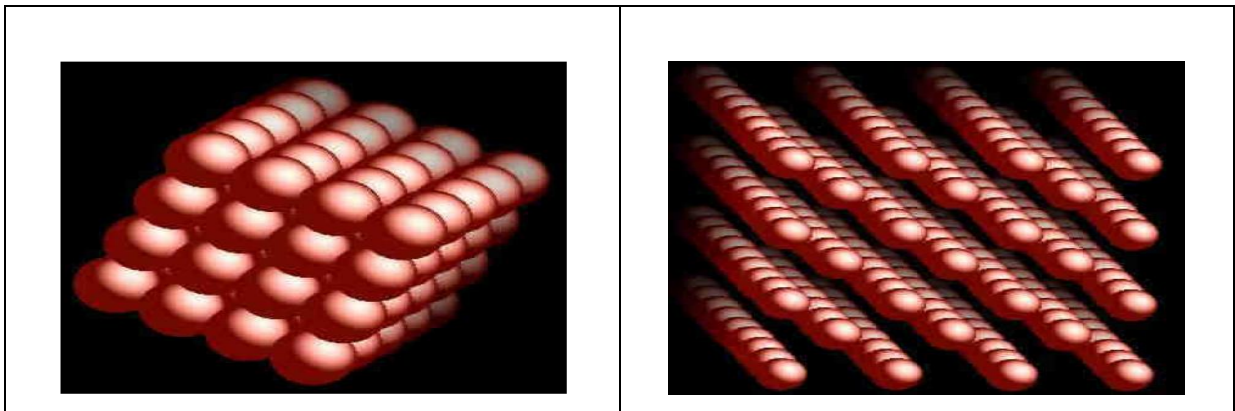


Figure I.19. Représentation schématique de la structure de coquille du vanadium.[7]

Structure cristalline : le vanadium cristallisé dans le système cubine centré.

Structure en cristal : semi conducteur.



- **Préparation du vanadium**

Le premier minéral connu contenant la vanadium fût la vanadinite $[\text{Pb}_3(\text{VO}_4)_2]_3\text{PbCl}_2$, isomorphe des apatites.

Le minéral est la patronite, sulfure de vanadium contenant du fer et du nickel (VS_4)

L'extraction du vanadium :

1°) enrichissement du minéral par méthode physique

2°) grillage du sulfure

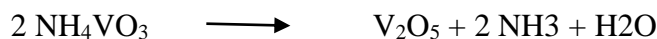
3°) fusion alcaline oxydante dans un four à réverbère : le vanadium passe à l'état de vanadate,

le fer à l'état de ferrite alcalin, l'oxyde NiO reste inaltéré, le vanadate se sépare par densité du fer et du nickel.

4°) après broyage, la scorie contenant le vanadium est lavée rationnellement : elle fournit une solution de NaVO_3 qu'on sépare des insolubles (fer, nickel, ...)

5°) la solution de métavanadate est traitée par l'ammoniaque qui précipite NH_4VO_3 peu soluble : les autres métaux qui ont suivi le vanadium restent en solution

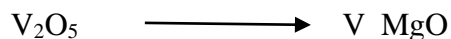
6°) après plusieurs précipitations à l'état de NH_4VO_3 si c'est nécessaire, le vanadate est calciné :



7°) l'oxyde V_2O_5 traité par aluminothermie fournit le vanadium brut à 98 %

Un vanadium plus pur est obtenu à partir de V_2O_5 par réduction par Ca ou CaH_2 .

Lors du traitement des minerais, l'industrie a le plus souvent en vue la préparation d'un ferro-alliage qui servira d'addition pour la fabrication des aciers au vanadium. Dans ce cas, la scorie obtenue par fusion est pulvérisée, mélangée à de l'oxyde de fer et soumise à l'aluminothermie.



Le vanadium brut peut être raffiné par réduction de VCl_3 pur par l'hydrogène. Le trichlorure obtenu à partir de V_2O_5 ou du vanadium aluminothermique est distillé avant réduction.

- **Propriétés physiques**

Le vanadium pur est un métal argenté grisâtre, et est mou et malléable. Il possède quand il est pur d'excellente caractéristique mécanique et peut se travailler à froid et à chaud. Mais de petites quantités d'impuretés, de l'hydrogène, de l'azote, de l'oxygène le rendent dur et cassant.

État standard: solide à 298 K

Couleur: métallique gris argenté

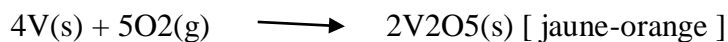
Classification: Métallique

Disponibilité : le vanadium est disponible sous plusieurs formes comprenant le clinquant, les granules, la poudre, la tige, et les turnings.

- **Propriétés chimiques**

Réaction du vanadium avec de l'air

A la température ambiante, le vanadium ne s'oxyde pratiquement pas à l'air. Le métal de vanadium réagit avec l'oxygène excessif, O₂, lors du chauffage à 660 ° C. Une fois préparé de cette façon, V₂O₅ est contaminé parfois par d'autres oxydes de vanadium.



Réaction du vanadium avec de l'eau

La surface du métal de vanadium est protégée par une couche d'oxyde et ne réagit pas avec de l'eau dans des conditions normales.

Réaction du vanadium avec des halogènes

Le vanadium réagit avec du fluor, F₂ lors du chauffage.



Par élévation de température, il entre en réaction avec le chlore, en formant VCl₄, avec l'ammoniac en formant VN et avec les bases fondues.

Réaction du vanadium avec des acides / Réaction du vanadium avec des bases

Il résiste bien aux acides non oxydants, mais est fortement attaqué par l'acide nitrique ou l'eau régale. Il fixe facilement l'hydrogène.

- **Dérivés des états d'oxydation +2, +3, +4, +5**

Hormis l'état +5, degré d'oxydation le plus stable, le vanadium présente des électrons célibataires : ces

composés seront colorés paramagnétiques. Des complexes se forment facilement.

A. 6. 1. Composés Binaires

Hydrures

VH: hydrure du vanadium

V₂H: hydrure de vanadium

Fluorures

VF₂: fluorure du vanadium

VF₃: fluorure du vanadium

VF₄: fluorure du vanadium

VF₅: fluorure du vanadium

Chlorures

VCl₂: chlorure du vanadium

VCl₃: chlorure du vanadium

VCl₄: chlorure du vanadium

Bromures

VBr₂: bromure du vanadium

VBr₃: bromure du vanadium

VBr₄: bromure du vanadium

Iodures

VI₂: iodure du vanadium

VI₃: iodure du vanadium

VI₄: iodure du vanadium

Oxydes

VO: oxyde du vanadium

VO₂: oxyde du vanadium

V₂O₃: oxyde du vanadium

V₂O₅: oxyde du vanadium

V₃O₅: oxyde de vanadium

Sulfures

V₂S₃: sulfure du vanadium

Selenides

VSE₂: sélénure du vanadium

Tellurures

VTe₂: tellure du vanadium

Nitrides

Navigation verticale: nitrure du vanadium

I-2-4- Applications Industrielles

- **Détail des utilisations**

La plus grande partie du vanadium produit dans le monde l'est sous forme de pentoxyde (V₂O₅) qui sert à la **fabrication d'alliages** :

- ✓ Ferro vanadium contenant de 30% à 95% de vanadium,
- ✓ aciers spéciaux au carbure de vanadium,
- ✓ alliages durs avec le chrome, le nickel, le manganèse, le bore, le titane, le tungstène, etc.

Environ 80% du vanadium maintenant produit est employé comme ferro-vanadium ou comme additif en acier.

Les composés minéraux sont employés comme **catalyseurs à chaud** :

- ✓ dans la pétrochimie.
- ✓ pour la production de l'acide sulfurique.
- ✓ pour la production de l'anhydride phtalique.
- ✓ dans l'oxydation de l'éthanol.

Ils entrent aussi dans la composition de pigments utilisés :

- ✓ en teinturerie.
- ✓ en verrerie.
- ✓ en céramique.

Ils sont de plus utilisés :

- ✓ comme agents de mordantage.
- ✓ comme révélateurs photographiques,
- ✓ dans la fabrication d'encre et de substances luminescentes.

Un mélange de vanadium-gallium est employé en produisant les aimants supraconducteurs.

Ses propriétés de résistance de la structure et de coupe de neutron le rendent utile dans des applications nucléaires.

CHAPITRE II

Les types des outils de coup

II- Introduction:

Les aciers à outils font partie intégrante du domaine des aciers spéciaux, mais ils diffèrent sensiblement des aciers de construction mécanique, tant par les conditions de leur utilisation que par les critères d'emploi qui servent à les définir. En effet, dans le cas d'un outil de qualité, on recherche le maximum de durée, sans fixer de limite supérieure, alors que l'acier de construction mécanique doit présenter une aptitude suffisante à l'emploi avec des caractéristiques spécifiques bien déterminées comme la tenue à la fatigue, la résistance à la rupture brutale, l'aptitude à subir un cycle thermomécanique au cours de la mise en œuvre et l'usinabilité.

Les aciers non alliés contiennent que du fer et du carbone, les autres éléments y étant présents en teneur résiduelles variables selon les matières premières et le mode d'élaboration utilisés.

À teneur en carbone égales, ces aciers acquièrent à la trempe des duretés aussi élevées que celles des aciers alliés. Ils diffèrent cependant de ces derniers, par une trempabilité plus faible, ce qui limite leur emploi à des pièces de sections relativement étroites.

En contrepartie, les aciers au carbone sont plus faciles à recuire ; ils sont moins durs à l'état recuit et présentent de ce fait, une usinabilité et une aptitude de formage à froid bien meilleure.

L'acier XC38 est un acier au carbone semi-doux ($C = 0.38 \pm 0.03\%$) utilisé pour la fabrication de pièces diverses nécessitant une bonne résistance mécanique. Sa teneur en carbone est garantie permettant ainsi d'obtenir des caractéristiques mécaniques précises. Il peut subir des traitements thermiques de trempe et revenu améliorant encore les propriétés mécaniques.

II .1. Type (classification) des outils coupants :

- ❖ Outils de fraisage fraises :
- ❖ Outils de perçage
- ❖ Outils de tournage

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser aux outils de tournage

II. 2. Type des outils de tournage

II.2.1. Outils pour l'usinage extérieur :

Nous avons deux sortes :

- à droite :

C'est-à-dire qu'ils servent à travailler de la droite vers la gauche (de la contre pointe ou poupée mobile vers le mandrin) désignation ISO R.

- à gauche :

c'est-à-dire qu'ils servent à travailler de la gauche vers la droite (du mandrin vers la poupée mobile) désignation ISO L.

Relativement facile à affûter, et très économique.

Résiste aux chocs (ne pas exagérer tout de même).

Pour l'usinage des matières plastique n'utiliser que ce type d'outils.

Une seule direction de travail possible pour la réalisation de cylindres ou de cônes extérieurs.

Si la pièce comporte un épaulement on obtient une surface en travail d'enveloppe et une surface en travail de forme.

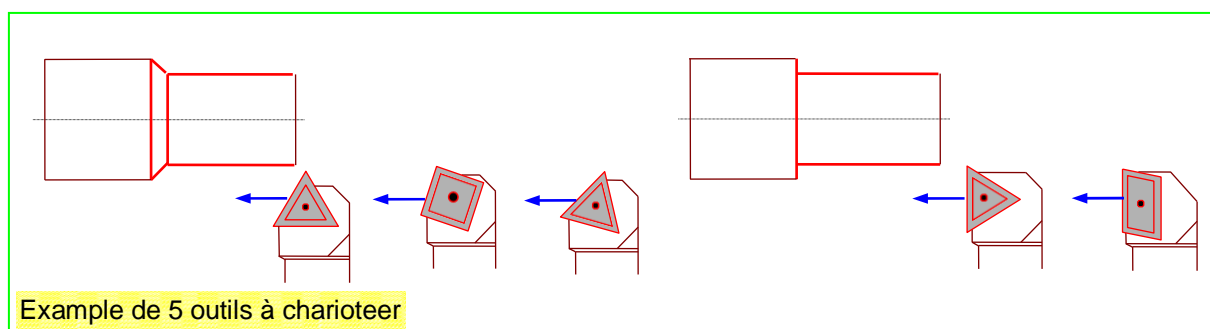


Figure. II -1 : 5 outil à charioteer.[8]

II.2.1. 1. Outil à charioteer coudé

C'est l'outil le plus couramment utilisé, est utilisé pour l'ébauche comme la finition. Dans les opérations de cylindrage, de dressage et l'alésage de grand Ø. Son inclinaison permet le bon déroulement du copeau.

Le fait de le détalonner comme indiqué sur le dessin, cela permet la réalisation de chanfreins ou ébavurages, à l'entrée des alésages, sans avoir besoin d'utiliser un autre outil.

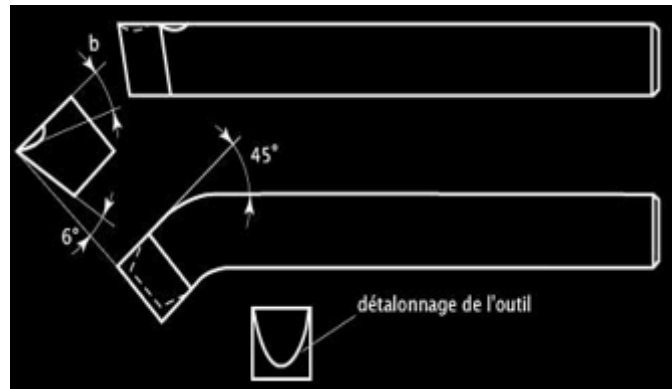


Figure. II -2 : Outil à charioter coudé.[9]

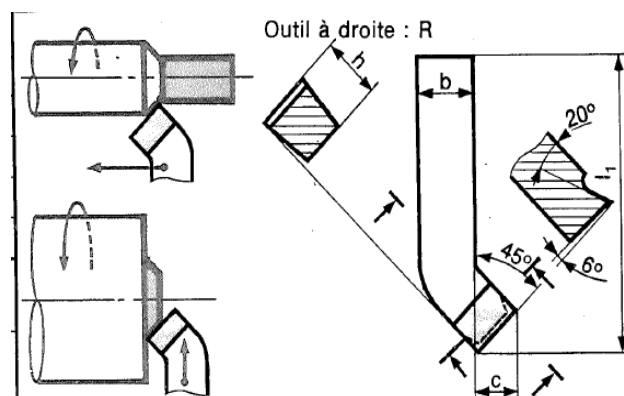


Figure. II -3 : Outil charioté à couteau.[10]

II.2.1.2..Outil à charioter droit

À l'outil précédemment cité, il peut facilement être réalisé dans un barreau en acier rapide charioté droit

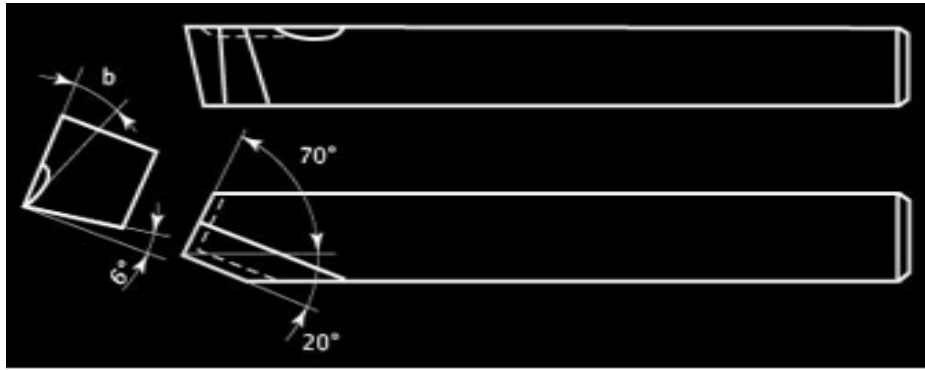


Figure. II -4 Outil à charioter droit.[11]

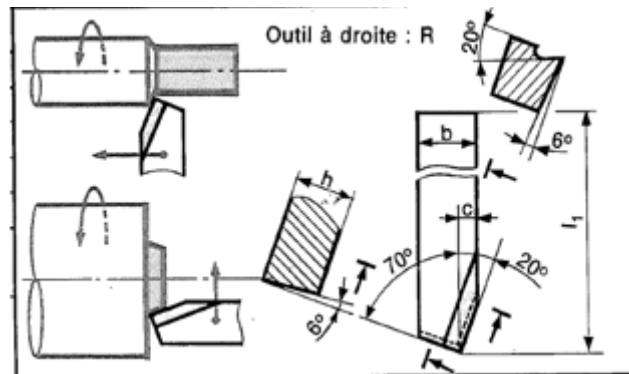


Figure. II -5 : Outil à charioter droit.[12]

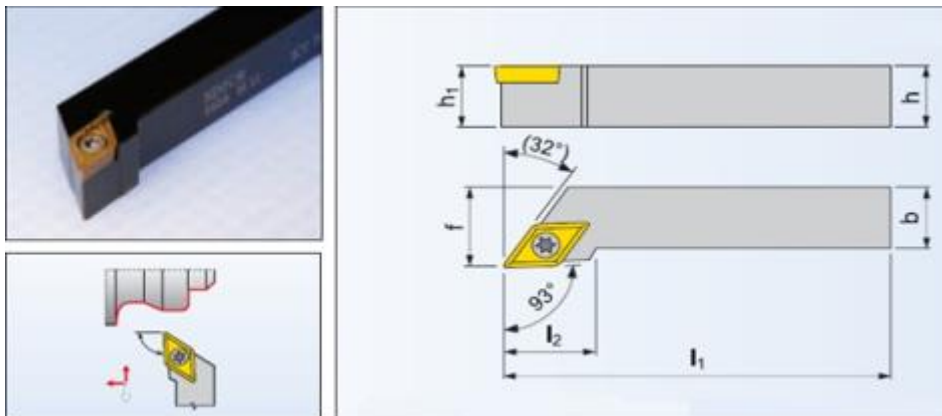


Figure. II -6 : Outil à charioter droit.[13]

II.2.1.3 Outil charioté à couteau

Utilisé pour le dressage des faces, pour la réalisation d'épaulement et de décolletage.

Il permet la réalisation de passe importante avec une faible avance.

Avec une petite largeur de cuillère (gorge d'enroulement du copeau) et une avance adaptée, il est possible d'obtenir un brise copeau, et donc avoir un copeau qui se casse en venant buter soit contre la face de la pièce au fur et à mesure que celui-ci avance (grande avance auto), ou bien qu'il vienne se casser contre l'outil. Cela pour éviter de faire des copeaux longs et dangereux. Pour obtenir cela il faut diminuer la vitesse de rotation et augmenter l'avance. C'est aussi valable pour tous les outils, externe et inter, mis à part les outils à fileter et à tronçonner entre autres.

Cela est important pour l'usinage de l'inox, car les guirlandes de cette matière sont très dangereuses, et elles coupent très bien la chair par exemple.

Car il faut penser au copeau lors de l'usinage, mais aussi lors du nettoyage du bac à copeaux.

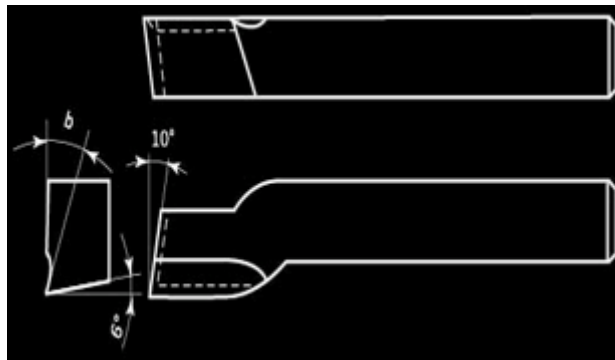


Figure. II -7 : Outil charioté à couteau.[13]

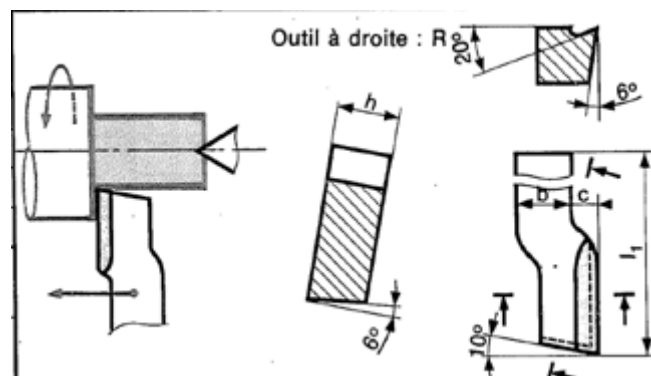


Figure. II -8 : Outil charioté à couteau.[13]

II.2.1.4. Outil à dresser d'angle

Utilisé pour l'usinage de petite surface, mais aussi pour l'ébauche d'épaulement.

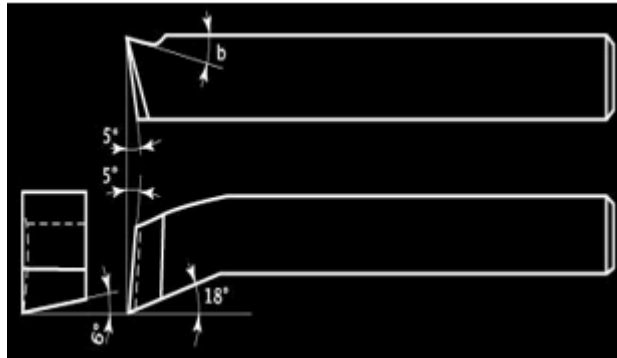


Figure. II -9 : Outil à dresser d'angle.[14]



Figure. II -10 : Outil à dresser d'angle.[14]

II.2.1.5 Outil à saigner droit

Relativement fragile du fait de faible section, à utiliser avec délicatesse, car nous pouvons être confrontés à un broutement provoqué par le soulèvement de la pièce, si l'avance manuelle de l'outil est trop importante. C'est pour cela qu'il ne doit jamais être utilisé avec une avance automatique.

Si possible à utiliser à l'envers, car le copeau aurait tendance à rester au-dessus de l'outil et donc dans la gorge réalisée, là c'est le bourrage.

Pour éviter cela il est bon de réaliser un léger rayon incliné en bout (tout comme pour l'outil à tronçonner), le copeau ainsi réalisé est plus large que la gorge et donc cela l'oblige à s'évacuer plus facilement.

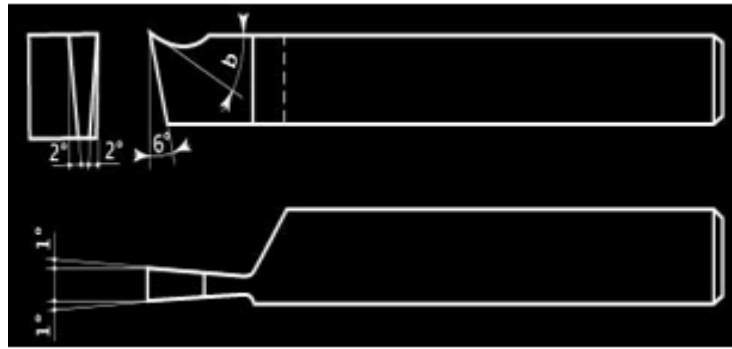


Figure. II -11 : Outil à saigner droit.[15]



Figure. II -12 : Outil à saigner.[15]

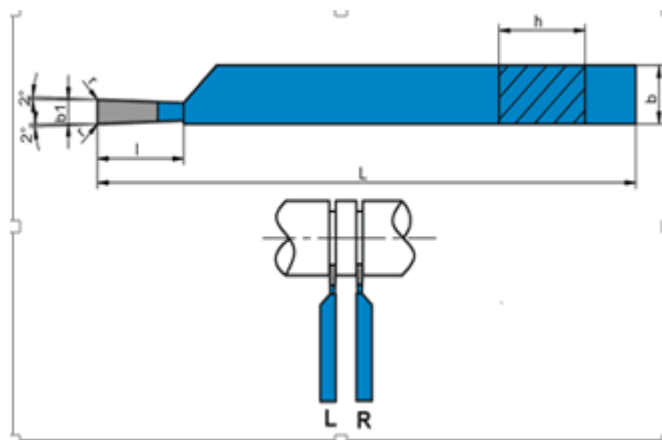


Figure. 13: Outil à saigner droit et gauche.[15]

II.2.1.6 Outil à tronçonner :

La conception de cet outil permet le saignage et le tronçonnage dans de meilleures conditions que l'outil précédemment cité.

La pièce tournant à l'envers tend à plaquer la broche sur ses coussinets inférieurs plus rigides et donc supprime tout broutement. De plus sa forme incurvée lui donne une élasticité qui permet un travail dans de meilleures conditions.

Il est tout de même recommandé comme l'outil précédent, de réaliser un léger arrondi en bout, qui peut être incliné comme indiqué sur le dessin, pour permettre l'évacuation du copeau. Ne pas hésiter à arrêter de faire avancer l'outil régulièrement afin de casser le copeau, en effet lors de cette opération, il est facile de réaliser de belle guirlande, mais cela est TRES DANGEREUX. Le copeau peu s'enrouler autour du mandrin, et donc en même temps embarquer tout ce qui se trouve à proximité

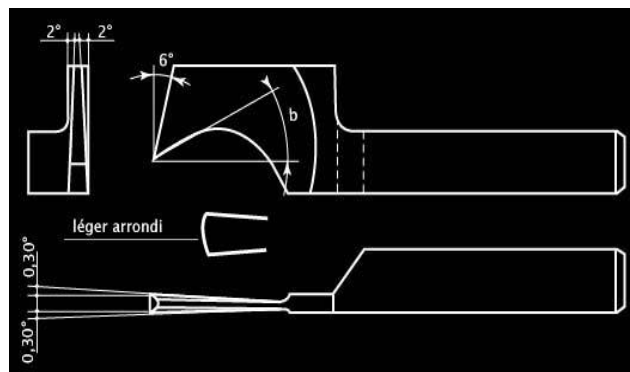


Figure. II -14 : Outil à tronçonner.[8]

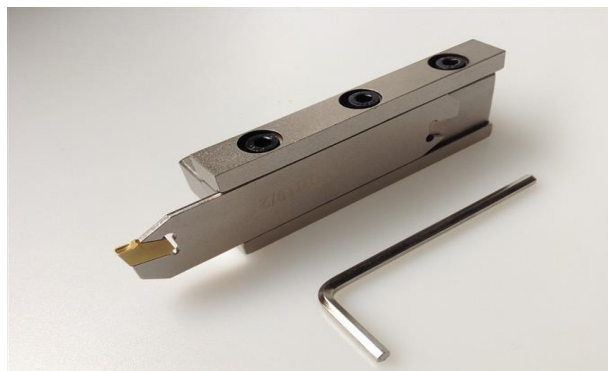


Figure. II -15 : Outil à tronçonner.[8]



Figure. II -16 : Outil à tronçonner.[8]

II.2.1.7 Outil à gorge

De même conception que l'outil à saigner, il permet des saignées moins profondes, mais plus larges, il est donc plus trapu et sa partie active plus courte.

Il est bon de faire un chanfrein de détalonnage sur l'angle supérieur arrière de l'outil, en effet après un certain nombre d'affûtage, la partie coupante est plus basse et donc moins large que la partie arrière de l'outil, cela est à réaliser aussi sur l'outil à saigner.

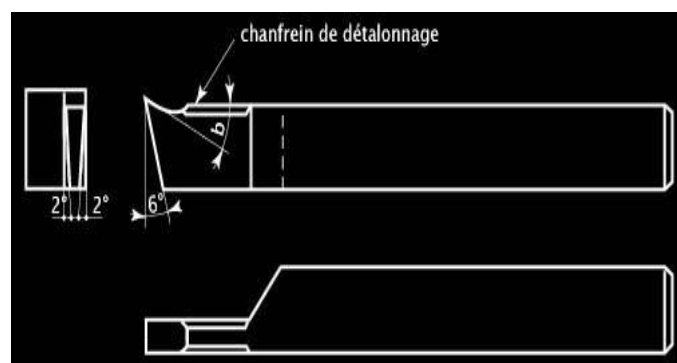


Figure. II -17 : Outil à gorge.[9]



Figure. II -18 : Outil à gorge.[12]



Figure. II -19 : les défirent outils à gorge.[13]

II.2.1.8 Outil à fileter extérieur :

Cet outil peut être réalisé dans un barreau en acier rapide, il est utilisé pour la réalisation de filetage extérieur. Son angle de 60° pour les filetages métriques, doit être de 55° pour les filetages Whitworth.

L'usinage d'un filetage est une opération délicate, mais avec un peu d'attention se réalise facilement.

Le travail doit se faire sur un seul flanc à la fois, nous avons donc plusieurs possibilités pour cela.

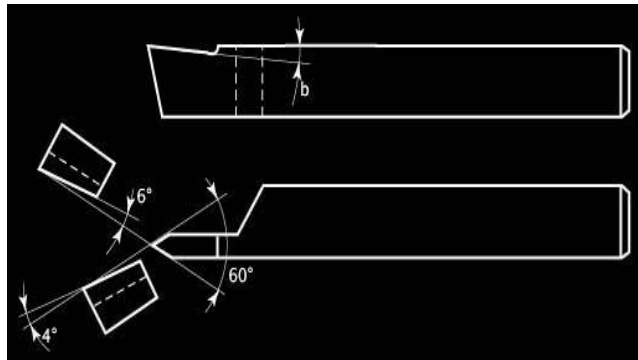


Figure. II -20 : Outil à fileter extérieur.[14]



Figure. II -21: Outil à fileter.[14]

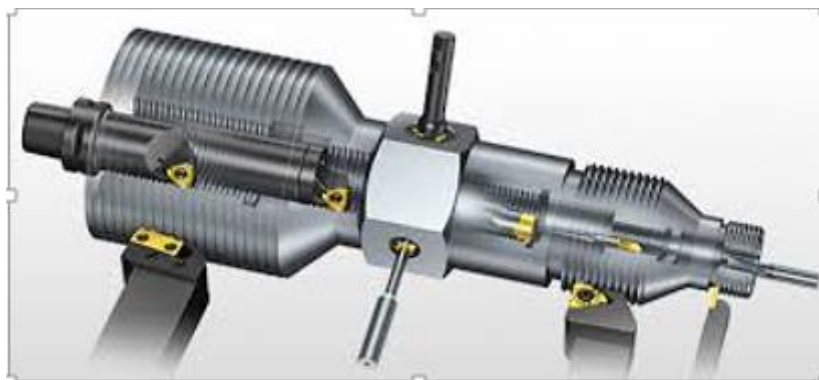


Figure. II -22 : les différent outils de filetage extérieur et enterreur.[16]

II.2.1.9 Outil pelle

Permet la réalisation en ébauche de gorge importante. Généralement utilisé pour le défonçage, perpendiculairement à l'axe de la pièce.

Utilisé de préférence à l'envers, il peut servir pour des opérations de carottage (gorge circulaire sur la face de pièce, mais aussi pour la découpe d'une rondelle ou bague qui nécessiterait d'enlever beaucoup de métal pour la réalisation de l'alésage, par exemple, une rondelle de D 150mm, d 130 mm épaisseur 20mm.

Dans ce dernier exemple, il est nécessaire de bien détalonner la partie inférieure de l'outil pour qu'il ne vienne pas toucher le \emptyset de la pièce.

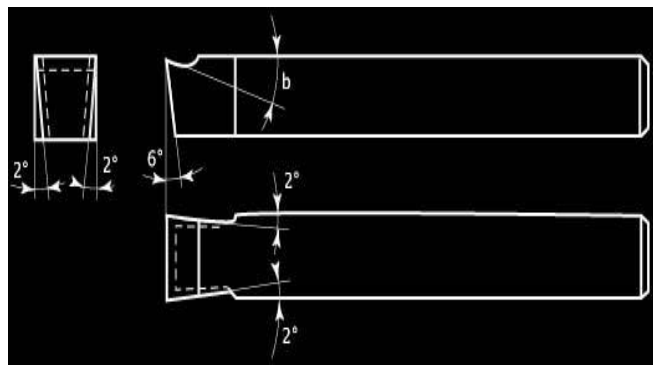


Figure. II -23 : Outil pelle.[17]



Figure. II -24 : Outil pelle.[17]

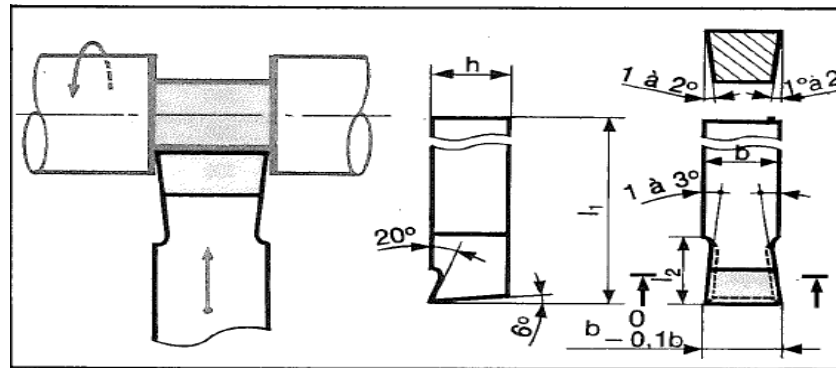


Figure. II -25 : Outil pelle.[17]

II.2.1.10 Outil à moleter :

Il sert à apposer une surface striée servant le plus souvent à une meilleure prise d'une surface (exemple : poignées). Le moletage est de moins en moins utilisé en raison des normes actuelles. L'outil à moleter classique ne travaille pas par enlèvement de matière, mais par refoulement. Les molettes sont des disques en acier rapide, montées sur un axe. Suivent le type de stries, leur pas et leurs inclinaisons peuvent varier. Il existe également des outils à moleter par enlèvement de copeaux

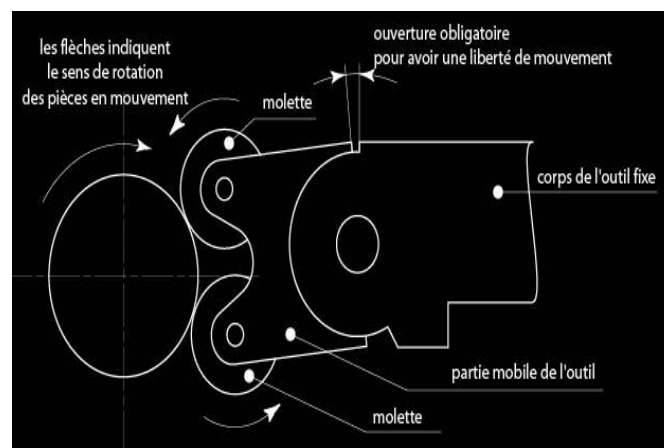


Figure. II -26 : Outil à moleter .[18]



Figure. II -27 : Outil à moleter.[19]

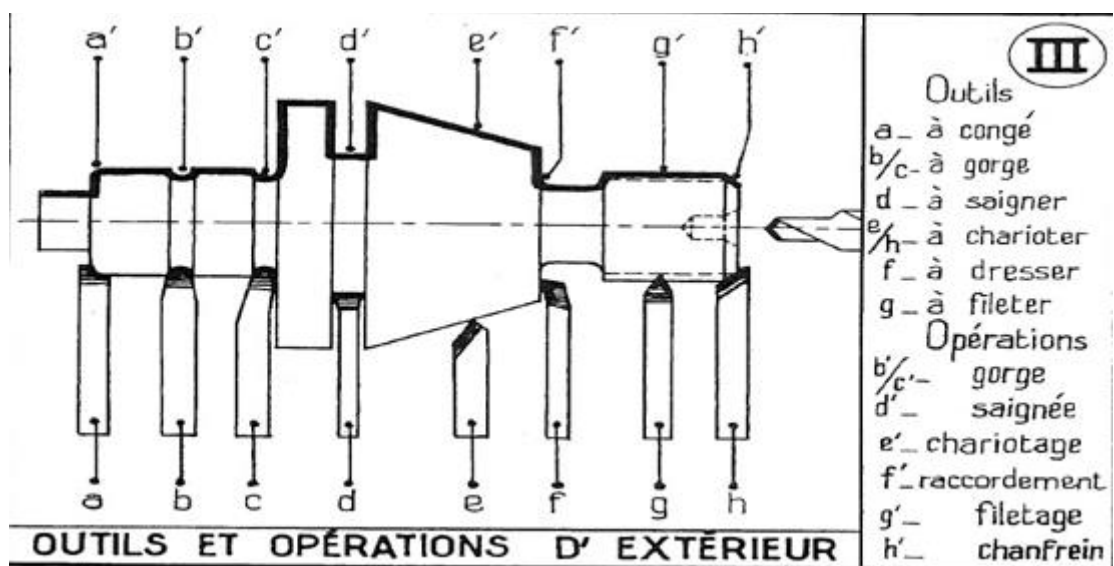


Figure. II -28 : les outils et opération de tournage extérieur.[20]

II.2.2 Les Outils pour l'usinage interne:

Pour l'utilisation de ces outils, il est recommandé de prendre toujours un outil le plus gros possible et que la partie hors de la tourelle soit la plus petite possible, cela pour éviter tout problème de broutage, vibration...

Ils se placent dans un porte-outil avec une embase en vé pour un meilleur maintien, toujours mettre une cale entre l'outil et la vis de serrage pour éviter le marquage du corps de l'outil.

Ce dernier point est valable aussi pour les outils exter.

II.2.2.1 outil à aléser

Utilisé pour l'ébauche et la finition des alésages simples. Plus robuste que l'outil à aléser dresser.

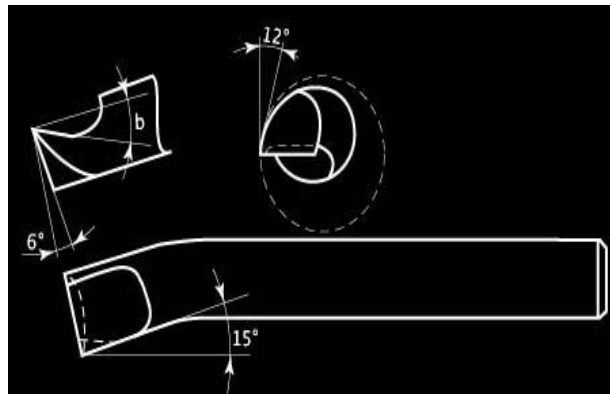


Figure. II -29 : Outil à aléser .[21]

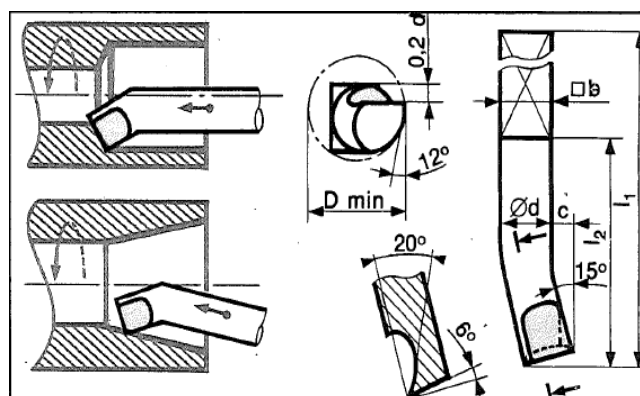


Figure. II -30: Outil à aléser.[21]

II.2.2.2 - Outil à aléser dressé :

Surtout utilisé pour la finition, mais aussi pour la réalisation d'épaulement inter, ou dressage de la face d'un trou borgne par exemple.

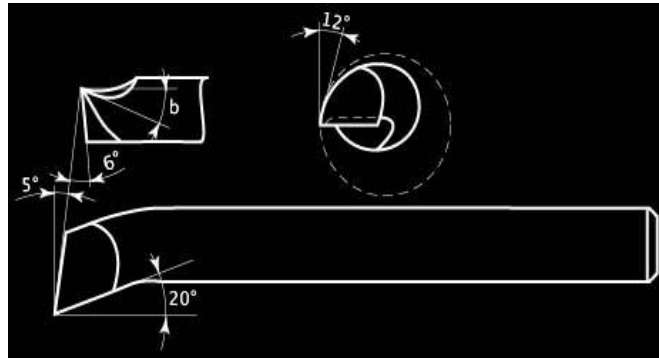


Figure. II -31: Outil à aléser dressé.[22]

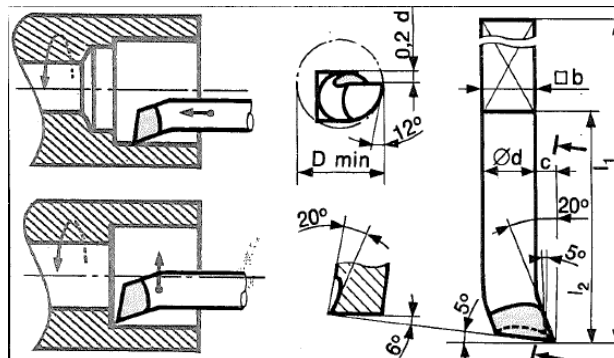


Figure. II -32 : Outil à aléser dresser.[22]

II.2. 2.3 - Outil à Chambrer

Utilisé pour l'usinage de gorges, de chambrage (évidemment inter pour diminuer la portée d'un alésage par exemple, une réserve de graisse...) de gorge de dégagement de filetage. Ne pas hésiter à lui faire un rayon dans chaque angle pour éviter de faire un angle vif (amorce de cassure) dans la pièce à usiner.

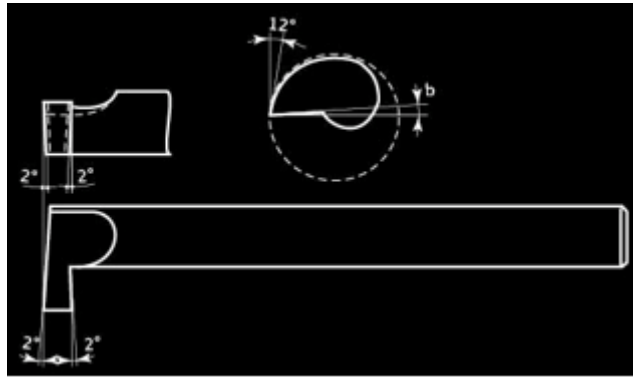


Figure. II -33: Outil à Chambrer.[23]

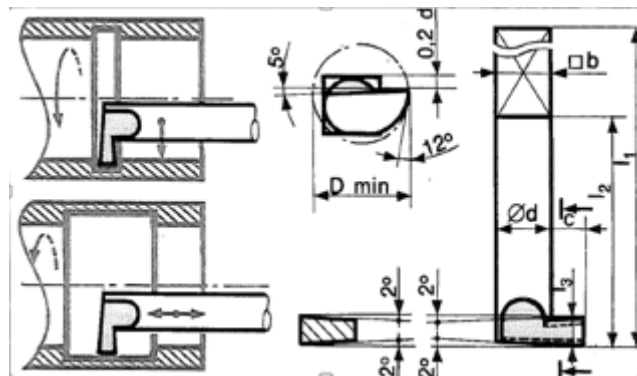


Figure. II -34: Outil à Chambrer.[24]



Figure. II -35: Outil à Chambrer.[25]

II.2.2.4 - Outil à fileter inter

Même utilisation que pour l'extérieur sauf qu'il n'est pas possible de le réaliser par pénétration oblique, son dégagement est facilité lorsqu'une gorge est réalisée dans les mêmes conditions que pour les filetages externes.

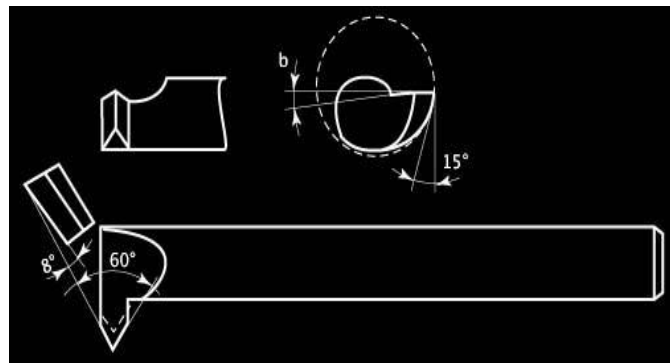


Figure. II -36 : Outil à fileter inter.[26]

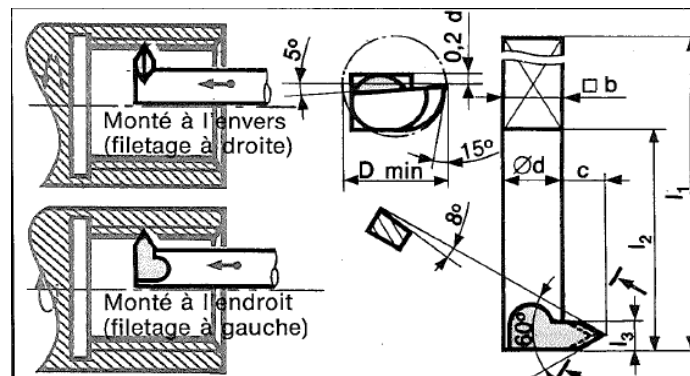


Figure. II -37: Outil à fileter inter.[26]



Figure. II -38 : Outil à fileter inter.[26]

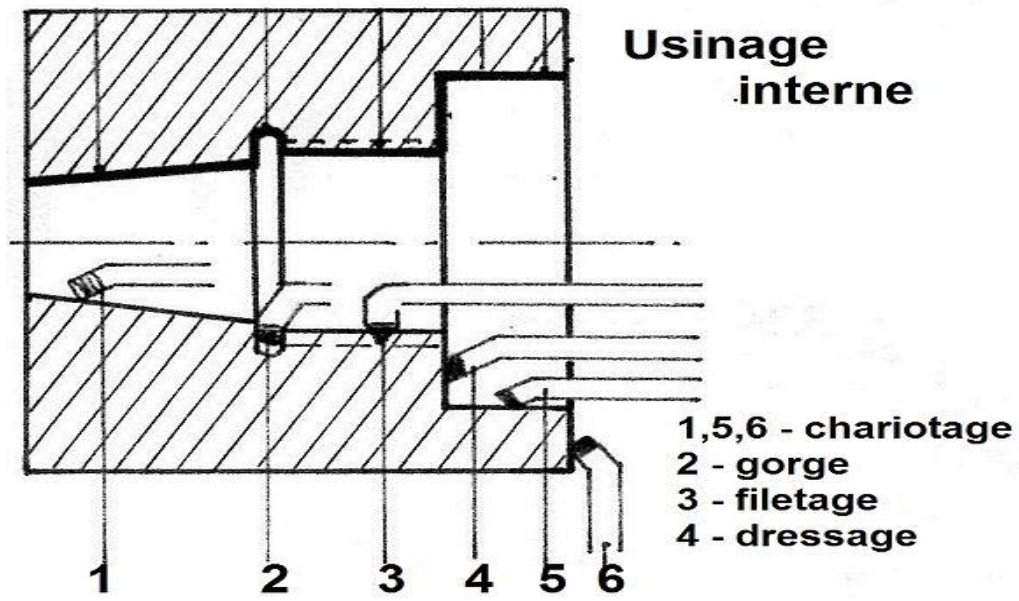


Figure. II -39 : les outils et opération de tournage intérieur.[26]

CHAPITRE III

LES MATERIAUX DES OUTILS
DE COUPE

III. Matériaux des outils :

III.1.Introduction:

- Les aciers à coupe rapide , appelés couramment aciers rapides présentent en commun la propriété de pouvoir acquérir après trempes une dureté élevée et de la conserver aux hautes températures , de l'ordre de 600 à 650° C à un degré supérieur à celui des autres aciers, utilisé d'abord exclusivement pour la coupe des métaux, les aciers rapides ont depuis trouvé de nombreuses applications dans le domaine de la mise en forme des métaux sans production de copeaux
- Les caractéristique requises pour la mise en forme avec ou sans enlèvement de copeaux sont essentiellement la dureté (à froid et surtout à chaud) la résistance à l'usure et la ténacité, ces caractéristiques ont été obtenues au moyen d'additions importantes d'éléments tels que le chrome et le cobalt donnant, l'un la trempabilité l'autre la dureté à chaud, l'augmentation de la teneur en vanadium de ces aciers ainsi que l'augmentation correspondante de la teneur en carbone ont conduit à la mise au point de nuances d'aciers rapides dites sur carburées, dont la résistance à l'usure et la dureté à chaud sont nettement supérieures à celles des aciers rapides classiques.
- L'appellation acier rapide (AR), ou ARS pour « acier rapide supérieur », désigne les aciers outils ayant la capacité de conserver leur trempe à haute température. Ils sont notamment employés pour la découpe à haute vitesse (foret...), d'où le terme « rapide », que l'on retrouve dans la désignation en anglais : *high speed steel*, abrégé HSS.
- Les aciers rapides sont généralement utilisés pour leurs propriétés de dureté élevées (> 60 HRC) et leur niveau de résilience acceptable (propriété de résistance au choc). Ils présentent en général une forte résistance à l'usure du fait de leur fort alliage et de la présence significative d'éléments producteurs de carbures durs tels que le tungstène et le vanadium.

III.2. Classification des aciers

III. 2.1. Aciers de construction

Dans les groupes des aciers de construction, on trouve les aciers au carbone et les aciers alliés, destinés à la fabrication des éléments de machines, utilisés dans la construction des ouvrages d'art et des édifices. La teneur en carbone dans ce groupe d'aciers ne dépassent pas 0,5 à 0,6 %.

Un acier de construction doit posséder en plus des bonnes propriétés mécaniques, de bonnes propriétés technologiques telles que se prêter bien au formage (laminage; forgeage, emboutissage, etc.), à l'usinage, au soudage, avoir une pénétration de trempe élevée et une faible aptitude aux déformations et aux tapures de trempe.

Il existe des centaines de nuances d'aciers de construction. Les aciers de construction sont élaborés dans des fours martin (acides et basiques), dans des fours électriques ouverts et dans des convertisseurs à soufflage supérieur.

III.2.2. Aciers de construction d'usage général (aciers au carbone)

Les aciers de construction au carbone forment deux classes, celles des aciers courants (ordinaires) et de qualité. D'après les conditions et le degré de désoxydation on distingue trois types de nuances.

III.2.3. Aciers de construction ordinaires (aciers courants)

Ils sont moins purifiés et contiennent donc plus de soufre, de phosphore et certaines autres inclusions non métalliques. Ils sont employés pour des pièces peu importantes tels que les fers marchands, laminés à chaud (poutres, barres, cornières, tôles, ...).

Ils sont très employés aussi dans la fabrication des éléments de machines peu importantes (axes, arbres, pignons, doigts de chenilles, bagues, boulons, écrous), les propriétés mécaniques d'un acier ordinaire peuvent être sensiblement améliorées par un traitement thermique (généralement une trempe à l'eau après chauffage). Ainsi après trempe à l'eau, la limite élastique des tôles laminées s'accroît légèrement sans que la plasticité ne se dégrade ($A = 15$ à 26 %).

Pour les constructions soudées, on utilise essentiellement les aciers calmés et semi- calmés à faible teneur en Mn et Si. Les aciers prévus à cet effet doivent avoir une faible aptitude au vieillissement thermique.

Pour les nuances devant être utilisées dans les régions froides, le seuil de rupture à froid acquiert une grande importance. Les aciers doivent être calmés et traités thermiquement (amélioration ou normalisation).

Les aciers de construction ordinaires, ayant une composition chimique définie et demandent une bonne tenue à l'usure, (axes, poussoirs, vis sans fin, pignons), subissent généralement une cémentation ou cyanuration.

III.2.4. Aciers de construction de qualité

Ces aciers ont une composition chimique plus rigoureuse, des teneurs plus faibles en soufre ($< 0,04\%$) et en phosphore ($< 0,035\%$), et suivant le degré de désoxydation, ils peuvent être calmés ou effervescents. Les aciers à faible teneur en carbone, donc à faible résistance, à plasticité élevée et à bonne soudabilité, s'emploient pour des pièces peu sollicitées. L'aptitude de ces aciers à l'estampage est d'autant plus faible que leur teneur en carbone est plus élevée. Les aciers de qualité sont utilisés :

- Sans traitement thermique.
- Avec le traitement de normalisation.
- Avec un traitement de cémentation lorsque les pièces demandent de faibles charges et une bonne tenue à l'usure (arbres à came, axes, leviers, etc.).

Les aciers à teneur moyenne en carbone ($0,3$ à $0,5\%$), s'emploient après une normalisation, une amélioration et une trempe superficielle pour des pièces très variées dans la construction mécanique (vilebrequins, bielles, pignons, tiges, etc.). A l'état normalisé, la résistance de ces aciers est plus grande que celle des aciers à bas carbone, alors que la Plasticité est plus basse. A l'état recuit, ces aciers se prêtent bien à l'usinage. L'acier à $0,45\%$ C est souvent utilisé pour les roues dentées et les arbres.

Les aciers contenant entre $0,6$ et $0,85\%$ C possèdent une résistance et une limite élastique plus grandes et une tenue à la l'usure plus élevée. Ils s'emploient après trempe et revenu, normalisation et revenu, ainsi qu'après trempe superficielle pour la fabrication des ressorts, tiges, rondelles, cylindres de laminoirs, etc.

Les aciers au carbone de qualité, contiennent du manganèse ($0,7$ à 1%), ce qui permet d'améliorer la résistance en augmentant la pénétration de trempe et de réduire légèrement la plasticité.

III.2.5. Aciers de décolletage

Les aciers de décolletage possèdent de bonnes aptitudes à l'usinage tout en assurant un bon état de surface. Ils contiennent généralement une teneur accrue en soufre et en phosphore. Le soufre se combine au manganèse en formant MnS sous forme d'inclusions allongées dans le sens du laminage et contribue à la formation d'un copeau court et cassant. Le phosphore améliore la dureté et la résistance, et élève le seuil de fragilité à froid.

La teneur en carbone varie de 0,08 à 0,45 %, celle du manganèse de 0,7 à 1,5 %, celle du soufre de 0,08 à 0,30 % et celle du phosphore de 0,08 à 0,15 %. La résistance et la dureté augmentent, alors que la plasticité diminue avec la teneur en carbone.

Exemples :

- Acier à 0,12 % C, $R = 420 \text{ N/mm}^2$, $HB = 160$, $A = 22 \%$.
- Acier à 0,40 % C, $R = 600 \text{ N/mm}^2$, $HB = 207$, $A = 14 \%$.

Parfois on rajoute à l'acier de 0,15 à 0,30 % de plomb qui fond lors de la coupe et diminue ainsi la résistance, les frottements et l'effort de coupe.

Les aciers de décolletage étirés à froid (écrouis) ont une résistance assez élevée (jusqu'à 800 N/mm^2), l'emploi de ces aciers est destiné à la fabrication de vis, de boulons, d'écrous, ainsi qu'aux pièces fortement sollicitées.

III.2.6. Aciers d'amélioration

Ce sont les aciers utilisés après trempe et revenu à haute température et contenant entre 0,3 et 0,5 % C. Les aciers d'amélioration doivent avoir une limite élastique élevée, une faible susceptibilité à l'entaille, une bonne pénétration de trempe et une faible aptitude à la fragilité de revenu.

Les nuances contenant entre 0,35 et 0,45 % s'emploient surtout pour les pièces de sections relativement petites, ou sollicitées par des charges relativement faibles. Pour des pièces volumineuses, on emploie les aciers alliés pour augmenter la pénétration de trempe. Pour des pièces encore plus grandes, on utilise les aciers fortement alliés exposés ci-après.

III.2.7. Aciers alliés au chrome

L'addition du chrome de 0,8 à 1,2 % accroît la pénétration de trempe et permet de former un carbure plus dur que la cémentite, ce qui contribue à l'augmentation de la dureté, de la résistance à la rupture et à l'usure, sans accroître la fragilité. Les aciers alliés au chrome peuvent contenir d'autres éléments tels que le bore (0,002 à 0,005) % qui augmente la pénétration de trempe et le vanadium (0,1 à 0,2) % qui renforce les propriétés mécaniques de l'acier.

III.2.8. Aciers alliés au chrome-manganèse.

L'addition combinée de chrome (0,9 à 1,2 %) et du manganèse (0,9 à 1,2) % permet d'accroître suffisamment la résistance et la pénétration de trempe. Ces aciers s'emploient pour des pièces de sections variant de 20 à 40 mm. L'addition supplémentaire de titane à l'acier, abaisse son aptitude à la surchauffe.

III.2.9. Aciers alliés au chrome-silicium-manganèse (chromansil)

Les propriétés mécaniques de ces aciers sont très élevées. La composition chimique moyenne est constituée de :

- 0,2 à 0,3 % C.
- 0,9 à 1,1 % Cr.
- 0,8 à 1,1 % Mn.
- 0,9 à 1,2 % Si.

Les caractéristiques mécaniques des aciers au Cr-Si-Mn après trempe à l'huile (880°C) et revenu (540°C) sont les suivantes :

- $R = 1100 \text{ N/mm}^2$.
- $R_e = 850 \text{ N/mm}^2$.
- $A = 10 \%$.
- $K = 50 \text{ J/cm}^2$.
- $Z = 45 \%$.

Les aciers 'chromansil' possèdent une bonne soudabilité une faible pénétration de trempe. Celle-ci peut être améliorée par une addition de 1,4 à 1,8 % de nickel.

III.2.10. Aciers alliés au chrome-nickel

Ces aciers possèdent une bonne résistance, une bonne ductilité et une grande pénétration de trempe. Ils sont employés pour la fabrication de grosses pièces de formes complexes, sollicitées en service à des chocs et des charges vibratoires.

Le nickel assure la ductilité maximale, et combiné au chrome, ils assurent une pénétration de trempe élevée. Combiné au molybdène, le nickel abaisse sensiblement le seuil de fragilité à froid.

Enfin nous avons rassemblé les principales nuances des aciers alliés d'amélioration et leurs caractéristiques dans le tableau ci-dessous.

Nuance DIN	Rm (daN/mm ²)	K (J/cm ²)	Applications technologiques
41 Cr 4	80 à 120	5 à 7	Boulonnerie pour matriçage à froid, à chaud. Se prête à la trempe par induction.
50 CrV 4	90 à 130	4 à 5	Essieux et arbres fortement sollicités. Se prête à la trempe par induction.
25 CrMo 4	65 à 105	7 à 10	Pièces d'avions, d'automobiles fortement sollicitées. Vilebrequins, leviers de direction, bielles, arbres.
42 CrMo 4	75 à 130	5 à 8	
30 CrMoV 9	90 à 145	4 à 6	Pièces de grande résistance : engrenages, axes.
24 NiCr 14	75 à 120	8 à 12	Pignons, roues dentées.
35 NiCr 18	110 à 165	4 à 7	Pièces très sollicitées, grande résistance aux chocs.
36 NiCrMo 4	75 à 130	6 à 10	Pièces pour flexion, chocs, torsion alternée : bielles, vilebrequins, arbres de cardans, d'engrenages, fusées d'essieux, leviers.
30 NiCrMo 8	90 à 145	5 à 8	
34 NiCrMo 6	80 à 130	6 à 9	
40 Mn 4	70 à 105	4 à 6	Pièces de faibles sections : boulons, vis, arbres.
37 MnSi 5	70 à 120	3 à 6	Pièces pour haute résistance à l'usure : roues d'engrenages, arbres.

Tableau III.1. les principales nuances des aciers alliés d'amélioration et leurs caractéristiques

III.2.11. Aciers de cémentation

Ce sont des aciers à faible teneur en carbone (0,10 à 0,25) %. Après trempe, cémentation et revenu à basse température, la dureté de la couche cémentée atteint 62 HRC et celle du cœur (20 à 40) HRC.

Les aciers de cémentation doivent avoir au cœur des propriétés mécaniques élevées, en particulier, une très haute limite élastique. Les éléments d'alliage améliorent les propriétés mécaniques.

III.2.12. Aciers alliés au chrome

La teneur en chrome des pièces simples, varie de 0,7 à 1 %, la profondeur de la couche cémentée atteint 1,5 mm. Une trempe à l'huile, suivie de cémentation, donne au cœur des pièces, une structure bainitique. Les propriétés mécaniques sont de l'ordre de :

- $R = (700 \text{ à } 800) \text{ N/mm}^2$.
- $R_e = (500 \text{ à } 650) \text{ N/mm}^2$.
- $A = (11 \text{ à } 12) \%$.
- $K = (60 \text{ à } 70) \text{ J/cm}^2$.

III.2.13. Aciers alliés au chrome-vanadium

L'addition de vanadium (0,1 à 0,2) % à un acier au chrome, améliore ses propriétés mécaniques, celles-ci, deviennent au cœur.

- $R = (750 \text{ à } 800) \text{ N/mm}^2$.
- $R_e = (550 \text{ à } 600) \text{ N/mm}^2$.
- $A = (12 \text{ à } 13) \%$.
- $K = 80 \text{ J/cm}^2$.

La faible pénétration de trempe de ces aciers ne permet de les utiliser que pour des pièces de petites dimensions (axes de pistons, arbres à cames).

III.2.14. Aciers alliés au chrome-nickel

L'addition simultanée de chrome et de nickel augmente la résistance, la plasticité et la ductilité au cœur des pièces. De plus, le nickel augmente la résistance et la ductilité de la couche cémentée.

Ces aciers sont employés pour les grosses pièces supportant, en service, des charges dynamiques importantes. Ils sont peu susceptibles de surchauffe en cémentation prolongée et n'ont pas de tendance à la sursaturation en carbone de la couche superficielle. L'addition de tungstène ou de molybdène aux aciers au chrome-nickel, accroît la stabilité de l'austénite sur fusionnée et par conséquent, la pénétration de trempe.

III.2.15. Aciers alliés au chrome-manganèse

Dans beaucoup de cas, puisque les aciers au chrome-nickel coûtent chers, ils sont remplacés par les aciers au chrome-manganèse qui sont employés pour la fabrication des engrenages, des arbres, etc.

Les aciers alliés au chrome- manganèse sont moins résistants à la surchauffe et possèdent une ductilité plus faible par rapport aux aciers chrome-nickel. Une faible addition de titane (0,03 à 0,09) % à cet acier donne après cémentation, trempe. revenu, une couche cémentée de dureté élevée (60 HRC), une pénétration de trempe très faible, ainsi une faible addition de molybdène l'accroît et donne une dureté maximale en surface.

Dans le tableau ci-dessous, nous avons porté les principales nuances d'aciers alliés de cémentation et leurs applications.

Nuance DIN	Rm (daN/mm ²)	Dureté (HB)	Applications technologiques
13 Cr 3	50 à 60	141 à 183	Pièces de construction avec exigences extraordinaires, résistance du cœur très élevée, haute résistance à l'usure: vis sans fin, engrenages..
15 CrNi 6	60 à 75	169 à 211	
18 CrNi 8	60 à 80	183 à 225	
15 CrMo 5	60 à 75	169 à 211	Pièces soumises à des efforts élevés de tous genre : roues dentées, engrenages de boîtes de vitesses, arbres à cames.
20 CrMo 5	75	220	
16 MnCr 5	60 à 70	155 à 200	
20 MnCr 5	60 à 75	169 à 211	
18 NiCrMo 6	115 à 150	210	Axes, engrenages, pignons, leviers de direction.

Tableau III.2. les principales nuances d'aciers alliés de cémentation et leurs applications.

III.3.1.16. Aciers de nitruration

Appliquée à un acier non allié, la nitruration ne donne qu'un durcissement faible et la pénétration de l'azote en profondeur fragilise les pièces. Par conte, il suffit d'introduire une faible quantité d'aluminium (1 à 2) % ou éventuellement d'autres éléments d'alliage, tels que le chrome, pour que la consolidation en surface s'intensifie sans affecter le cœur. L'addition d'une certaine quantité de molybdène, assure le maintien prolongé à 550°C et ne change pas la résilience (pas de fragilisation).

La dureté obtenue dans la couche nitrurée est d'autant plus élevée que le teneur en aluminium est plus forte. Pour obtenir une résistance au cœur, plus importante, on augmente la teneur en

carbone (jusqu'à 0,5 %), en gardant inchangée celle de l'aluminium. Le tableau suivant rapporte les principales nuances de nitruration et leurs caractéristiques.

Désignation	Caractéristiques				Applications
	Rm	Re	A	K	
	(da/mm ²)		(%)	(J/cm ²)	
30 CDA 6-612	800	700	18	19	Axes, vilebrequins, arbres, engrenages
45 CDA 6-12	900	800	16	16	Outils d'emboutissage, de sertissage, engrenages fortement chargés.
30 CAD 6-6	800	700	18	19	Même usage que ci-dessus. Couche nitrurée plus tenace et moins dure.
40 CAD 6-6	900	800	15	16	
30 CAD 6-3	800	700	18	19	
45 CAD 6-3	900	800	15	16	
20 CD 12	700	600	22	18	Pièces soumises au chocs importants et nécessitant une grande résistance à l'écaillage
30 CD 12	800	700	19	23	
30 CD 12 revenu à 550°C	1300	1200	11	8	
Z 35 CS 8	950	850	18	6	Pièces résistant à l'oxydation à chaud : soupapes à tiges nitrurées.
Z 50 CNW 20	880	450	30	10	

Tableau III.3. rapporte les principales nuances de nitruration et leurs caractéristiques.

III.2.17. Aciers pour constructions soudées

Comme leur nom l'indique, les aciers pour constructions soudées doivent d'abord avoir une bonne soudabilité. De plus, il est nécessaire qu'ils aient une limite élastique assez élevée et ils ne doivent pas être susceptibles de rupture par fragilité. Ces aciers contiennent en général :

- _Une faible teneur en carbone (0,15 à 0,22) % cause des exigences de soudabilité.

- Une teneur relativement élevée en manganèse à cause des exigences de résistance mécanique.
- Eventuellement de faible addition de chrome et de molybdène.

Les aciers pour constructions soudées sont très employés en construction, métalliques soudées et en chaudronnerie, notamment, dans le domaine ferroviaire (wagons, etc.).

Ces propriétés s'obtiennent pour une teneur en carbone supérieure à 0,5 % après trempe et revenu à 500°C, du point de vue composition chimique, les aciers à ressorts diffèrent très peu des aciers de construction, mais les conditions d'élaboration sont plus rigoureuses.

Généralement la limite élastique des aciers à ressorts au carbone est supérieure à 800 N/mm² et celles des aciers à ressorts alliés est supérieure à 1000 N/mm². Après trempe, tout le volume de la pièce doit avoir une structure martensitique.

La nuance avec la teneur la plus élevée en carbone (1,25 à 1,32) % est pauvre en manganèse (0,1 à 0,25) %. Cette nuance est utilisée, après traitement, pour faire des rubans de scie, de la coutellerie, des lames de grattoirs, etc. Les teneurs moyennes en éléments d'alliages contenus dans les aciers à ressorts sont : Si : (1,5 à 2,8) %, Mn : (0,6 à 1,2) %, Cr : (0,2 à 1,2) %, Ni : (1,4 à 1,7) %, W : (0,8 à 1,2) %.

Ces éléments assurent la pénétration de trempe, affinent le grain et augmentent la tenue à la relaxation. Le silicium élève la pénétration de trempe et retarde la décomposition de la martensite pendant le revenu. Les autres éléments sont plus ou moins présents suivant l'usage des ressorts.

Dans le cas courant, les ressorts sont durcis par trempe et revenu à moyenne température, ou par écrouissage superficiel (grenailage) qui permet d'augmenter la limite de fatigue. L'emploi des aciers à ressorts est très varié (voir tableau ci-dessous).

- Dans le cas de sollicitations normales, on utilise les aciers au manganèse-silicium.
- Dans le cas où s'impose un amortissement efficace et une longue durée de vie sous sollicitations élevées, on emploie les aciers au chrome-silicium et au chrome-vanadium.

Nuances DIN	Re (daN/mm ²)	Dureté (HB)	Applications
46 Si 7	90	255	Ressorts de suspension pour locomotives et wagons.
60 SiMn 5	85	250	Ressorts en spirales, coniques, hélicoïdaux, à lames.
46 Mn 7	75 à 90	230	Ressorts soumis à un taux élevé de flexion alternée : Ressorts à lames, ressorts à boudins.
67 SiCr 5	85	240	Ressorts de soupapes et régulateurs.
50 CrV 4	80	235	Ressorts à boudins, barres de torsion, ressorts de soupapes (T = 350°C).

Tableau III.4. . L'emploi des aciers à ressorts est très varié

III.2.1.18. Aciers à roulements

Les aciers à roulements doivent satisfaire à des exigences très rigoureuses en ce qui concerne les inclusions non métalliques. Leur présence dans la partie sollicitée, provoque une concentration de contraintes qui entraîne une rupture de fatigue prématurée. Les bagues, rouleaux et bielles, exigent dans les conditions de travail, une dureté, une tenue à l'usure et une résistance, élevées.

A l'état recuit, ces aciers ont une structure perlitique à grains fins, assez usinable avec une dureté d'environ 187 HB. Après trempe à l'huile et revenu à basse température (200°C) la dureté atteint (61 à 66) HRC.

Les bagues, les rouleaux et les bielles sont fabriquées en acier à haut carbone contenant du chrome. Dans le cas de grosses pièces, on utilise comme addition, du chrome-manganèse-silicium ou du chrome-nickel (aciers de cémentation). Pour les roulements travaillant dans des milieux agressifs, on emploie l'acier inoxydable à 1,2 % C et 1,4 % Cr.

Dans le tableau, ci-dessous, nous avons porté quelques nuances d'aciers pour roulements et leurs principales applications.

Nuances DIN	Rm (daN/mm ²)	Dureté (HRC)	Applications
105 Cr 4	70	63 à 67	Roulements à bagues de 10 à 17 mm de diamètre.
100 Cr 6	70	63 à 66	Bagues de roulements à billes, disques et anneaux de butées à billes et à galets, sièges de roulements.
100 CrMn 6	73	63 à 66	Bagues de plus de 30 mm d'épaisseur de paroi à l'état fini.
X90 CrMoV 18	85	57 à 59	Roulements inoxydables, rouleaux à billes, à galets.

Tableau III.5. Quelques nuances d'aciers pour roulements et leurs principales applications.

III.2.19. Aciers à haute résistance (Maraging)

Les exigences de ces aciers sont les suivantes :

- Une résistance mécanique élevée.
Une bonne tenue à la rupture fragile
- Une fiabilité élevée en service.

Ces prescriptions correspondent, dans une grande mesure, aux aciers martensitiques de vieillissement qui contiennent très peu de carbone (< 0,03 %) et appelés aciers « Maraging ». Ce sont les ferronickels martensitiques traités par durcissement structural. Ils sont souvent additionnés de cobalt, de molybdène, de niobium, etc., pour assurer le vieillissement.

Lors du vieillissement, le chrome consolide la martensite, améliore la tenue à la corrosion. Le manganèse provoque le vieillissement de la martensite Fe-Ni, mais diminue la plasticité et la ductilité de la martensite vieillie.

Le plus utilisé des aciers Maraging est le Z3 NKDT 18-9-5 contenant 18 % Ni, 9 % Co, 5 % Mo, et 0,7 % Ti. Son traitement thermique comporte un recuit d'une heure à 820°C avec un refroidissement à l'air, suivi d'un traitement de vieillissement de 3 heures à environ 480°C. Les caractéristiques mécaniques après recuit et vieillissement sont portées dans le tableau ci-dessous.

Etat	Rm (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	A (%)	Z (%)	KCV (J/cm ²)
Recuit	650 à 1020	630 à 700	15 à 20	70 à 80	31 à 45
Vieilli	1750 à 1950	1650 à 1850	10 à 12	48 à 57	31 à 45

Tableau III.6. Les caractéristiques mécaniques après recuit et vieillissement

L'acier Maraging se distingue donc par ses bonnes propriétés de résistance et de ductilité. A l'état trempé, il se prête bien à l'usinage, au corroyage et au soudage. Les aciers martensitiques de vieillissement s'emploient dans les industries aéronautiques, navales, dans les constructions d'appareils de mesure et de contrôle, etc.

III.2.20. Aciers à haute tenue à l'usure

Il existe deux classes d'aciers résistant à l'usure :

- Les aciers austénitiques au manganèse.
- Les aciers martensitiques au chrome.

III.2.21. Aciers austénitiques au manganèse

Ce sont des aciers austénitiques à haute teneur en manganèse, de composition moyenne de (0,9 à 1,3) % C et de (11,5 à 14,5) % Mn.

Ces aciers n'ont pas une dureté particulièrement élevée, mais ils possèdent une aptitude remarquable à s'écrouir sous l'effet de faibles déformations plastiques. Ils ont de ce fait, une très bonne tenue au frottement, convenablement traités, ils sont très peu fragiles. Leur haute aptitude à s'écrouir, les empêche d'être usinables et ils ne peuvent être mis en forme que par moulage et rectification. Après coulée, ils sont constitués d'austénite et de carbure en excès $(Fe, Mn)_3C$, qui se précipite aux joints de grains en altérant la résistance et la ductilité.

Les aciers austénitiques au manganèse conviennent pour des pièces de frottement (rails de chemins de fer, godets d'excavateur, mâchoires de concasseur, etc.). L'acier le plus connu de cette catégorie est l'acier "Hadfeld" de désignation normalisée Z 120 M 12, dont les caractéristiques mécaniques sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Etat	Rm (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	A (%)	Z (%)	Dureté (HB)
Trempe à l'eau	850 à 1050	340 à 440	40 à 60	35 à 40	160
Ecroui (10 à 20) %	1200 à 1250	800 à 900	15 à 25	-	200

Tableau III .7. les caractéristiques mécaniques l'acier "Hadfield"

L'addition d'environ 1 % de molybdène permet d'éviter les précipitations indésirables de carbure, et de surclasser l'acier Hadfield du point de vue résistance à l'abrasion.

III.2.22. Aciers à haute tenue à la corrosion (aciers inoxydables)

La tenue à la corrosion s'obtient en ajoutant aux aciers ordinaires, des éléments chimiques qui forment en surface, des pellicules protectrices fortement liées au métal de base et qui empêchent ainsi le contact direct métal-milieu corrosif.

Les éléments d'addition (chrome, aluminium, silicium) se dissolvent dans le fer et forment, pendant l'échauffement de l'acier, des couches protectrices d'oxydes tels que $(Cr, Fe)_2O_3$, $(Al, Fe)_2O_3$. Au fur et à mesure que la teneur des éléments d'addition est élevée, plus la tenue à la corrosion s'élève en température :

- Avec (5 à 8) % Cr, on peut atteindre $T = (700 \text{ à } 750)^\circ\text{C}$.
- Avec (15 à 17) % Cr, on peut atteindre $T = (950 \text{ à } 1000)^\circ\text{C}$
- Avec 25 % Cr et 5 % Al, on peut atteindre $T = 1300^\circ\text{C}$.

Les aciers à haute tenue à la corrosion peuvent être classés en deux groupes principaux : les aciers alliés au chrome qui, après refroidissement à l'air obtiennent une structure martensitique ou ferritique et les aciers alliés au chrome-nickel à structure austénitique.

III.2.23. Aciers inoxydables au chrome

L'addition à l'acier entre 12 et 14 % de chrome, rend positif le potentiel électrochimique du métal qui devient ainsi résistant à la corrosion dans l'atmosphère, l'eau potable, l'eau de mer et dans plusieurs sortes d'acides, de sels et d'alcalis. Les aciers inoxydables au chrome contiennent une faible teneur en carbone et éventuellement des additions d'aluminium pour améliorer la résistance à la corrosion à chaud. Il est indiqué deux types de ces aciers dans le tableau ci-dessous.

Nuances	% C	% Cr	Traitements thermiques	Rm (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	A (%)
Z3 C 13	0,03	13	Trempe (air ou huile) à 950°C et revenu (2 à 4) h vers (650 à 700)°C	550 à 700	350 à 550	15
Z5 CA 13	0,05	13		450 à 600	250 à 450	20

Tableau III.8. deux types des aciers inoxydables

Malgré sa faible teneur en carbone, l'acier Z3 C13 prend partiellement par la trempe, une structure martensitique. L'acier est inoxydable, grâce à la présence d'aluminium (0,2 %). Ces deux nuances sont soudables. La tenue à la corrosion des aciers à 13% Cr est meilleur, mais à condition que tout le chrome soit à l'état de solution solide. Dans ce cas, il forme à la surface une couche protectrice dense de type Cr₂O₃.

Les aciers Z12 C13 et Z20 C13 s'emploient pour les pointeaux des carburateurs, les ressorts, les instruments chirurgicaux, les aciers à plus forte teneur en chrome (17 % et plus) ont une tenue à la corrosion plus élevée. L'acier Z12 C17 s'emploie après recuit de recristallisation vers 750°C dans l'industrie alimentaire et l'industrie légère.

Les aciers ferritiques Z15 C 25 et Z15 C 28 s'emploient, le plus souvent, sans traitement thermique pour la fabrication des pièces travaillant dans des milieux agressifs (acide nitrique bouillant, ...). Ces nuances résistent à l'oxydation à chaud jusqu'à 1150°C en atmosphère sulfureuse. Leurs caractéristiques mécaniques à chaud sont faibles et elles deviennent facilement fragiles après quelques temps de maintien à haute température, probablement à cause du grossissement exagéré du grain.

III.2.24. Aciers inoxydables au chrome-nickel

Ce sont des aciers austénitiques, additionnés généralement de chrome, nickel ou de manganèse. Ils ont une faible limite d'écoulement, une résistance modérée, une plasticité élevée et une bonne tenue à la corrosion dans les milieux oxydants. Les caractéristiques de quelques nuances d'aciers inoxydables Cr-Ni, après trempe à l'eau à 1150°C sont rapportées dans le tableau suivant.

Nuances	Composition chimique				Rm (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	A (%)
	% C	% Cr	% Ni	% Si			
Z15 CN24-12	0,15	24	12		600	250	35
Z10 CN25-20	0,10	25	20	-	600	250	35
Z12 NCS38-18	0,12	18	38	2	600	300	30

Tableau III.9. Les caractéristiques de quelques nuances d’aciers inoxydables Cr-Ni, après trempe à l’eau à 1150°C

Des nuances voisines à celles mentionnées dans le tableau, teneurs en carbone plus élevée, permettent d’améliorer la coulabilité en moulage. Les teneurs en nickel peuvent être abaissées en raison de l’influence gammagène du carbone. Les aciers inoxydables au chrome-nickel coûtent très chers. C’est pourquoi, on a recours à des aciers moins coûteux dans lesquels le nickel est remplacé par le manganèse. Ces aciers servent dans la fabrication des appareils travaillant dans des milieux faiblement corrosifs.

Par trempe (1050°C), les aciers au Cr-Ni-Mn, acquièrent une structure austénitique. Dans le domaine de déformation, ils subissent, d’une part, un fort durcissement, et d’autre part, une transformation partielle en martensite.

Les tableaux suivants résument différentes nuances d’aciers inoxydables ferritiques, austénitiques et martensitiques ainsi que leurs domaines d’applications.

III.3.1.25. Aciers inoxydables ferritiques :

Nuances DIN	HB état recuit	R (dan/mm ²)	Applications
X8 Cr17	150	45 à 60	Ustensiles de cuisines, ferrures de portes, revêtements de comptoirs.
X8 CrTi17	150	45 à 60	Résistant à la corrosion inter cristalline : bacs, pales d’agitateurs.
X8 CrMoTi17	160	50 à 65	Résistant aux acides : citrique, sulfurique, borique bouillant, acétique froid et bouillant, sulfate d’ammoniac bouillant, iode sec, vinaigre.

Tableau III.10. Les caractéristiques de quelques nuances d’aciers inoxydables ferritiques

III.2.26. Aciers inoxydables austénitiques

Nuances DIN	HB état recuit	R (dan/mm ²)	Applications
X12 CrNi18-8	175	50 à 70	Ustensiles de cuisines, ferrures de portes et fenêtres, Instruments chirurgicaux, sièges de soupapes.
X10 CrNiTi18-9	185	50 à 75	Ustensiles, appareils pour l'industrie alimentaire et chimique, pièces pour réacteurs nucléaires.
X12 CrNiS18-8	175	50 à 70	Crochets à viandes, écrous, vis à bielles.
X8 CrNi12-12	175	50 à 65	Ustensiles de cuisines
X5 CrNiMo18-12	175	50 à 70	Instruments de chirurgie, conduite d'eau résiduaire, gicleurs résistant aux acides, armatures.

Tableau III.11. Les caractéristiques de quelques nuances d'aciers inoxydables austénitiques**III.2.27. Aciers inoxydables martensitiques :**

Nuances DIN	HB état recuit	R (dan/mm ²)	Applications
X10 Cr13	160	50 à 65	Instruments médicaux, canons de fusils de chasse, rivets, ustensiles de cuisine.
X20 Cr13	240	60 à 70	Moulage : hélices de navires, roues, godets pour turbines. Forgeage : arbres, boulons.
X40 Cr13	225	70 à 85	Instruments de chirurgie, couteaux de table, hachoir, pieds à coulisse.
X35 CrMo17	260	70 à 85	Aciers inattaquables à l'eau de mer, bonne résistance à chaud.
X22 CrNi17	260	80 à 95	
X90 CrMoVCo17	265	70 à 85	Disques perforés pour cuisine, couteaux, bistouris.

Tableau III.12. Les caractéristiques de quelques nuances d'aciers inoxydables martensitiques**III.3.2. Aciers à outils**

Les aciers à outils sont des aciers au carbone et alliés à plus de 0,5 % C. Ils sont caractérisés par :

Une dureté élevée (60 à 65) HRC.

Une grande résistance à l'usure.

Une forte résistance mécanique.

Dans le cas général; ce sont des aciers hypereutectoïdes et lédéburitiques, dont la structure après trempe et revenu à basse température se compose de martensite et de carbures. Pour les outils qui demandent une ductilité relativement élevée (matrices de formage à chaud), on emploie des aciers hypoeutectoïdes. Après trempe et revenu à haute température, ils acquièrent une structure de sorbite.

On distingue actuellement quatre classes d'aciers à outils :

Classe 1 : aciers au carbone pour travail à froid.

Classe 2 : aciers alliés pour travail à froid.

Classe 3 : aciers pour travail à chaud

avec chocs : forgeage, estampage, matriçage.

Sans chocs : moules, pièces de filage.

Classe 4 : aciers à coupe rapide.

Les aciers à outils sont repérés, indépendamment de la désignation normalisée, par quatre chiffres :

Le premier indique la classe.

Les trois autres dépendent du groupe, du sous-groupe d'emploi et des éléments d'alliages dominants.

III.3.2.1 Aciers à outils de la classe 1

Ce sont des aciers au carbone destinés pour le travail à froid. Cette classe d'aciers est utilisée pour l'outillage à main. Les aciers au carbone doivent assurer, après trempe et revenu à basse température, une dureté élevée de l'arête tranchante des outils (60 à 65)HRC, nettement supérieure à celle du métal usiné, ainsi qu'une bonne tenue à l'usure pour conserver l'état de l'arête tranchante.

La faible stabilité de l'austénite surfusionnée affaiblit la pénétration de trempe des aciers à outils au carbone. La pénétration de trempe totale lors du refroidissement à l'eau ne s'obtient que pour des dimensions inférieures à (10 à 12) mm des outils.

C'est pourquoi les nuances contenant entre 0,5 et 1,2 % de carbone, s'emploient généralement pour

des outils de petites dimensions (limes, forets aléseurs, ...).

Dans le cas où les outils subissent en service des charges dynamiques, il est recommandé d'utiliser des aciers hypoeutectoïdes et eutectoïdes traités thermiquement, de manière à obtenir une structure de type troostite.

Pour les outils, (comme les fraises, tirets, scies, grattoirs, ...), on emploie des aciers hypereutectoïdes (1 à 1,3) % C traités et à structure composée de martensite et de carbures.

Les aciers au carbone présentent les avantages suivants :

Prix modéré.

Faible dureté et bon usinage à l'état recuit.

Bonne aptitude à la transformation à l'état recuit.

Quelques nuances d'aciers à outils de la classe 1, avec des exemples d'applications, sont exposées dans le tableau ci-après.

Nuances AFNOR	Température moyenne (°C)			Dureté HRC	Applications
	Recuit	Trempe	Revenu		
XC 50	750 à 780	830 E	150 à 300	54	Outils de forage, fourches, râpeaux.
XC 60	750 à 780	825 E 850H	200 à 300	60 à 63 60 à 62	Petites matrices, outils de chocs, barres.
XC 70	750 à 780	800 E 850 H	150 à 250	61 à 63	Scie à bois, marteaux, fers de rabots.
XC 80	750 à 780	800 E 800 H	150 à 250	63 à 64 62	Matrices, cisailles, poinçons, estampes, scies circulaires.
XC 90	750 à 780	790 E 790 H	150 à 300	63 à 64 63	Burins, tourneurs, coutellerie, matrices, chirurgie.
XC 100	700 à 750	790	150 à 250	63 à 65	Ciseaux, burins, poinçons, touches à froid
XC 110	700 à 750	780 E	150 à 250	64 à 65	Matrices à chaud, Outils pour meules.
XC 120	700 à 750	180 E	150 à 250	65	Calibres, jauges, burins, outils à bois.

Recuit : recuit d'adoucissement, E : eau, H : huile

Tableau III.13. Quelques nuances d'aciers à outils de la classe 1, avec des exemples d'applications

III.3.2.2 Aciers à outils de la classe 2

Ce sont les aciers à outils pour travail à froid. Les aciers à outils alliés pour travail à froid, de même que les aciers à outils au carbone ne sont pas très résistants, et de ce fait, sont employés pour la coupe des matériaux relativement doux et à de faibles vitesses de coupe, la température en service ne dépasse pas 2350°C.

Les aciers à outils alliés au chrome, vanadium, molybdène, ... font preuve d'une grande stabilité de l'austénite surfusionnée et par suite d'une grande pénétration de trempe. Le traitement thermique comporte une trempe à l'huile et un revenu à 200°C afin de réduire les déformations et les gauchissements des outils. Les aciers à outils pour travail à froid sont de plusieurs sortes.

III.3.2.2.1 Aciers au manganèse et au manganèse-vanadium

Les teneurs moyennes sont de l'ordre de 0,8 % C, 2,1 % Mn et de 0 à 0,25 % V. Les aciers de cette classe sont appelés aciers indéformables. Ils ont pour principale Caractéristique, une bonne indéformabilité au traitement thermique due à une température de trempe relativement basse. On les trempe, soit à l'huile, soit au bain de sels par trempe étagée. Ils forment une solution commode pour les outils de précision et de mesure, ne demandant pas une résistance particulière à l'usure (poinçons, matrices de découpage, calibre vérificateurs, instruments de mesure, ...).

III.3.2.2.2 Aciers au chrome

La composition moyenne comporte les additions suivantes : (1 à 2,1) % C, (0,2 à 1,3) % Cr, (0 à 0,25) % V. Les aciers à faible teneur en chrome présentent une faible trempabilité et sont employés pour de petits outils à fabriquer en grande série (mèches, tarauds, ...), et pour des pièces demandant une bonne tenue au choc ou à la flexion (extracteurs, butées, ...).

Les nuances, à plus forte teneur en chrome (13 %) et contenant du vanadium, sont très indéformables et très résistantes à la flexion et sont destinées à la fabrication, par exemple, de filières, mandrins d'étirage, galets de formage, matrices d'extension à froid, molettes de coupes, fraises et outils à bois.

III.3.2.2.3 Aciers au chrome-molybdène

La composition moyenne de ces aciers comporte : (1 à 1,5) % C, (5 à 12) % Cr, (0,9 à 1,1) % Mo, (0,1 à 0,4) % V. Les aciers de ce type se déforment très peu à la trempe et sont employés pour les mêmes catégories d'outils que précédemment.

III.3.2.2.4 Aciers au chrome-tungstène

Ces aciers contiennent en général, les teneurs suivantes : (0,4 à 1,1) % C, 0,9 % Mn, (0,85 à 1,1) % Cr, (1 à 2) % W. Ces aciers sont d'un emploi très général, ils sont durs, tenaces et d'un assez grand pouvoir trempant. Leur application est très variée, outils coupants (forets, mèches, cisailles .), alésoirs, tarauds, filières, poinçons, matrices, etc.

III.3.2.2.5 Aciers au nickel-chrome

Ces aciers contiennent 0,35 % C, 1,7 % Cr, 3,75 % Ni. C'est une nuance particulière, réservée pour les outillages d'estampage à froid, comportant des gravures de grande finesse et d'un prix élevé.

III.3.2.3 Aciers à outils de la classe 3

Ce sont des aciers à outils pour travail à chaud Dans cette catégorie d'aciers, on peut distinguer deux classes principales :

Les aciers au Cr-W-Mo-V.

Les aciers au Ni-Cr-Mo.

Quelques nuances d'aciers à outils pour travail à chaud sont mentionnées, à titre d'exemple, dans le tableau suivant :

N° d'ordre	% C	% Cr	% W	% Mo	% V	% Ni
1	0,6	0,9	1,85	0,2	0,15	-
2	0,4	5	1,3	1,4	0,4	-
3	0,3	2,5	9	0,3	0,4	-
4	0,55	0,85	-	0,45	-	1,75
5	0,4	1,5	-	0,5	-	4,3

Tableau III.14. Quelques nuances d'aciers à outils pour travail à chaud sont mentionnées, à titre d'exemple

La nuance au Cr-W, repérée sous le numéro 1 dans le tableau précédent, possède une grande résistance à l'état traité, une haute limite de fatigue notamment aux chocs répétés et une bonne stabilité au revenu jusqu'à 500°C. On l'emploie comme outillage travaillant aux

chocs à des températures moyennes : poinçons de perçage, lames de cisailles à chaud, petites matrices diverses.

La deuxième nuance qui contient 5 % Cr, est un acier indéformable pour outillage travaillant à chaud. Il est réservé aux emplois demandant à la fois une haute résistance à la compression et une bonne tenue aux chocs thermiques entre 300 et 600°C.

La troisième nuance contenant une très forte teneur en tungstène (9 %), est caractérisée par une grande dureté et une bonne tenue à l'usure. Cet acier peut être utilisé jusqu'à la température de 650°C.

Les deux autres nuances au nickel-chrome-molybdène ont une excellente pénétration de trempe et sont employés pour les grosses matrices d'estampage à chaud.

III.3.2.4 Aciers à outils de la classe 4:

III.3.2.4.1 Matériaux des outils acier rapide

Cette classe contient les aciers à coupe rapide. Les aciers à coupe rapide ou simplement les aciers rapides sont caractérisés par :

Une bonne tenue à chaud.

Une bonne dureté.

Une résistance mécanique et une tenue à l'usure élevée.

La propriété de garder la structure martensitique à chaud à 600°C.

L'utilisation des aciers de coupe par rapport aux aciers à outils ordinaires, permet d'augmenter sensiblement la vitesse de coupe de 2 à 4 fois et la tenue de l'outil de 10 à 30 fois.

L'élément d'alliage principal est le tungstène. Plus la teneur en tungstène est élevée, plus les qualités de coupe de ces aciers sont meilleures et ceci jusqu'à environ 23%. Au delà de cette teneur, le tungstène semble n'avoir aucun effet.

Les teneurs en chrome sont en général, de l'ordre de 4 à 4,5 %. Le molybdène peut remplacer le tungstène et la tenue à chaud de ces aciers s'améliore en présence de vanadium et de cobalt.

Les aciers rapides contiennent des carbures lédéburitiques. A l'état recuit, ils sont constitués de ferrite alliée et de carbures de type M_6C , $M_{23}C_6$, MC , M_3C dont le principal acier dans les aciers rapides est le M_6C , la ferrite comporte la plus grande partie dissoute de chrome.

La structure d'un acier moulé comporte un eutectique complexe qui ressemble à la lédéburite et qui

se dépose aux joints de grains.

Pour assurer une bonne tenue à chaud, les outils rapides sont soumis à une trempe de 1200 à 1300°C pour avoir une meilleure dissolution des carbures secondaires, et obtenir au chauffage, de l'austénite hautement alliée au Cr, W, Mo, et V. Ceci assure, après trempe, une structure martensitique à haute stabilité, donc une bonne tenue à chaud. La trempe est suivie d'un revenu multiple à haute température.

Les nuances commerciales d'aciers rapides peuvent se classer comme suit.

III.3.2.4.2 Aciers rapides courants

Ces Aciers sont aussi appelés "aciers 18-4-1" et ils contiennent environ 18 % W, 4 % Cr, 1 % V. Ils sont employés pour les outils coupants à grande vitesse (forets, tarauds, alésoirs, ...), ainsi que pour le petit outillage demandant une grande résistance à l'usure à chaud et sans chocs thermiques (matrices spéciales, filières,...).

III.3.2.4.3 Aciers rapides au tungstène-molybdène

La teneur moyenne de ces aciers est de 6 % W, 6 % Mo, 4 % Cr et 2 % V. Le molybdène remplace, en partie, le tungstène. Une teneur donnée de molybdène peut remplacer une teneur, à peu près, double de tungstène.

III.3.2.4.4 Aciers extra-rapides

Ces aciers contiennent en moyenne 18 % W, 4 % Cr, 1 % Mo et 2 % V. Ils sont utilisés pour outils de finition devant présenter des arêtes aiguës et une grande constante de profil (peignes à fileter les tubes, fraises, broches, alésoirs, ...)

III.3.2.4.5 Aciers rapides spéciaux au cobalt

Ce sont des aciers rapides qui contiennent, en plus de la teneur moyenne, environ entre 2 et 15 % Co. Ils sont destinés à être utilisés dans des conditions de travail très sévères.

Usinage de métaux durs (aciers traités, fontes trempés).

Vitesses de coupes très élevées (tours automatiques, tours à barres).

Section du copeau forte (dégrossissage, rabotage).

III.3.2.4.6 Aciers rapides à haute teneur en vanadium

La teneur en vanadium atteint 5 %. Le carbure de vanadium est à l'origine de la supériorité de ces aciers, en ce qui concerne, la tenue à la coupe.

III.3.2.4.7 Aciers au molybdène-cobalt

Ce sont des aciers à coupe rapide; de dureté exceptionnelle (59 à 70) HRC, permettant d'usiner les alliages à haute résistance massique et les alliages réfractaires.

Dans les tableaux suivants, nous avons rapporté quelques nuances d'aciers rapides :

Aciers rapides au tungstène.

Aciers rapides au molybdène.

III.3.2.4.8 Carbures métalliques à outils

On appelle carbures métalliques, les alliages constitués de tungstène et de titane, alliés au cobalt. Les carbures de tungstène WC et de titane TiC, très durs et fragiles sont agglomérés par une phase ductile de cobalt.

Les carbures métalliques contiennent en général (85 à 36) % WC, (6 à 60) % TiC et (3 à 25) % Co. La dureté et la tenue à l'usure des carbures métalliques restent importantes jusqu'à 800°C. Ils permettent de travailler avec une arête tranchante échauffée jusqu'à des températures plus élevées que dans le cas des aciers à outils, (fig. 139), ce qui veut dire qu'ils peuvent être utilisés à des vitesses de coupe plus grandes.

Les alliages au titane-tungstène s'emploient essentiellement pour l'usage des aciers au carbone et alliés. Ils sont élaborés sous forme de plaquettes fixées aux supports, généralement en acier ordinaire, non pas par fusion, mais par frittage. A cet effet, les poudres TiC et WC, finement broyées (1 à 3) μm et mélangées à du cobalt pulvérisé dans des proportions bien définies, sont compactées puis elles sont frittées vers 1500°C.

Variation R_m , E , $A = f(T)$ de la nuance WC + 6,5 % Co.

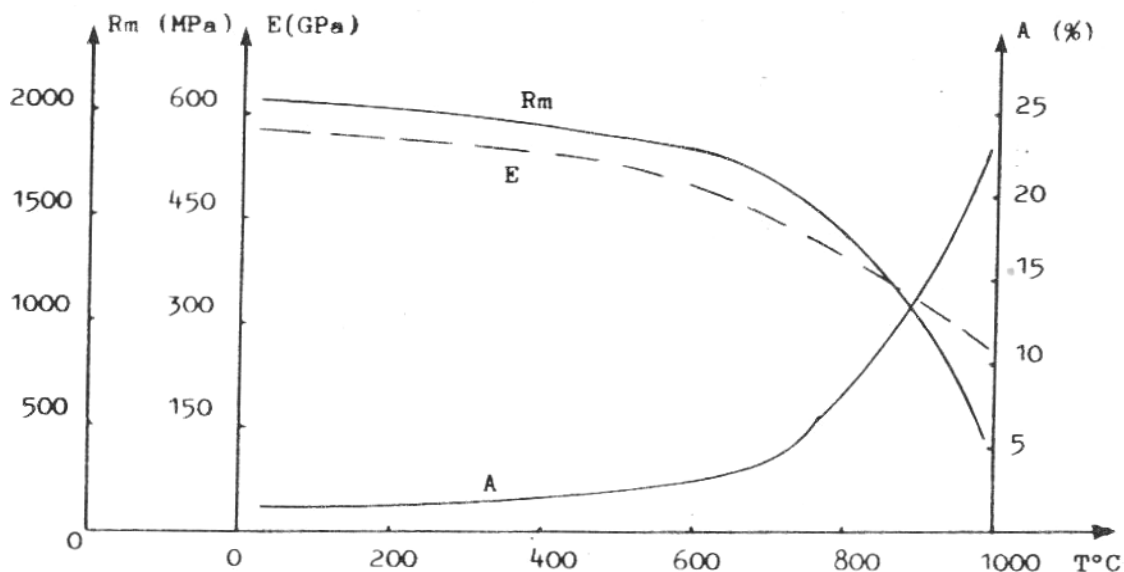


Figure III -1: diagramme de carbure métallique.[28]

III.3.2.4.9 Aciers et alliages spéciaux

Cette partie du chapitre est consacrée à quelques aciers et alliages ayant des propriétés physiques particulières et dont les caractéristiques mécaniques présentent un intérêt secondaire.

Conséquent, pour accroître l'énergie magnétique, il faut augmenter H_c . Pour augmenter la force coercitive, il faut que la structure de l'alliage comporte des défauts de structure (lacunes, dislocations, blocs, ...), qui constituent une distorsion du réseau cristallin.

Pour la fabrication des aimants, on utilise les aciers à haut carbone, environ 1 % C, additionnés de chrome, de tungstène, de cobalt, ... Ces aciers se prêtent bien à l'usinage et au corroyage, mais possèdent une énergie magnétique relativement faible. Ainsi, on les utilise pour les aimants peu importants. Les alliages les plus importants dans l'industrie des aimants sont ceux à base des éléments de transition Fe, Co et Ni, additionnés également de Cu, Al, Co, Ti, Nb, pour augmenter la force coercitive. Ces alliages sont durs et fragiles, donc ils ne se déforment pas. Les aimants s'obtiennent selon la forme par moulage, suivi de rectification.

Pour obtenir des propriétés magnétiques élevées de ces alliages, on procède au chauffage vers 1200 à 1300°C, puis d'une trempe à une vitesse propre pour chaque type d'alliage, suivie d'un revenu vers 550 à 650°C.

III.3.2.4.10 Aciers magnétiques doux

Ces aciers sont employés dans le domaine de l'électrotechnique. Les aciers à faible teneur en carbone (0,05 à 0,005) %, et contenant du silicium (0,8 à 4,8) %, sont très employés pour les tôles magnétiques. ils doivent avoir :

Une faible force coercitive H_c .

Une haute perméabilité magnétique.

Des pertes par hystérésis très faibles.

Pour avoir ces caractéristiques, le matériau ferromagnétique doit avoir une structure homogène (solution solide ou métal pur), et doit être purifié des impuretés et des inclusions telles que la cémentite, l'oxygène et le soufre. Le matériau doit être complètement recristallisé (vers 1200°C), afin d'éviter les effets de l'écroûissage (forte réduction du paramètre μ et accroissement de H_c).

Le silicium forme avec le fer une solution solide, ce qui permet d'augmenter la résistance électrique, et donc de diminuer les pertes de courants tourbillonnaires. De plus, le silicium augmente la perméabilité magnétique, abaisse quelque peu la force coercitive et les pertes par hystérésis.

L'estampage à froid, la coupe, l'enroulement des noyaux à tôles dégradent les propriétés magnétiques des aciers, c'est pour cela, qu'il est recommandé d'appliquer un recuit entre 750 et 790°C. L'acier pour transformateur est livré sous forme de bandes et tôles laminées à froid, et ayant une texture magnétique orientée.

a-Permalloy :

Ce sont les alliages à permittivité initiale et à permittivité maximale élevées, permettant d'obtenir une induction magnétique importante et de faibles champs. Les permalloys sont à base de nickel (40 à 80) %, et contiennent souvent du molybdène et du chrome.

b-Ferrites :

Les ferrites sont des oxydes complexes de fer et de métaux bivalents de types $nM_o.mFe_2O_3$ (où M est un métal bivalent) obtenus par agglomération de poudres. Leurs caractéristiques sont essentiellement la résistivité élevée (10^3 à 10^7) Ωcm et la magnétisation de saturation relativement faible.

Les ferrites s'emploient dans le cas des hautes fréquences et des hyperfréquences lorsque

L'utilisation des ferromagnétiques devient impossible par les grandes pertes en énergie électromagnétique. Elles servent en radio-électronique et en radiotechnique pour la fabrication des antennes à tiges magnétiques, des noyaux des amplificateurs, etc. Les ferrites en $\text{MgO-MnO-Fe}_2\text{O}_3$ servent de mémoires d'ordinateurs.

III.3.2.4.11 Aciers et alliages pour éléments chauffants

La présence d'une solution solide dans un alliage favorise l'obtention d'une haute résistance électrique. Les aciers et alliages prévus comme éléments chauffants, doivent posséder une bonne tenue à l'oxydation à chaud et une résistance suffisante au chauffage pour pouvoir conserver en service leurs formes.

On emploie, le plus souvent, les aciers au chrome-aluminium à basse teneur en carbone de type ferritique (fechral et chromal). Plus la teneur en chrome et en aluminium est élevée, meilleures sont les caractéristiques des éléments de chauffage. Les aciers au Cr-Al sont peu plastiques, ainsi pour en faire des éléments, le métal doit être chauffé vers 200 à 350°C, suivant les dimensions des pièces.

Nous avons déjà noté que les alliages au nickel ont une haute résistance électrique par formation de solution solide. Parmi ces alliages, il y a essentiellement les alliages au nickel-chrome, appelés "nichromes". Pour réduire le prix des nichromes et conserver ou améliorer les caractéristiques de résistance, une partie du nickel est remplacée par du fer, ces alliages s'appellent "ferronichromes" et sont utilisés à 950 ou 1000°C. Les nichromes sont employés aussi bien pour la fabrication des ustensiles de ménage, que des éléments de chauffage des fours électriques

III.3.2.4.12 Alliages aux propriétés dilatométriques

Ce sont des alliages à base de Fe-Ni, très employés dans la construction mécanique et surtout dans la construction des appareils. Le coefficient de dilatation ' α ' entre -100°C et +100°C, diminue brusquement lorsque la teneur en nickel augmente jusqu'à 36 % et il s'accroît par la suite, si la teneur continue à augmenter. Ce comportement est largement exploité en technique.

Ainsi les éléments des machines et des appareils devant conserver des dimensions constantes entre -100 et +100°C se font en alliages austénitiques (% C < 0,05 et 36 % Ni), appelés "elvar". Ces alliages, dont le coefficient de dilatation $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ est constant dans l'intervalle de température (-50 à +100)°C, sont utilisés comme étalons de longueur en métrologie, comme pièce

dans certains appareils de mesures géodésiques.

III.4 Angle des outils de tour :

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

La (figure III -2) illustre, dans le système de référence outil en main, les trois angles principaux, l'angle de dépouille α , l'angle de taillant β et l'angle de coupe γ .

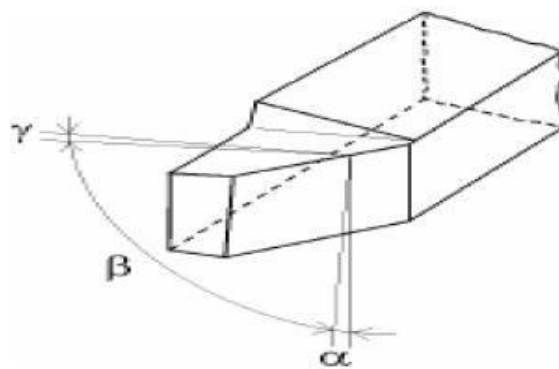


Figure III -2: Angles du taillant (outil en main).[10]

La (figure III -3) 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).

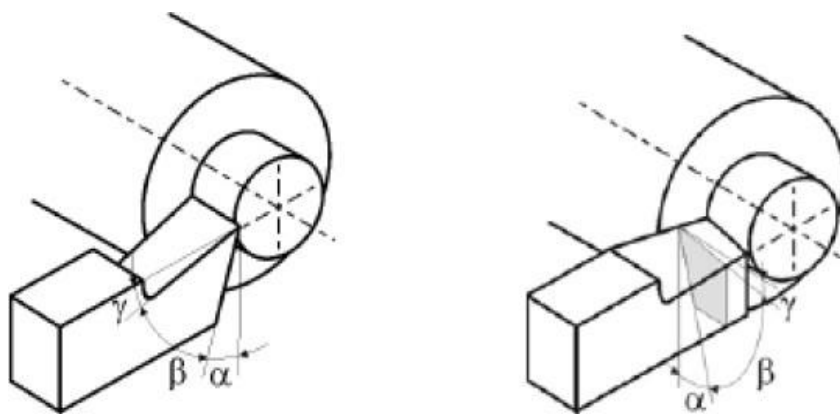


Figure III -3: Angles du taillant (outil en travail) .[11]

Globalement, l'angle de dépouille α influe sur le frottement entre l'outil et la pièce et donc 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, les dégagements de chaleur etc. L'angle de taillant β affecte la résistance à la rupture du taillant. La somme de ces trois angles est toujours égale à 90°

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

Dans le cas où la somme est supérieure à 90° , on parle de coupe négative (γ négatif).

III.4.1 Les parties de l'outil :

La partie la plus importante de l'outil est l'arête de coupe, intersection d'une face de coupe sur laquelle glisse le copeau, et d'une face en dépouille opposée à la surface tranchée, i.e. partie active, dont la dureté doit être plus grande que celle du métal à travailler. Sur tous les outils il est nécessaire de dépouiller certaines surfaces pour éviter leur frottement avec les surfaces engendrées. L'étude des outils peut prendre comme modèle celle de l'outil prismatique:

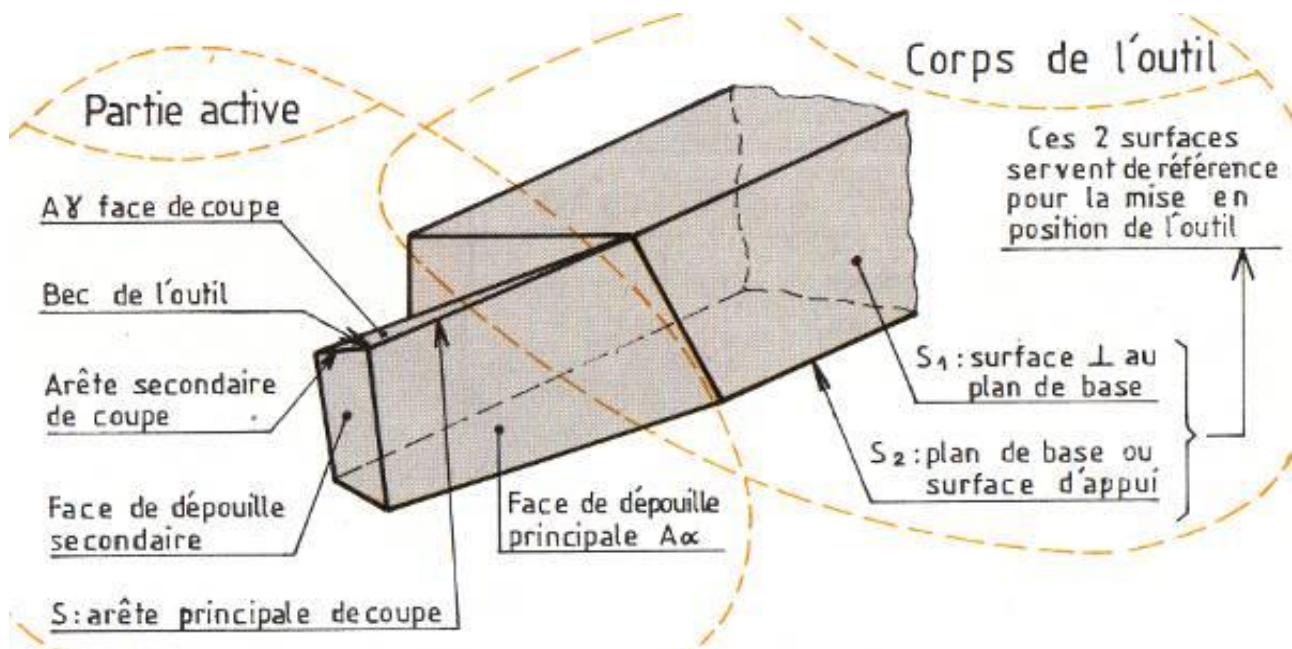


Figure. III -4 : La partie la plus importante de l'outil.[12]

III.4.2 les plans de l'outil :

Les angles de la partie active sont définis par trois plans P_r , P_f et P_s eux même repérés en fonction des vecteurs vitesse de coupe V et d'avance V_f :

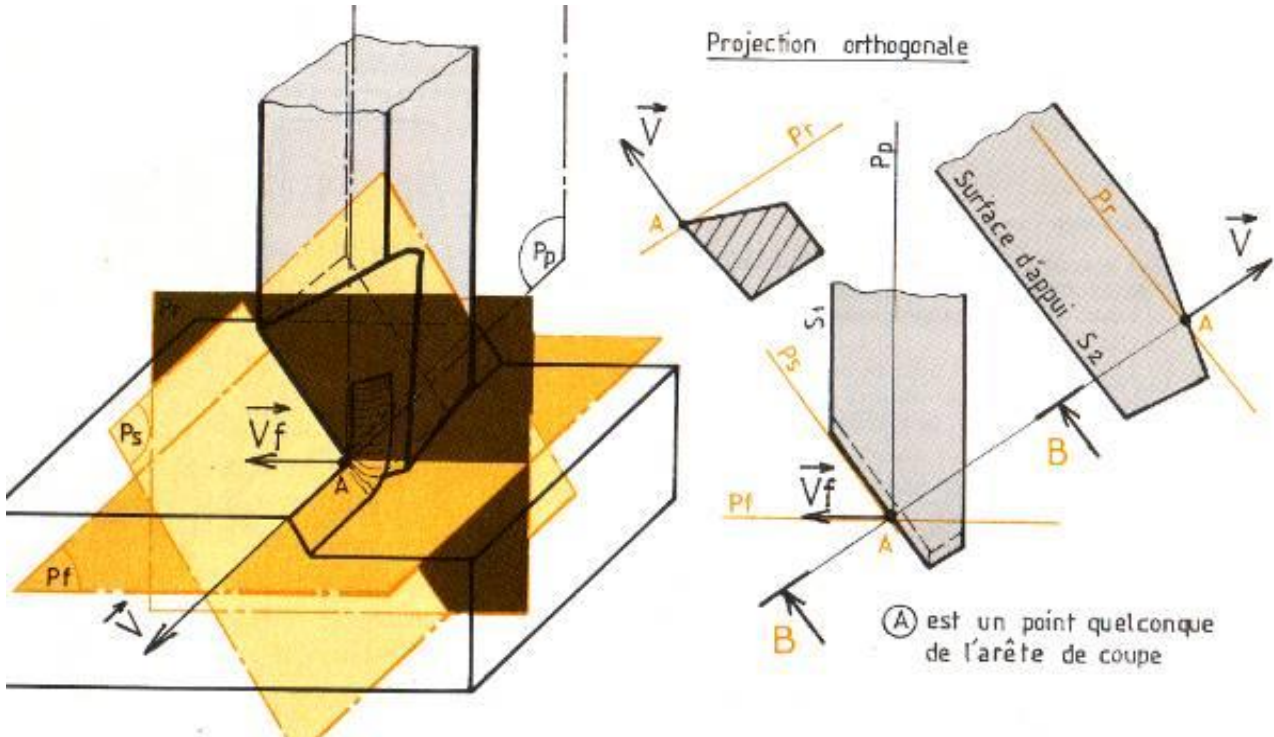


Figure. III -5 : les plans de l'outil (en main).[13]

- P_r plan de référence (en marron), passant par le point A de l'arête et perpendiculaire à la direction du vecteur vitesse de coupe V
- P_s plan d'arête (en beige), perpendiculaire au plan P_r et contenant la tangente à l'arête S
- P_f plan de travail conventionnel (en orange), perpendiculaire au plan P_r et parallèle à la direction du vecteur avance V_f .

On définit ainsi les angles:

- de direction d'arête d'outil K_r , angle entre P_f et P_s mesuré dans P_r , dépend du travail d'usinage (forme de la surface à générer, ébauche ou finition), angle à gauche ou à droite
- d'inclinaison d'arête d'outil λ_s , angle que fait l'arête de coupe S et le plan P_r , dépend du genre et du type de travail (ébauche ou finition, choc ou continu). Une valeur négative a pour but d'augmenter la résistance du bec et d'orienter le déroulement du copeau.
- de coupe γ , dépend du matériau usiné

de dépouille Alpha (Ci. 6° pour l'acier rapide, 4° à 8° pour les carbures métalliques)

de taillant Béta (dépends de la résistance à la coupe du métal à usiner)

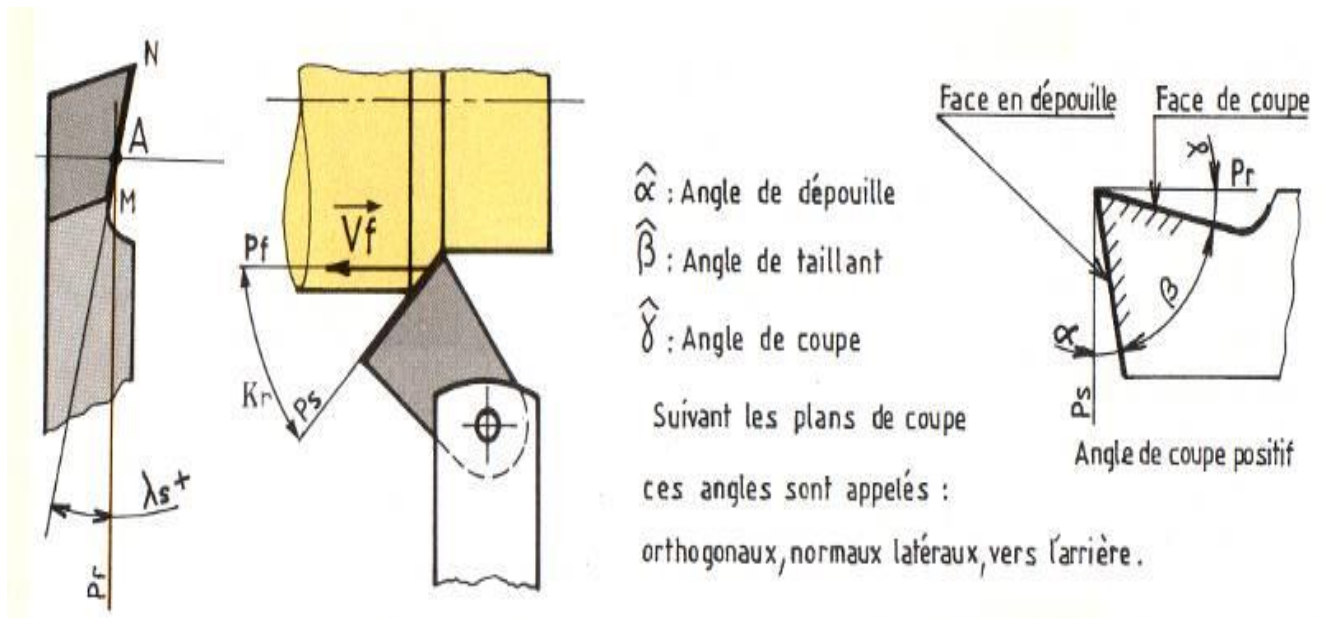


Figure. III -6 : définit les angles.[14]

Le bec de l'outil joue un rôle important sur la rugosité de la surface engendrée, car il diminue la hauteur des stries. La section du corps de l'outil et la longueur de l'arête de coupe sont fonction de l'avance et de la profondeur de passe.

III.4.3 Détermination des angles de coupe :

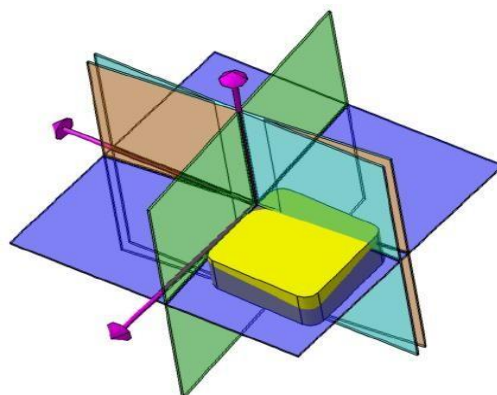


Figure III -7: les plans de l'outil (en main).[15]

outil en main Spécifier la face de coupe, face de dépouille et arête de coupe Déterminer les vecteurs V_c et V_f en un point O de l'arête de coupe Associer le repère (O, X_0, Y_0, Z_0) Identifier les plans de l'outil (en main) P_r, P_f, P_o et P_s

$$\{P_r \perp V_c\} ; \{P_f = (V_f, V_c)\} ; \{P_s \text{ contient l'arête et } \perp$$

$$P_r\} ; \{P_o \perp P_r \text{ et } P_s\}$$

Projeter la plaquette dans ces plans pour identifier les angles de l'outil

Dans P_r : angle de direction d'arête κ

Dans P_o : angles des face : $\gamma_0 \alpha_0 \beta_0$

Dans P_s : angle d'inclinaison d'arête λ

Car ils influencent sur : La longueur d'arête en travail L'entrée en matière en début de passe La sortie de passe

La fragilité en pointe de l'outil

La direction de dégagement du copeau

La robustesse et la réversibilité de la plaquette

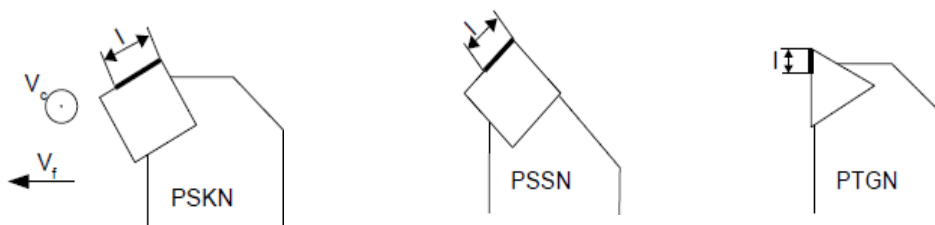


Figure. III -8 : La fragilité en pointe de l'outil.[16]

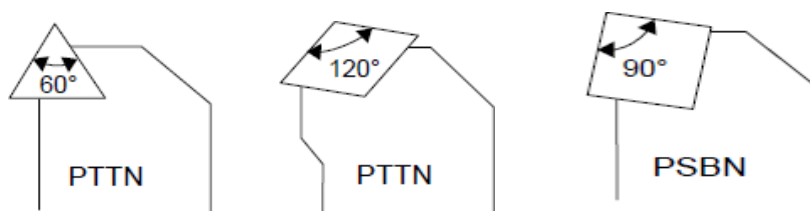


Figure. III-9 : La direction de dégagement du copeau.[16]

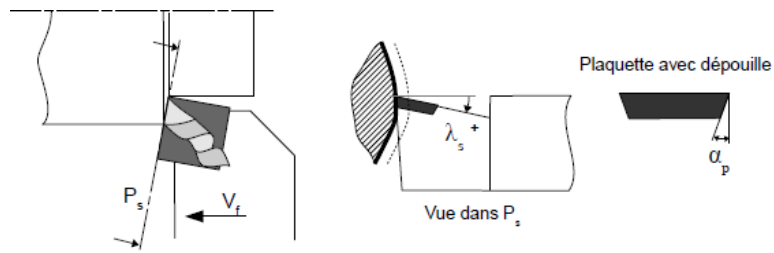


Figure. III -10 : La robustesse et la réversibilité de la plaquette.[15]

Une fois encore, le but n'est pas de former des spécialistes des outils de coupe mais d'entrevoir la complexité des outils et de maîtriser les bases élémentaires.

L'angle de direction d'arête κ représente l'orientation de l'arête de coupe par rapport à la direction d'avance de l'outil dans le plan de référence P_r

Influe sur la géométrie usinable, l'épaisseur de copeau (et donc les efforts), la fragilité de la pointe de l'outil...

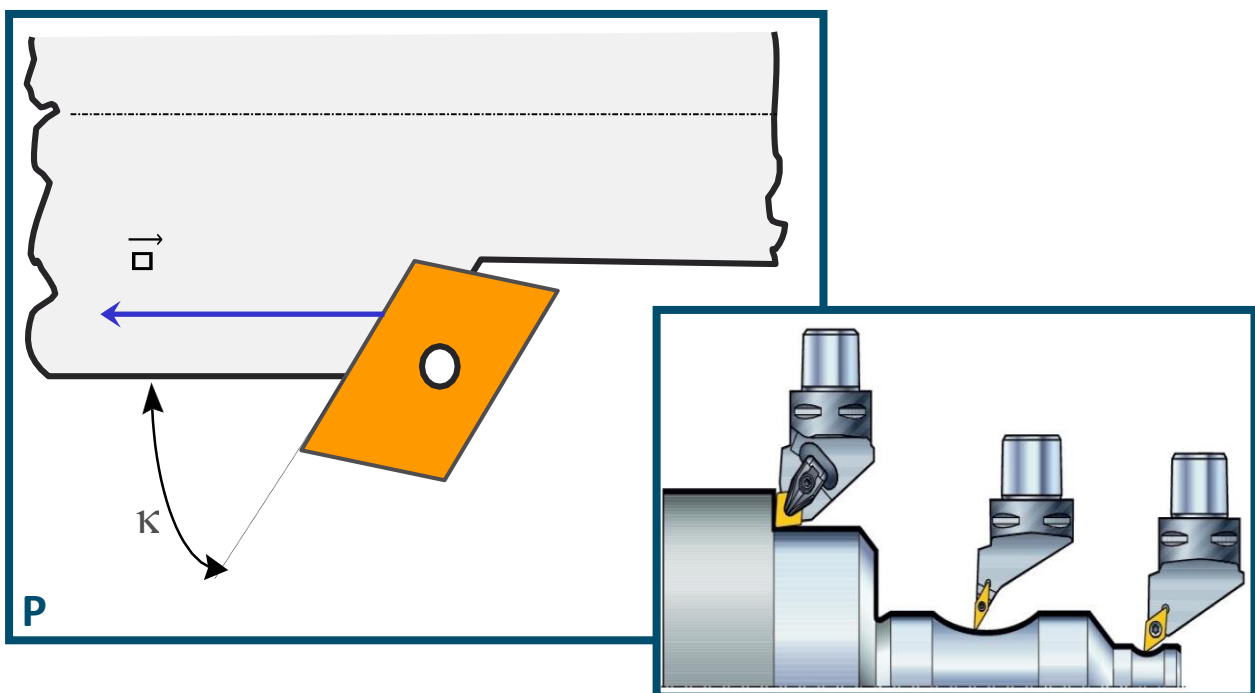


Figure III -11 : L'angle de direction d'arête κ .[15]

Représente l'orientation de l'arête de coupe par rapport à la direction d'avance de l'outil dans le plan de référence P_r

Influe sur la géométrie usinable, l'épaisseur de copeau (et donc les efforts), la fragilité de la pointe de l'outil....

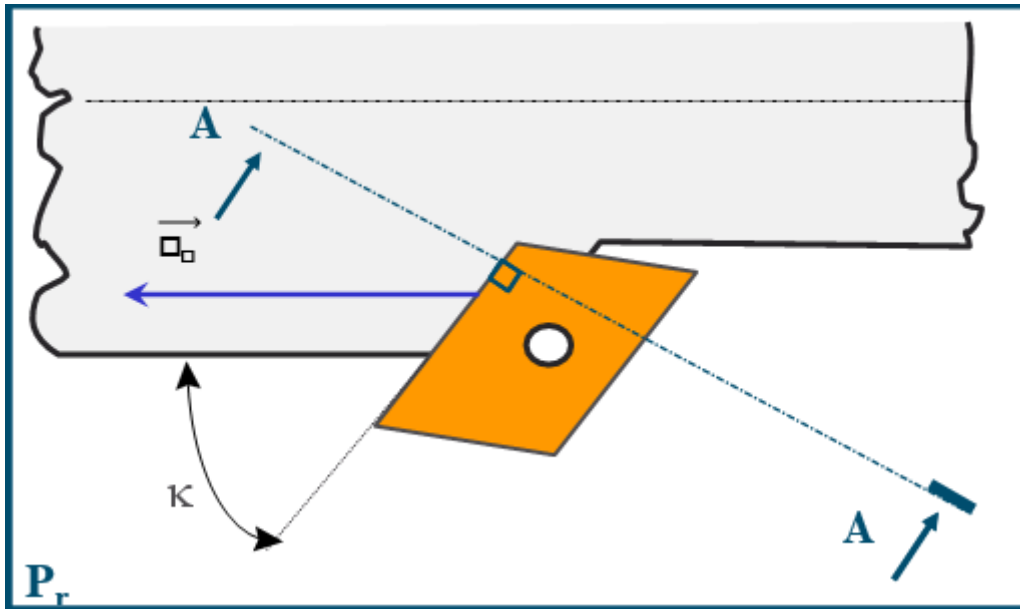


Figure III -12 : L'angle de direction d'arête κ . [12]

Dans le plan orthogonal P_o

Trois angles, définis par rapport à la vitesse de coupe

Angle de coupe γ_o , par rapport à la face de coupe qui joue directement et principalement sur les efforts de coupe

Angle de dépouille α_o , par rapport à la face... de dépouille qu'on prendra soin de garder positif pour éviter le talonnage, $\alpha_o \sim 5-6^\circ$

Et angle de taillant β

caractéristique de l'outil lui-même et non de son orientation

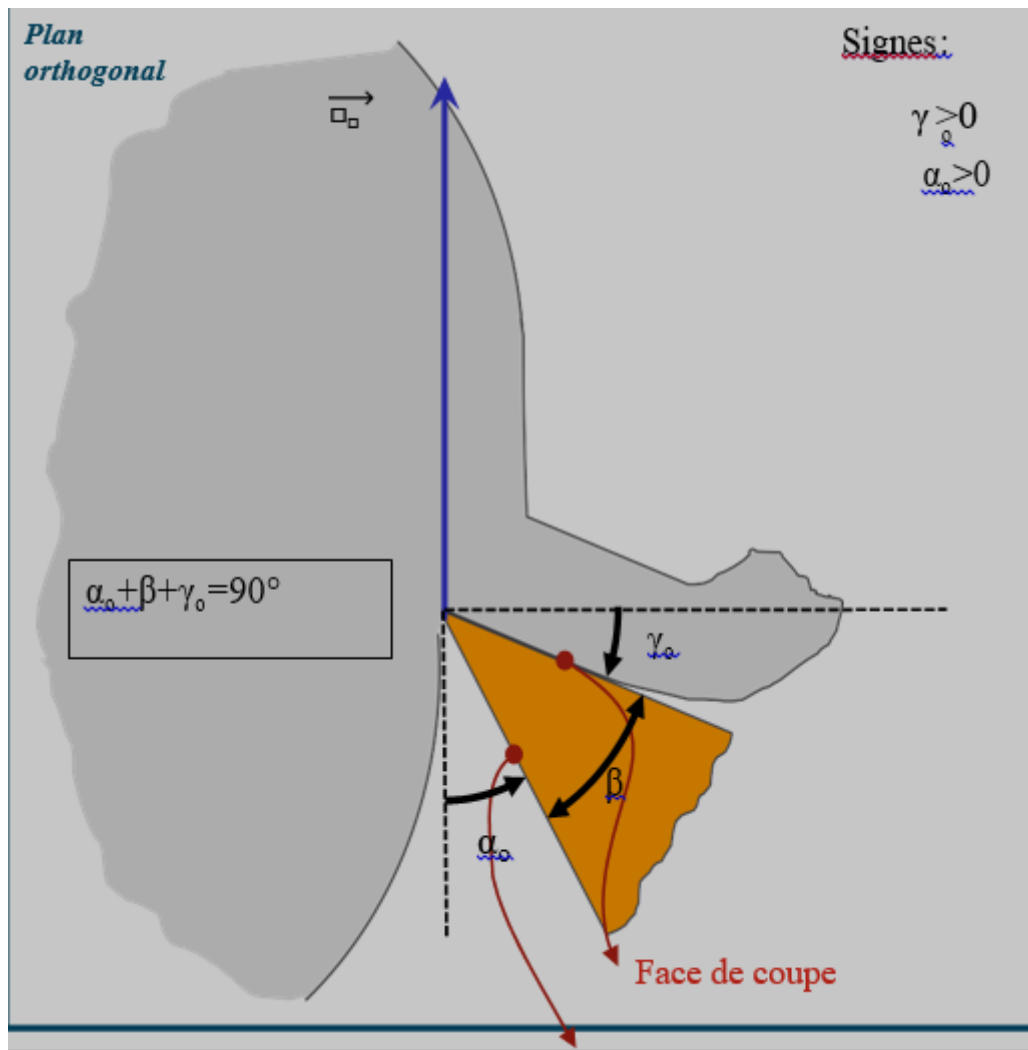


Figure III -13: Choix de l'angle de coupe.[12]

Fonction du matériau et de sa dureté

Ex : comment découper le beurre en fonction du réglage de son frigo...

III.4.3.a Angles de coupe positifs

Pour l'usinage de matériaux mous

Efforts moindres : réduction des vibrations, pour machines moins puissantes ou peu rigides...

Fragilité de l'outil coupant...

III.4.3.b Angles de coupe négatifs

Pour l'usinage de matériaux durs

Réversibilité de la plaquette, usinage au choc...

Efforts importants, machines de plus grande puissance et rigidité,...

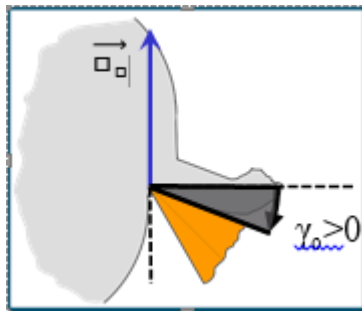


Figure III -14 : Angles de coupe positifs.[14]

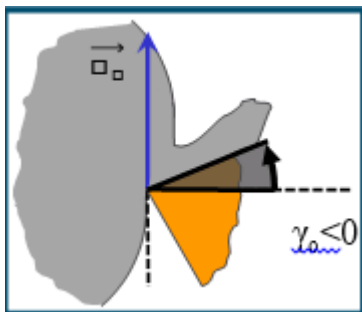


Figure III -15 : Angles de coupe négatifs.[14]

CHAPITRE IV

**Comparaison entre forêt revêtu et un autre
non revêtu**

IV.1. Généralités sur les revêtements des outils de coupe

Les revêtements sont couramment classés comme revêtements mous et revêtements durs selon leurs duretés. Habituellement les revêtements souples sont utilisés pour réduire le frottement, tandis que les revêtements durs (nitrures, diamant, ...) sont utilisés pour leur bonne résistance à l'usure. Parfois, les revêtements sont également classés par épaisseur, sous forme de couches minces et de revêtements épais. Pour les revêtements minces, le substrat portera une grande partie du chargement, par conséquent, la réponse tribologique des systèmes de revêtement dépend des propriétés de l'interface et du substrat. Alors qu'un revêtement épais supportera tout le chargement appliqué sur la pièce revêtue. Les structures des revêtements ont subi un grand développement, allant des revêtements simples monocouches, à multicouches jusqu'aux revêtements adaptatifs avancés.

- Les avantages de combiner plusieurs structures et compositions à l'intérieur d'un même revêtement sont selon Donne:
- la réalisation de diverses propriétés physiques individuelles (par exemple barrière de diffusion + faible frottement).
- la réduction de l'inadéquation des propriétés mécaniques et chimiques entre le substrat et le revêtement (principalement pour améliorer l'adhérence),
- la maîtrise de la contrainte résiduelle dans les revêtements,
- la capacité à arrêter les fissures lors de l'utilisation dans des conditions sévères,
- l'adaptabilité avec le changement des conditions opératoires et l'amélioration de la dureté et/ou de la ténacité.

Le principal avantage d'un revêtement multicouche est la performance des couches individuelles. Par contre le mélange de couches doit respecter la compatibilité aux interfaces. Par exemple, une couche de TiN (nitrure de titane) est souvent ajoutée entre les couches d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) et de carbure (WC-Co), afin d'éviter les faibles affinités chimiques entre ces deux nuances. Même chose pour les revêtements en MoS₂ qui présentent peu d'affinité avec les aciers.

IV.2. Comportement tribologique des revêtements des outils de coupe

Les modes d'usure des outils de coupe sont liées directement aux interactions mécaniques et thermiques entre l'outil et la matière usinée. C'est pour cette raison que la plupart des chercheurs dans la littérature dédient plus d'attention à ces phénomènes. Le rôle des revêtements en tant que protection de l'outil est analysé principalement des points de vue mécaniques et thermiques.

IV.3. Comportement mécanique

a analysé l'effet de trois types de revêtements mono et multicouches (TiC, TiC+TiN et TiC+Al₂O₃+TiN) en usinage. Il a conclu que selon les conditions de coupe, certains revêtements peuvent réduire considérablement la pression spécifique. Cette réduction peut atteindre 20% dans le cas d'un revêtement multicouche également étudié le comportement tribologique de l'interface de contact, Il a constaté que les propriétés intrinsèques des revêtements dans des formats mono et multicouches jouent un rôle crucial dans le contrôle du comportement mécanique du contact. Le frottement au niveau de la face de coupe des outils revêtus change de telle sorte que la relation entre les contraintes de cisaillement et les contraintes normales peuvent être exprimées par une fonction linéaire ayant une pente positive ou négative selon la structure du revêtement utilisé (voir Le type de revêtements peut réduire le frottement et par conséquent les contraintes mécaniques à l'interface. En effet, des variations relativement élevées du coefficient de frottement allant de 0.5 à 1 ont été observées. Par contre, dans leurs études du frottement, trouvent, pour tous les revêtements testés, que la variation du coefficient de frottement est faible d'un revêtement à un autre, même dans le cas du carbure de tungstène non revêtu lorsque la vitesse de frottement est élevée. Par contre, les revêtements ont amélioré la résistance à l'usure ont comparé le rendement d'un outil en carbure non revêtu K20 (outil A) à celui du revêtement bicouche CVD2 en TiCN/Al₂O₃ (outil B) et un multicouches PVD3 en TiAlN/TiN (outil C) lors de l'usinage à sec de l'Inconel 825. À l'issue de cette étude, une réduction significative de l'effort de coupe a été obtenue avec l'outil C pour toutes les vitesses de coupe. Un écart maximal entre l'outil C et les autres outils A et B de 58 et 31% respectivement est notée D'autre part, l'écart entre les efforts des outils B et A est faible sauf pour une vitesse de coupe élevée (124 m/min). Egalement, l'outil C est plus efficace pour réduire le frottement en raison de la présence d'une couche de TiN et d'une morphologie plus lisse du revêtement. Par une modélisation par éléments finis, démontrent qu'avec la présence d'un revêtement, la contrainte dans l'outil diminue, alors que la contrainte agissant sur la pièce reste inchangée. Ceci est dû à un coefficient de frottement réduit avec le revêtement TiN. Plusieurs auteurs ont confirmé que les revêtements permettent de réduire la force de frottement (effort tangentiel) lors de l'usinage, alors que la force normale à la surface de coupe (effort de coupe) est

peu sensible à la présence ou non du revêtement . Ce n'est pas forcément la couche de revêtement qui rentre en contact avec le matériau à usiner qui est toujours à l'origine de la réduction des efforts. La valeur du frottement peut être significativement modifiée quand une couche intermédiaire isolante est présente lors de l'usinage d'acier inoxydable ou d'acier carbone]. A l'issue de ces travaux, on peut constater que le revêtement a une influence capitale sur les de contact outil/pièce (pression, frottement), et les composantes des efforts de coupe.

IV.4.Comportement thermique

Pour montrer le rôle d'un revêtement d'un point de vue thermique, plusieurs études ont été proposées dans la littérature. Aexploité dans ses travaux la température mesurée par un thermocouple pour définir la valeur de la température moyenne à l'interface outil/pièce. Il conclut que lorsque l'effet de barrière thermique se produit, les revêtements réduisent sensiblement la plage des températures de contact et contribuent à une nette amélioration du transfert de la chaleur à des vitesses de coupe élevées. En particulier, pour l'usinage d'un acier inoxydable avec une vitesse de coupe égale à 160 m/min et un revêtement à quatre couches, la température de contact diminue d'environ 300 °C par rapport à un outil en carbure non revêtu. A des vitesses de coupe élevées, indique que l'utilisation d'outils revêtus multicouches peut laisser passer environ 40% de la chaleur générée dans le corps de l'outil pendant le processus de coupe. Ces résultats ont été illustrés schématiquement, dans laquelle deux matériaux (acier AISI 1045 en carbone et acier inoxydable AISI 304) ont été usinés avec différents outils de coupe revêtus. Le partage thermique obtenu dans ces deux cas est tout à fait différent.

L'utilisation d'un revêtement multicouche offre des propriétés tribologiques améliorées des surfaces en contact. Indiquent que l'évacuation de la chaleur par le copeau et la température à l'interface deviennent plus importantes avec un revêtement à faible conductivité thermique.ont proposé plusieurs modèles physiques qui calculent les températures moyenne et maximale à l'interface outil/copeau pour les outils non-revêtus et les outils munis d'un revêtement mono et multicouche. Ces modèles tiennent compte des conductivités thermiques, des diffusivités équivalentes des revêtements et de leurs coefficients de partage de la chaleur. Ils montrent qu'une augmentation allant jusqu'à 30% de la part de chaleur évacuée par le copeau peut se produire avec les revêtements multicouches. La comparaison avec des essais expérimentaux donne une précision de l'ordre de 10 à 15%. Zhang et al. ont à leur tour développé un modèle 1D analytique pour simuler le comportement thermique d'un outil revêtu monocouche. L'analyse thermique a été obtenue en utilisant la technique de la transformée de Laplace et une extension de la série de Taylor.

Les résultats montrent que les propriétés thermo-physiques du système revêtement/substrat affectent la distribution de la température dans l'outil. Kusiak et al. ont réalisé une étude sur l'influence thermique de plusieurs revêtements déposés sur un outil de coupe. Elle consiste à estimer le flux de chaleur appliqué sur l'outil. Leur analyse a été réalisée à l'aide d'un modèle analytique basé sur des transformées intégrales de Laplace et Hankel. Les résultats ainsi obtenus montrent que pour une source de chaleur invariable et une surface de contact outil/copeau constante, la température dans l'outil peut être fortement influencée par la présence d'un revêtement, en particulier, quand le revêtement possède une faible conductivité thermique comme par exemple l' Al_2O_3 . L'évolution du flux de chaleur dans des substrats d'outils lors du processus de tournage a été l'objet d'une étude intéressante faite par Rech. Cette dernière montre que les revêtements influencent principalement la quantité de chaleur générée à l'interface outil/copeau (modification du coefficient de frottement), cependant ils n'influencent pas la répartition de la chaleur entre le substrat et le copeau pendant les opérations de tournage. De ce fait, ils ne jouent pas le rôle d'une barrière thermique. Rech met en cause le changement de l'aire de contact « collant » à l'interface outil/pièce pour justifier la modification de la température dans le contact.

met en cause le changement de l'aire de contact « collant » à l'interface outil/pièce pour justifier la modification de la température dans le contact.

Yen et al. ont usiné avec un revêtement multicouche de type (TiC/ Al_2O_3 /TiN), ils confirment que l'effet de barrière thermique du revêtement (ou de la couche intermédiaire

d' Al_2O_3) semble être significatif mais uniquement dans le régime initial (transitoire) de coupe. Cet effet devient beaucoup moins significatif lorsque la coupe a atteint un état thermiquement stable (régime établi). L'effet, la pente de la courbe de température à travers l'épaisseur du revêtement passe de 13 (a) à 2.5 dans la. Une comparaison entre deux modèles a été proposée par Yen et al.: un modèle pour lequel les couches de revêtements sont traitées séparément via les conditions aux limites de maillage, et un deuxième modèle utilisant une couche composite du revêtement avec des propriétés thermiques équivalentes. Les simulations issues de ces modèles effectuées avec la méthode EF, donnent des résultats quasi-identiques en termes d'efforts de coupe et de la géométrie de copeau. Un écart des deux modèles est cependant observé lorsque la température atteint le régime permanent. Il faut conclure donc qu'il y a des auteurs comme Koné et al. qui considèrent que les revêtements jouent le rôle de barrière thermique lors de l'usinage, et d'autres qui indiquent que les revêtements ne jouent pas ce rôle, mais davantage influent sur le comportement du contact outil/pièce. Dans ce travail de thèse, nous allons garder à l'esprit les deux conclusions dans nos développements et mener des discussions selon les résultats obtenus.

IV.5. Comportement à l'usure des couches de revêtement

Le but principal de l'utilisation du revêtement est d'augmenter la résistance à l'usure et les performances pendant l'opération d'usinage. a rapporté que le revêtement TiN présente une grande résistance à l'usure pour une large gamme de matériaux. Le revêtement TiAlN est un excellent choix pour la protection des outils pour les opérations de coupe interrompues en raison de sa ductilité élevée. D'autre part, le revêtement TiAlN forme une couche supérieure d'Al₂O₃ dense à haute température et cette formation améliore sa résistance à l'oxydation,

Les épaisseurs de revêtement peuvent aller de quelques microns (en usinage) à plusieurs millimètres ou centimètres pour d'autres applications, Certaines études expérimentales. Ont examiné l'effet de l'épaisseur de revêtement sur la résistance à l'usure en dépouille. La plage des épaisseurs testées était comprise entre 1 et 29 μm selon la méthode de dépôt (PVD ou CVD), pour des vitesses de coupe comprises entre 34.8 et 335 m/min, des avances entre 0.15 et 0.25 mm/tr et des profondeurs de passe entre 0.5 et 2mm. Le matériau de la pièce est différent dans chaque cas. Les résultats obtenus sont assez dispersés. Dans les travaux de Posti et Nieminen ;la résistance à l'usure de l'outil augmente continuellement avec l'augmentation de l'épaisseur du revêtement. Dans les travaux de Kim , la durée de vie de l'outil était plus longue avec une épaisseur comprise entre 7.5 et 10.5 μm , et dans ceux de Cheng], la résistance à l'usure en dépouille augmentait avec l'épaisseur du revêtement jusqu'à 6 μm et diminuait drastiquement avec une épaisseur de revêtement de 10 μm .

Selon Tuffy, lorsque l'épaisseur du revêtement augmente, la durée de vie de l'outil augmente aussi jusqu'à ce qu'une épaisseur de revêtement critique soit atteinte. Ceci est bien qui montre l'effet de l'épaisseur du revêtement de TiN sur la performance d'usinage des substrats en WC. Une fois que cette épaisseur critique est dépassée, l'augmentation de l'énergie de déformation (vérifiée par XRD4) dans le revêtement annule l'effet d'une augmentation supplémentaire de l'épaisseur du revêtement entraînant ainsi une diminution de la durée de vie de l'outil.

Les revêtements à faible épaisseur diminuent le coefficient de diffusion et le coefficient de solubilité de l'outil, diminuant ainsi l'usure. Par conséquent, le revêtement a une solubilité beaucoup plus faible dans la pièce que le substrat 'WC' lui-même. Il est clair que l'augmentation du nombre des couches de revêtement augmente la résistance à l'usure. De plus, la combinaison de différents matériaux en structure stratifiée donne un revêtement avec de bonnes propriétés mécaniques, d'usure et d'oxydation.

Cependant, les revêtements multicouches ont de meilleures propriétés mécaniques (dureté, ténacité, adhérence) que les revêtements monocouches, grâce au grand nombre d'interfaces présentes dans une telle structure, limitant la propagation des fissures.

Une étude faite par Ducros et Sanchette compare différents types de revêtements.

Le revêtement nano-couche (TiN-ALTiN) a montré une meilleure résistance à l'usure, suivi par le revêtement multicouche en CVD (Ti(C, N)/Al₂O₃-TiN). Cependant, ce revêtement n'a pas pu empêcher le mécanisme d'usure par adhésion conduisant à la formation de l'arête rapportée sur la face de coupe.

IV.6. Comparaison entre forêt revêtu et un autre non revêtu

Le choix des matériaux d'outils et de leurs revêtements est important. Il dépend des différents

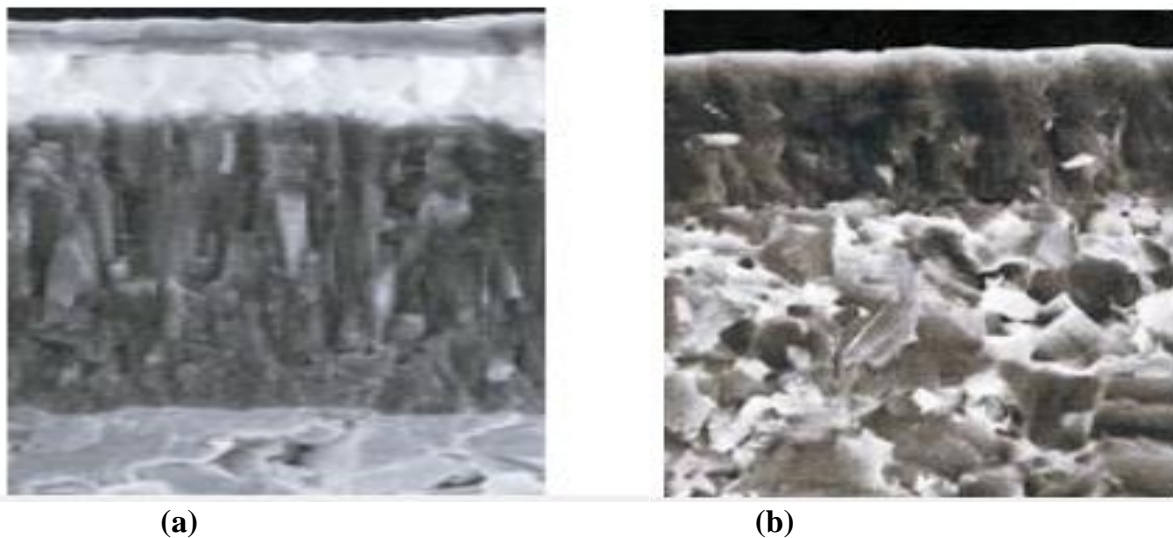


Figure IV.1. Image réalisée avec un MEB d'un outil revêtu avec trois couches de revêtement (a) puis une seule couche[30]

L'importance et l'efficacité des revêtements, ont été étudiées par plusieurs auteurs. Tönshoff et al. ont comparé les performances des forets revêtus (TiN et TiAlN), par rapport à un autre non revêtu. Les courbes d'évolution de la largeur moyenne de la bande d'usure en dépouille VBc Figure 1 pendant le perçage montrent l'efficacité des revêtements. Harris et al.

ont étudié la performance de plusieurs types de revêtements (monocouche et multicouches) pendant le perçage à sec de l'acier.

Ils ont montré Figure 14 qu'un bon revêtement peut augmenter d'une manière significative la durée de vie de la forêt (de 750 à 2250 trous).

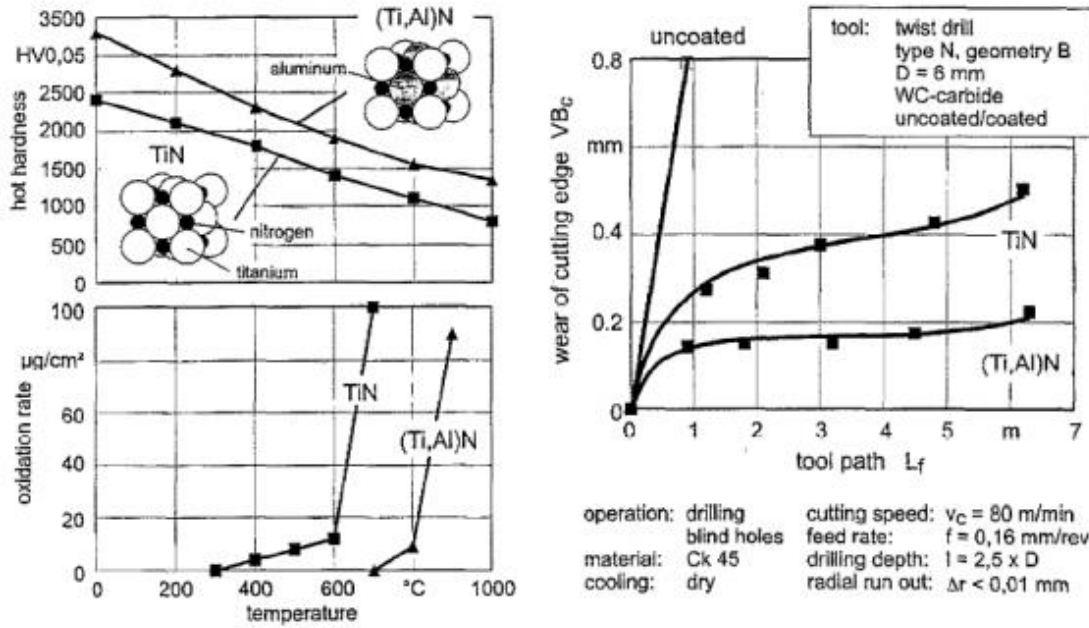


Figure IV.2. L'évolution de VBc pendant le perçage avec des forets revêtus et sans revêtement.[33]

IV.7.RESULTATS OBTENUS

Après avoir étudié les travaux réalisés par les chercheurs aux sujets des outils de coupe, notamment le foret cylindrique c'est à dire les matériaux utilisés pour le revêtement des forets cylindrique, nous avons abouti les résultats suivants :

Pour les forets revêtus, une forte augmentation de durée de vie des outils, et aussi un changement au niveau de la structure, ensuit la résistance de l'outil durant l'usinage .un bon état du surface de la pièce usiné.

Nous avons fait une suite de recherche sur les matériaux utilise pour le revêtement, comme la combinaison entre des vanadiums et le molybdène, ce genre de matériaux a des caractéristiques mécaniques très élevées, par exemple, la résistance à des chaleurs et aussi formation des carbure donnent une grande dureté aux forets revêtis.

CONCLUSION

Le but de cette étude est d'améliorer les propriétés mécaniques des outils de coupe (Forêt), nous avons utilisé la pulvérisation magnétron pour l'obtention des couches de revêtement..

L'élaboration des revêtements des outils de coupe est réalisée avec le procédé (PVD).

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 de la dureté montrent une amélioration très claire de cette dernière dans le sens de l'évolution de la structure de revêtement.

Nous avons enregistré après comparaison des outils revêtus aux outils non revêtus soumis aux travaux d'usinage, une nette amélioration de la résistance à l'usure est remarquée.

Les opérations d'usinage réalisées aux différentes vitesses de coupe, montrent que le critère d'usure 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.

Références bibliographiques

- [1] Komanduri R., Schroeder T., Hazra J., Turkovich (von) B.F., Flom D.G. – On the catastrophic Shear Instability in High-Speed Machining of an AISI 4340 Steel – Journal of Engineering for Industry – Vol.104, p.121-131, may (1982).
- [2] Y. Shao, J. Paul, Thin Solid Films 238 (1994) 8.
- [3] "Cours d'obtention des couches minces", Vol. 3, Société Française du Vide (SFV)
- [4] Richardt A., Durand A.M., *Editions In Fine (1995) ISBN 2-84046-038-6, pp. 145-150.*
- [5] A. Richard, A.M. Durand, "Pratique du vide et des dépôts des couches minces", Ed. IN FINE, Paris 1995
- [6] Jun PENG, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'rts et Métiers, n°432, 2006, pp12-13.
- [7] Jun PENG, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'rts et Métiers, n°432, 2006, pp12-13.
- [8] Norme Internationale ISO 3685-1977 (F), Tool-life testing with single-point turning tools, PP.5-15, première Edition (1977).
- [9] Bodart .E « Une méthode rapide de mesure de l'usinabilité et les essais de longue durée » CIRP ANNALES, pp.261-263, (09/1990)
- [10] François BAGUR "Matériaux pour outils de coupe" Techniques de l'ingénieur, BM7 080 - 1
- [11] Mohamed Elbah , Mohamed Athmane Yallese and all, Comparative assessment of wiper and conventional ceramic tools on surface roughness in hard turning AISI 4140 steel, Measurement, Vol 46, pp 3041–3056 Feb 2013
- [12] H. Aouici, M.A. Yallese, B. Fnides, T. Mabrouki, Machinability investigation in hard turning of AISI H11 hot work stwith CBN tool, Mechanika 6 (86) (2010) 71–77.
- [13] **C. BOURNICON**, "Sollicitations et modes d'endommagement des outillages à chaud", *Traitement Thermique*, **246**, 1991, pp. 70-77.
- [14] **J.Â. GAVEN**, "Tool performance of aluminium die-casting dies", Proceedings of the conference "Tools for die casting", Sweden, 26-28 September 1983, pp. 267-289.

- [15] G. PRIMON, J. BEGUINOT, L. CADIOU, "Contribution à la mise au point du traitement thermique de recuit sur acier à outils pour travail à chaud de type Z 38 CDV 5 (AISI H11)", *Traitement Thermique*, **217**, 1988, pp. 13-15.
- [16] M. SIAUT, "Evolution du choix des aciers spéciaux destinés à la fabrication d'empreintes pour injection d'alliages légers", *Rapport interne Aubert & Duval*, 1994.
- [17] Norme Française NF A 04-102, "Produits sidérurgiques : détermination de la grosseur du grain ferritique ou austénitique des aciers", AFNOR, novembre 1980.
- [18] M. SIAUT, "Traitement thermique des aciers Z 38 CDV 5 pour moules sous pression d'alliages légers et optimisation des propriétés d'emploi", *Traitement Thermique*, **217**, 1988, pp. 21-26.
- [19] Z. Hu, J. XIAO, "Cyclic softening characteristics and mechanism of hot work die steels during low-cycle fatigue", in "Fatigue 90", Proceedings of the 4th, international conference on fatigue and fatigue thresholds, Honolulu, 1990, pp. 469-474.
- [20] Kone F, Czarnota C, Haddag B, Nouari M. Finite element modelling of the thermo-mechanical behavior of coatings under extreme contact loading in dry machining. *Surf Coat Technol* 2011;205:3559–66. [
- [21] Grzesik W. Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications. Elsevier; 2008.
- [22] Holmberg K, Mathews A. Coatings tribology: a concept, critical aspects and future directions. *Thin Solid Films* 1994;253:173–8.
- [23] Donnet C, Erdemir A. Historical developments and new trends in tribological and solid lubricant coatings. *Surf Coat Technol* 2004;180:76–84.
- [24] Oliveira SA, Bower AF. An analysis of fracture and delamination in thin coatings subjected to contact loading. *Wear* 1996;198:15–32.

- [25] Rech J. Influence of cutting tool coatings on the tribological phenomena at the tool–chip interface in orthogonal dry turning. *Surf Coat Technol* 2006;200:5132–9.
- [26] Grzesik W. The role of coatings in controlling the cutting process when turning with coated indexable inserts. *J Mater Process Technol* 1998;79:133–43.
- [27] Grzesik W. An integrated approach to evaluating the tribo-contact for coated cutting inserts. *Wear* 2000;240:9–18.
- [28] Grzesik W, Zalisz Z, Nieslony P. Friction and wear testing of multilayer coatings on carbide substrates for dry machining applications. *Surf Coat Technol* 2002;155:37–45.
- [29] Thakur A, Gangopadhyay S, Maity KP, Sahoo SK. Evaluation on effectiveness of CVD and PVD coated tools during dry machining of Incoloy 825. *Tribol Trans* 2016;59:1048–58.
- [30] MacGinley T, Monaghan J. Modelling the orthogonal machining process using coated cemented carbide cutting tools. *J Mater Process Technol* 2001;118:293–300.
- [31] Rech J. Contribution à la compréhension des modes d’actions tribologiques et thermiques des revêtements en usinage. Application au cas du taillage de dentures à la fraise-mère à grande vitesse. Arts et Métiers ParisTech, 2002.
- [32] Rech J, Kusiak A, Battaglia JL. Tribological and thermal functions of cutting tool coatings. *Surf Coat Technol* 2004;186:364–71.
- [33] Uzun İ, Aslantas K. Numerical simulation of orthogonal machining process using multilayer and single-layer coated tools. *Int J Adv Manuf Technol* 2011;54:899–910.
- [34] Grzesik W, Nieslony P. Prediction of friction and heat flow in machining incorporating thermophysical properties of the coating–chip interface. *Wear* 2004;256:108–17.
- [35] Grzesik W. The influence of thin hard coatings on frictional behaviour in the orthogonal cutting process. *Tribol Int* 2000;33:131–40.
- [36] Grzesik W, Van Luttervelt CA. An investigation of the thermal effects in orthogonal cutting associated with multilayer coatings. *CIRP Ann-Manuf Technol* 2001;50:53–6.

[37] Grzesik W, Nieslony P. Physics based modelling of interface temperatures in machining with multilayer coated tools at moderate cutting speeds. *Int J Mach Tools Manuf* 2004;44:889–901.

[38] Zhang S, Liu Z. An analytical model for transient temperature distributions in coated carbide cutting tools. *Int Commun Heat Mass Transf* 2008;35:1311–5.

[39] Kusiak A, Battaglia J-L, Rech J. Tool coatings influence on the heat transfer in the tool during machining. *Surf Coat Technol* 2005;195:29–40.

[40] Yen Y-C, Jain A, Chigurupati P, Wu W-T, Altan T. Computer simulation of orthogonal cutting using a tool with multiple coatings. *Mach Sci Technol* 2004;8:305–26.

RESUME :

Les traitements de protection, à base de couches minces dures, de type nitrures des métaux de transition, ont été développés en vue d'améliorer la tenue de service d'outils destinés à l'usinage .

En raison des sollicitations sévères auxquelles l'arête est soumise, ces revêtements doivent avoir de bonnes propriétés physicochimiques, mécaniques et tribologiques.

Et en se basant sur les études qu'avaient été obtenues, nous avons étudié les principales caractéristiques du système binaire VN. On a remarqué que des films minces pouvaient apporter des améliorations significatives en termes de résistance à l'usure et qu'une préparation préalable par pré-rodage était fortement conseillée pour permettre une meilleure adhérence de la couche.

Abstract

The protective treatments, based hard thin layers of nitrides such transition metals have been developed to improve the holding of tools for machining department. Due to severe stresses to which the edge is subjected, these coatings must have good physicochemical properties, mechanical and tribological.

And based on studies that had been obtained, we studied the main characteristics of the binary system VN. It was noted that thin films could make significant improvements in wear resistance, and advance preparation by pre-running was strongly advised to allow for better adhesion of the layer.

ملخص

المعالجات الوقائية ذات أساس طبقات رقيقة صلبة من نوع نتريدات المعادن الإنتقالية ، تطورت بهدف تحسين الأدوات أثناء التشغيل.

بسبب الضغوط الشديدة التي تتعرض لها الحافة، هذه الطلاءات ويجب أن تتوفر على خصائص فيزيائية وميكانيكية جيدة.

وبناء على الدراسات التي تم الحصول عليها، قمنا بدراسة الخصائص الرئيسية للنظام ثنائي VN و لوحظ أن الأغشية الرقيقة يمكن لها إدخال تحسينات كبيرة في مقاومة التآكل، والتحضير المسبق من قبل ما قبل التشغيل يسمح بالتصاق أفضل للطبقة.