

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



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
Laboratoire des Matériaux Minéraux et Composites

THESE

PRESENTÉE POUR OBTENIR LE DIPLOME DE DOCTORAT EN MECANIQUE

Par

Hamid AKNOUCHE

**Etude de l'usure des outils de coupe traités
dans le domaine de l'usinage du bois**

Soutenue le 14 / 04 / 2009, devant le jury :

Mr	Remy Marchal	Prof. Arts et Métiers ParisTech, CER de Cluny, France.....	Président
Mr	Abdellatif Zerizer	Prof. Université de Boumerdes.....	Rapporteur
Melle	Corinne Nouveau	M.C.F. Arts et Métiers ParisTech, CER de Cluny, France....	Co-rapporteur
Mr	Bertrand Charrier	M.C.F. CNRS, Université de Pau, France.....	Examineur
Mr	Abdelillah Hakam	Prof. Université Mohamed V, Rabat, Maroc.....	Examineur
Mr	Boudjemaa Bezzazi	Prof. Université de Boumerdes.....	Examineur

Boumerdes 2009

Remerciements

Comme le veut la tradition, je vais tenter de satisfaire au difficile exercice de la page des remerciements, peut-être la tâche la plus ardue de ces années de thèse. La difficulté tient plutôt dans le fait de n'oublier personne. C'est pourquoi, je remercie par avance ceux dont le nom n'apparaît pas dans cette page et qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre. Ils se reconnaîtront.

Ce travail a été effectué pour une grande partie au LABOMAP dirigé par Monsieur le Professeur Michel LAMBERTIN, qui mérite honneur et respect.

Un grand merci à Mohamed Tahar ABADLIA, Professeur et Directeur du LMMC pour son accueil, sa sympathie et ses qualités humaines.

Mes remerciements à Remy MARCHAL, Professeur ENSAM Paritech Cluny, France, pour ses conseils avisés, ses compétences scientifiques, son soutien chaleureux, et qui me fait l'honneur de présider mon jury de thèse

Je remercie Monsieur ZERIZER Abdellatif, Professeur, d'avoir proposé le sujet et accepté la direction de cette thèse après m'avoir aidé et encouragé à plusieurs reprises, dans la réalisation de ce travail.

Je remercie également Mademoiselle Corinne NOUVEAU, Maître de conférences. ENSAM Paritech, pour l'aide précieuse et la patience dont elle a fait preuve lors des différentes applications dans son laboratoire mais aussi pour avoir accepté de codiriger cette thèse.

Ma gratitude à Abdelillah HAKAM, Professeur à l'Université Mohamed V, Agdal Maroc, Boudjemaa BEZZAZI, Professeur à l'UMBB et Bertrand Charrier, Maître de conférences, HDR, Sylvadour, Université de Pau, pour le temps précieux qu'il m'ont accordé en acceptant d'être mes examinateurs et les remarques très utiles qu'il ont fait et qui m'ont permis d'enrichir ce manuscrit.

Pour terminer, Je tiens à remercier les autorités compétentes de l'UMBB pour m'avoir fait bénéficier d'une bourse m'ayant permis de finaliser cette thèse.

Merci à ma famille et mes amis pour leur présence à mes côtés, ils découvrent aujourd'hui mon travail de recherche

Dédicaces

Dédicaces

A mes parents

A ma femme

A toute ma famille

Je dédie ce mémoire

SOMMAIRE

Partie 1 : Etude bibliographique

INTRODUCTION GENERALE	1
I. MATERIAU BOIS ET SON USINAGE.....	3
II. USINAGE DU BOIS	5
II.1 COUPE DU BOIS	5
II.1.1. <i>Coupe orthogonale</i>	5
II.1.1.1 Principe.....	5
II.1.1.2. Efforts induits lors de la coupe orthogonale du bois	7
II.1.1.3. Formation du copeau en direction 90°-0°	8
II.1.2. <i>Coupe oblique</i>	10
II.1.2.1. Principe.....	10
II.1.2.2. Efforts induits lors de la coupe oblique.....	13
II.1.3. <i>Coupe périphérique</i>	15
II.1.3.1. Principe.....	15
II.1.3.2. Formation du copeau en coupe périphérique.....	15
II.1.3.3. Efforts induits lors de la coupe périphérique du bois	15
II.1.3.4. Coupe hélicoïdale.....	16
II.4. TECHNIQUES D'USINAGE EXPERIMENTAL	20
II.4.1. <i>Déroutage</i>	20
II.4.2. <i>Défonçage</i>	21
III. CONCLUSION	22
IV. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	24
I. L'OUTIL DE COUPE.....	27
I.1. OUTILS DE COUPE POUR LE BOIS	27
I.1.1. <i>Géométrie des outils de coupe destinés à l'usinage bois</i>	27
I.1.2. <i>Types de matériaux usinant</i>	29
I.1.2.1. Les aciers.....	29
I.1.2.2. Les alliages chrome-cobalt.....	30
I.1.2.3. Les carbures de tungstène.....	31
I.1.2.4. Le diamant polycristallin.....	33
I.1.2.5. Les céramiques.....	35
I.2. PROPRIETES DES DIFFERENTS MATERIAUX DE COUPE	35
II.1. MECANISMES D'ENDOMMAGEMENT DES OUTILS	37
II.1.1. <i>Déformation plastique et fatigue</i>	37
II.1.2. <i>Usure par abrasion</i>	38
II.1.3. <i>Usure par adhésion : arête rapportée et attrition</i>	38
II.1.4. <i>Usure par diffusion</i>	39
II.2. CAS DES OUTILS DE COUPE DESTINES A L'USINAGE BOIS.....	41
II.2.1. <i>Endommagement des outils destinés en première transformation (usinage de bois vert)</i>	41
II.2.2. <i>Endommagement des outils destinés en seconde transformation (usinage bois et dérivés)</i>	44
III. FACTEURS GENERAUX INFLUENÇANT LE TRAVAIL DE L'OUTIL DANS L'USINAGE DU BOIS	45
IV. CONCLUSION	46
V. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	48
INTRODUCTION	50

I. CLASSIFICATION DES MATERIAUX DURS	50
II. GENERALITES SUR LES COUCHES MINCES.....	52
II.1. FORMATION D'UNE COUCHE MINCE	52
II.2. CLASSIFICATION DES TECHNIQUES DE DEPOT	53
II.3. CHOIX D'UNE TECHNIQUE DE DEPOT DE COUCHES MINCES	54
III. DEFINITION D'UN PLASMA	55
IV. TECHNIQUES DE DEPOTS DE COUCHES MINCES	56
IV.1. EVAPORATION.....	56
IV.2. PULVERISATION CATHODIQUE.....	57
IV.2.1. Pulvérisation magnétron.....	60
IV.2.2. Système micro-ondes.....	62
V. DEPOTS CHIMIQUES EN PHASE VAPEUR (C.V.D.- P.A.C.V.D.)	66
VI. LES REVETEMENTS POUR OUTILS COUPANTS	69
VII. LES TRAITEMENTS STRUCTURELS ET SUPERFICIELS (TRAITEMENTS THERMOCHIMIQUES)	72
VII.1. LA NITRURATION	72
VII.1.2. La nitruration par implantation ionique.....	73
VII.1.3. Système d'Implantation ionique par immersion plasma.....	74
VIII. REVETEMENTS UTILISES DANS LE DOMAINE D'USINAGE BOIS.....	75
IX. CONCLUSION	77
X. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	78

Partie 2: Experimentation

I.1. PROCEDURES D'ELABORATION DES FILMS MINCES	81
I.1.1. Configuration de l'enceinte du bâti dual magnétron	82
I.1.2. Substrats et protocole de dépôts.....	83
II.1. LE SYSTEME DE NITRURATION IONIQUE	83
II.1.2. Traitement thermique.....	85
II.1.3. Conditions de nitruration.....	85
II.2. ETUDE DE LA STABILITE THERMIQUE DES FILMS	85
II.3. TECHNIQUES ET MOYENS DE CARACTERISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES	86
II.3.1. Microscopie électronique à balayage (MEB)	87
II.3.2. Spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS)	89
II.3.3. Diffraction de rayons X (DRX)	90
II.4. TECHNIQUES DE CARACTERISATIONS MECANIQUES	91
II.4.1. Contraintes résiduelles des films	92
II.4.2. Adhérence	95
II.4.3. Dureté	97
II.4.4. Usure.....	100
II.5. ESSAIS D'USINABILITE	103
II.5.1. Opérations de déroulage.....	103
II.5.2. Opérations de défonçage	106
III. ANALYSE DE LA QUALITE DES SURFACES USEEES.....	110
IV. CONCLUSION	111
IV. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	112
I. DEPOTS DE FILMS DE CRALN PAR PULVERISATION MAGNETRON	113

Sommaire

I.1. PROPRIETES PHYSICOCHIMIQUES	114
I.1.1. Analyses chimiques par EDS.....	114
I.1.2. Variation de l'épaisseur des couches de CrAlN.....	116
I.1.3. Morphologie des couches.....	117
I.1.4. Analyses structurales par DRX.....	117
I.2. PROPRIETES MECANQUES	118
I.2.1. Contraintes résiduelles.....	118
I.2.2. Dureté.....	119
I.2.3. Coefficient de frottement.....	120
I.2.4. Essais sur Calotest sur les revêtements CrAlN.....	121
I.3. ETUDE DE LA STABILITE THERMIQUE	121
I.3.1. Analyses structurales par DRX.....	121
I.3.2. Analyses de composition par EDS.....	124
II. DEPOTS DE FILMS DE CRSIN PAR PULVERISATION MAGNETRON.....	128
III. DEPOTS DE FILMS DE TIALN PAR PULVERISATION MAGNETRON.....	128
IV. DEPOTS DE FILMS (CRALN/CRN) PAR PULVERISATION MAGNETRON.....	129
V. APPLICATION DES TRAITEMENTS DUPLEX POUR LES ACIERS 90 CMV8	130
V.1. PREPARATION DES SUBSTRATS	130
V.2. CARACTERISATION DES ECHANTILLONS NITRURES	131
VI. TEST D'USINAGE BOIS	136
VI.1. DEROULAGE.....	136
VI.1.1. Recul de l'arête.....	136
VI.1.2. Acquisition des efforts.....	137
VI.1.3. Test de qualité des surfaces déroulées.....	139
VI.1.4. Test de chocs.....	141
VI.2. DÉFONÇAGE	144
VI.2.1. Résultats de l'usure des outils revêtus en CrAlN.....	144
VI.2.2. Résultats d'usure pour les outils en CrSiN.....	145
VI.2.3. Résultats d'usure pour outils en TiAlN.....	145
VI.2.4. Usure comparative entre les trois revêtements.....	146
VI.2.5. Essais de défonçage sur des outils en aciers	147
VII. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	149
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES.....	151
ANNEXES	

Liste des figures

Partie1 : Etude bibliographique

Chapitre I : Matériau bois et son usinage

Figure 1.1.1: Structure du tronc dans l'arbre.....	4
Figure 1.1.2: Principaux axes du bois.....	4
Figure 1.1.3 : Principaux types de coupe orthogonale.....	6
Figure 1.1.4 : Géométrie de la coupe orthogonale et composante des forces de coupe.....	7
Figure 1.1.5 : Copeau de type I obtenu en direction $90^\circ - 0^\circ$	8
Figure 1.1.6 : Copeau de type II, obtenu en direction $90^\circ - 0^\circ$	9
Figure 1.1.7 : Copeau de type III, obtenu en direction $90^\circ - 0^\circ$	9
Figure 1.1.8 : Schéma montrant la position de l'arête tranchante.....	10
Figure 1.1.9 : Variation du rayon de l'arête tranchante en fonction de l'angle oblique (i).....	11
Figure 1.1.10 : Variation de l'angle d'attaque du couteau en fonction de l'angle oblique (i)...	11
Figure 1.1.11 : Coupe du bois en utilisant une barre de pression et un couteau fixe.....	12
Figure 1.1.12 : Chaîne type de production de contreplaqué.....	14
Figure 1.1.13 : Technique de défonçage.....	15

Chapitre II : L'outil de coupe

Figure 1.2.1 : Les angles de l'outil de coupe.....	19
Figure 1.2.2 : Influence de l'angle d'attaque sur les efforts de coupe suivant les directions de coupe.....	20
Figure 1.2.3 : Frittage du carbure de tungstène.....	23
Figure 1.2.4 : Outils de défonçage à plaquettes carbure de tungstène.....	24
Figure 1.2.5 : Fabrication des plaquettes en diamant.....	25
Figure 1.2.6 : Exemples d'outils diamant utilisés en industrie.....	26
Figure 1.2.7 : Usure présentée comme une fonction de la température.....	28
Figure 1.2.8 : Usure par abrasion.....	29
Figure 1.2.9 : Coupe orthogonale d'acier.....	30
Figure 1.2.10 : Mécanismes d'usure par diffusion.....	31
Figure 1.2.11 : Cratère formé par usure par diffusion.....	31
Figure 1.2.12 : Structure du bois.....	33
Figure 1.2.13 : Objets trouvés dans le bois.....	33
Figure 1.2.14 : Répartition en pourcentage des coûts de production des couteaux de broyage.....	34

Chapitre III : Traitement de surface pour outil de coupe

Figure 1.3.1 : Classification des matériaux durs.....	40
Figure 1.3.2. Gamme d'épaisseurs réalisable suivant les différentes techniques de dépôt.....	45
Figure 1.3.3. Diagrammes schématiques des techniques d'évaporation.....	46
Figure 1.3.4. Diagrammes schématiques de techniques de dépôt physique.....	47

Liste des figures

Figure 1.3.5 : A/ Principe de la pulvérisation.....	48
Figure 1.3.6 : Trajectoires électroniques.....	49
Figure 1.3.7 : Magnétron plan circulaire conventionnel.....	50
Figure 1.3.8 : Exemples d'arrangements de cathodes magnétron.....	50
Figure 1.3.9 : Schéma de principe du réacteur associant magnétron et systèmes micro-ondes.....	52
Figure 1.3.10 : Schéma de principe du réacteur PLD.....	53
Figure 1.3.11 : Mise en situation des 4 zones caractérisant le contact du triplet Pièce Outil Copeau.....	57
Figure 1.3.12 : Zone des sollicitations du couple outil/matière.....	59
Figure 1.3.13 : Cahier des charges d'un revêtement.....	60
Figure 1.3.14 : Principe de l'implantation ionique.....	61
Figure 1.3.15 : Système magnétron combiné à la PIII.....	65

Partie2 : Expérimentation

Chapitre1 : Elaboration et expérimentation des outils de coupe traités

Figure.2.1.1 Bâti de pulvérisation magnétron.....	71
Figure.2.1.2 : Intérieur de l'enceinte de dépôts.....	71
Figure 2.1.3. Le four BMI B83 TIC.....	73
Figure.2.1.4 : Dilatomètre.....	74
Figure.2.1.5 : Système d'acquisition.....	75
Figure.2.1.6 : Cycle thermique.....	75
Figure.2.1.7: MEB "Jeol JSM-5900 LV.....	76
Figure.2.1.8 : Images MEB.....	77
Figure.2.1.9 : Spectre EDS d'une couche de CrN.....	78
Figure. 2.1.10 : Détecteur de fuites ASM 10.....	78
Figure. 2.1.11 : Condition de Bragg.....	79
Figure. 2.1.12 : Configuration Bragg-Brentano.....	80
Figure. 2.1.13 : Déformation de l'ensemble film/substrat.....	83
Figure. 2.1.14 : Dispositif de mesure des rayons de courbure.....	84
Figure. 2.1.15 : Courbe caractéristique obtenue après Scratch-test.....	84
Figure. 2.1.16 : Micrographie de l'endommagement d'un film.....	85
Figure. 2.1.17 : Courbe caractéristique de charge/décharge.....	86
Figure. 2.1.18 : Section d'une indentation.....	87
Figure. 2.1.19 : Nanoduromètre NHT.....	88
Figure. 2.1.20 : Courbe représentant la nanodureté.....	88
Figure. 2.1.21 : Tribomètre en configuration pion plan.....	89
Figure. 2.1.22 : Exemple de cratère obtenu par Calotest.....	90
Figure 2.1.23 : Micro dérouleuse et procédé de déroulage.....	92
Figure. 2.1.24 : Outils de déroulage et patins de frottements.....	93
Figure. 2.1.25 : Rondelles de MDF.....	93
Figure. 2.1.26 : Mesure du recul de l'arête d'un couteau de déroulage.....	94
Figure. 2.1.27: Défonceuse 3 axes à commande numérique.....	95
Figure. 2.1.28 : Outil de fraisage.....	95
Figure. 2.1.29 : Principe du défonçage.....	96

Figure. 2.1.30 : Mesure de l'usure de l'arête des plaquettes carbures.....	97
Figure. 2.1.31 : exemple d'acquisition de mesure de l'usure sur microscope optique OLYMPUS.....	97
Figure. 2.1.32 : Profilomètre optique Wyko.....	98

Chapitre2 : Résultats et interprétations

Figure. 2.2.1 : Spectres EDS des films CrAlN déposés sous différentes tensions appliquées à la cible d'aluminium.....	101
Figure. 2.2.2 : Pourcentage atomique des différents éléments en fonction de la tension appliquée à la cible : (a) d'aluminium, (b) de chrome.....	102
Figure. 2.2.3 : Variation de l'épaisseur des films CrAlN.....	103
Figure. 2.2.4 : Diffractogrammes des films de CrAlN.....	104
Figure. 2.2.5 : Morphologie des films de CrAlN.....	105
Figure. 2.2.6 : Contraintes résiduelles	105
Figure. 2.2.7 : Dureté et module d'Young.....	106
Figure. 2.2.8 : Coefficient de frottement.....	107
Figure. 2.2.9 : Morphologie des surfaces après tests de pion disque.....	108
Figure. 2.2.10 : Volume d'usure sur Calotest des revêtements CrAlN.....	108
Figure.2.2.11: Diffractogrammes des films CrAlN déposés avec différents pourcentages d'Al avant recuit.....	109
Figure. 2.2.12: Diffractogrammes des films CrAlN déposés avec différents pourcentages d'Al recuits à 600°C.....	109
Figure.2.2.13 : Diffractogrammes des films CrAlN déposés avec différents pourcentages d'Al recuits à 800°C.....	110
Figure.2.2.14: Diffractogrammes des films CrAlN déposés avec différents pourcentages d'Al recuits à 1000°C.....	111
Figure.2.2.15 : Pourcentage atomique des différents éléments en fonction de la température de recuit pour les films CrAlN déposés avec 5% d'Al.....	112
Figure.2.2.16: Pourcentage atomique des différents éléments en fonction de la température de recuit pour les films CrAlN déposés avec 13% d'Al.....	112
Figure.2.2.17 : Pourcentage atomique des différents éléments en fonction de la température de recuit pour les films CrAlN déposés avec 28 % d'Al.....	113
Figure.2.2.18 : Pourcentage atomique des différents éléments en fonction de la température de recuit pour les films CrAlN déposés avec 30% d'Al.....	113
Figure.2.2.19: Pourcentage atomique des différents éléments en fonction de la température de recuit pour les films CrAlN déposés avec 45% d'Al.....	114
Figure.2.2.20: Pourcentage atomique des différents éléments en fonction de la température de recuit pour les films CrAlN déposés avec 51% d'Al.....	114
Figure.2.2.21: Représentation de la variation de la dureté.....	117
Figure.2.2.22: Cycle de trempe revenu pour l'acier 90CrMoV8.....	118
Figure.2.2.23: Cycle de nitruration à 500°C pendant 8h.....	118
Figure.2.2.24: Diffractogrammes de l'acier 90CMV8.....	120
Figure.2.2.25: Spectre EDS en surface et au cœur des échantillons nitrurés.....	121
Figure.2.2.26: Evolution de la microdureté en fonction de la profondeur de la couche nitrurée et du temps de nitruration.....	122

Liste des figures

Figure.2.2.27: Empreinte de la micro dureté d'un échantillon d'acier 90CMV8 nituré.....	122
Figure.2.2.28: Recul de l'arête en fonction de la longueur usinée.....	124
Figure.2.2.29: Effort de coupe en fonction de la longueur de coupe.....	124
Figure.2.2.30: Exemple acquisitions pendant le déroulage.....	125
Figure.2.2.31: Evolution des efforts de coupe en fonction de l'usure des outils.....	125
Figure.2.2.32: coefficient de frottement métal/bois.....	126
Figure.2.2.33: Exemple de relevé topographique d'une surface usinée.....	127
Figure.2.2.34 : Rugosité moyenne.....	127
Figure.2.2.35 : Ablocage de la pièce pendant l'essai de chocs.....	128
Figure.2.2.36 : Efforts moyens pendant les essais de chocs.....	129
Figure.2.2.37 : Micrographie des outils de coupe avant et après le choc.....	129
Figure.2.2.38 : Exemple acquisitions pendant le test de choc.....	130
Figure.2.2.39 Evolution de l'usure des outils CrAlN en fonction de la longueur d'usinage.....	131
Figure.2.2.40 : Evolution de l'usure des outils CrSiN en fonction de la longueur d'usinage.....	132
Figure.2.2.41 : Evolution de l'usure des outils TiAlN en fonction de la longueur d'usinage.....	132
Figure.2.2.42 : Evolution de l'usure des outils TiAlN, CrN, CrSiN et nu en fonction de la longueur d'usinage.....	133
Figure.2.2.43 : Évolution des vitesses d'usure en fonction de la longueur usinée.....	133
Figure.2.2.44 : Evolution de l'usure des outils en acier revêtu et non en fonction de la longueur d'usinage.....	134
Figure.2.2.45 : Micrographie d'outils revêtus en aciers après 600m d'usinage.....	134

Liste des tableaux

Partie 1 : Etude bibliographique

Chapitre I : Matériau bois et son usinage

Tableau 1.1.1: Propriétés mécaniques des bois.....	3
--	---

Chapitre 2 : L'outil de coupe

Tableau 1.2.1 : Les qualités des carbures pour les outils de bois.....	23
Tableau 1.2.2 : Caractéristiques générales des matériaux de coupe.....	27
Tableau 1.2.3 : Propriétés des matériaux de coupe.....	28

Chapitre 3 : Traitement de surface pour outil de coupe

Tableau 1.3.1. Propriétés mécaniques et physiques des matériaux durs.....	41
Tableau 1.3.2. Caractéristiques principales des méthodes de dépôt sous vide.....	44
Tableau 1.3.3. Avantages et inconvénients des procédés P.V.D. et C.V.D.....	55

Partie 2 : Expérimentation

Chapitre I : Elaboration et expérimentation des outils de coupe traités

Tableau 2.1.1 : Caractéristiques techniques du MDF usiné.....	93
Tableau 2.1.2 : Paramètres de coupe retenus pour le déroulage du MDF.....	94
Tableau 2.1.3 : Paramètres de coupe en défonçage.....	96

Chapitre II : Résultats et interprétations

Tableau.2.2.1. Conditions de dépôts de CrAlN.....	101
Tableau.2.2.2 : Conditions de dépôts de CrSiN.....	115
Tableau.2.2.3 : Caractéristiques des films CrSiN.....	115
Tableau.2.2.4 : Conditions de dépôts de TiAlN réalisés en industrie.....	116
Tableau. 2. 2.5 : Résultats des valeurs de rugosité.....	127
Tableau.2.2.6 : vitesses d'usure des outils revêtus.....	133

Liste des annotations

α : angle d'attaque
 γ : angle de dépouille
 β : angle du couteau
 f : force résultante
 f_N : force normale
 f_p : force parallèle
 e : épaisseur de coupe
 r_e : rayon de courbure de l'arête tranchante
 r_c : rayon de l'arête tranchante
 i : angle d'inclinaison de l'arête tranchante
 α_e : angle d'attaque effectif
 h : hauteur de l'onde d'usinage
 O : largeur de l'onde d'usinage
 A : vitesse d'alimentation du bois
 R : rayon du cercle de coupe
 $\emptyset$: angle d'hélice
 V_t : vitesse transversale de l'arête tranchante
 D : diamètre du cylindre de coupe
 Z : nombre de rangées de couteaux
 W : largeur de coupe
 F_c : force de coupe concentrée
 L : distance entre rangées adjacentes de couteaux
 N : vitesse de rotation du porte outil.
 V_c : vitesse de coupe.
 V_f : vitesse d'avance.
 d_{hkl} : distance entre deux plans réticulaires d'indice de Miller h,k,l consécutifs.
 θ : angle que forment les rayons X incidents ou diffractés avec le plan réticulaire,
 n : nombre entier appelé ordre de la réflexion.
 λ : longueur d'onde du faisceau de rayon X.
 σ_{int} : contrainte interne.
 σ_{th} : contrainte thermique.
 $\Delta\alpha$: coefficients de dilatation thermique du film.
 E_s : module d'Young du substrat.
 ν_s : coefficient de Poisson du substrat.
 e_s : épaisseur du substrat.
 e_f : épaisseur du film.
 R_0 : rayon de courbure avant dépôt.
 R : rayon de courbure après dépôt.

ملخص

تطور وسائل الإنتاج في صناعة الخشب والمنافسة الدولية المتزايدة تتطلب الربحية العالية والجديدة أين التكنولوجيا ومواد القطع هما القضايا المفتاح للإنتاجية .
في إطار صناعة الخشب، يرتبط كل جهاز بمنتج، الهدف منه هو التحكم في الظروف الناتجة عن التكاليف المالية المهمة جدا للآلات. لأفضل الظروف، لا بد التقليل من الخسائر في المادة ، وتيرة تغيير الأدوات و من تكاليف الإنتاج.

هذا البحث كان غرضه الرئيسي هو تحديد آليات الارتداء أدوات القطع في التحول الأول والثاني للأخشاب، والتوصية إلى حلول لزيادة إنتاجية أدوات القطع، بتطبيق التغليف السميكة. في الواقع، حماية الطلاء يفترض أن تكون ثابتة تجاه الكيمائية والميكانيكية والبيئية التي يتعرض لها أثناء الاستخدام.

الطلاء السميكة لا يوضع على أداة القطع لزيادة العمر ومقاومة الخدش للأداة ، وإنما لاستخدامها في تصنيع الآلات ذات السرعة العالية دون التشحيم. هذا الطلاء ثبت أنه فعال في حال شملت الدراسة الأولية لأنواع من الاطلية ، وسيلة للحصول عليه وتعديل عملية وضع المعايير. ولذلك وضعنا الطلاء ، و وصف هذه الطلاءات مكننا من رؤية تأثير على الهيكل والاستقرار الحراري والخصائص الميكانيكية و التريبولوجيكية للأفلام

اختبار الآلة للأدوات المغلفة أظهرت أن لسطح المغلف ب أعطى نتائج مثيرة للاهتمام بشأن قدرته على الصمود ضد الماء والصدمات التي تولد من العقد

في مسار العملية ، الفيلم يملك أصغر بعد ارتداء بعد 1500م من تصنيع
الكلمات الأساسية :

ارتداء. منيترون ، CrAIN ,CrSIN ,Ti والتوجيه، MDF

Résumé

L'évolution des moyens de production dans l'industrie du bois et la concurrence internationale imposent des rentabilités de plus en plus élevées où les nouvelles technologies et matériaux de coupe sont des points clés de la productivité.

Dans le contexte industrie bois, chaque machine-outil est associée à un produit donné, dont l'intérêt est de maîtriser les conditions d'usinage dues aux coûts financiers au demeurant très important des machines. Pour des conditions de rendement optimum, il est impératif que les pertes de matière et fréquence de changement d'outils soient minimisées au même titre que les coûts de production.

La présente recherche a eu comme objectif principal d'identifier les mécanismes d'usure des outils coupants dans la première et seconde transformation du bois et de préconiser des solutions afin d'augmenter la productivité des outils de coupe, par l'application des revêtements durs. En effet, un revêtement de protection est supposé être stable vis-à-vis de l'environnement chimique et mécanique auquel il est soumis durant son utilisation.

Un revêtement dur n'est pas déposé tel quel sur un outil de coupe pour accroître la durée de vie et la résistance à l'abrasion de l'outil, surtout pour des utilisations en usinage à grande vitesse sans lubrification. Ce revêtement s'avérera efficace si sa mise en œuvre inclut une étude préalable du type de revêtement, des moyens pour l'obtenir et des ajustements des paramètres du procédé d'élaboration.

De ce fait on a élaboré des revêtements CrAlN, CrSiN et TiAlN, la caractérisation de ces revêtements nous a permis de voir l'influence de l'Al sur la structure ainsi que la stabilité thermique et les propriétés mécaniques et tribologiques des films.

Les tests d'usinage des outils revêtus, ont montrés que le revêtement CrSiN a donné des résultats intéressants quant à son aptitude à résister à l'usure et aux chocs qui peuvent être générés par les nœuds.

Dans l'opération de défonçage, le film CrN possède l'usure la plus réduite après 1500m de d'usinage du MDF.

Mots clés : usure, Magnétron, CrAlN, CrSiN, TiAlN, Déroulage, Défonçage, MDF.

Abstract

The change of the production means in the industry of wood and the international competition imposes more and more elevated profitabilities where the new technologies and materials of cut are keynotes of the productivity.

In the context industry woods, every machine tool is bound to a given product, whose interest is to master the conditions of machining moreover due to the financial costs very important of the machines. For conditions of optimum yield, it is imperative that the losses of matter and frequency of alteration of tools are minimized for the same reason as the costs of production.

The present research had like main goal to identify the mechanisms of wear and tear of the cutting tools in the first and second transformation of wood and to recommend some solutions in order to increase the productivity of the tools of cut, by the application of the hard coatings.

Indeed, a protective coating is assumed to be steady opposite the chemical and mechanical environment to which it is submitted during his/its usage.

A hard coating is not deposited as is on a tool of cut to enlarge the useful life and the resistance to the abrasion of the tool, especially for usages in high-speed machining without lubrication. This coating will prove to be efficient if his/her/its bets in. Includes a preliminary survey of the type of coating, of the means to get it and the parameters of the development process.

Of this fact one elaborated of the CrAlN coatings, CrSiN and TiAlN, the characterization of these coatings permitted us of or even the Al's influence on the structure as well as the thermal stability and the mechanical qualities and tribologic of the films.

The tests of machining of the covered tools, showed that the CrSiN coating gave interesting results as for has his/her/its ability has resist to the wear and tear and the shocks that can be generated by the knots.

In the routing the CrN films possesses the most reduced wear and tear after 1500m machining of the MDF.

Keywords: Wear, Magnetron, CrAlN, CrSiN, TiAlN, Peeling, Routing, MDF.

Introduction générale

L'évolution des moyens de production dans l'industrie du bois et la concurrence internationale imposent des rentabilités de plus en plus élevées où les nouvelles technologies et matériaux de coupe sont des points clés de la productivité.

Dans le contexte industrie bois, chaque machine-outil est associée à un produit donné, dont l'intérêt est de maîtriser les conditions d'usinage dues aux coûts financiers au demeurant très importants des machines. Pour des conditions de rendement optimum, il est impératif que les pertes de matière et fréquence de changement d'outils soient minimisées au même titre que les coûts de production.

Dans la première transformation aussi bien que la seconde, l'usure d'un outil a des conséquences importantes. Pour s'en rendre compte, il suffit d'énumérer les différents coûts liés à l'usure d'un outil :

- Le temps et la matière première perdus (litiges, retours clients...),
- Les temps d'arrêt de la machine (augmentation des efforts et puissance de coupe consommée),
- Le changement d'outil (temps perdu, réglage de l'outil, fabrication de pièces d'essais),
- Le rechargement et/ou affûtage.

Cette problématique fait en sorte que de nombreuses questions sont posées sur le fonctionnement des mécanismes d'usure qui du reste, demeurent sans réponse claire du côté des industriels de la filière bois ou chercheurs dans ce domaine.

L'utilisation d'outils (carbure (WC-Co), acier rapide (high speed steel ou HSS)) présentant d'excellentes propriétés mécaniques de surface par application de revêtements durs en films minces a montré son efficacité contre l'usure abrasive et corrosive des outils.

D'autres modifications « structurelles » sont également introduites avec succès dans le marché de l'outillage telles que les traitements de nitruration et de cémentation. Cependant, il existe très peu d'exemples d'application dans le domaine de l'usinage du bois.

Les difficultés de l'usinage bois sont liées à de nombreux facteurs : faibles angles de bec et grandes dimensions d'outils, matière première hétérogène ainsi que la présence fréquente à même le bois de corps étrangers de plus grande dureté (clous, cailloux, balles de chasseurs...). Les éléments précités, conduisent à ébrécher l'arête des outils donnant des produits déclassés et de moindre qualité (état de surface, dimensions...).

Les principaux outils coupants utilisés dans l'industrie de la première transformation du bois sont les lames de scies (disques circulaires ou rubans) et les couteaux (fraisage et broyage en scierie, déroulage, tranchage). En seconde transformation, on utilise également des fraises (défonçage, profilage). Des progrès relatifs quant à l'amélioration de la durée de service des scies ont été obtenus par le brasage de pastilles en insert carbures ou le stellitage des dents. Par contre dans l'opération de déroulage, on utilise toujours des outils en acier où des solutions doivent être trouvées pour améliorer leur tenue à l'usure et la qualité des produits finis. En seconde

transformation, les carbures sont les plus utilisés, mais leur durée de service est limitée. On retrouve également des outils en acier pour le rabotage et le corroyage.

Dans ce contexte, nous avons orienté nos investigations dans le souci d'appliquer des traitements de surface aux outils de coupe en acier (opération de déroulage) et aux carbures (défonçage) du fait que l'amélioration de leurs performances reste un enjeu économique de grande importance.

L'anti-usure et l'anti-corrosion sont les premières fonctions que l'on souhaite satisfaire grâce aux traitements de surface. Mais les procédés d'élaboration des couches minces deviennent aujourd'hui multifonctionnels afin d'assurer simultanément plusieurs propriétés, tribologiques et tactiles, tenue au grippage, protection thermique, etc.

Les carbures et les nitrures des métaux de transition sont fréquemment utilisés grâce à leur réfractarité exceptionnelle et leurs remarquables propriétés mécaniques, comme leur dureté extrême. Divers procédés, tels que les dépôts physiques et chimiques en phase vapeur (PVD et CVD), permettent de produire ces revêtements sous forme de couches minces ou de multicouches.

Cette thèse est synthétisée en deux parties essentielles, la première partie composée de trois chapitres est dédiée à l'étude bibliographique.

- Le premier chapitre, une étude bibliographique relative au matériau bois et son usinabilité est détaillée, ou on retrouve les principales techniques d'usinage du bois.
- Le deuxième chapitre, une présentation des outils de coupe ainsi que les différents matériaux qui sont destinés à l'usinage du bois.
- Le troisième chapitre, est une recherche bibliographique sur les endommagements des outils de coupe en générale et ceux destinés à l'industrie du bois. Dans ce chapitre, différents traitements pour outils de coupe tels que les revêtements et nitruration qui sont les plus utilisés pour museler les outils coupant.

La deuxième partie qui est composée de deux chapitres, prend en charge les différents techniques expérimentales utilisées pendant notre recherche.

- Le premier chapitre, est une étude sur les différentes démarches expérimentales employées relatives à l'élaboration et caractérisation des revêtements en couche minces utilisés, ainsi que les techniques d'évaluation des qualités de surfaces usinées.
- Le deuxième chapitre, différents résultats des traitements et caractérisations réalisés sur les outils de coupe étudiés sont donnés ainsi que leur interprétation.

Ce mémoire est finalisé par une conclusion générale ainsi que des recommandations sur d'éventuels orientations de traitements pour augmenter la durée de service des outils de coupe dans le domaine de l'usinage du bois et de ses dérivés.

Bibliographie

Partie 1 : chapitre 1

Matériau bois et son usinage

I. Matériau bois et son usinage

Généralités sur le matériau bois

Le bois est un matériau biologique. C'est la matière ligneuse et compacte qui compose le tronc, les branches et les racines assurant aussi bien le rôle de conduction de la sève brute des racines jusqu'aux feuilles et le rôle de soutien mécanique de la plante [1].

Les principales cellules composant le bois sont les fibres ou « trachéides », parallèles à l'axe du tronc, ces dernières lui confèrent dans cette direction une plus grande résistance.

En effet, le bois est un matériau anisotrope. Le tableau 1 met en évidence cette propriété et cela en comparant des propriétés mécaniques de quelques essences de bois suivant les deux directions, parallèle et perpendiculaire aux fibres.

Tableau 1.1.1: Propriétés mécaniques des bois

Bois	Masse volumique (mg.m ⁻³)	Module d'Young (GPa)		Résistance (MPa) // aux fibres		Ténacité (MPa.m ^{1/2})	
		// aux fibres	⊥ aux fibres	Traction	Compression	// aux fibres	⊥ aux fibres
Balsa	0.1-0.3	4	0.2	23	12	0.05	1.2
Acajou	0.53	13.5	0.8	90	46	0.25	6.3
Sapin Douglas	0.55	16.4	1.1	70	42	0.34	6.2
Pin d'Ecosse	0.55	16.3	0.8	89	47	0.35	6.1
Bouleau	0.62	16.3	0.9	-	-	0.56	-
Frêne	0.67	15.8	1.1	116	53	0.61	9.0
Chêne	0.69	16.6	1.0	97	52	0.51	4.0
Hêtre	0.75	16.7	1.5	-	-	0.95	8.9

Le cambium, situé sous l'écorce, est le moteur de génération du bois dans la direction radiale du tronc. Il ne génère qu'une couche de bois par an. Les cernes annuels sont visibles grâce à la variation de densité et de la taille des cellules créées par la croissance rapide au printemps (bois initial) et en été (bois final) et la croissance lente en automne et en hiver.

Chez certaines essences, dites essences à aubier différencié, le bois parfait est coloré et nettement distinct de la couronne d'aubier périphérique (figure : 1.1.1).

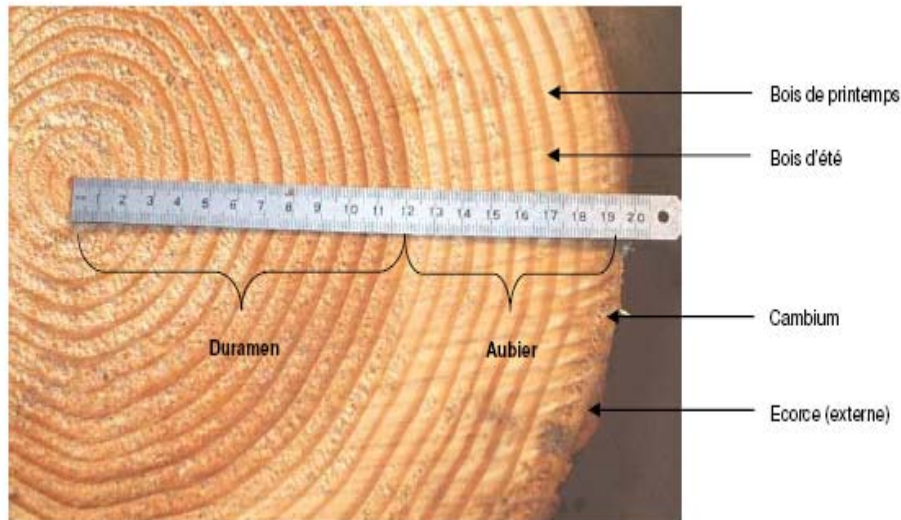


Figure : 1.1.1: Structure du tronc dans l'arbre.
Exemple du chêne, essence à aubier différencié [2].

Dans l'étude ou la reconnaissance d'un bois, les observations doivent se faire selon trois plans parfaitement définis, comme le montre la figure : 1.1.2 :

- ✓ le plan transversal, perpendiculaire à l'axe de l'arbre (bois de bout) ;
- ✓ le plan radial, parallèle à l'axe et passant par le centre structurel de l'arbre (débit sur quartier) ;
- ✓ le plan tangentiel, tangent aux cernes de croissance (débit sur dosse).

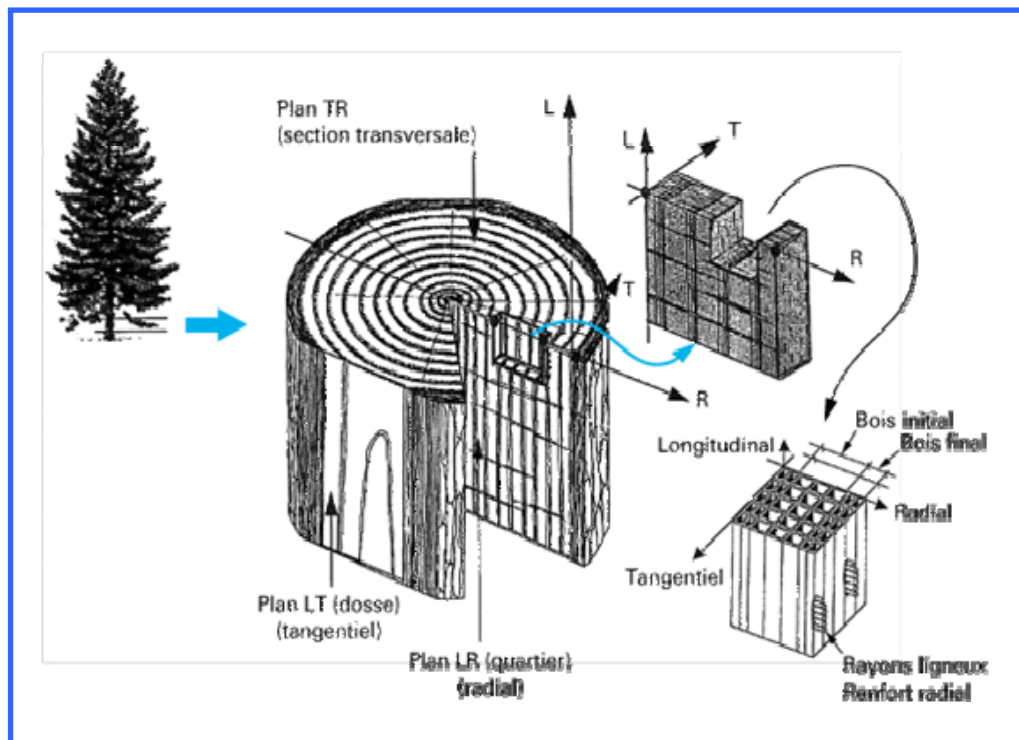


Figure : 1.1.2: Principaux axes du bois [3].

II. Usinage du bois

II.1 Coupe du bois

La coupe conventionnelle du bois est définie comme étant l'action de l'arête tranchante d'un outil sur une pièce de bois, qui produit des copeaux de dimensions et d'épaisseurs variables.

La formation de ces copeaux dépendra entre autres de la géométrie de l'outil, des propriétés du bois et de la direction de coupe par rapport à l'orientation des éléments ligneux. La qualité de la surface obtenue suite à l'usinage sera ainsi reliée à la formation des copeaux. L'usinage ou coupe classique est alors un procédé de contrainte et de rupture. La contrainte est appliquée au bois par l'action humaine ou par l'action d'une machine, à l'aide d'un outil de coupe [4]. L'orientation et la direction de la force sont contrôlées par le type d'instrument de coupe et par le bras de l'opérateur (ou par la machine). L'outil présente une géométrie particulière et le bois a également des propriétés physiques et mécaniques particulières. La direction du mouvement et la forme de l'outil déterminent le développement des contraintes imposées au bois et, par conséquent, la manière dont la rupture ou la « coupe » est réalisée.

Deux facteurs interviennent lors de la coupe du bois,

- La notion d'affûtage dans laquelle la surface de coupe de l'arête tranchante de l'outil doit être la plus petite possible pour que la force appliquée par l'outil puisse générer une contrainte supérieure à la résistance mécanique du bois,
- L'état ou condition du bois, en termes de sa teneur en humidité, température, présence de défauts, etc.

On distingue deux modes principaux de coupe que sont les coupes orthogonale et périphérique. La plupart des problèmes d'usinage peuvent, avec certaines adaptations, être analysés par l'un ou l'autre de ces modes de coupe.

II.1.1. Coupe orthogonale

II.1.1.1 Principe

La coupe orthogonale est produite par un outil dont l'arête tranchante est perpendiculaire à la direction du mouvement de la pièce de bois. La surface résultante est un plan parallèle à la surface originale. Le rabot de menuisier, la scie à ruban, la scie circulaire, le tour à bois et la trancheuse sont des exemples de machines-outils et d'outils travaillant en mode de coupe orthogonale. Par ailleurs, la coupe orthogonale est un cas particulier d'usinage périphérique où le diamètre du porte-outil tend vers l'infini. Ce mode de coupe est alors utilisé quelques fois pour analyser la formation de copeaux en coupe périphérique.

McKenzie [5] a proposé une nomenclature à deux chiffres pour décrire les principales situations qui peuvent se présenter en coupe orthogonale. Le premier représente l'angle entre l'arête tranchante de l'outil et le fil du bois tandis que le deuxième indique l'angle entre la direction de coupe et celle du fil. On retrouve ainsi trois coupes de base, soit les coupes $90^\circ-0^\circ$, $90^\circ-90^\circ$ et $0^\circ-90^\circ$ (Figure : 1.1.3).

La coupe orthogonale en direction $90^\circ-0^\circ$ se présente dans des procédés tels que le tranchage longitudinal, le rabotage manuel, c'est-à-dire dans tout travail du bois effectué suivant la direction parallèle au fil.

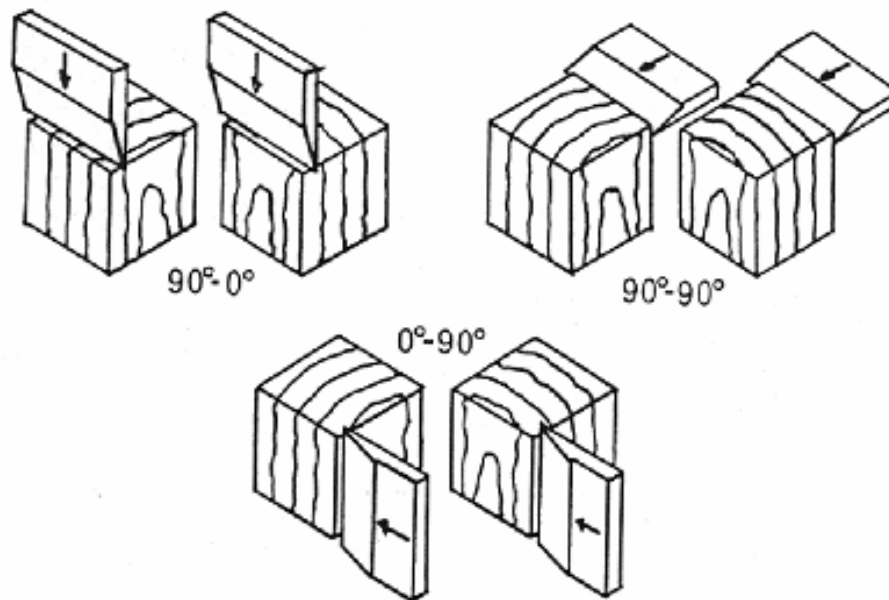


Figure : 1.1.3 : Principaux types de coupe orthogonale [4].

La formation du copeau en coupe orthogonale $90^\circ-0^\circ$ représente ainsi une des situations d'usinage les plus fréquentes, ce qui explique le fait qu'elle ait été étudiée plus en détail. Il est clair que les efforts impliqués lors de l'usinage vont varier selon la direction de coupe. Normalement, les efforts de coupe pour la direction $90^\circ-90^\circ$ sont plus importants que pour la direction $90^\circ-0^\circ$. La direction $0^\circ-90^\circ$ nécessite de faibles énergies de coupe [6].

Trois angles de coupe sont identifiés lors de la coupe orthogonale (Figure : 1.1.4). L'angle d'attaque (α) affecte la pénétration de l'arête tranchante dans le bois et intervient lors du dégagement du copeau. Un angle α faible provoque un effort important et l'outil « gratte » le bois plutôt qu'il ne le coupe. Un angle α important diminue les efforts mais tend à provoquer l'arrachement des fibres. L'angle de dépouille (γ) sert à éviter le talonnement du bois sur l'outil. S'il est trop faible, la face de dépouille va frotter sur le bois, provoquant l'échauffement et l'usure de l'outil. S'il est trop grand, l'arête tranchante devient plus fragile. L'angle du couteau (β) est complémentaire aux deux précédents et conditionne la résistance de l'outil à l'usure. Les angles les plus adéquats sont choisis en fonction du type d'usinage, du matériau usiné et de la composition de l'outil [7].

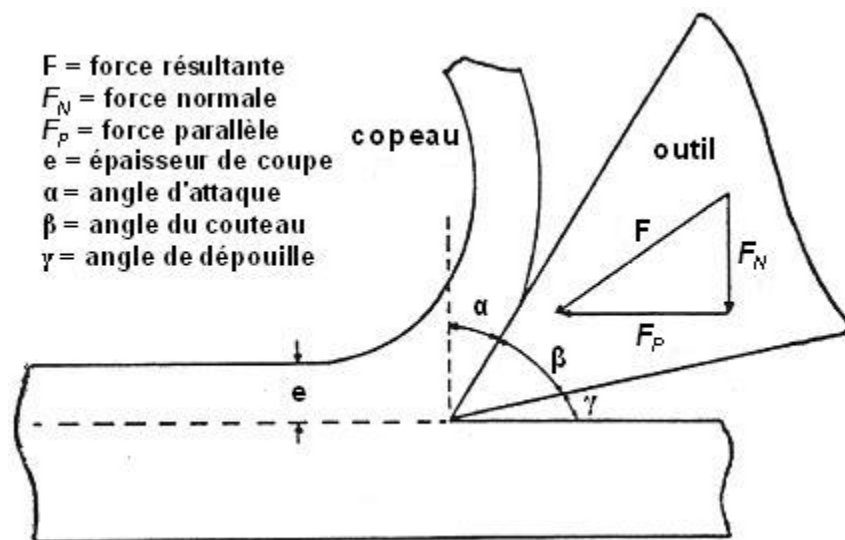


Figure : 1.1.4 : Géométrie de la coupe orthogonale et composante des forces de coupe [8].

II.1.1.2. Efforts induits lors de la coupe orthogonale du bois

La force résultante qui agit sur le bois peut être décomposée en une force parallèle (F_P) et une force normale (F_N) par rapport à la surface générée (Figure.1.1.4). La magnitude et la direction des composantes parallèle et normale de la force résultante vont dépendre des divers facteurs propres à l'outil de coupe, aux conditions de travail ainsi qu'au matériau travaillé [6].

La variation des forces en fonction des diverses variables de coupe a fait l'objet de plusieurs études. Ainsi, les forces de coupe ont été étudiées en fonction de l'angle d'attaque [8-13], de l'épaisseur du copeau [8, 14,15], de l'orientation des couteaux [10,16], de l'usure des outils [14,17-23], ainsi que de la masse volumique [8,13,15], de la teneur en humidité et de la température du bois [14].

Plusieurs méthodes sont disponibles pour mesurer les forces de coupe. Brendel [24] affirme que le fonctionnement des dynamomètres est généralement basé sur le principe selon lequel une structure soumise à une force présentera une déformation proportionnelle à la force appliquée. Selon l'auteur, deux méthodes peuvent être employées pour mesurer cette déformation:

- L'évaluation du changement de propriétés physiques produit dans le matériau de la structure, comme ses propriétés magnétiques (chez les matériaux ferromagnétiques) ou piézo-électriques (chez les structures cristallines),
- La mesure indirecte, prise par des jauges de déformation.

Ces deux catégories peuvent être subdivisées en dynamomètres du type auto-générateur et du type interrogé.

Un dynamomètre type auto-générateur est capable de générer des voltages électriques proportionnels aux déformations produites dans sa structure (ex. dynamomètre piézo-électrique à cristaux de quartz). D'autre part, un dynamomètre type interrogé requiert une deuxième source d'énergie, de façon que la déformation soit estimée par le biais du changement de la résistance électrique des jauges installées sur la structure [24].

Stewart [25] et Huang [14] ont évalué les forces normale et parallèle en coupe orthogonale à l'aide d'un dynamomètre interrogé proposé par Franz [26]. D'autre part, King [27] ont suggéré

un dynamomètre de type interrogé qui permet de déterminer les composantes de la force de coupe selon trois directions (parallèle, normale et latérale). Cet appareil comporte quatre demi anneaux entrecroisés munis d'un système de douze jauges de résistance. Ainsi, ce dynamomètre élimine la possibilité d'obtenir une sensibilité croisée ou dépendante du point d'application de la charge. Le dynamomètre à demi anneaux entrecroisés a été employé avec succès par Néri et al. [15] et Hernández [20, 21,28].

II.1.1.3. Formation du copeau en direction 90° - 0°

Le type de copeau détermine la qualité de la surface générée dans la pièce. Franz [26] a étudié l'usinage orthogonal 90° - 0° et a identifié trois types de copeaux : de type I, II et III.

a) Copeau de type I

Il se forme lorsque les conditions de coupe sont telles que le bois fend devant le tranchant du couteau formant un copeau qui est ensuite séparé tel une poutre encastrée en porte-à-faux (Figure : 1.1.5). Ce type de copeau est produit de façon cyclique selon les étapes de formation suivantes: l'outil applique initialement une compression parallèle au fil jusqu'à ce qu'un fendage survienne devant l'arête tranchante de l'outil. La rupture par fendage suit le fil du bois et se poursuit jusqu'à ce que l'effort de flexion produit par l'allongement du copeau devienne le facteur limitant et que le copeau casse comme étant une poutre encastrée en porte-à-faux. À ce moment, un nouveau cycle de formation de copeau commence. Le copeau produit par fendage suit le fil du bois de telle manière qu'il peut se former même en dessous du plan de coupe provoquant ainsi un défaut du type fil arraché.

Les conditions qui favorisent la formation de ce type de copeau sont entre autre l'emploi d'un angle d'attaque élevé (supérieur à environ 25°) de même qu'une épaisseur de copeau trop grande. D'autre part, étant donné que la résistance du bois au fendillement longitudinal est faible, la production de copeaux de type I est associée à une faible consommation d'énergie de la machine-outil.

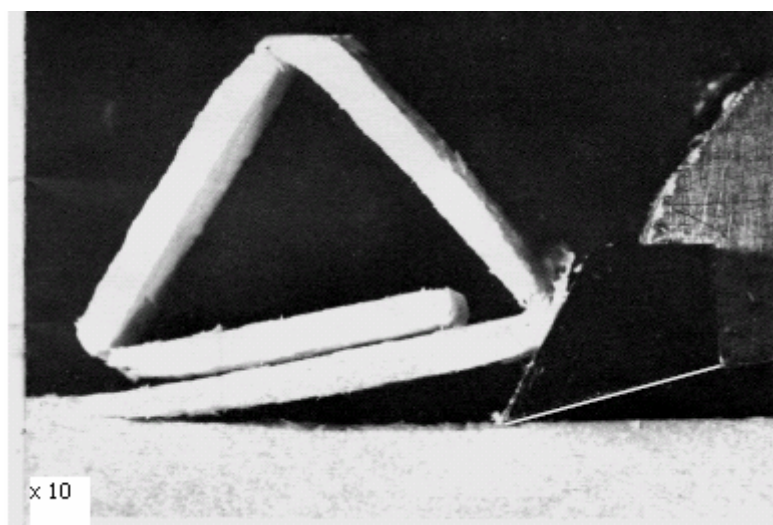


Figure : 1.1.5 : Copeau de type I obtenu en direction 90° - 0° , à un angle d'attaque de 25° et à 1,14 mm de profondeur de coupe [8].

b) Copeau de type II

Le copeau de type II se forme dans des conditions plus limitées. Le mouvement de l'outil déforme le bois devant l'arête tranchante en compression longitudinale et provoque des contraintes de cisaillement diagonales. La rupture du bois se produit le long d'une ligne qui s'étend à partir de l'arête tranchante de l'outil, formant ainsi un copeau en continu. Le copeau de type II représente ainsi l'idéal du point de vue de la qualité de surface (Figure : 1.1.6).

Les principaux facteurs qui permettent la formation de ce type de copeau sont l'emploi d'un angle d'attaque intermédiaire (en général entre 10 et 25°) et de faibles épaisseurs de coupe.

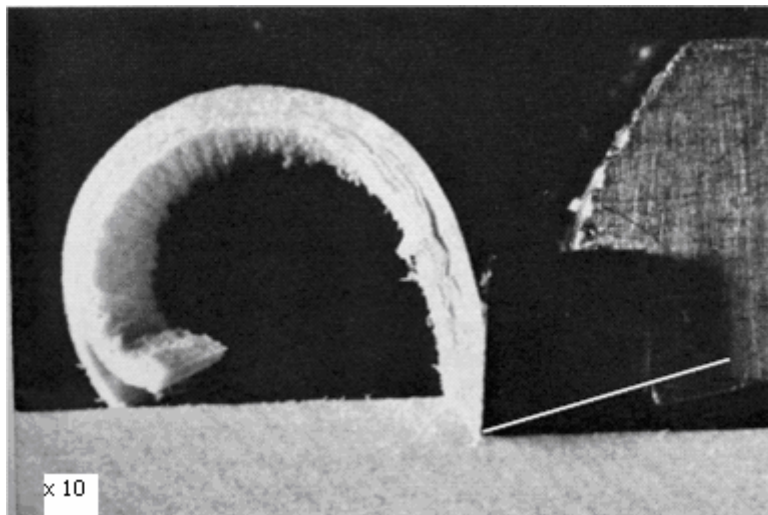


Figure : 1.1.6 : Copeau de type II, obtenu en direction 90°-0°, à un angle d'attaque de 15° et à 1,14 mm de profondeur de coupe [8].

En général, le copeau de type II est obtenu lorsque la force normale de coupe est proche de zéro ou légèrement négative [26]. Stewart [9] proposa ainsi une méthode pour estimer un angle d'attaque susceptible de favoriser la formation de copeaux de type II, à partir des valeurs moyennes des forces normale et parallèle de coupe.

c) Copeau de type III

Le copeau de type III est également formé de façon cyclique. Le bois supporte initialement une compression longitudinale dans des conditions telles que les ruptures se produisent par compression et cisaillement longitudinal devant l'arête tranchante de l'outil de coupe. Le copeau obtenu est sans forme précise et a de la difficulté à s'échapper de la face d'attaque du couteau, se faisant compacter contre cette face. Les contraintes sont ensuite transférées vers des surfaces non atteintes, qui vont être coupées à leur tour (Figure : 1.1.7). Les principales conditions qui favorisent la formation de ce type de copeau sont l'utilisation d'un angle d'attaque faible ainsi que l'emploi de couteaux émoussés. Ce type de copeau provoque le

défaut appelé grain laineux ou pelucheux, ainsi que le fil soulevé. Par ailleurs, étant donné les propriétés mécaniques du bois impliquées dans la formation de ce type de copeau, la consommation d'énergie est plus élevée que celle observée pour les copeaux de type I et II.

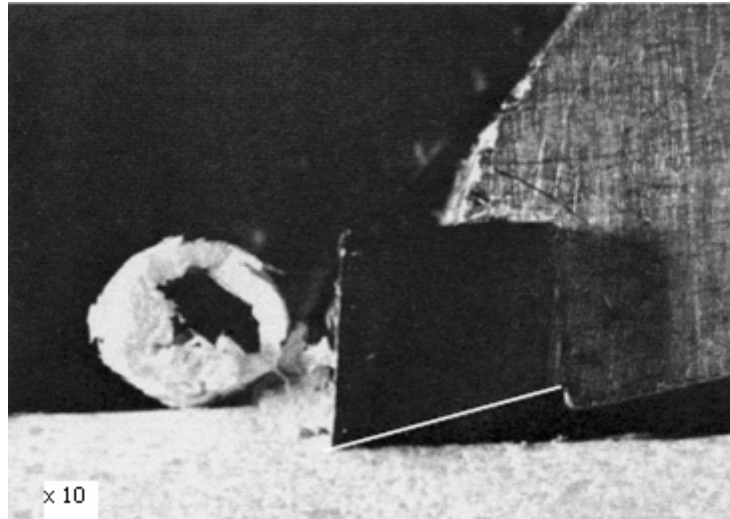


Figure : 1.1.7 : Copeau de type III, obtenu en direction 90° - 0° , à un angle d'attaque de 5° et à 1,14 mm de profondeur de coupe [8].

II.1.2. Coupe oblique

II.1.2.1. Principe

La coupe oblique se différencie de la coupe orthogonale par une inclinaison donnée (i) à l'arête tranchante du couteau, appelé angle d'inclinaison [29,30] ou angle oblique [12,16] (Figure : 1.1.8). Cette inclinaison induit plusieurs changements dans la géométrie de l'outil et les forces produites durant la coupe [12, 16,30], ainsi que dans la qualité de la surface usinée [19,29, 30]. La dépouille (γ) et l'angle du couteau (β) diminuent [12,30].

À mesure que l'angle i augmente, l'angle d'attaque (α) augmente, tandis que l'angle de dépouille (γ) et l'angle du couteau (β) diminuent [12,16,30], signalant que les changements dépendant de la géométrie de coupe deviennent plus accentués à partir d'un angle i de 30° . Selon, Jin *et al* [12], un angle i d'environ 30° avec un angle d'attaque entre 20 et 30° pourraient être utilisés dans la pratique. D'après Kuraptsev [31], l'angle i doit être toujours inférieur à 45° . Cependant, ces recommandations ne tiennent pas compte de l'utilisation d'éléments limitant le fendillement du bois en face de l'arête tranchante.

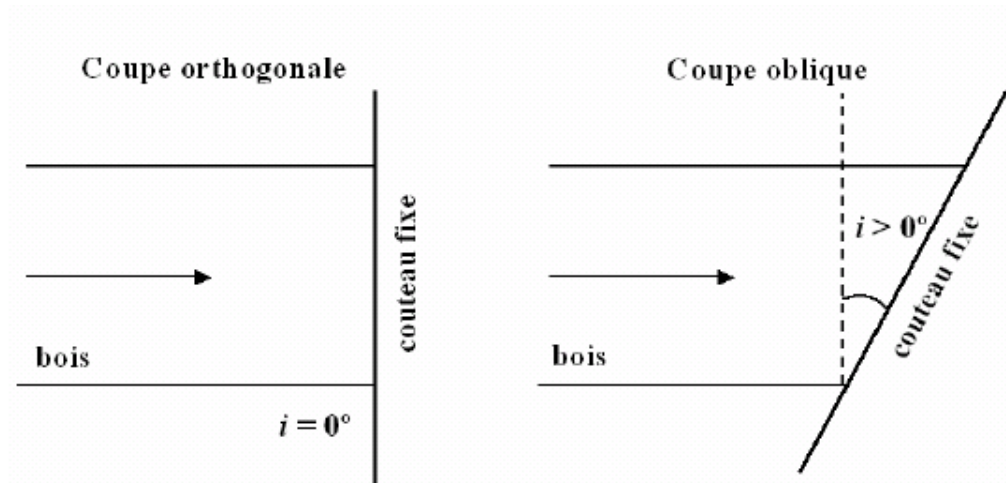


Figure : 1.1.8 : Position de l'arête tranchante du couteau en coupe orthogonale et en coupe oblique

Une particularité très importante de la coupe oblique est que le rayon de courbure de l'arête tranchante diminue à mesure que l'angle i augmente, ce qui accroît le pouvoir coupant du couteau [16]. Le rayon de l'arête tranchante est considéré comme étant circulaire (r_c) lorsque i est nul. Cependant, la courbure de l'arête tranchante devient elliptique lorsque i diffère de zéro, en acquérant un rayon r_e , lequel est calculé comme suit [12]:

$$r_e = r_c \cos i \quad (1)$$

Cette relation génère une courbe telle que montrée à la figure : 1.1.9. On remarque ainsi que le rayon de courbure diminue rapidement à partir d'un angle i supérieur à 15° . On obtient alors un rayon réduit de moitié à un angle i de 60° et réduit de trois quarts à un angle i de $75,5^\circ$.

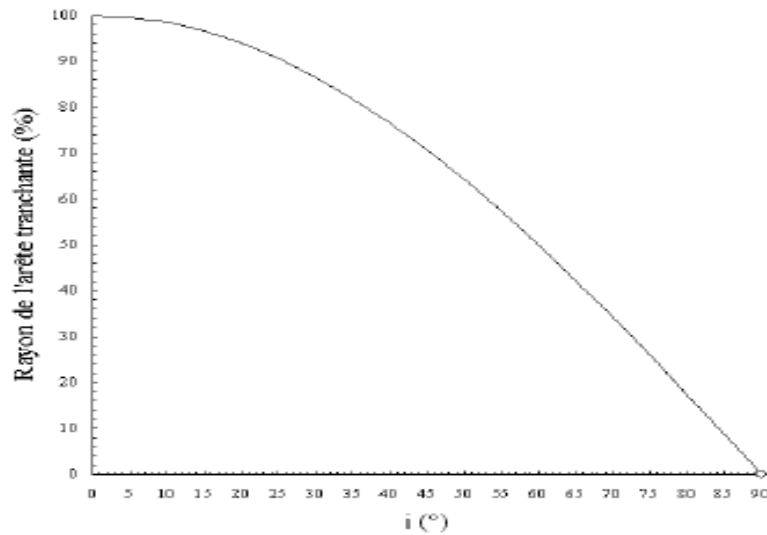


Figure : 1.1.9 : Variation du rayon de l'arête tranchante en fonction de l'angle oblique (i)

D'autre part, la variation de l'angle d'attaque en fonction de l'inclinaison de l'arête tranchante (i) est estimée à l'aide de l'équation (2) [30]:

$$\alpha_e = \arcsin(\sin^2 i + \cos^2 i \sin \alpha) \quad (2)$$

où α_e est l'angle d'attaque effectif (en degrés), i est l'angle d'inclinaison de l'arête tranchante (en degrés) et α est l'angle d'attaque à un angle i égal à 0° . Cette équation est illustrée à la figure : 1.1.10. On remarque que l'effet de l'angle d'inclinaison (i) diminue à mesure que l'angle d'attaque à $i = 0^\circ$ augmente.

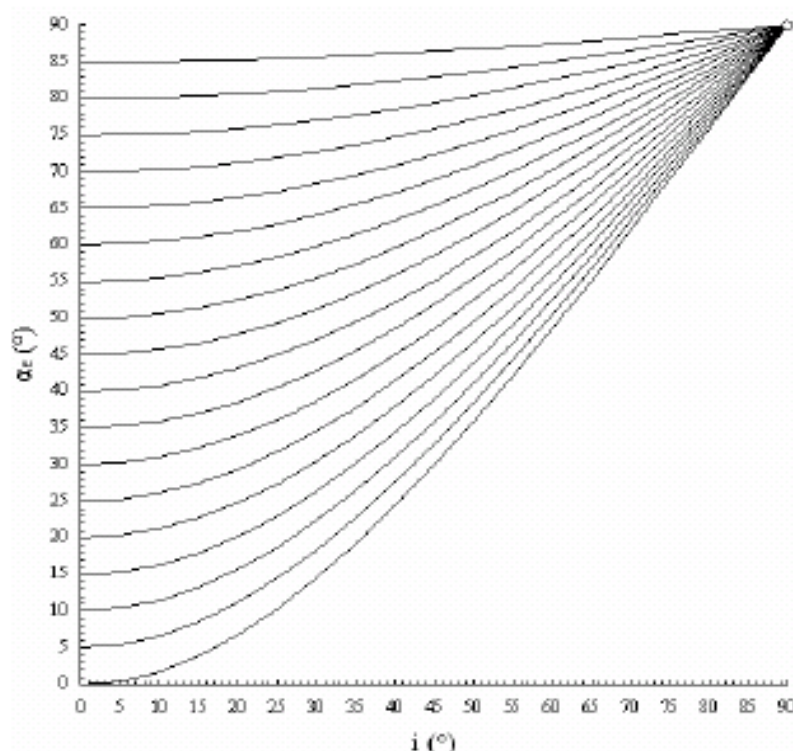


Figure 1.1.10 : Variation de l'angle d'attaque du couteau en fonction de l'angle oblique (i)

Jin [12] indique que la composante parallèle de la force de coupe (F_P) diminue à mesure que l'angle i augmente lors de la coupe parallèle au sens du fil. Il rapporte toutefois que, pour la coupe perpendiculaire au sens du fil, cette composante augmente à mesure que l'angle i augmente. Ceci s'explique par le fait que durant la coupe parallèle au fil, la coupe évolue de la situation 90° - 0° vers celle 0° - 90° avec l'augmentation de i , ce qui entraîne une réduction des forces de coupe. La situation inverse se présente lors de la coupe transversale aux fibres.

II.1.2.2. Efforts induits lors de la coupe oblique

D'après Jin [17], la force normale (F_N) en coupe oblique est affectée par l'angle i et par l'angle d'attaque effectif α_e du couteau. La force normale diminue ainsi de façon linéaire à mesure que l'angle oblique augmente, pour les coupes longitudinale et transversale aux fibres. Cette force devient négative (vers le haut) lorsque l'angle d'attaque α dépasse 30° , notamment en présence d'un angle i également supérieur à 30° .

Selon Ozaki [29], l'effet de l'angle oblique sur la rugosité des surfaces coupées diffère en fonction de la situation de coupe. Ainsi, pour la coupe perpendiculaire aux fibres, la rugosité a diminué rapidement avec l'augmentation de l'angle oblique; une tendance inverse fut toutefois observée pour la coupe parallèle aux fibres. L'angle d'attaque effectif α_e et l'angle entre l'orientation des fibres et l'arête tranchante furent les facteurs les plus importants affectant la rugosité obtenue.

Il est reconnu que des forces normales négatives (vers le haut), associées à des angles d'attaque élevés, peuvent provoquer un fendillement longitudinal des copeaux en face de l'arête tranchante [17,28, 32]. Selon les résultats de Jin [16], des forces normales négatives très élevées peuvent survenir pour certaines conditions de coupe oblique, étant donné l'utilisation des angles d'attaque élevés. On pourrait donc prévoir que des copeaux similaires à ceux du type I [26] pourraient être produits lors de la coupe oblique, en augmentant ainsi l'incidence du fil arraché. Pour empêcher la production de ruptures par fendillement longitudinal lors de l'emploi d'angles d'attaque élevés, Stewart [18,19] propose un système incluant une barre de pression dans le design de l'outil, similaire à celle utilisée dans les opérations de déroulage du bois (Figure : 1.1.11). L'objectif de la barre de pression est de modifier les champs de contraintes dans la région de coupe, de façon à minimiser l'incidence du fendillement. La barre de pression permet ainsi d'obtenir des surfaces et des copeaux de bonne qualité lors de la coupe à l'aide de couteaux fixes.

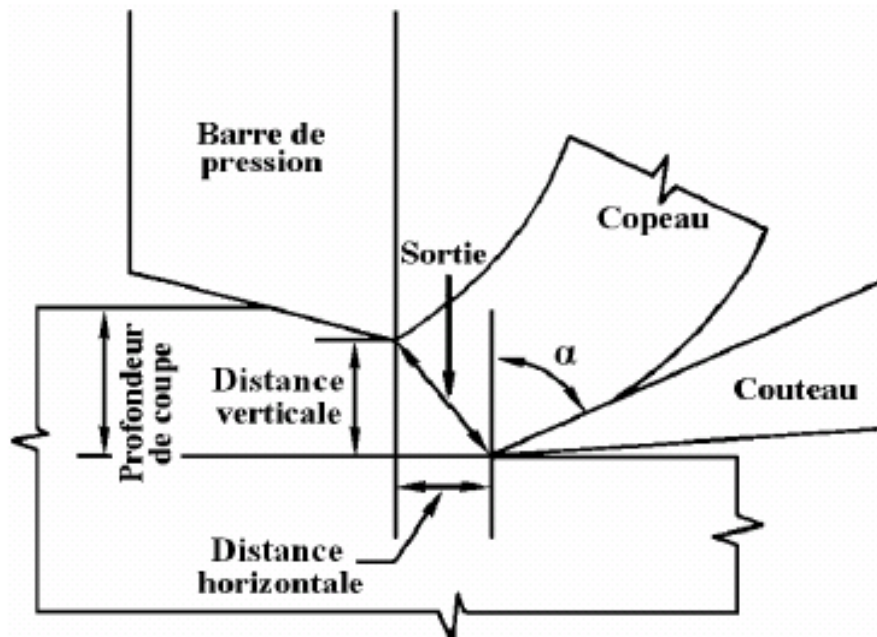


Figure : 1.1.11 : Coupe du bois en utilisant une barre de pression et un couteau fixe [19]

Stewart [18] a d'abord travaillé en coupe orthogonale avec des angles d'attaque de 45 et 52,5°. Les distances horizontale et verticale entre l'arête tranchante du couteau et la pointe de la barre de pression furent variables (Figure : 1.1.9). Des taux de compression transversale variant de 0 à 40% de la profondeur nominale de coupe furent alors appliqués. Les échantillons furent coupés de façon à présenter des angles de 0, 10 ou 20° par rapport à l'axe parallèle ou perpendiculaire aux fibres, dans le but de simuler plusieurs angles d'alimentation. D'après ces conditions de coupe, les meilleurs résultats furent obtenus pour un angle d'alimentation de 20° par rapport au sens parallèle ou perpendiculaire aux fibres, soit en coupe 70°-20° ou 20°-70°.

Stewart [19] a ensuite adapté la coupe oblique dans le design qu'il a proposé en 1986. L'alimentation fut alors parallèle aux fibres et l'arête tranchante était orientée selon un angle de 20° par rapport à l'orientation de l'alimentation, soit en coupe 20°-0° ($i = 70^\circ$). Les angles d'attaque et de dépouille furent de 52,5° et de 0°, respectivement. La profondeur de coupe et la distance verticale entre la barre de pression et l'arête tranchante furent de 0,5 et de 0,37 mm, respectivement. Lors de la coupe à l'aide d'un tel système, les forces produites par l'arête tranchante et par la barre de pression étaient apparemment insuffisantes pour produire des déformations permanentes et affecter négativement la qualité de surface. Stewart [19] affirme que la force normale produite est plus faible que celle observée lors de la coupe ce qui explique l'absence d'écrasement cellulaire.

Pour une épaisseur de copeau donnée, les forces de coupe augmentent généralement à mesure que les distances horizontale et verticale diminuent (Figure.1.1.9). Ainsi, la qualité de surface est améliorée jusqu'au point où l'ouverture de sortie devient trop petite en limitant le passage du copeau [18].

D'après Hernández [33], les surfaces produites par la méthode de coupe proposée par Stewart [18,19] sont en effet meilleures que celles produites par coupe périphérique.

Le système de couteau fixe avec barre de pression pourrait probablement produire des surfaces requérant peu ou aucune opération ultérieure de finition, principalement chez les

espèces à porosité circulaire [18]. Les surfaces obtenues par ce système présentent une apparence supérieure à celles produites par coupe périphérique et inférieure à celles finement poncées [18,19].

Stewart [18,19] a d'ailleurs conclu que la barre de pression est efficace dans la réduction du fil arraché.

Ainsi, la coupe oblique combinée avec une barre de pression pourrait éliminer des défauts couramment attribués à la coupe périphérique conventionnelle et au ponçage [18]. Les surfaces obtenues au moyen de ce système ne présentent pas de rainures, moins de fissures, pas de marques de couteaux tout en étant moins endommagées. Ainsi, ce système de coupe pourrait remplacer partiellement des opérations de rabotage par coupe périphérique ou de ponçage, tout en contribuant à la réduction des niveaux de bruit dans les industries du bois [18,19].

II.1.3. Coupe périphérique

II.1.3.1. Principe

La coupe périphérique est un procédé où le bois est enlevé d'une pièce sous forme de copeaux individuels au moyen de l'action intermittente des couteaux placés dans la périphérie d'un porte-outil rotatif. La surface obtenue consiste en une série de traces ou ondes individuelles générées par le contact successif des couteaux sur le bois [34] (Figure : 1.1.12). Il faut souligner que la coupe orthogonale est un cas particulier de coupe périphérique où le diamètre du porte-outil tend à l'infini.

Le rabotage conventionnel est un procédé de coupe périphérique qui peut être réalisé par *coupe en avalant*, où l'avance du bois et la trajectoire de l'outil de coupe vont dans le même sens, ou par *coupe en opposition*, où le sens du déplacement est opposé à la trajectoire de l'outil de coupe.

II.1.3.2. Formation du copeau en coupe périphérique

La formation du copeau par coupe périphérique en direction longitudinale est semblable à celle de la coupe orthogonale 90° - 0° . La coupe périphérique présente cependant certaines particularités dont voici un aperçu pour le cas de l'usinage en opposition [6]:

- Au début, la coupe est essentiellement parallèle au fil du bois, tandis qu'à la sortie du couteau la coupe présente un angle par rapport au fil.
- Le copeau augmente d'épaisseur à mesure que le couteau avance dans la coupe, atteignant une valeur maximale tout juste avant que celui-ci sorte de la pièce de bois. Le copeau à la sortie est souvent de type I.
- La partie de la trajectoire qui reste visible à la surface est la portion initiale de la coupe où l'épaisseur de copeau est minimale. Une rupture de type II peut alors être induite favorisant une bonne qualité de surface.

II.1.3.3. Efforts induits lors de la coupe périphérique du bois

Le comportement des forces en coupe orthogonale a été étudié depuis les années 1960 par McKenzie [5], depuis plusieurs chercheurs se sont mis à s'intéresser à cette problématique dont les plus récents sont Hernandez [21]. En revanche, la connaissance sur les forces induites lors de la coupe périphérique est encore insuffisante.

Palmqvist [35] ont utilisé une nouvelle technique pour mesurer les forces induites durant une coupe périphérique. Ils ont démontré que la force parallèle d'un couteau augmente graduellement depuis zéro jusqu'à un maximum le long de la coupe, tandis que la force normale est positive (vers le bas) au début et devient ensuite négative (vers le haut) vers le milieu et la fin de la coupe.

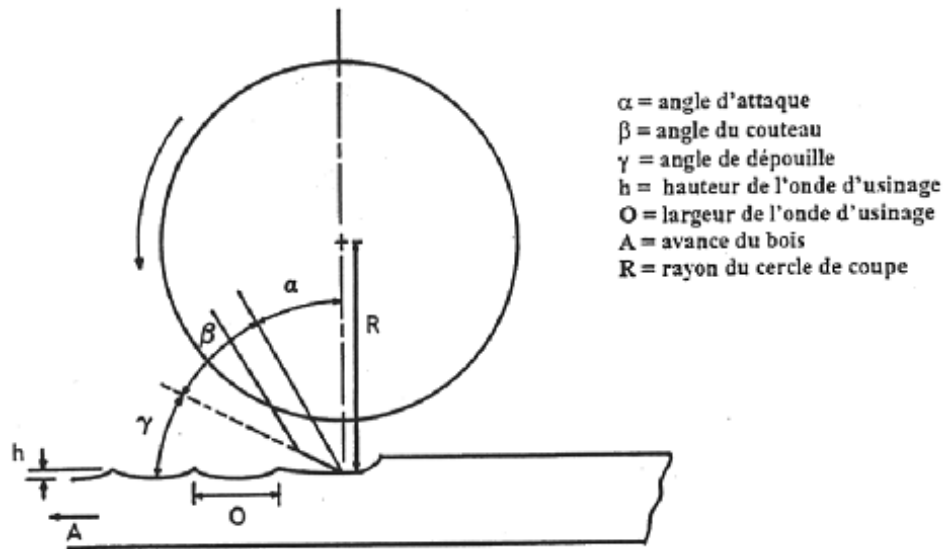


Figure : 1.1.12 : Schéma illustrant la coupe périphérique en opposition

La grandeur de ces forces va dépendre du type de matériau usiné, de la géométrie des outils et des conditions de coupe. La force normale atteint sa valeur maximale vers la fin de la coupe, juste avant que l'arête tranchante quitte la surface du bois. Cette force conditionne probablement la formation du fil arraché, pouvant causer des dommages dans la surface du bois, particulièrement si les fibres du bois sont mal orientées.

II.1.3.4. Coupe hélicoïdale

Les porte-outils opérant par coupe périphérique hélicoïdale présentent une géométrie dans laquelle les couteaux sont placés selon une inclinaison par rapport à l'axe de rotation [36], en formant plusieurs rangées obliques [9] ayant une arête tranchante continue [37]. L'inclinaison de ces rangées par rapport à l'axe de rotation du porte-outil hélicoïdal est nommée « angle d'hélice » [9,36] lequel est représenté par $\varnothing$ [9,37]. La Figure : 1.1.13, montre un modèle de ce type de porte-outil.

Les porte-outils hélicoïdaux réalisent la coupe de façon progressive: seulement quelques points du cylindre de coupe touchent la pièce à la fois [36,37 et 38]. Cette action de coupe minimise l'impact lors de l'usinage tout en réduisant le niveau de bruit généré [39,40-43]. En plus, la géométrie de la coupe hélicoïdale permet théoriquement d'obtenir des surfaces de meilleure qualité [36,43].

La Figure : 1.1.14, compare la géométrie de coupe des porte-outils hélicoïdaux et de ceux conventionnels. Le schéma montre la distance entre rangées adjacentes de couteaux (L), mesurées parallèlement à l'axe de rotation du porte-outil hélicoïdal [36,37]. Cette distance contrôle le nombre de rangées ayant contact au même temps avec la pièce usinée [9]. Il est préférable que plusieurs rangées aient contact avec la surface du bois pendant la coupe [37]. Stewart [37] a proposé une distance L inférieure à 10 cm. Une réduction considérable de

l'impact est obtenue lorsque la distance L est telle qu'un contact constant est maintenu entre le porte-outil et la surface de la pièce. La perte du contact constant, quand L est plus élevé que la largeur de la pièce usinée (W), produit une augmentation de cet impact et, conséquemment, de la vibration du système.

Lors de la coupe hélicoïdale, une force concentrée avance transversalement à la surface de la pièce. La vitesse de cet avancement (V_t) est fonction de la vitesse de rotation du porte-outil (N) et de l'angle d'hélice (ϕ) (Figure : 1.1.14). Pour un ϕ de 45° , V_t est approximativement égal à N (Stewart 1975b). La Figure : 1.1.15, illustre le comportement des forces de coupe en fonction du temps pour un porte-outil hélicoïdal avec L plus petit et plus élevé que W . La variation de la force de coupe en fonction du temps (dF_c/dt) est minimale lorsque le rapport de contact (W/L) est supérieur à 1, car l'action de coupe est continue dans cette condition [9,37 et 42]. Lorsque le rapport W/L est inférieur à 1, le contact devient intermittent, ce qui augmente l'impact, la vibration et, conséquemment, le niveau de bruit [9,37]. Les porte-outils à couteaux droits présentent un rapport W/L égal à 0 [37] puisque L tend à l'infini.

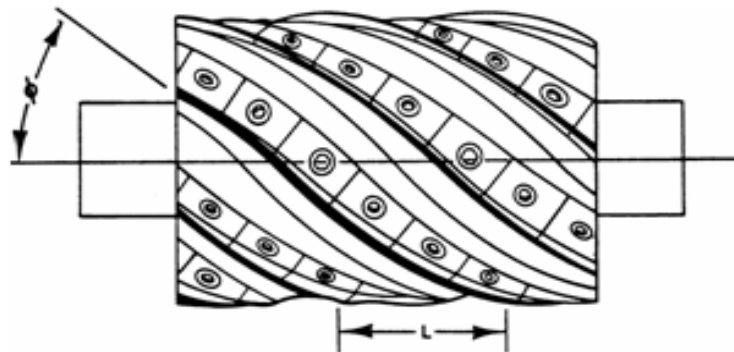


Figure : 1.1.13 : Porte-outil hélicoïdal: ϕ est l'angle d'hélice et L est la distance axiale entre rangées adjacentes de couteaux [9].

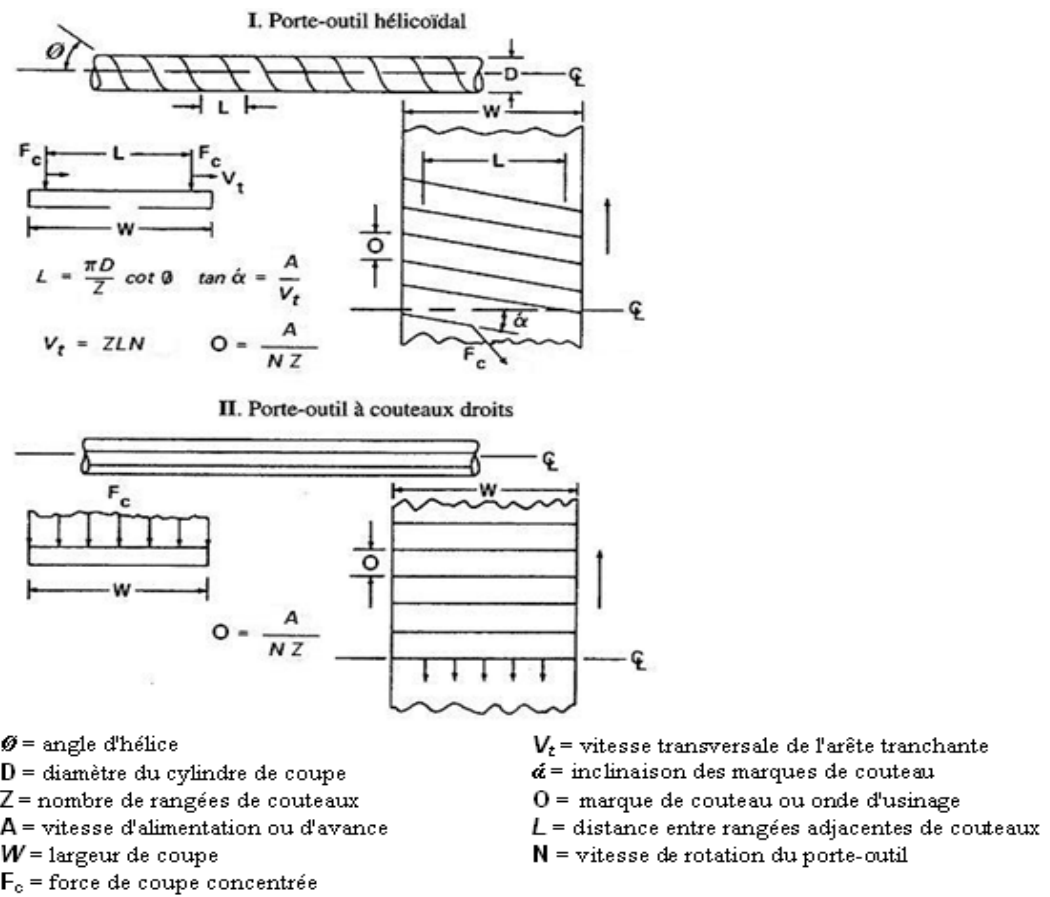


Figure : 1.1.14 : Comportement des forces de coupe en fonction du temps, pour un porte-outil hélicoïdal [9].

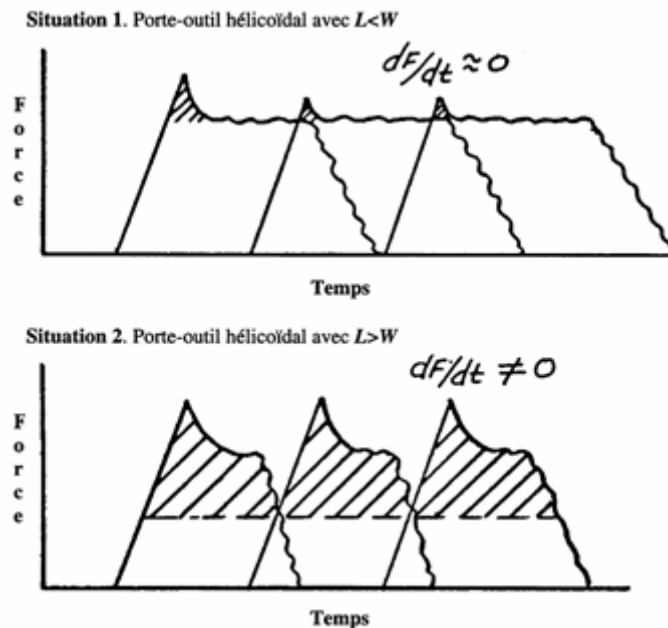


Figure : 1.1.15 : Comportement des forces de coupe en fonction du temps, pour un porte-outil hélicoïdal [9].

Lors de la coupe périphérique hélicoïdale, l'impact est engendré seulement lorsque les couteaux débutent la coupe dans une extrémité de la pièce [9]. En revanche, lors de la coupe périphérique à couteaux droits, l'impact se produit simultanément dans une ligne comprenant toute la largeur de la pièce usinée (Figure : 1.1.14). La coupe périphérique hélicoïdale se distingue donc de celle à couteaux droits principalement par l'impact restreint à une extrémité et par l'application d'une force concentrée sur la pièce [9, 41].

Une autre caractéristique qui différencie la coupe hélicoïdale de celle à couteaux droits est la géométrie des marques de couteaux laissées à la surface de la pièce usinée. Selon Stewart [26], au fur et à mesure que l'arête tranchante traverse la largeur de la pièce à une vitesse V_t , la pièce est alimentée perpendiculairement l'axe de rotation du porte-outil à une vitesse A , en produisant un angle (α) entre la marque du couteau et l'axe de rotation (Figure : 1.1.14). Pour les vitesses d'alimentation (A) couramment utilisées dans les industries, l'angle des marques du couteau (α) ne dépasse pas usuellement 10° .

Selon Stewart [31], la qualité de surface obtenue à l'aide des porte-outils hélicoïdaux est similaire à celle observée pour les porte-outils conventionnels lors de l'usinage perpendiculaire aux fibres. Autour des noeuds ou dans des cas de déviation du fil, l'alimentation du porte-outil avec un angle de 45° par rapport à la direction des fibres semble réduire l'incidence de l'arrachement à la surface [42]. D'après York [42], cette méthode d'alimentation procure des surfaces de bonne qualité pour l'industrie des meubles. À l'aide d'un prototype, Koch [44] a positionné l'outil hélicoïdal selon ce même principe.

Le type d'alimentation suggéré par Stewart [36], York [42] et Koch [44] conduit à la coupe 0° - 90° , laquelle fournit les meilleures qualités de surface. Ce type d'alimentation a toutefois l'inconvénient d'être restreint à l'usinage de planches courtes. Pour un angle d'hélice de 45° , les sens d'alimentation perpendiculaire et parallèle à l'axe de rotation sont virtuellement égaux, puisque la coupe est toujours oblique au fil du bois, ayant le même angle d'hélice pour les deux sens [42].

En plus des avantages de la géométrie hélicoïdale cités ci-dessus, Jones [43] ajoute l'économie d'énergie et la réduction de l'impact sur l'arbre du porte-outil. Boles [37] explique que l'énergie de coupe requise diminue puisque l'engagement des couteaux se produit dans une largeur inférieure à celle de la pièce usinée.

En revanche, les inconvénients des porte-outils hélicoïdaux sont résumés comme suit :

- Coût plus élevé des couteaux et des porte-outils.
- Affûtage plus compliqué et coûteux.
- Augmentation du temps d'installation des couteaux.
- Nécessité d'aligner la machine de façon à compenser la poussée latérale, pour éviter une friction excessive lors de l'alimentation.

Les fabricants de porte-outils hélicoïdaux signalent qu'ils génèrent d'une part moins de bruit, ce qui concorde avec la littérature, et d'autre part qu'ils produisent des surfaces de meilleure qualité. Cependant, peu de travaux scientifiques ont été publiés sur les effets de cette géométrie de coupe sur la qualité des surfaces usinées. Dans ce contexte, le présent travail vise à analyser les effets du rabotage périphérique par coupe hélicoïdale sur la qualité de surfaces finies.

II.4. Techniques d'usinage expérimental

II.4.1. Déroulage

Le déroulage est un procédé de première transformation du bois au cours duquel un billon est mis en rotation devant un couteau faisant toute la longueur de ce billon [45]. Ce couteau est animé d'un mouvement de translation proportionnel à la rotation du bois. Ces mouvements combinés produisent un ruban continu de placage d'épaisseur constante.

Le déroulage, tout comme le sciage, est l'une des deux grandes technologies de « première transformation » permettant une mise en œuvre aisée du bois en passant d'une géométrie approximative (bois ronds) à des éléments industrialisables (respectivement placages et avivés) [46].

Cette technique de premier débit permet donc la transformation rapide et sans manipulation importante du bois rond en placages de diverses épaisseurs et dimensions. Les placages constituent les éléments de base pour la réalisation d'une multitude de produits et matériaux (parements d'ébénisterie, parements muraux, emballages légers, matériaux lamellés,...). Les placages étant faciles à purger de leurs gros défauts et à traiter dans la masse (traitement de préservation et d'ignifugation), les produits obtenus n'en sont que plus performants.

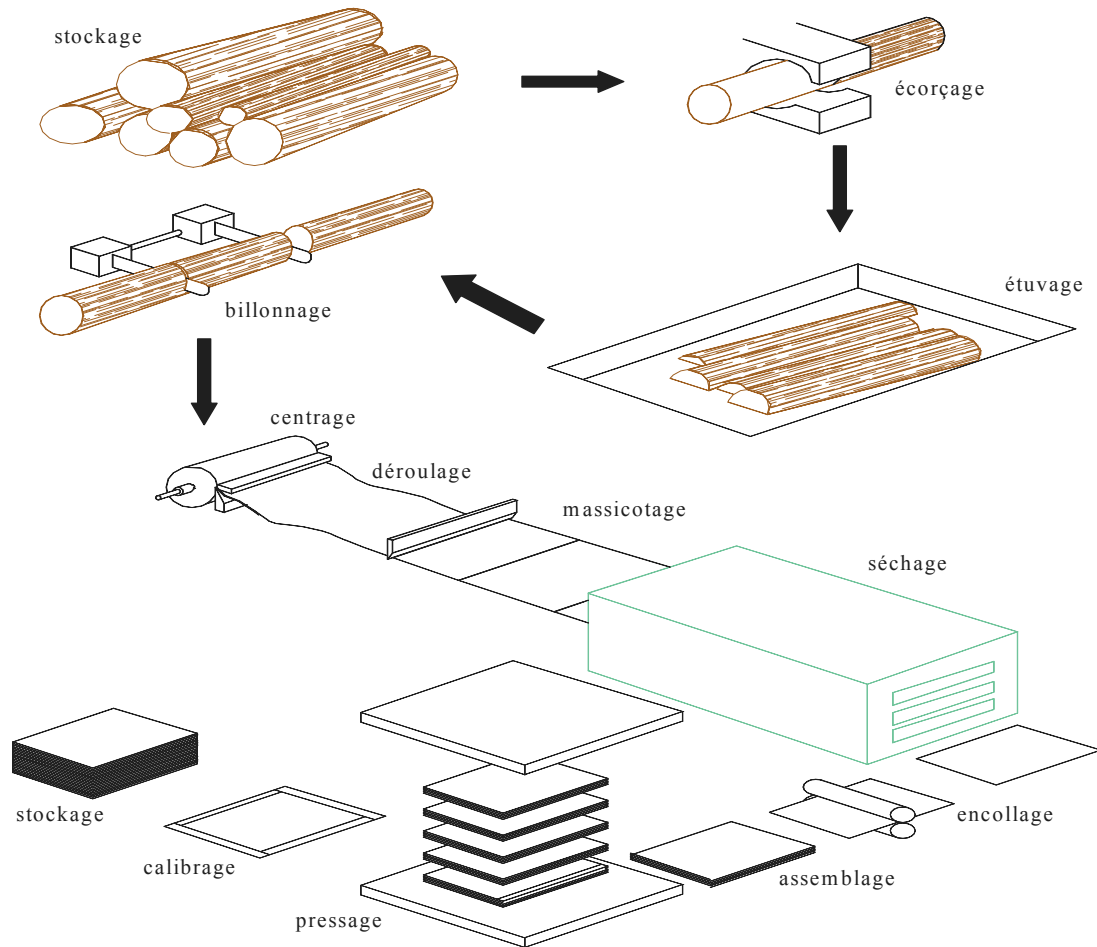


Figure : 1.1.16 : Chaîne type de production de contreplaqué [45].

L'essentiel des pertes est dû à la mise en longueur des billons, à la mise au rond (passage de la forme brute du billon à un cylindre parfait) et par l'abandon d'un noyau résiduel dont le diamètre dépend de celui des broches d'entraînement du billon. Le déroulage a longtemps été une technologie réservée à la production du contreplaqué (Figure : 1.1.16) et des emballages légers.

Du fait des évolutions conjuguées de la ressource et des produits industriels dérivés du bois demandés par les prescripteurs, le débit par déroulage tend à élargir son champ d'intérêt économique, d'autant que cette technologie peut encore se prêter à d'importantes évolutions.

II.4.2. Défonçage

Le défonçage est un fraisage à grande vitesse de rotation avec des outils de faible diamètre. Les défonceuses sont des machines relativement simples qui permettent de profiler (faible enlèvement de matière) mais aussi de percer, de découper, d'entailler et de calibrer des pièces à base de matériau bois et dérivés (CPL (contre plaqué, LVL (Laminated Veneer Lumber, MDF (Medium Density Fiberboard)...).

Ces usinages divers peuvent être réalisés à l'aide d'outils de formes simples. Comme exemples d'usinage on peut citer : le calibrage de porte, les rainures de glissière pour meuble

de bureau, la découpe de l'assemblage d'angle pour le plan de travail de cuisine, la fabrication de meubles ou encore la réalisation d'objets de formes diverses (Figure : 1.1.17.A et B).



Figure : 1.1.17 : Technique de défonçage : (A) accessoires d'un sommelier réalisés et (B) couvercle pour pèse-personne.

Le défonçage possède divers avantages : il permet

- ◆ de supprimer certaines opérations d'usinage (comme le découpage d'un panneau en le calibrant et en le moulurant),
- ◆ une grande précision et régularité des pièces usinées,
- ◆ une rapidité d'exécution,
- ◆ des usinages complexes.

Les organes constitutifs d'une défonceuse sont le bâti, la table, la tête porte-outil, le mandrin porte-outil et les outils (à une coupe, à 2 ou 3 coupes simples ou de formes, monoblocs et tranchants amovibles). Les caractéristiques de ces éléments dépendent du type de défonceuse et du constructeur.

Les outils sont soit en acier à forte teneur en chrome (13 à 14%) et avec 1,6 à 1,8% de carbone, soit en carbure de tungstène (plus particulièrement pour travailler des matériaux abrasifs). La vitesse de rotation est comprise entre 10000 et 24000 trs/min.

Le nombre important de paramètres influant durant l'usinage ainsi que la grande variabilité du matériau bois à usiner rend difficile la prédiction exacte du comportement des outils.

III. Conclusion

L'objectif de cette première partie axée essentiellement sur le matériau bois et les techniques d'usinage est de mieux appréhender et comprendre les problèmes auxquels sont soumis les outils de coupe au contact des matériaux fibreux.

La synthèse bibliographique met en évidence pas mal de paramètres influant pouvant jouer un rôle non négligeable dans le couple outil/matière.

Le chapitre qui suit a pour but de montrer les différents matériaux utilisés pour l'élaboration des outils de coupe ainsi que leur mode de fabrication, dans le domaine de l'usinage du bois et de ses dérivés en particulier.

IV. Références bibliographiques

- [1] Ashby M.F., Jones D. R. H. « MATERIAUX 2. Microstructure et mise en œuvre », éditions DUNOD, ISBN 2-04-018979-3, 1980, pp. 249-252.
- [2] Denaud L.-E., Analyses vibratoires et acoustiques du déroulage, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Cluny, N° 2006-43, 2006.
- [3] Techniques de l'ingénieur, article C925, Volume CA, Parution 02/2001, pp. 455-458.
- [4] Hoadley R.B., Understanding wood: a craftsman's guide to wood technology. Taunton Press, Newtown, Connecticut, 2000, pp. 256-261.
- [5] McKenzie W.M., Fundamental aspects of the wood cutting process, Forest Products Journal, Vol 10(9), 1960, pp.447-456.
- [6] Koch P., Utilization of hardwoods growing on southern pine sites. Volume II, Processing Agriculture handbook N° 605, USDA, Forest Service, Washington, DC, 1985, pp.22-32.
- [7] Jodin P., Le bois matériau d'ingénierie. Association pour la recherche sur le bois en Lorraine. Ecole nationale du génie rural, des eaux et des forêts. Arbolor, Nancy, 1994, pp. 78-88.
- [8] Woodson G.E., Koch P., Tool forces and chip formation in orthogonal cutting of loblolly pine, Forest Service Research Paper SO-52. US Department of Agriculture, 1970, pp. 356-362.
- [9] Stewart H.A., Optimum rake angle related to selected strength properties of wood, Forest Products Journal, Vol 27(1), 1977, pp. 51-53.
- [10] Komatsu M., Machining performance of a router bit in the peripheral milling of wood I. Effects of the radial rake angle of the peripheral cutting-edge on the cutting force and machined-surface roughness, Mokuzai Gakkaishi, Vol 39(6), 1993, pp. 628-635.
- [11] Huang Y.-S., Cutting forces components in orthogonal cutting parallel to the grain (90-0) I. Effects of the rake angles, Mokuzai Gakkaishi, Vol 40(10), 1994, pp. 1134-1140.
- [12] Jin W., Cai L., Study and analysis on cutting forces of oblique cutting of wood, Holz als Roh- und Werkstoff, Vol 54, 1996, pp. 283-286.
- [13] Néri A.C., Gonçalves R., Hernández R.E., Forças de corte ortogonal 90-90 em três espécies de madeira de eucalipto, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Vol 3(2), 1999, pp.239-244.
- [14] Axelsson B.O.M., Grundberg S.A., Grönlund J.A., "Tool wear when planing and milling. Measurement methodology and influencing factors", Proceedings of the 11th International Wood Machining Seminar, Honne, Norway, 25-27 May 1993, pp. 159-176.
- [15] Néri A.C., Gonçalves R., Hernández R.E., Forças de corte ortogonal 90-90 em três espécies de madeira de eucalipto, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Vol 4(2), 2000, pp.275-280.
- [16] Jin W., Cai L., Study on the normal component force in oblique cutting of wood, Holz als Roh- und Werkstoff, Vol 55, 1997, pp.118-120.
- [17] Stewart H.A., Some surfacing defects and problems related to wood moisture content, Wood and Fiber, Vol 12(3), 1980, pp. 175-182.
- [18] Stewart H.A., Fixed knife-pressure bar system for surfacing dry wood, Forest Products Journal, Vol 36(6), 1986, pp. 52-56.
- [19] Stewart H.A., Fixed-knife pressure-bar planing method reduces or eliminates subsurface damage, Forest Products Journal, Vol 39(7), 1989, pp. 66-70.
- [20] Hernández R.E., Rojas G., Effects of knife jointing and wear on the planed surface quality of sugar maple wood, Wood and Fiber Science, Vol 34(2), 2002, pp.293-305.
- [21] Hernández R.E., De Moura L.F., Effects of knife jointing and wear on the planed surface quality of northern red oak wood, Wood and Fiber Science, Vol 34,2002, pp.540-552.

- [22] Nouari M., List G., Girot F., Coupard D., Experimental analysis and optimisation of tool wear in dry machining of aluminium alloys, *Wear* 255, 2003, pp. 1359–136.
- [23] Aknouche H., Outahyon A., Nouveau C., Marchal R., Zerizer A., Butaud I.C., Tool wear effect on cutting forces: In routing process of Aleppo pine wood., *J. Mater. Process.* 2008. sous presse
- [24] Brendel A.E., Force, torque, and pressure measurement. 10.1. Terminology. In: *Instrumentation and control: fundamentals and applications*. Wiley Series in Mechanical Engineering Practice. Sous la direction de Nachtigal, C.L. Wiley-Interscience, Toronto, 1990, pp. 890-896.
- [25] Stewart H.A., Effect of cutting direction with respect to grain angle on the quality of machined surface, tool force components and cutting friction coefficient, *Forest Products Journal*, Vol 9(3), 1969, pp. 43-46.
- [26] Franz N.C., An analysis of the wood-cutting process. The University of Michigan Press, Michigan, 1958. pp. 172-180.
- [27] King B., Foschi R.O., Crossed-ring dynamometer for direct force resolution into three orthogonal components, *International Journal of Machine Tool Design & Research*, Vol 9, 1969, pp. 345-356.
- [28] Hernández R.E., Naderi N., Effect of knife jointing on the gluing properties of wood, *Wood and Fiber Science*, Vol 33(2), 2001, pp. 292-301.
- [29] Ozaki S., Fukui H., Studies on the oblique cutting of wood III. Roughness of machined surface in 90°- 0° and 0°-90° cutting situations, *Mokuzai Gakkaishi*, Vol 31(5), 1985, pp.354-360.
- [30] Ozaki S., Kimura S., The cutting plane and the ratio of shrinkage of the chips in a 90°-90° cutting situation, *Mokuzai Gakkaishi*, Vol 35(10), 1989, pp. 896-904.
- [30] Ozaki S., Fukui H., Studies on the oblique cutting of wood. I. Cutting forces in cutting parallel and perpendicular to the grain, *Mokuzai Gakkaishi*, Vol 28(5), 1982, pp. 284-294.
- [31] Kuraptsev N.F., Chipless cutting of wood at right angles and at oblique angles (to the grain), *Lesnoi Zhurnal*, Vol 6, 1975, pp. 163-166.
- [32] Stewart H.A., Chip formation when orthogonally cutting wood against the grain, *Wood Science*, Vol 3(4), 1971, pp. 193-203.
- [33] Estrich J., « Tooling for woodworking », Verlag Moderne Industrie AG & Co. Vol 6, 1992. pp. 196-199.
- [34] Koch P., An analysis of the lumber planning process: Part I. *Forest Products Journal*, 5(4), 1955. pp. 255-264.
- [35] Palmqvist J. et Johansson G., Cutting forces in peripheral milling of wood. Actes du 14th International Wood Machining Seminar, tenu à Paris, Épinal et Cluny, France, du 12 au 19 septembre 1999, pp. 441-452.
- [36] Stewart H.A., Chips produced with a helical cutter. *Forest Products Journal*, 21(5), 1971, pp. 44-48.
- [37] Stewart J.S., Wood planer cutterhead design for reduced noise level. U.S. Patent 4.074.737. U.S. Patents Office, Washington, D.C. 1978. pp. 6 -12.
- [38] Boles C.L., et R.J. Flanigan., Noise reducing planer cutter head. U.S. Patent 3.933.189. U.S. Patents Office, Washington, D.C, 1976, pp. 16-21.
- [39] Stewart J.S., An overview of sources and source controls for woodworking machinery noise. Actes du Noise-Con 81 National Conférence on Noise Control Engineering, tenu à l'Université de la Caroline du Nord, Caroline du Nord, États-Unis, 1981, pp. 305-310.
- [40] Stewart H.A., et Lehmann W.F., Cross grain cutting with segmented helical cutters produces good surfaces and flakes. *Forest Products Journal*, 24(9), 1974, pp.104-106.
- [41] Berolzheimer C.P., Recherches en usinage du bois. II. La lutte contre le bruit.

Conférence préparée pour le Département des sciences du bois, Université Laval, Québec, 20 septembre 1991.

[42] York F.W., Helical heads promise planer noise reduction. Modern Sawmill Techniques, vol. 5, actes du 4th Sawmill Clinic, 1975, pp. 249-254.

[43] Koch P., Prototype flaking head smooths surfaces left by headrig or edger chipping heads. Forest Products Journal, 26(12), 1976, pp.22-27.

[44] Jones C.W., Cutterheads and knives for machining wood. C.W. Jones, Seattle, WA, .1994, pp. 138-143.

[45] Butaud J.C., Mémoire CNAM, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Cluny, 1994.

[46] Decès-Petit C., Etude des phases transitoires au cours du déroulage de bois, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Cluny, 1996.

Bibliographie

Partie 1 : chapitre 2

L'outil de coupe

I. L'outil de coupe

Introduction

De nos jours et au su de l'évolution technologique, on recense une multitude de techniques de mise en œuvre des procédés de coupe du bois (Laser, Jet d'eau, Diamant, micro-usinage...). Malgré cette immense avancée, l'outil de coupe en tant qu'élément d'action reste incontournable dans la procédure d'enlèvement de matière. C'est pourquoi nous allons nous intéresser dans ce qui suit à présenter une synthèse des matériaux usinant.

I.1. Outils de coupe pour le bois

Un outil est composé de deux parties distinctes ou non et pouvant être composées du même matériau [1,2]:

- le corps,
- la ou les parties tranchantes.

Le corps de l'outil doit présenter :

- de la ténacité,
- une bonne résistance à la fatigue,
- une absorption des efforts de coupe,
- la possibilité d'être brasable si la fixation des dents l'exige,
- une masse volumique limitée surtout pour les outils de grande taille.

Pour la zone tranchante (dent ou couteau), on choisira un matériau :

- permettant une bonne acuité d'arête,
- dur, résistant bien à l'usure,
- suffisamment rigide pour s'opposer aux efforts de coupe,
- non fragile,
- insensible à la corrosion.

D'autres facteurs (entretien, prix,...) interviennent également dans le choix de ces matériaux.

I.1.1. Géométrie des outils de coupe destinés à l'usinage bois

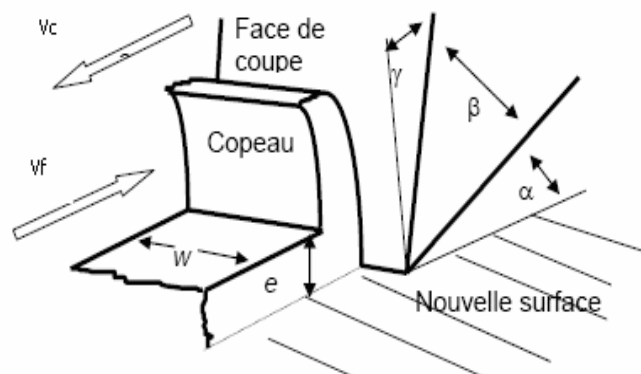


Figure : 1.2.1 : Les angles de l'outil de coupe [3].

α : angle de dépouille : entre le dos de l'outil et la surface de travail de l'outil,
 γ : angle de coupe : entre la surface de l'outil et le plan perpendiculaire à la direction d'avance,
 e : épaisseur de copeau avant d'être détaché de la pièce,
 w : largeur de copeau avant déformation,
 V_c : vitesse de coupe,
 V_f : vitesse d'avance.

Les caractéristiques angulaires des outils de coupe destinés pour l'usinage du bois sont montrées sur la figure 1.2.1, on distingue les angles γ , β et α où :

$$\gamma + \beta + \alpha = 90^\circ \quad (1)$$

- **L'angle de coupe (γ)** : ou angle d'attaque, est l'angle le plus important dans l'outil, de lui dépendent en grand partie la qualité du travail exécuté et la puissance nécessaire. L'effort de coupe décroît en même temps que l'angle d'attaque augmente jusqu'à ce que cet angle ait une valeur d'environ 45° (figure : 1.2.1). Un angle de 20 à 25° est utilisé dans le cas du fraisage de MDF.

- **L'angle de dépouille (α)** : cet angle est sans grande influence sur les efforts de coupe dans la limite où il évite le talonnage de l'outil et n'affaiblit pas l'angle de taillant. Les angles de dépouille sont compris entre 7 et 25° . Un angle de 15° est souvent utilisé dans l'usinage du MDF.

- **L'angle de taillant (β)** : cet angle conditionne la résistance mécanique et la flexibilité du bec de l'outil. Les outils ayant des angles de taillant trop petits se détériorent très rapidement. Dans le but d'éviter une détérioration trop rapide de la partie active et une qualité de travail médiocre, la valeur de l'angle de taillant ne doit pas être en dessous d'une valeur critique. Cette valeur dépend du matériau travaillé, de la constitution de l'outil, de l'épaisseur du copeau et de la direction de coupe. La valeur critique se situe entre 35 et 45° pour les directions A et B et jusqu'à 20° dans la direction C (Figure : 1.2.2).

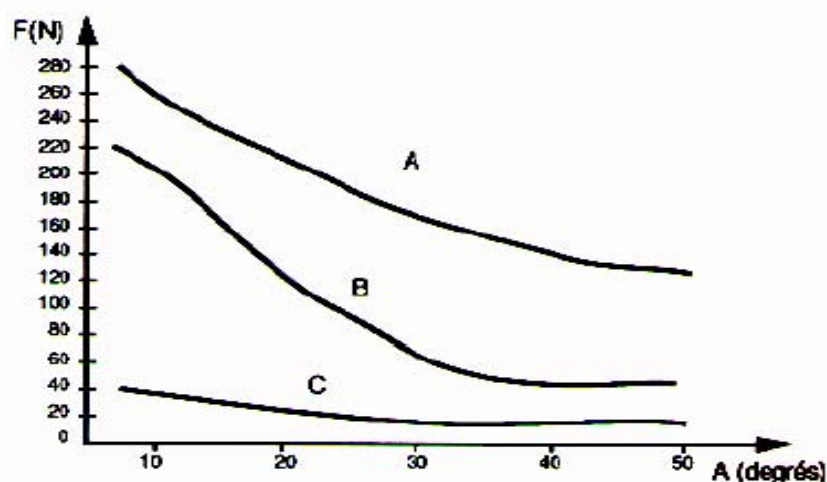


Figure : 1.2.2 : Influence de l'angle d'attaque sur les efforts de coupe suivant les directions de coupe A,B,C [4].

I.1.2. Types de matériaux usinant

La panoplie des matériaux aujourd'hui disponibles est très vaste [1]. Toutefois, seuls quelques-uns possèdent des qualités rendant possible la coupe du bois. Les matériaux de coupe utilisés en usinage bois sont :

- les aciers,
- les alliages chrome-cobalt,
- les carbures de tungstène,
- le diamant polycristallin,
- les céramiques.

I.1.2.1. Les aciers

Les aciers alliés et aciers rapides sont utilisés depuis respectivement 1880 et 1900. Ils ont bénéficié de nombreuses améliorations qui leur permettent d'être encore employés de nos jours [1].

L'acier est un alliage de fer et de carbone dont la dureté augmente avec le taux de carbone. Les caractéristiques physiques et mécaniques sont modifiées par l'addition d'éléments d'alliage tels que le chrome, le tungstène, le titane, le cobalt, le silicium, le nickel, le molybdène,... dans le but d'augmenter la trempabilité, la résistance à l'usure, la dureté et la résistance aux attaques chimiques.

On peut également les améliorer par des traitements thermiques tels que :

- un revenu destiné à supprimer des tensions créées lors du laminage,
- une trempe pour augmenter la dureté,
- un revenu qui succède à la trempe pour homogénéiser les tensions au sein du métal. Il diminue la fragilité de l'acier mais au prix d'une légère chute de la dureté.

Des traitements de surface thermochimiques peuvent également être réalisés afin d'améliorer les caractéristiques des aciers.

Les aciers sont utilisés pour la confection d'outils, très souvent pour constituer le corps, assez fréquemment pour la partie tranchante. Pour celle-ci on utilise :

- des aciers au chrome (jusqu'à 12 %),
- des aciers rapides,
- des aciers surcarburés, qui sont des aciers rapides à haute teneur en carbone (1,5 à 1,8 %) et à taux de tungstène élevé (15 à 18 %).

La dureté moyenne des aciers à outils varie de 45 à 60 HRC et de 60 à 65 HRC pour les aciers rapides.

Les aciers ont pour principaux avantages :

- la finesse de l'arête de coupe, qui engendre un excellent pouvoir tranchant donc une bonne qualité d'usinage,
- une grande facilité d'entretien : l'affûtage se fait sans difficulté, que ce soit à sec ou sous arrosage,
- une bonne résistance aux chocs,
- une mise en œuvre facile,

- un prix très abordable.

Toutefois, leur résistance mécanique est altérée par une élévation de température. Cela induit une usure d'origine mécanique rapide. De plus, comme ils sont également sensibles à la corrosion physico-chimique, on comprend que leur capacité à résister à l'usure soit faible. La tenue de coupe étant un élément essentiel dans le calcul du prix de revient d'une pièce usinée, les aciers sont aujourd'hui réservés à des emplois bien précis :

- outils dont la souplesse est indispensable (ruban),
- outils pour l'usinage de bois tendres et peu abrasifs,
- outils spécifiques pour des séries limitées,
- outils à angle de taillant très petit (couteaux de dérouleuse),
- outils très minces pour des usinages spéciaux,
- outils pour usinage aux conditions très difficiles (avec chocs par exemple)).

I.1.2.2. Les alliages chrome-cobalt

Le plus connu est le stellite (nom déposé) découvert en 1922. L'une des caractéristiques particulières du stellite est sa capacité à conserver à chaud ses qualités mécaniques. Sachant également que les matériaux de base de cet alliage sont résistants à la corrosion, on comprend que sa résistance à l'usure soit remarquable. Le stellite se compose essentiellement d'un pourcentage massique de chrome ($\approx 30\%$), cobalt (50-60%), carbone (2-2,5%), tungstène (10-15%) et silicium (0,8%) selon les différentes nuances.

Le stellite est très souvent utilisé en scierie car il sert à la préparation des lames à ruban. Il est déposé par fusion sur la pointe des dents de scies.

Pour les autres outils utilisés en usinage du bois, on emploie un alliage voisin : le tantung, qui est également une marque déposée. Cet alliage se présente sous forme de barreaux tronçonnés et profilés avant d'être brasés sur un corps en acier. Une seule des deux sortes de tantung est utilisée dans l'industrie du bois. Elle se compose en pourcentage massique de 27 à 32% de chrome, 45 à 50% de cobalt, 2 à 4 % de carbone, 14 à 19% de tungstène, 2 à 7 % de tantale/niobium, 1 à 3 % de manganèse et 2 à 5 % de fer. Elle présente entre autre l'avantage de conserver une dureté de l'ordre de 60 à 65 HRC jusqu'à des températures supérieures à 700°C.

Les qualités des alliages chrome-cobalt sont :

- une bonne résistance à l'usure,
- une bonne arête de coupe,
- une mise en œuvre facile (soit par fusion soit par brasage),
- une facilité d'affûtage.

Néanmoins, ces outils ne sont pas aussi tenaces que les outils en acier rapide et sont donc plus sensibles aux chocs. Ces outils ne sont donc pas utilisés lors d'opérations de coupe non continues. Ils sont employés pour des applications nécessitant des opérations à des vitesses de coupe deux fois supérieures à celles des outils en acier rapide.

Leurs domaines d'application privilégiés sont :

- en scierie,
- en menuiserie spécialement pour l'usinage de bois de faible ou moyenne dureté mais abrasifs.

I.1.2.3. Les carbures de tungstène

Les aciers et alliages chrome-cobalt vus précédemment ont une ténacité, une résilience et une résistance thermique aux chocs suffisantes mais n'ont pas une assez grande dureté à chaud : leur durée de vie est alors faible quand de grandes vitesses de coupe sont mises en œuvre.

Afin de pallier cette limitation, les carbures de tungstène ont été introduits dans les années trente. Grâce à leur grande dureté conservée dans un domaine important de températures, leur important module d'élasticité, leur conductivité thermique élevée ainsi que leur faible coefficient d'expansion thermique, les carbures sont parmi les matériaux les plus utilisés pour la fabrication d'outils.

Alors que les aciers et alliages chrome-cobalt sont obtenus par fusion de différents composants, les carbures de tungstène sont obtenus par frittage, à l'aide d'un liant, le cobalt (Figure : 1.2.3).

Le carbure de tungstène et le cobalt sont choisis pour leurs caractéristiques complémentaires (dureté du carbure et résilience du cobalt) (tableau 1.2.1).

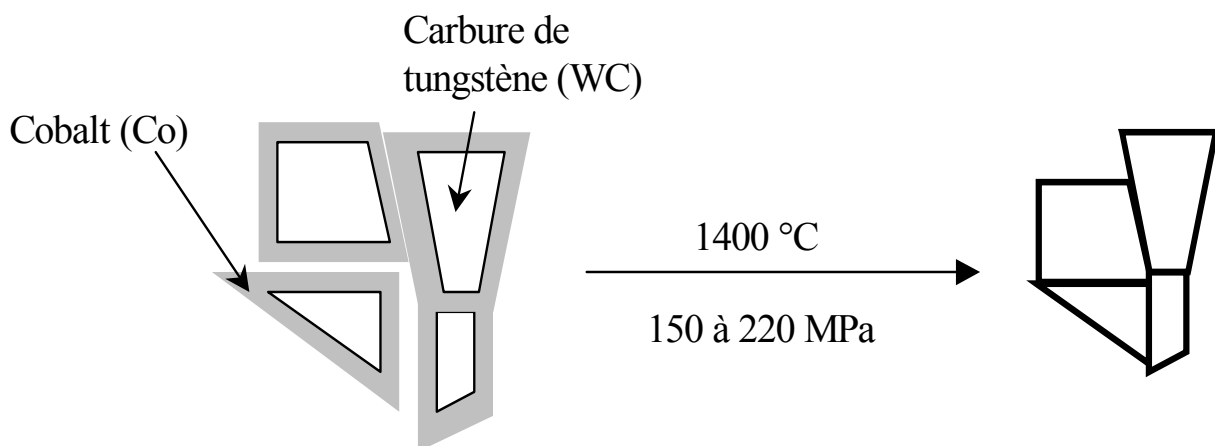


Figure : 1.2.3 : Frittage du carbure de tungstène [1].

Le carbure de tungstène a pour principales qualités :

- sa dureté qui le place parmi les corps connus les plus durs après le diamant et le nitrure de bore cubique, ce qui lui confère une excellente résistance à l'abrasion,
- son point de fusion particulièrement élevé qui lui permet de supporter sans dommage les températures atteintes lors de l'usinage,
- sa bonne inertie aux attaques physico-chimiques.

Tableau : 1.2.1 : Les qualités des carbures pour les outils de coupe du bois [5].

Désignation du matériau	Densité (g/cm ³)	Dureté (HV10)	Résistance à la flexion (N/mm)	Module d'élasticité (N/mm*1000)
K01	15.10	1850	1400	66.5
K05	14.85	1750	1600	64.5
K06	15.10	1700	1800	66.5
K10	14.85	1650	1800	64.5
K20	14.85	1600	1850	64.5
K30	14.70	1500	2200	63.0
K40	14.55	1400	2400	61.5

Le cobalt est choisi pour son aptitude à lier les grains entre eux.

Cette hétérogénéité se traduit par une certaine sensibilité aux chocs et vibrations car les plans d'assemblage sont autant de zones de fragilité potentielle. Il est donc recommandé que l'angle de taillant soit de l'ordre de 55-60°.

Les performances du produit obtenu vont être fonction de deux paramètres principaux :

- le pourcentage relatif Co-WC : la résistance aux chocs s'accroît en même temps que le taux de Co s'élève grâce à sa grande ténacité mais en contrepartie, la résistance à l'usure diminue.
- la granulométrie : des grains de petite taille génèrent un matériau résistant à l'usure mais fragile.

Cette hétérogénéité a une autre conséquence sur la coupe du bois : les grains de carbure de tungstène sont d'une dureté telle qu'ils ne s'usent pratiquement pas, mais dès que les arêtes commencent à s'émousser, les efforts de coupe augmentent et les grains se déchaussent et se détachent. Cela se produit lors du travail mais également à l'affûtage.

Cette particularité entraîne :

- un pouvoir tranchant inférieur à celui des aciers, se traduisant par une mauvaise aptitude à l'usinage des bois tendres,
- l'absence de bavure lors de l'affûtage.

D'une façon générale, le carbure se présente sous la forme de plaquettes brasées ou fixées mécaniquement sur un corps en acier (Figure : 1. 2.4).



Figure : 1.2.4 : Outils de défonçage à plaquettes carbure de tungstène pour le profilage du bois [6].

Les applications du carbure de tungstène sont les usinages de matières abrasives (nombreux bois exotiques, panneaux, matériaux composites). Mais leur tenue de coupe élevée (jusqu'à 30 fois celle des aciers) les fait apprécier également pour l'usinage d'autres matières moins désaffûtantes. L'apparition de carbures « micro-grains » ou « submicro-grains » est intéressante car :

- le pouvoir tranchant est nettement amélioré ce qui les rend aptes au travail des essences tendres,
- la tenue de coupe est augmentée allant jusqu'à trois ou quatre fois celle des compositions classiques.

L'avènement des porte-outils à plaquettes à 4 faces jetables a réduit considérablement l'entretien.

Les outilleurs de nos jours arrivent à faire des outils spéciaux en fonction de la matière à usiner en modifiant la taille des grains de tungstène.

I.1.2.4. Le diamant polycristallin

Le diamant est le corps le plus dur que l'on utilise. Les seuls diamants employés en usinage étaient, jusqu'à une vingtaine d'années, les diamants naturels, ce qui limitait leur emploi. Depuis que l'on sait fabriquer industriellement des grains de diamant, les utilisations se sont multipliées et ce matériau est depuis une quinzaine d'années employé pour l'usinage des panneaux et du bois massif.

Le qualificatif « polycristallin » est donné à ce matériau pour le distinguer du diamant naturel « monocristallin » où chaque particule n'est qu'un seul cristal [7]. Les plaquettes que l'on utilise aujourd'hui sont constituées d'une multitude de grains de diamant. Ces grains ont été obtenus à partir de poudre de carbone pur passée dans un four à haute pression et à température élevée, et disposés à la surface d'une plaquette en carbure de tungstène revêtue d'une fine couche de métal (Figure : 1.2.5) [8].

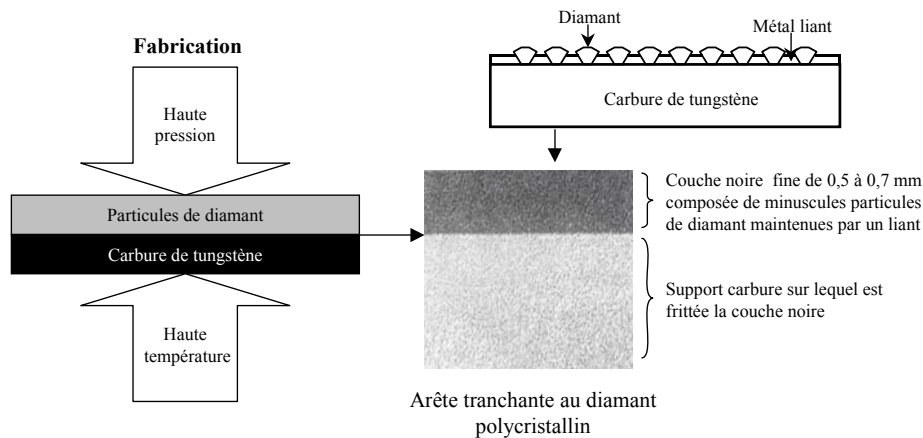


Figure : 1.2.5 : Fabrication des plaquettes en diamant [8].

Ces dernières années des innovations ont été introduites dans la fabrication des PCD telles qu'une nouvelle couche bimodale de grains de diamant extrêmement résistant à l'abrasion, et liée intégralement à un substrat de carbure de tungstène. La structure PCD extrêmement dense, comprend ainsi un diamant polycristallin avec un système de répartition bimodale des grains de diamant. Cette conception nouvelle et innovante de plaquettes pour outils de coupe permet d'obtenir une résistance maximale à l'abrasion dans les applications mettant en jeu des matériaux non-ferreux et non-métalliques.

Les résultats d'essais effectués en industrie avec ce nouveau PCD indiquent des performances deux fois plus importantes que celles obtenues avec les PCD classiques [8].

Les avantages de ce matériau sont nombreux :

- Taux d'enlèvement de matière plus élevés, temps de cycles réduits, fournissant davantage de pièces par équipe,
- Vitesses de coupe et d'avance substantiellement plus grandes par rapport à celles obtenues avec des outils conventionnels,
- Qualité hautement améliorée des pièces de fabrication, excellent contrôle dimensionnel, finitions de surface homogènes, réduction des pièces défectueuses,
- Durée de vie plus longue de l'outil (de 100 à 200 fois celle des carbures classiques) ayant pour conséquence un temps de fonctionnement accru de la machine, donnant une plus grande capacité de production sans investissement dans de nouveaux équipements.

Son principal inconvénient est sa fragilité, car la cohésion de la couche de diamant est quasiment nulle. Elle est déposée sur un substrat en carbure lui-même fragile : l'ensemble ne peut qu'être très sensible aux chocs (mécaniques ou thermiques et aux vibrations).

Pour éviter des fissures ou des brèches à l'arête de coupe, il est recommandé d'éviter des angles de taillant inférieurs à 75° . L'outil diamant doit être réaffûté dès qu'il commence à s'émousser.

L'application privilégiée de ces outils est l'usinage de matériaux abrasifs à condition :

- d'utiliser une machine en excellent état mécanique (ni à-coups, ni vibrations),
- d'être soigneux et attentif lors des interventions sur l'outil (démontage, manipulation),

- d'usiner des matériaux exempts d'inclusions métalliques ou minérales risquant d'engendrer des ruptures. Des détecteurs installés sur les machines en amont des outils permettent d'éviter tout accident dû à des corps métalliques.

En diminuant le nombre d'interventions sur la machine par des changements d'outil, le diamant polycristallin améliore la rentabilité d'opérations d'usinage à coût horaire élevé. C'est pourquoi ces outils sont de plus en plus utilisés sur des chaînes ou des centres d'usinage à commande numérique. Des outils diamant utilisés industriellement sont représentés sur la figure : 1.2.6.

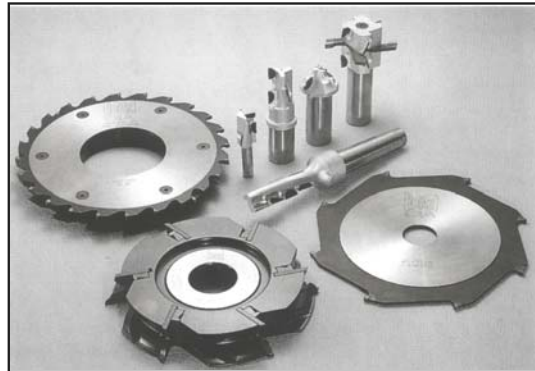


Figure : 1.2.6 : Exemples d'outils diamant utilisés en industrie [6].

I.1.2.5. Les céramiques

Sous ce nom générique on regroupe des matériaux aux caractéristiques physiques et mécaniques très différentes et aux applications très diverses. Pour la coupe, où l'on recherche la dureté, la résistance aux chocs, aux efforts et à l'usure, seules quelques compositions présentent des performances intéressantes [1].

Les céramiques sont des matériaux frittés composés à partir d'oxydes ou de nitrures.

On citera entre autre les alumines (Al_2O_3 étant le composant de base, résistance mécanique médiocre), les zircons (élaborées à partir de ZrO_2 , non brasables) et les nitrures de silicium (Si_3N_4 , peu utilisés encore, secteur de la coupe du bois et des panneaux envisageable, facilement brasables). Les céramiques (introduites dans les années cinquante) occupent un créneau situé entre le carbure de tungstène et le diamant synthétique mais ne sont pas encore utilisées industriellement. La raison majeure, en usinage des métaux notamment, est leur faible ténacité qui conduit à des performances variables lors d'usinages industriels [9].

De nombreuses tentatives de développement sont en cours mais celles-ci se heurtent aux progrès constants des outils carbures et à la baisse de prix des outils diamant.

I.2. Propriétés des différents matériaux de coupe

Les propriétés des différents matériaux de coupe ainsi que leurs caractéristiques générales sont résumées dans les tableaux 1.2.2 et 1.2.3 [1,2].

Tableau 1.2.2 : Caractéristiques générales des matériaux de coupe

Caractéristiques générales	Aciers alliés	Aciers rapides	Alliages Cr-Co	Carbures de tungstène	Céramiques	Diamant
Dureté relative à chaud	1	1	1	5	8	25
Ténacité (résistance à la fatigue)	← augmentation →					
Résilience	← →					
Résistance relative à l'usure	1	1	7	30	-	3000 à 6000
Résistance relative à l'abrasion	0,05 à 0,1	0,05 à 0,1	0,3	1	10 à 30	100
Vitesse de coupe	→					
Résistance aux chocs thermiques	←					
Applications	perçage, déroulage (faible vitesse), sciage ruban	tournage, perçage, fraisage (vitesse moyenne)	-	tournage, perçage, fraisage (vitesse moyenne)	tournage (grande et très grande vitesse)	fraisage, tournage (grande et très grande vitesse)
Prix de l'outil	→					

Tableau 1.2.3 : Propriétés des matériaux de coupe

Propriétés	Aciers rapides	Alliages Cr-Co	Carbures de tungstène	Céramiques	Diamant (cristal)
Dureté	83-86 HRA	82-84 HRA	90-95 HRA	91-95 HRA 1800-3200 HK	7000-8000 HK
Module d'élasticité (GPa)	200	-	520-690	310-410	820-1050
Densité (kg/m ³)	8600	8000-8700	10000-15000	4000-4500	3500
Température de fusion (°C)	1300	-	1400	2000	700
Conductivité thermique (W/m.K)	30-50	-	42-125	29	500-2000
Coefficient d'expansion thermique (10 ⁻⁶ /°C)	12	-	4-6,5	6-8,5	1,5-4,8

II.1. Mécanismes d'endommagement des outils

Introduction

La connaissance des mécanismes d'endommagement est un aspect très important de la coupe des métaux ou du bois car l'usure des outils participe pour une grande part dans le coût des opérations d'usinage. Le changement de la géométrie des outils, corollaire de l'usure, modifie les conditions de coupe et par conséquent détériore la qualité de l'usinage. L'usure peut avoir des origines mécaniques (abrasion, attrition) ou bien peut être chimiquement activée (usure par diffusion) et chaque mécanisme d'endommagement agit sur l'outil à des niveaux différents selon les conditions spécifiques de l'usinage. La prédominance d'un des mécanismes ou l'effet combiné de plusieurs d'entre eux dépend à la fois du type d'opération d'usinage, des conditions de coupe et des propriétés physico-chimiques des matériaux mis en jeu. Les phénomènes tribologiques aux interfaces contrôlent alors la nature et la sévérité des usures. Par exemple, quand la température à l'interface outil-copeau atteint des valeurs suffisamment élevées, l'adhésion et l'abrasion font généralement place aux phénomènes de diffusion (Figure : 1.2.7).

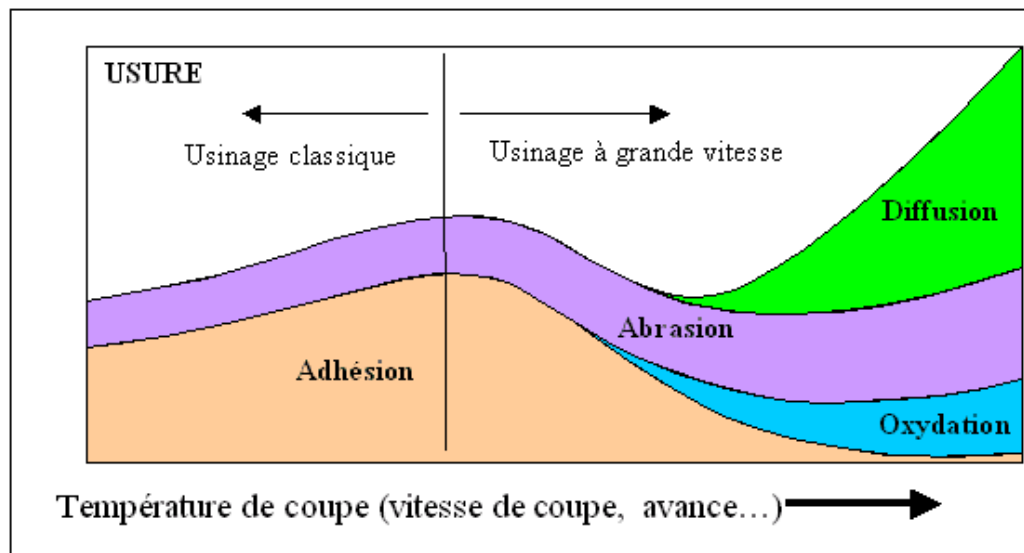


Figure : 1.2.7 : Usure présentée comme une fonction de la température [10].

II.1.1. Déformation plastique et fatigue

Les déformations plastiques se produisent sous l'effet combiné des grandes pressions et des grandes températures générées pendant l'usinage. Elles apparaissent au niveau de la pointe de l'outil et sur la face de coupe de celui-ci. Les conditions d'usinage sévères (grandes vitesses de coupe et grandes avances) ainsi que la dureté élevée de certaines pièces sont donc favorables à l'apparition de tels phénomènes. Les dimensions et la géométrie des outils (acuité de l'arête) sont les principaux paramètres pour prévenir l'usure par déformation plastique. La fatigue des outils est due aux combinaisons des phénomènes thermiques et mécaniques. Les fluctuations de la température, le chargement et le déchargement des efforts peuvent en effet conduire à la fissuration des outils et/ou à l'effondrement des arêtes de coupe.

II.1.2. Usure par abrasion

L'usure par abrasion se caractérise par la formation de bandes striées dans la direction de contact avec la surface usinée de la pièce ou dans la direction du copeau qui glisse le long de la face de coupe. L'usure par abrasion apparaît donc à la fois sur la face de coupe (Figure : 1.2.8 (a)) et sur la face de dépouille des outils (Figure : 1.2.8 (b)). Ce sont les particules dures qui sont à l'origine de cette usure. Elles peuvent être présentes dans la pièce sous la forme d'inclusions et de précipités ou provenir de l'outil lui-même par d'autres mécanismes d'usure telle que l'adhésion. De micro copeaux sont ainsi arrachés à l'outil par ces éléments durs qui sont sans cesse renouvelés au cours de l'usinage. L'usure par abrasion est l'usure dominante quand le contact à l'interface outil-copeau est essentiellement du glissement [11,12].

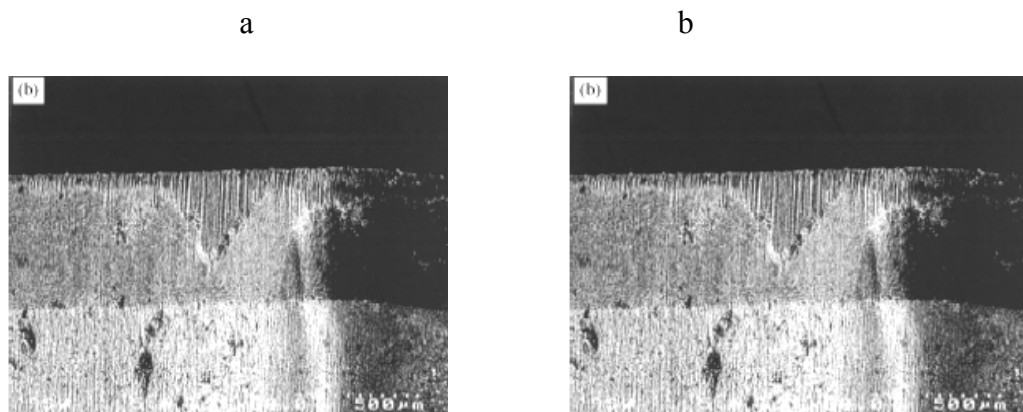


Figure : 1.2.8 : Usure par abrasion (a) sur la face de coupe après usinage d'alliage de titane, [13] et (b) sur la face de dépouille après usinage de Duralcan, [14].

II.1.3. Usure par adhésion : arête rapportée et attrition

Sous l'effet de la pression, de véritables soudures se créent entre l'outil et le copeau par écrasement/entrelacement des aspérités ou par des phénomènes d'adsorption et de solubilité s'il existe une affinité chimique entre les atomes qui constituent les deux surfaces.

Lorsque les jonctions formées se rompent, des fragments de matière provenant du copeau restent accrochés sur la face de coupe de l'outil. Dans certaines conditions, notamment à faible vitesse de coupe, les éléments du copeau qui ont tendance à coller s'accumulent de manière importante pour former un dépôt macroscopique (Figure 1.2.9 (a)) que l'on appelle arête rapportée (« Built-Up Edge »). Comme l'arête rapportée (BUE) a tendance à grossir, elle devient instable et finit par se briser. Une partie de la matière est emportée par le copeau, le reste peut passer sous l'arête de coupe et coller à la surface de la pièce. Le processus de formation et de destruction de l'arête rapportée peut se répéter plusieurs fois au cours d'un usinage causant une variation périodique de l'avance et de l'angle de coupe. Il en résulte une modification importante des dimensions souhaitées du produit fini et une détérioration de son état de surface.

L'évacuation des fragments de copeaux adhérents ou de l'arête rapportée peut s'accompagner d'arrachement d'une partie de la couche superficielle de l'outil sur laquelle s'est constitué le dépôt, ce phénomène d'usure est appelé attrition. Il est encore plus néfaste vers la fin de l'usinage au moment où l'outil se désengage de la pièce et l'arête rapportée expulsée.

Le mécanisme de formation d'arête rapportée est encore mal connu, mais il est généralement associé au phénomène d'écrouissage de la matière qui semble être prédominant dans la formation du copeau aux faibles vitesses de coupe [11,15]. L'utilisation de vitesses de coupe suffisamment élevées permet souvent de limiter l'apparition de l'arête rapportée (Figure : 1.2.9 (b)).

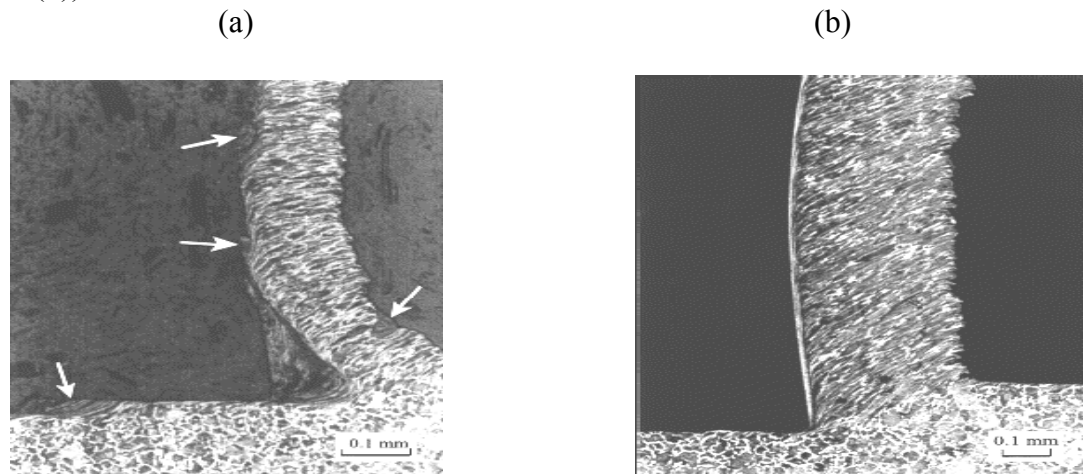


Figure : 1.2.9 : Coupe orthogonale d'acier [13] (a) $V_c=0,5$ m/s, $f=0,2$ mm/tr (les flèches blanches indiquent les dépôts de matière laissés sur la pièce après l'évacuation de l'arête rapportée) - (b) $V_c=2$ m/s, $f=0,2$ mm/tr.

II.1.4. Usure par diffusion

Aux vitesses de coupe très élevées, les phénomènes de diffusion prédominent. Sous l'effet de la température et de la pression, les atomes diffusent de l'outil vers le copeau ou vice-versa. Dans le cas des aciers, l'usure par diffusion a été expérimentalement mise en évidence par l'existence de gradients de concentration des différents éléments de l'outil dans les copeaux et par l'observation de la formation rapide d'un cratère sur la face de coupe de l'outil [12,16].

Gregory [17] explique la dégradation des outils WC-Co pendant l'usinage d'un acier Armco par diffusion mutuelle du cobalt et du carbone de l'outil et du fer de la pièce usinée (Figure 1.2.10 (a)). Le cobalt migrant vers le copeau change le potentiel chimique du carbone dans l'austénite et vient se localiser à l'interface pour former un nouveau carbure dispersé $(Fe_xCo_yW_z)C$ aux dépens des carbures initiaux WC. La couche intermétallique formée, de petites fissures sont amorcées sous la forte pression exercée à la surface de l'outil. L'écoulement continu du copeau sur la surface de l'outil s'accompagne alors d'une décohésion des grains de carbures les plus superficiels. La couche d'alliage métallique $(Fe_xCo_yW_z)C$ et des grains en WC de l'outil sont ainsi évacués avec le copeau créant un cratère sur la face de coupe de l'outil.

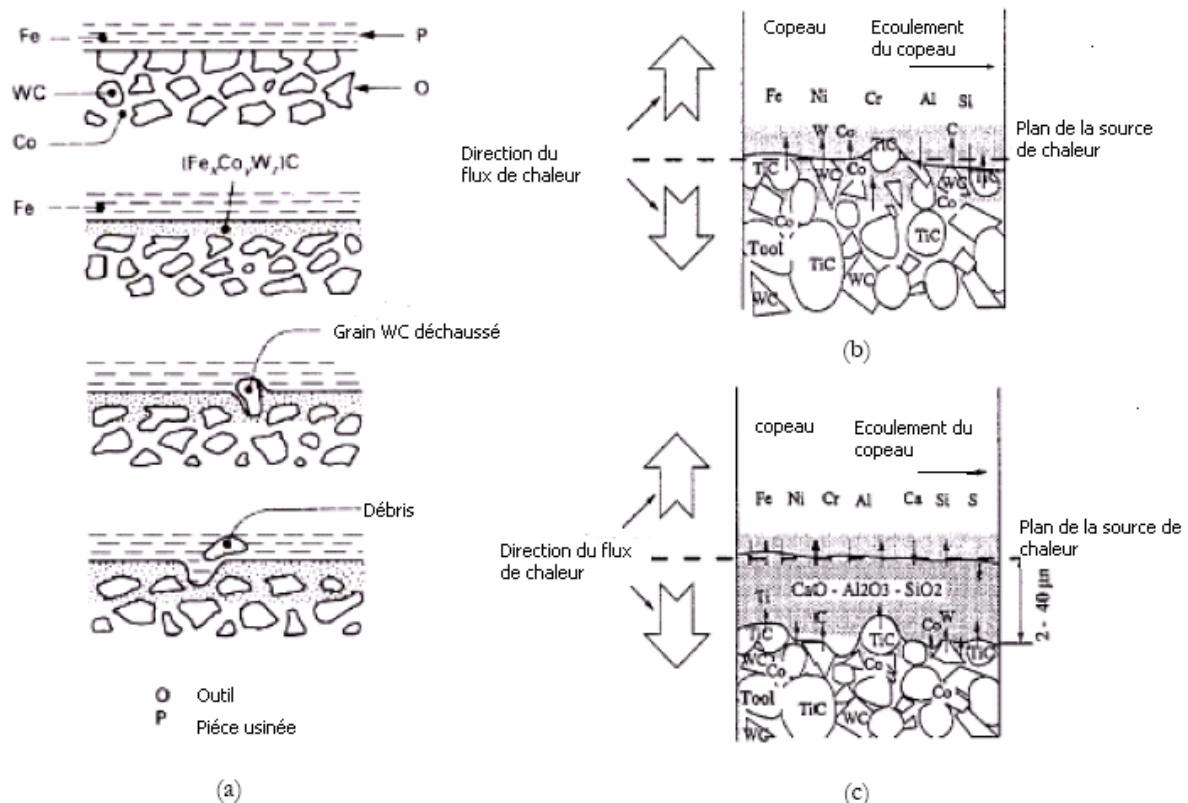


Figure : 1.2.10 : Mécanismes d'usure par diffusion : (a) Représentation schématique des différents stades de l'usure d'un outil carbure [18], (b) Modèle dynamique de diffusion [16], et (c) Modèle quasi-statique [19]

Naerheim [16] a montré dans le cas des outils WC-Co et WC-(Ti-Ta,W)C-Co que le cratère présent sur la face de coupe des outils est principalement formé par diffusion atomique des éléments de l'outil dans le copeau plutôt que par arrachement mécanique de fragments de l'outil (Figure : 1.2.10 (b)).

Il existe une relation directe entre la forme du cratère et la distribution de la température à l'interface outil-copeau. L'observation d'un cratère formé par diffusion montre que celui-ci n'apparaît qu'à une certaine distance de la pointe de l'outil, là où la température atteint ses plus hautes valeurs (figure : 1.2.11). Les avis divergent cependant quant à l'influence de celle-ci sur la forme du cratère. Par exemple, selon Gekonde [12], la profondeur maximale du cratère coïncide avec la température de transformation de phase de l'acier usiné, tandis que pour Molinari [20], elle est localisée là où le maximum de la température est atteint.

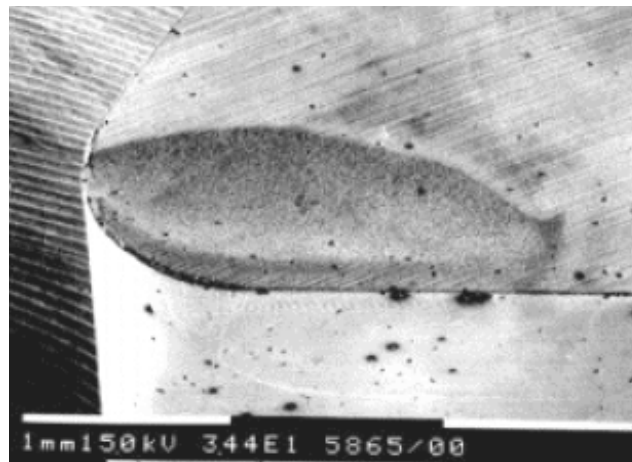


Figure : 1.2.11 : Cratère formé par usure par diffusion sur une plaquette carbure après 20 secondes d'usinage d'un acier AISI 1020 avec une vitesse de coupe de 300 m/min [11].

Les modes d'usure décrits précédemment (Figures : 1.2.10 (a) et 1.2.10 (b)) sont contrôlés par des mécanismes de diffusion dynamique car il y a renouvellement permanent de la matière du copeau en contact avec la surface de coupe, l'alimentation en éléments diffusants restant donc constante durant l'opération. Il arrive qu'une couche adhésive se forme sur la face de coupe, le copeau et l'outil ne sont alors plus directement en contact. Dans ce cas, les mécanismes de diffusion passent d'un processus dynamique à un processus statique. C'est le cas par exemple des aciers inoxydables traités au calcium usinés à l'aide d'outils WC-Co-TiC. La présence d'inclusions conduit à la formation d'une couche stable d'une épaisseur variant de 2 à 40 μm de couleur dorée essentiellement composée de $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ et de quelques éléments de l'outil provenant du mécanisme de diffusion quasi-statique illustré par la figure 1.2.10(c) [19]. La formation de couche de transfert peut être recherchée dans certains cas puisqu'elle peut constituer une barrière de diffusion et ainsi limiter la formation du cratère.

II.2. Cas des outils de coupe destinés à l'usinage bois

II.2.1. Endommagement des outils destinés en première transformation (usinage de bois vert)

Le bois étant un matériau hétérogène il ne présente pas les mêmes propriétés mécaniques sur tout le volume à usiner. En effet, selon la zone de bois (aubier, duramen, nœud, cernes, etc), (figure : 1.1.1) ainsi que sa structure (figure : 1.II.12) [21], la densité et la dureté du matériau à usiner, l'outil n'a pas le même comportement en terme d'usure et de résistance aux chocs.

D'autres facteurs influent également sur le comportement des outils tels que le type d'application (procédé d'usinage), l'essence (résineux ou feuillu), la température (bois en été 'sec' ou bois en hiver 'gelé'), le type d'usinage (continu ou discontinu) et les conditions d'usinage (vitesse de rotation des têtes de fraisage, vitesse d'avance des grumes, etc).

Ainsi, l'endommagement des outils est attribué à plusieurs phénomènes qui, selon le procédé, peuvent se produire en même temps.

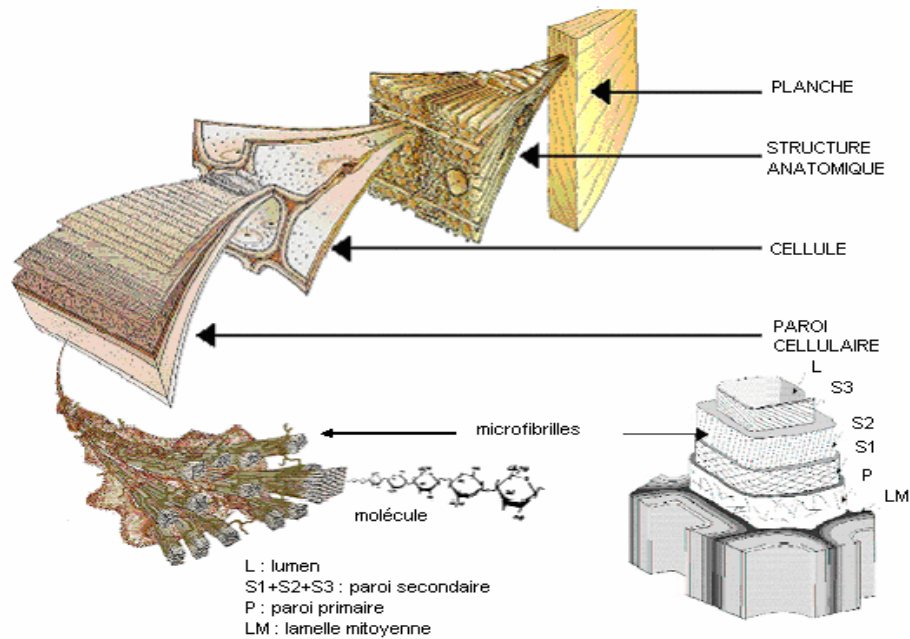


Figure : 1.2.12 : Structure du bois [21]

En plus de l'usure classique des outils par abrasion, des ébréchures de l'arête des outils peuvent être occasionnées par les nœuds ou par des corps étrangers (cailloux, clous, balles,.....) que contiennent fréquemment les bois à usiner. La figure : 1.2.13, montre des exemples d'objets trouvés dans une scierie.



a

b

Figure : 1.2.13 : (a) Objets trouvés dans le bois, (b) Objets métalliques incrustés dans le bois en scierie

Ces cassures de l'arête sont favorisées par le faible angle de bec qu'exige généralement le processus de première transformation du bois. Dans l'industrie du déroulage, l'arête coupante peut avoir une longueur comprise entre 0,5 et 4,1 m et un angle de bec compris entre 19 et

23°, ce qui fait que non seulement elle s'émousse mais il lui arrive assez souvent de s'ébrécher (arête de coupe très fragile).

Durant le déroulage, l'apparition de chaque nouvelle brèche de l'arête du couteau détériore la qualité des placages. La fréquence de remplacement des couteaux se voit ainsi accrue. Il peut intervenir après quelques tours de déroulage (cas extrême) ou après 8 heures de production [22].

Les outils utilisés pour la fabrication de plaquettes de bois (copeaux calibrés destinés à la fabrication de panneaux ou de pâte à papier) par déchiquetage connaissent sensiblement les mêmes problèmes d'endommagements. Certes, l'angle de bec de l'outil dans ce cas précis possède une valeur plus importante (45°) mais une coupe discontinue par chocs répétés conduit à l'émoussement de l'arête (vitesses de coupe importantes des têtes de fraisage de l'ordre de 50 m/s). Les outils utilisés dans ce secteur doivent donc posséder de bonnes caractéristiques de résistance à l'abrasion mais aussi aux chocs.

Les aciers sont les matériaux les plus répandus en première transformation du bois et choisis selon plusieurs critères en relation avec leurs propriétés intrinsèques (dureté, module d'Young, résistance à la rupture, etc) et en fonction d'un futur emploi bien défini : nature du procédé d'usinage (coupe continue (déroulage) ou discontinue (déchiquetage, broyage, etc)), conditions de coupe, dureté du bois, dimensions des outils, etc. Cependant, les aciéristes et les fabricants d'outils ne sélectionnent pas une nuance d'acier selon des critères scientifiques mais plutôt de façon empirique.

Pour avoir une idée sur les raisons du choix des aciers les plus utilisés en industrie de coupe du bois, les outilleurs ont été consultés. Il en découle que la fluctuation des cours de l'acier influe énormément sur le choix d'une nuance pour une application donnée. En effet, bien souvent, pour un même procédé d'usinage, l'outilleur change de nuance d'aciers non pas à cause d'une amélioration des performances des outils mais à cause d'une impossibilité d'approvisionnement ou d'un surcoût du prix d'achat de la matière première.

Les dimensions de l'outil sont également un facteur influent. En effet, selon la société SOGELAM le prix de l'acier, donc de la matière première, représente entre 30 à 35 % du coût de production de l'outil (figure : 1.2.14).

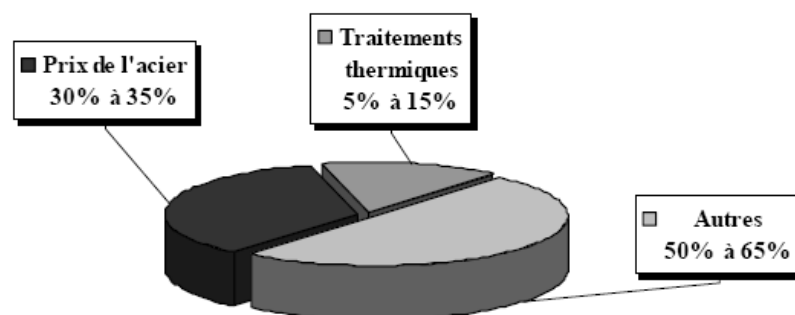


Figure : 1.2.14 : Répartition en pourcentage des coûts de production des couteaux de broyage de la société SOGELAM [23].

Aussi, pour des questions de coûts, les fabricants utilisent des nuances d'aciers plus économiques pour réaliser des couteaux de plus grandes dimensions.

Il est évident que cette pratique conduit inévitablement à l'emploi d'outils avec des propriétés médiocres et accentuant ainsi leur endommagement prématuré.

Dans la littérature, il est admis que les propriétés mécaniques des essences de bois et les paramètres de coupe seuls ne suffisent pas à expliquer l'usure des outils. Plusieurs auteurs attribuent l'usure à la combinaison d'un effet mécanique (frottement du bois sur l'arête de coupe) et d'une corrosion électrochimique [24]. La corrosion de l'acier en contact avec le bois dépend de la nature du bois (pH des tannins) et de la température de l'arête durant la coupe [25]. En effet, usiner un bois acide tel que le chêne génère une usure plus importante que l'usinage d'un bois de pH neutre comme le sapin.

L'humidité des bois et la structure métallurgique des outils jouent également un rôle très important dans l'usure [26]. Par ailleurs, Gauvent *et al* [25] affirme que l'endommagement de l'arête par corrosion opère lorsque l'outil est non sollicité (hors service). L'eau acide extraite durant la coupe stagne sur la surface de l'outil, crée un environnement propice à la corrosion et touche non seulement l'outil mais également les composants de la machine en acier se trouvant à proximité de la zone de coupe.

Ainsi, les carbures ont été très largement utilisés ces dernières décennies, à cause de leur haute résistance à l'usure, remplaçant pour l'usinage des dérivés du bois, les aciers à haute teneur en carbone et aciers rapides. Une augmentation significative de la durée de vie des outils a ainsi été observée. Cependant lors de l'usinage du bois vert à haute teneur en humidité, une dégradation rapide de l'arête de coupe se produit. Cette déficience des performances (usure 2 à 3 fois plus importante que lors de l'usinage de matériaux à base de bois) est attribuée à la nature très corrosive des extraits organiques présents dans le bois vert [26,27].

Il est donc nécessaire de créer une protection physique couvrant la lame de l'environnement corrosif externe pendant ou après la coupe pour palier à ce problème.

II.2.2. Endommagement des outils destinés en seconde transformation (usinage bois et dérivés)

Contrairement aux bois usinés en première transformation (bois massif), dans ce secteur, généralement des matériaux à base de bois sont utilisés. L'industrie des matériaux dérivés est relativement jeune (début des années 40) et s'est, depuis, bien développée dans de nombreux pays.

Les principales raisons de ce succès sont :

- La possibilité d'utiliser des arbres de faibles dimensions et de qualité secondaire mais aussi de valoriser les produits connexes des industries de première transformation (sciures, copeaux, déchets ...) [28],
- L'abondance de résine synthétique,
- L'homogénéité des matériaux ainsi reconstitués,
- Un large panel de dimensions,
- La compatibilité des produits pour une grande variété d'utilisations (meubles, construction de bâtiment) ce qui en a fait un matériau avec de nombreux débouchés.

L'essor qu'a pris l'utilisation de matériaux dérivés du bois a contraint les industriels à confectionner des outils de hautes performances de coupe, avec une haute résistance à l'usure résultant des hautes cadences de production. De plus, la plus grande abrasivité de ces matériaux limite l'utilisation d'outils en acier rapide et justifie l'emploi d'outils en carbure [29,30].

Grâce à l'émergence après 1927 des outils en carbure de tungstène WC et leur emploi en usinage du bois, cette industrie s'est développée rapidement. Son utilisation a augmenté de façon significative la productivité des industries utilisatrices. Jusqu'à présent ce type d'outils reste le plus utilisé [31].

Les outils en carbures offrent en effet la solution la plus économique dans plusieurs applications. De plus, la production d'outils aiguisés est aisée et leur affûtage peut être réalisé à l'aide d'une meule diamant classique. D'autre part, le contrôle de la composition et de la microstructure a permis d'obtenir des carbures avec des propriétés mécaniques et chimiques spécifiques. Ainsi, des carbures plus résilients avec une haute teneur en cobalt sont employés en première transformation du bois tandis que des carbures plus durs avec une faible teneur en liant cobalt et des tailles de grains submicroniques sont utilisés en seconde transformation du bois.

Comme en première transformation, les outils employés connaissent des limitations dues à l'usure de leur arête coupante. Darmawan [32] note que l'usure des outils est plus rapide lors de l'usinage de dérivés de bois que lors de l'usinage de bois massif. Ceci est dû essentiellement à la présence de quantités importantes d'impuretés telles que des poussières (particules minérales), de la silice, des colles,..... Par ailleurs, il constate également que l'usure des outils est d'autant plus rapide que la densité du matériau usiné est grande.

En ce qui concerne la modification de la géométrie de l'arête des outils, Kusiak [33] l'attribue à l'effet de la chaleur générée lors du procédé d'usinage. Même si l'angle de bec des outils utilisés en seconde transformation du bois est relativement important, généralement de 55°, l'élévation de la température sur le liant cobalt des outils carbures conduit à la dissolution de ce dernier et au déchaussement des grains de WC. Une interprétation simplifiée laisserait penser que l'usure par abrasion est le facteur unique des phénomènes d'endommagement des outils or, certaines études montrent le contraire. En effet, d'après Stewart [30] des phénomènes d'oxydation/corrosion à haute température interviennent lors de l'usinage de MDF.

En 1979, les premiers outils en PCD (Polycrystalline Diamond) furent commercialisés. En usinage de panneaux de particules et panneaux de fibres agglomérés, la durée de service de ces outils fut 125 fois supérieure à celle des outils carbures conventionnels. Le secteur de la coupe du bois est devenu ainsi le deuxième domaine d'utilisation de ces outils après le secteur automobile où les outils en PCD sont les plus employés [34].

En 1995 l'utilisation d'outils en PCD représentait 29% de la consommation mondiale et a atteint 40% à la fin des années 90. Par contre, il est à noter tout de même que l'inconvénient majeur de ce genre d'outils est leur fragilité et leur coût très élevé ce qui limite leur utilisation dans de nombreuses applications surtout ces dernières années.

III. Facteurs généraux influençant le travail de l'outil dans l'usinage du bois

Pour un bon fonctionnement, l'outil doit idéalement présenter les caractéristiques suivantes :

- Bonne qualité de coupe, tant en ce qui concerne l'état de surface résultant et la précision de coupe,
- Longue durée d'utilisation,
- Grande facilité d'affûtage,
- Possibilité de montage et démontage rapide et facile,
- Bonne conservation de profil pendant le plus grand nombre d'affûtages,
- Bonne évacuation des copeaux,
- Consommation d'énergie minimale,

- Ne pas être dangereux,
- Posséder un logement de copeaux devant la dent suffisant pour des vitesses d'avance maximales
- Ne pas provoquer d'échauffement anormal du bois,
- Ne pas adhérer aux résines dégagées par certains matériaux.

Par ailleurs, il faut noter les facteurs qui ont une influence sur le travail de l'outil, facteurs liés au matériau à usiner, à l'outil et au mode de travail :

a) **Facteurs associés au matériau :**

- la densité et la dureté du bois,
- l'abrasivité (cause principale d'usure),
- l'humidité, en général, elle abaisse les efforts de coupe et diminue l'usure,
- l'hétérogénéité de la matière
- la direction de coupe, les efforts de coupe variant de 1 à 4 suivant la direction de travail,
- la température.

b) **Facteurs liés à l'outil :**

- la géométrie de la dent,
- l'état de surface de la face d'attaque et finesse de l'arête,
- la matière de l'outil,
- le diamètre de l'outil et le nombre d'arête(s) de coupe,
- la saillie de l'arête de coupe par rapport au porte-outil,
- la face défectrice du contre-fer et le logement du copeau.

c) **Facteurs liés au mode de travail :**

- l'épaisseur et la largeur du copeau,
- l'angle entre l'arête de coupe et la direction des fibres,
- la profondeur de coupe,
- le mouvement relatif du bois par rapport à l'outil,
- la vitesse de coupe.

IV. Conclusion

Il est clair que les outils coupants pour le bois subissent des dégradations au cours des processus d'usinage, les causes sont multiples et complexes. Ces endommagements conduisent à des pertes économiques pour les industries du bois (pertes de capacité de production, produits déclassés, coût de remplacement des outils).

Dans le but d'augmenter la production, des améliorations ont été apportées aux outils existants. L'apparition de nouvelles nuances d'aciers en première transformation du bois, l'emploi d'outils en PCD en seconde transformation ainsi que l'utilisation de machines techniquement très performantes pour la préparation des outils ont permis d'augmenter la productivité. L'automatisation de l'appareil productif ainsi que l'amélioration technique des machines ont imposé aux outils des cadences très rapides, ce qui pousse les fournisseurs d'outils à prévoir des modifications aux outils de coupe.

Des solutions pourraient provenir des modifications superficielles par des traitements structuraux et des revêtements durs.

Dans le chapitre suivant sont évoquées les différentes techniques de traitement des outils de coupe susceptibles d'améliorer leur performance. Des études précédentes ont d'ailleurs été menées sur ce sujet et les résultats étaient plus qu'encourageants.

V. Références bibliographiques

- [1] Juan J., « Comment bien usiner le bois », Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (CTBA), ISBN 2-85684-012-4, 1992, pp. 236-246.
- [2] Kalpakjian S., *Manufacturing Engineering and Technology*, Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, ISBN 0-201-56950-7, 1989, pp. 289-297.
- [3] Koch P., *Wood machining processes. A volume in the wood processing series*, Edited by Frederick F., Wangaard, Yale University. 1964.
- [4] Aguilera A.A., *Optimisation des conditions de coupe pour l'usinage du bois. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy I*, 2000.
- [5] Dret B., Charloix T., *Les nouveaux matériaux de coupe pour outils à bois. Revue du bois* N°10, 1986, pp. 29-37.
- [6] Estrich J., « Tooling for woodworking », Verlag Moderne Industrie AG & Co., avec la collaboration technique de Gebr. Leitz GmbH & Co., Oberkochen, 1992, pp. 114-122.
- [7] Demazeau G., « Rapport de fin de Contrat S et perspectives à moyen terme ». 1991, pp. 59-64.
- [8] Encyclopédie LEITZ., Catalogue général Edition 1, Gebr. Leitz GmbH & Co., Oberkochen, 1997, pp. 11-18.
- [9] Murakawa M., Takeuchi S., *Journal of Adhesion Science and Technology* 9(6), 1995, pp. 695-710.
- [10] Carrilero M.S., Sola J.M.S., Sanchez J.M., Alvarez M., Gonzalez A., Marcos J.M., *A SEM and EDS insight into the BUL and BUE differences in the turning process of AA2024 Al-Cu Alloy*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 42, 2002, pp. 215-220.
- [11] Trent E.M., Wright P.K., *Metal Cutting*, Butterworth-Heinemann, 4th Edition, ISBN 2-72098-7, 2000, pp. 26-36.
- [12] Gekonde H.O., Subramanian S.V., *Tribology of tool-chip interface and tool wear mechanisms*, *Surface and Coatings Technology*, 149, 2002, pp. 151-160.
- [13] Casto S Lo., Lucchini E., Maschio S., Piacentini M., Ruisi V.F., *Ceramic materials wear mechanisms when cutting nickel-based alloys*, *Wear*, 225-229, 1999, pp. 227-233.
- [14] Andrewe C.J.E., Feng H-Y., Lau W.M., *Machining of an aluminium/SiC composite using diamond inserts*, *Journal of Materials Processing Technology*, 102, 2000, pp. 25-29.
- [15] Trent. E.M., *Cutting steel and iron with cemented carbide tools, Part II: Conditions of seizure at the tool-work interface*, *Journal of the Iron and Steel Institute*. Vol 5, 1963, pp. 923-932.
- [16] Naherheim Y., Trent E M., *Diffusion wear of cemented carbide tools when cutting steel at high speeds*, *Metal Technology*, Vol 2, 1977, pp. 548-555.
- [17] Grzesik W., *Experimental investigation of the cutting temperature when turning with coated indexable inserts*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39, 1999, pp. 355-360.
- [18] Japers SPFC., Dautzenberg J.H., *Material behaviour in metal cutting. Strains, strain Rates and Temperatures in chip formation*, *Journal of Materials Processing Technology*, 121, 2000, pp. 123-135.
- [19] Qi H.S., Mills B., *On the formation mechanism of adherent layers on cutting tool*, *Wear* 198, 1996, pp. 192-196.
- [20] Molinari A., Nouari M., *Modelling of tool wear by diffusion in metal cutting*, *Wear*, 252, 2002, pp. 135-149.
- [21] Foulger A.N., *Classroom Demonstrations of Wood Properties*, US Govt. Printing Office, Washington, DC, 1969, pp. 155- 166.
- [22] Beer P., *Etude de l'influence des modifications de la surface de l'outil sur la qualité de la coupe par déroulage*, Thèse de doctorat, ENSAM de Cluny, n° 1998-40, 1998.

- [23] Labidi C, Amélioration de la durée de service d'outils d'usinage du bois par traitements de surface et préparation de l'arête de coupe, Thèse de doctorat, ENSAM de Cluny n°582007, 2007.
- [24] Kaminski J., Rudnicki J., Nouveau C., Savan A., Beer P., Surface and Coatings Technology, 200, 2005, pp. 83- 86.
- [25] Gauvent M., Rocca E., Meausoone P.J., Brenot P., Wear, 261, 2006, pp.1051-1055.
- [26] Pugsley V.A., Korn G., Luyckx S., Sockel H.-G., Heinrich W., Wolf M., Feld H., Chulte R., International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 19, 2001, pp. 311-316.
- [27] Bayoumi A.M., Stewart J.S., Bailey J.A., Wood Fibre Science, 20, 1988, pp. 457-460.
- [28] Pinheiro D., Vieira M. T., Dias J. P, Djouadi M. A., Nouveau C., Proceedings of the 16th International Wood Machining Seminar, Matsue, Japan, August 24 -27, 2003, pp. 615-621.
- [29] Sheikh-Ahmad J.Y., Stewart J. S, Feld H., Wear, 255, 2003, pp. 1433-1437.
- [30] Salje E., Proceedings of the 9th International Wood Machining Seminar, University of California-Berkley, CA., 1988, pp. 211-214.
- [31] Qingshun B., Yingxue Y., Shuodong C., International Journal of Refractory Metals and Hard Materials 20, 2002, pp. 395-400.
- [32] Darmawan W., Tanaka C., Usuki H., Ohtani T., J. of Wood Sci, 47, 2001, pp. 342-345.
- [33] Kusiak A, Battaglia J.C, Marchal R, Influence of CrN coating in wood machining from heat flux estimation in the tool, International Journal of Thermal Sciences, 44, 2005, pp. 289-301.
- [34] Stewart H. A., Forest Product Journal, 54, 2004, pp. 53-56.

Bibliographie

Partie 1 : chapitre 3

Traitement de surface pour outil de coupe

Introduction

Ce chapitre est dédié aux techniques d'amélioration de la tenue à l'usure des outils de coupe. Les techniques pour l'amélioration des caractéristiques des outils coupants sont nombreuses, on se limitera à l'étude de certaines méthodes qui se résument par les techniques de revêtements en matériaux durs et aussi par des traitements structuraux et superficiels des outils destinés à enlever la matière.

En premier lieu une étude sur les matériaux durs a été faite, suivie d'une étude sur les techniques et moyens d'élaboration des revêtements durs.

I. Classification des matériaux durs

Les matériaux possédant une dureté élevée et susceptibles d'être utilisés comme revêtements ont été classés par Holleck [1] en fonction de la nature de leur liaison chimique, comme le montre la figure : 1.3.1.

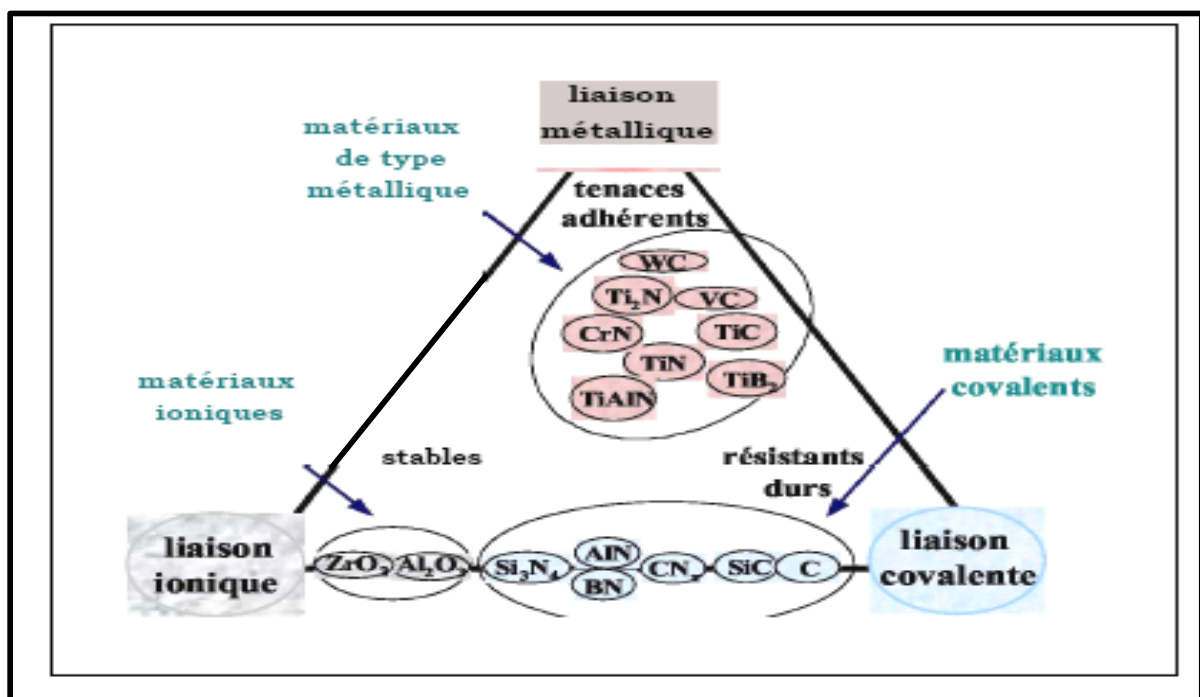


Figure : 1.3.1 : Classification des matériaux durs [1].

- Matériaux à caractère métallique: borures, carbures et nitrures de métaux de transition,
- Matériaux à caractère covalent: borures, carbures et nitrures de silicium, d'aluminium, de bore, ainsi que le diamant,
- Matériaux à caractère ionique: oxydes d'aluminium, de zirconium, de titane et de béryllium.

Les propriétés d'un matériau varient en fonction de la position de celui-ci dans la figure : 1.3.1. Ainsi, les matériaux à caractère métallique présentent en général une bonne ténacité et une bonne adhérence, car en général, les interfaces cohérentes ou semi cohérentes (présentant une faible énergie d'interface) sont développées avec les substrats métalliques, les matériaux à caractère covalent montrent une dureté très élevée et enfin, les matériaux à caractère ionique présentent une bonne stabilité chimique.

Cette classification sert à comprendre le comportement de ces matériaux comme revêtements durs pour une application particulière. L'application de ce type de films pour la protection des surfaces a connu un grand essor depuis une vingtaine d'années.

Les propriétés de divers matériaux durs sont données dans le tableau 1.3.1, tout en sachant que ces propriétés sont dépendantes de la technique d'élaboration. Il existe un grand nombre de composés possédant une dureté élevée. Cependant, pour réussir la conception d'un revêtement, il est nécessaire de faire une bonne sélection des matériaux ainsi qu'une bonne sélection de la technique d'élaboration, en prenant en compte des critères thermodynamiques, mécaniques et physiques.

Tableau 1.3.1. Propriétés mécaniques et physiques des matériaux durs [2].

Type de matériaux	Matériau	densité	Point de fusion (° C)	Dureté Vickers (Hv)	Module de Young (GPa)	Résistivité électrique (pn cm)	Coefficient de dilation thermique (CDT°10 K ⁻¹)
Métalliques	TiB ₂	4.50	3225	3000	560	7.0	7.8
	TiC	4.93	3067	2800	470	50	8.0-8.5
	TiN	5.40	2960	2300	250	25	9.4
	ZrB ₂	6.11	3245	2300	540	6	5.9
	ZrC	6.63	3445	2560	400	42	7.0-7.4
	ZrN	7.32	2982	1600	510	21	7.2
	VB ₂	5.05	2747	2150	510	13	7.6
	VC	5.41	2658	2900	430	53	7.3
	Vn	6.11	2177	1560	460	85	9.20
	CrB ₂	5.58	2188	2250	540	18	10.5
	CrN	6.11	1050	1100	400	640	23
	WC	15.72	2776	2350	720	17	3.8-3.9
Covalents	B ₄ C	2.52	2450	4000	441	5.10 ⁵	4.5 (5.6)
	BN	3.48	2730	5000	660	10 ¹⁸	xxx
	C (diamant)	3.52	3800	8000	910	10 ²⁵	1.0
	SiC	3.22	2500	2600	400	8000	4.5
	Si ₃ N ₄	3.19	1900	1720	210	10 ¹⁸	2.5
	AlN	3.26	2250	1230	350	10 ¹⁵	5.7
Ioniques	Al ₂ O ₃	3.98	2047	2100	400	10 ²⁹	8.4
	TiO ₂	4.25	1867	1100	205	xxx	9.0
	ZrO ₂	5.76	2677	1200	190	10 ¹⁶	11 (7.6)
	HfO ₂	10.2	2900	780	xxx	xxx	6.5
	MgO	3.77	2877	750	320	10 ¹²	13
Substrats	W	19.3	3410	xxx	407	30	4.45
	WC-6Co	xxx	xxx	1500	640	xxx	5.40
	Acier rapide	xxx	xxx	800-1000	250	xxx	12-15
	HSS						

Les caractéristiques qu'on peut tirer de ce tableau sont les suivantes :

- Tous ces matériaux possèdent une dureté et un point de fusion élevés,
- Comme la fragilité est liée à la dureté, les matériaux à liaison ionique exhibent une faible résistance à la fissuration,
- Le module d'Young des matériaux à liaison ionique est le plus faible,
- Le coefficient de dilation thermique (CDT) augmente, en général, des matériaux à liaison covalente vers les matériaux à liaison métallique, en passant par les matériaux à liaison ionique.

Quant aux substrats, il existe une température limite de dépôt pour éviter une transformation potentielle (recristallisation, transformation de phases ou vieillissement). Ainsi, la température de dépôt limite pour les aciers rapides doit être inférieure à 700°C, alors que pour le tungstène et le carbure cémentés il n'y a pas de limite, en raison de leur point de fusion élevé.

II. Généralités sur les couches minces

Les besoins de l'industrie de coupe, demandeuse d'outils dotés d'une excellente résistance à l'usure, ont conduit, depuis plusieurs décennies, au développement de couches minces de nitrures de métaux de transition déposées par procédés physiques en phase vapeur (PVD). Compte tenu des conditions extrêmes auxquelles ils sont soumis, ces dépôts doivent présenter plusieurs caractéristiques particulières. Dureté et propriétés tribologiques optimisées sont les premières à considérer, compte tenu de l'application potentielle de ces couches dans le domaine de l'usinage. En outre, ils doivent présenter une bonne tenue à l'oxydation à chaud en raison de l'élévation de température concomitante au frottement. Enfin, ils doivent constituer un moyen efficace pour lutter contre la corrosion du substrat, afin de limiter par exemple l'agression d'un éventuel lubrifiant ou la contamination lors d'un stockage en atmosphère industrielle.

Les revêtements monocouches TiN et CrN ont ainsi largement été étudiés au cours de ces dix dernières années et ont trouvé de nombreuses applications industrielles, notamment dans le domaine du fraisage pour leurs propriétés mécaniques exceptionnelles. Cependant, dans un souci constant de rentabilité et d'amélioration de la durabilité des outils employés, une nouvelle génération de revêtements, constituée de deux types de dépôts dits nanostructurés a été développée : d'une part les « super réseaux », multicouches formées par plusieurs strates de matériaux, tels que TiN, CrN, NbN ou AlN, dont l'épaisseur individuelle n'excède pas quelques dizaines de nanomètres et d'autre part les nanocomposites, constitués par la dispersion de grains de quelques nanomètres, dans une matrice amorphe de nature différente, typiquement des nanocristaux de TiN dans une matrice amorphe de BN. Ces nouveaux dépôts sont censés allier une haute dureté à une ténacité accrue et permettent donc d'envisager des applications toujours plus sévères, comme l'usinage de nouveaux matériaux ou la mise en forme à haute cadence.

II.1. Formation d'une couche mince

Il y a trois étapes dans la formation d'un dépôt en couche mince à partir d'une phase vapeur [3].

- **Etape n°1** : synthèse ou création de la (ou les) espèce(s) à déposer : afin de mettre un matériau en phase vapeur on peut utiliser des techniques comme l'évaporation, la pulvérisation ou la dissociation des espèces dans un plasma.
- **Etape n°2** : transport de ces espèces de la source vers le substrat : il peut se dérouler sans collision entre atomes et molécules si on est en régime de flux moléculaire (libre parcours moyen important). En revanche, si la pression partielle du matériau et/ou des gaz environnants est assez élevée, il y aura de nombreuses collisions dans la phase vapeur pendant le transport vers le substrat.

Etape n°3 : dépôt sur le substrat et croissance de la couche : cette étape prend en compte le dépôt de la couche avec les processus de nucléation et de croissance. Lorsque des atomes frappent une surface, ils perdent leur énergie au profit de cette dernière et se condensent pour former des îlots de nucléation stables. Pendant la condensation, les adatoms ont un degré de mobilité sur la surface qui dépend de leur énergie cinétique et de la force (ainsi que du type d'interaction) entre l'adatom et la surface. Les îlots vont se développer et se rejoindre pour former une couche continue (c'est la coalescence). Les liaisons entre des atomes et des matériaux dissemblables (ceux de la couche et du substrat) peuvent être de différentes natures. Une fois la coalescence effectuée, on a formation d'une interface. Le type de zone interfaciale dépend de la morphologie de surface du substrat, de la contamination du substrat, des interactions chimique atome/surface, de l'énergie des atomes déposés et du comportement de nucléation des atomes déposés.

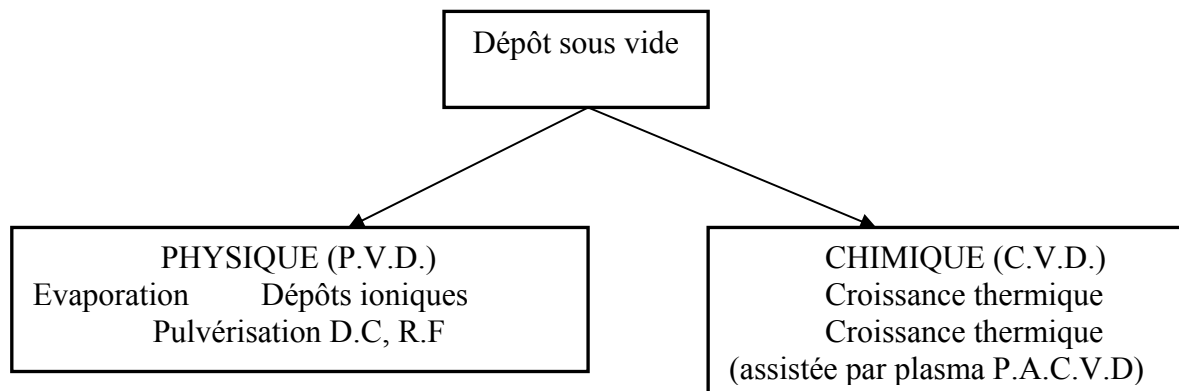
Cette interface peut être :

- ❖ **mécanique** : accrochage mécanique du matériau de la couche sur une surface rugueuse, l'état de surface du substrat influence la croissance de la couche. Une rugosité importante peut en effet améliorer l'adhérence de la couche,
- ❖ **abrupte** : passage abrupt du matériau de la couche au matériau du substrat en une distance de l'ordre de la distance interatomique (de 2 à 5 Å),
- ❖ **composée** : couche de composition constante, épaisse de plusieurs paramètres de maille et créée par une interaction chimique des matériaux de couche et de substrat,
- ❖ **diffusée** : changement graduel de composition, de contrainte intrinsèque et de paramètres de maille au travers de l'interface,
- ❖ **de pseudo-diffusion** : interface diffusée entre deux matériaux normalement insolubles qui le deviennent sous l'effet d'un bombardement ou d'une implantation ionique.

Quand les îlots se sont rejoints et que la zone interfaciale prend corps, la couche commence à épaisir, c'est la **croissance**. La façon dont la couche se forme et croît détermine les propriétés de la couche mince finale.

II.2. Classification des techniques de dépôt

Les techniques de dépôt peuvent être décrites en fonction des trois étapes citées précédemment. On peut donc classer les techniques de dépôts de la manière suivante :



II.3. Choix d'une technique de dépôt de couches minces

Le tableau 1.3.2 résume les principales caractéristiques prises en compte pour le choix d'une technique de dépôts.

Dans un premier temps, il faut vérifier quelle technique pourra synthétiser le matériau que l'on veut déposer. Le chauffage du substrat est également un critère important dans le choix de la technique de dépôt. Par ailleurs, connaissant l'état de surface du substrat à revêtir, on ne choisira pas une technique pouvant perturber l'interface de croissance si ce substrat est très rugueux [4]. L'évaporation induisant des perturbations à l'interface de croissance est à proscrire lorsque des substrats rugueux sont à revêtir.

Tableau 1.3.2. Caractéristiques principales des méthodes de dépôt sous vide [4].

Caractéristiques	Evaporation	Ion Plating	Pulvérisation	C.V.D.
Production de l'espèce à déposer	Energie thermique	Energie thermique	Transfert de moment	Réaction chimique
Vitesse de dépôt	Jusqu'à 75 $\mu\text{m}/\text{mn}$	Jusqu'à 25 $\mu\text{m}/\text{mn}$	Faible (sauf pour métaux purs)	Moyenne (200 à 2500 $\text{\AA}/\text{mn}$)
Espèce déposée sous forme de	Atomes et ions	Atomes et ions	Atomes et ions	Atomes
Dépôt sur :				
-Des substrats de formes complexes	Peu recommandée	Bons résultats mais épaisseur non uniforme	Assez bons résultats mais épaisseur non uniforme	Bons résultats
-dans des trous borgnes de petit diamètre	Résultats médiocres	Résultats médiocres	Résultats médiocres	Résultats moyens et limités
Dépôt de métaux, alliages, composés réfractaires	Oui	oui	oui	oui
Energie des atomes de l'espèce déposée	Faible 0,1 à 0,5 eV	Peut être élevée 1 à 1000 eV (et plus)	Peut être élevée 1 à 100 eV	Peut être élevée en PACVD
Bombardement du substrat puis	non (sauf	oui	oui	Possible en PACVD

de la couche par des ions de gaz inerte	assistance par un canon à ions externe)			
Perturbations introduites à l'interface de croissance	Non	oui	oui	oui
Chauffage du substrat par moyens externes	oui	oui ou non	oui ou non	oui en CVD oui ou non en PACVD

Le choix d'une technique de dépôt n'est donc pas aisé et doit être bien étudié. Outre les paramètres précités, on doit également tenir compte de certains paramètres que sont :

- la vitesse de dépôt désirée,
- les limites imposées par le substrat (température..),
- l'adhérence du dépôt sur le substrat,
- la géométrie des substrats (de forme complexe ou non),
- la pureté du matériau choisi,
- la préservation de l'environnement,
- la facilité d'approvisionnement du matériau à déposer.

Les épaisseurs des revêtements sont souvent en fonction de la méthode de dépôt utilisée comme le montre la figure : 1.3.2.

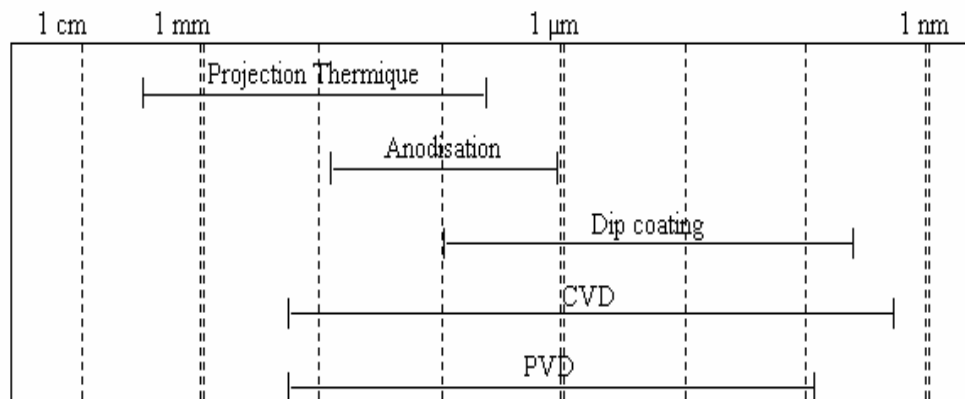


Figure : 1.3.2. Gamme d'épaisseurs réalisables suivant les différentes techniques de dépôt [5].

Comme nous l'avons vu précédemment, de nombreuses techniques de dépôts utilisent des plasmas soit pour créer des espèces énergétiques (ions), soit pour dissocier des molécules. Nous allons donc dans ce qui suit décrire de manière succincte ce qu'est un plasma.

III. Définition d'un plasma

Si l'on fournit une énergie suffisante à un gaz moléculaire, celui-ci va progressivement se dissocier en un gaz atomique à cause des collisions entre particules dont l'énergie cinétique est supérieure à l'énergie de liaison de la molécule [5-7].

A des températures suffisamment élevées, une fraction croissante des atomes aura assez d'énergie cinétique pour dépasser, par collisions, l'énergie de liaison des électrons des couches supérieures et obtenir ainsi un gaz ionisé ou plasma.

Cette transition n'est pas une phase de transition dans le sens thermodynamique car elle se fait graduellement avec l'augmentation de la température du plasma.

Technique d'obtention d'un plasma

En pulvérisation magnétron, le plasma est obtenu par une décharge électrique dans un gaz. Un champ électrique est appliqué entre deux électrodes : une cathode (généralement à un potentiel négatif) et une anode (généralement à la masse). Ce champ accélère les électrons libres à des énergies suffisamment élevées pour ioniser les atomes par collisions. Le champ appliqué transfère plus efficacement de l'énergie aux électrons (légers) qu'aux ions (relativement lourds). La température des électrons est de ce fait plus élevée que celle des ions car le transfert d'énergie thermique des électrons aux particules plus lourdes est lent. Toutefois, pour que le gaz soumis au champ électrique s'ionise, il est nécessaire qu'un certain nombre de conditions (pression, tension de polarisation, distance interélectrodes,...) soit rempli : ce sont les conditions de Paschen [8].

IV. Techniques de dépôts de couches minces

IV.1. Evaporation

L'évaporation est une technique d'obtention des films sous vide qui consiste à évaporer ou sublimer un matériau. L'énergie nécessaire à l'évaporation est le plus souvent fournie par bombardement électronique. Le dépôt se fait par condensation de la phase vapeur sur un substrat.

L'évaporation permet l'obtention de films à une vitesse de dépôt élevée. En revanche, les inconvénients que présente cette technique sont l'élaboration de films souvent sous-stoechiométriques (ceci est dû à une dissociation partielle des espèces), une faible adhésion des couches et la nécessité d'une densité de puissance assez importante pour produire la phase gazeuse des matériaux ayant un point de fusion très élevé. Le développement de l'évaporation réactive assistée par plasma (Activated Reactive Evaporation) a permis de pallier à ces inconvénients. Dans cette technique la phase vapeur est produite grâce à un faisceau d'électrons et la réactivité est augmentée par la présence d'un plasma réactif. Diverses modifications de cette technique donnent lieu à d'autres procédés PVD, tels que le dépôt par plasma à très basse pression (Low-Pressure Plasma Deposition, LPPD), l'évaporation réactive assistée par un bias (Biased Activated Reactive Evaporation, BARE), etc. La figure : 1.3.3 montre un diagramme schématique de chaque technique de dépôt.

Les matériaux les plus souvent produits par ces techniques sont les oxydes, carbures et nitrures d'aluminium, de titane et de zirconium [9] avec une excellente pureté.

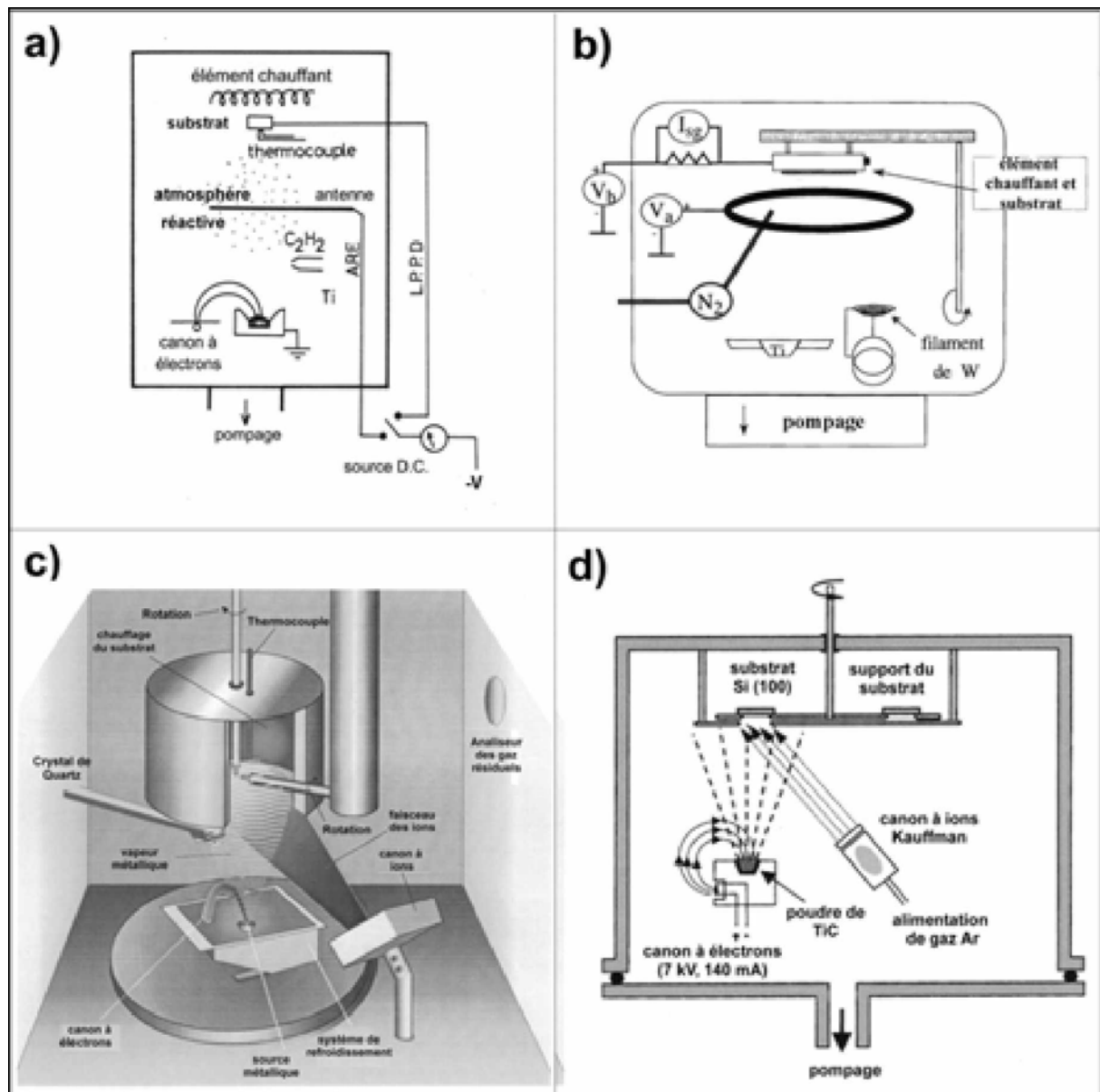


Figure : 1.3.3. Diagrammes schématiques des techniques d'évaporation, a) évaporation réactive (Low Pressure Plasma Deposition/L.P.P.D.) [10], b) évaporation réactive assistée par une anode [11], c) évaporation assistée par un canon à ions [12] et d) évaporation assistée par un canon à ions Kauffman [13].

IV.2. Pulvérisation cathodique

La pulvérisation cathodique est une technique qui consiste à bombarder une cible avec des ions de manière à ce que les espèces éjectées de la cible viennent se déposer sur un substrat. Le bombardement a lieu sur la cible qui est placée sur la cathode attirant les ions positifs générés dans un plasma de gaz à basse pression. Pour les films de TiC et de TiN, le plasma est souvent produit avec un gaz neutre (Ar) et/ou un gaz réactif (azote, méthane, propène, etc.). De la même façon que pour l'évaporation, diverses modifications apportées à la pulvérisation cathodique donnent lieu à divers procédés d'élaboration (figure : 1.3.4). Ainsi, les techniques de dépôt physique en phase vapeur sont devenues très nombreuses.

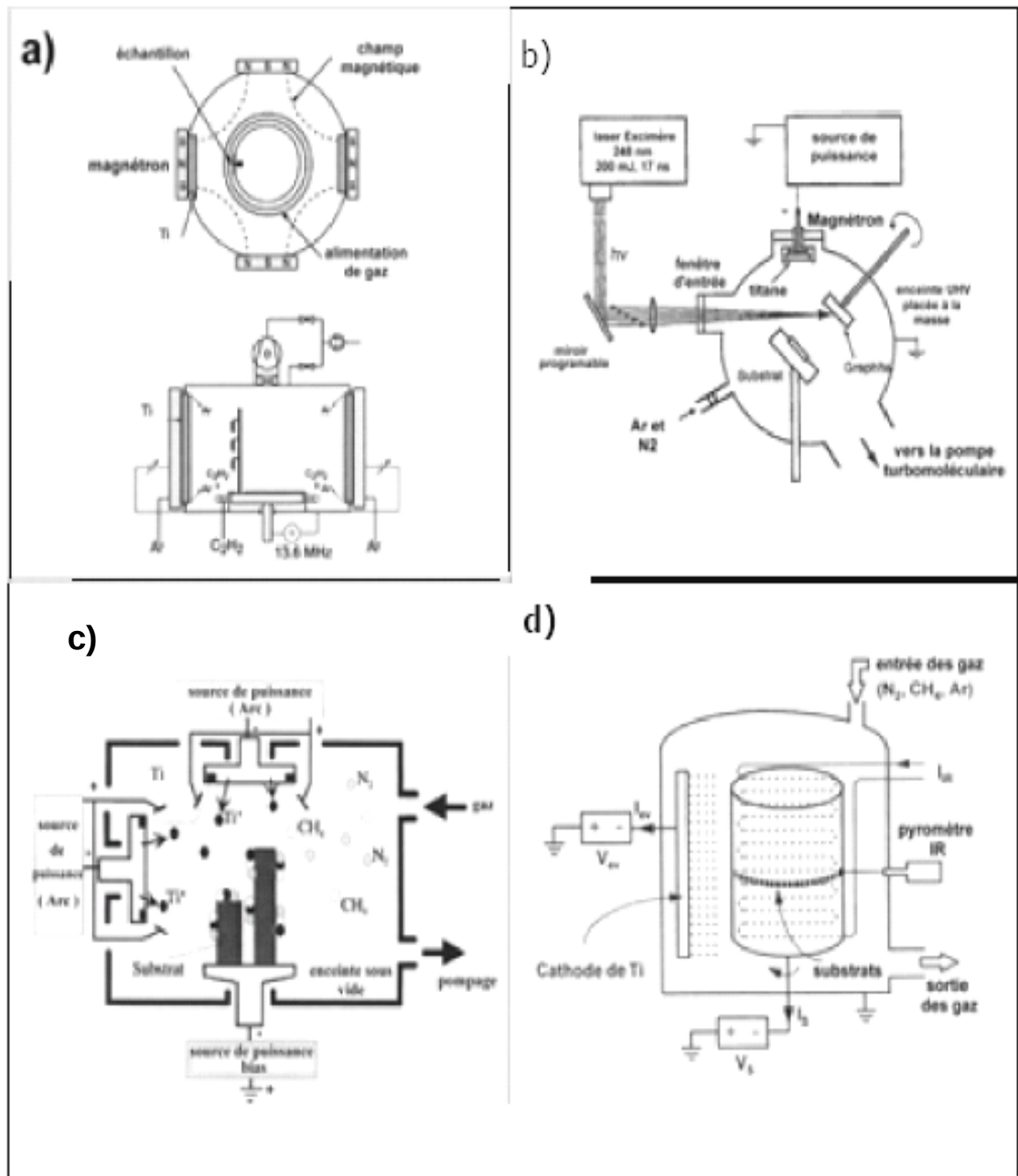


Figure : 1.3.4. Diagrammes schématiques de techniques telles que a) la pulvérisation magnétron [14], b) la pulvérisation magnétron assistée par un laser pulsé [15], c) le dépôt ionique assisté par un système multi-arc pour la fabrication de TiCN [16] et d) la pulvérisation assistée par arc pour élaborer TiCN [17].

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. Pour un métal avec une puissance d'environ 5 W/cm^2 et une pression dans l'enceinte autour de $1,3 \text{ Pa}$, on peut espérer obtenir une vitesse de dépôt de 2 nm/s . La température du substrat dépend essentiellement de la vitesse de dépôt donc de la densité du plasma. Le substrat peut atteindre des températures de l'ordre de 300 à 500°C . Toutefois, pour certains types de dépôts, on peut être amené à chauffer le substrat [3].

Les paramètres de 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-substrats,
- la densité de courant,
- la géométrie de l'ensemble,
- la présence ou non de champs magnétiques.

Les ions peuvent provenir soit d'un plasma, soit directement d'une source d'ions (figure : 1.3.5).

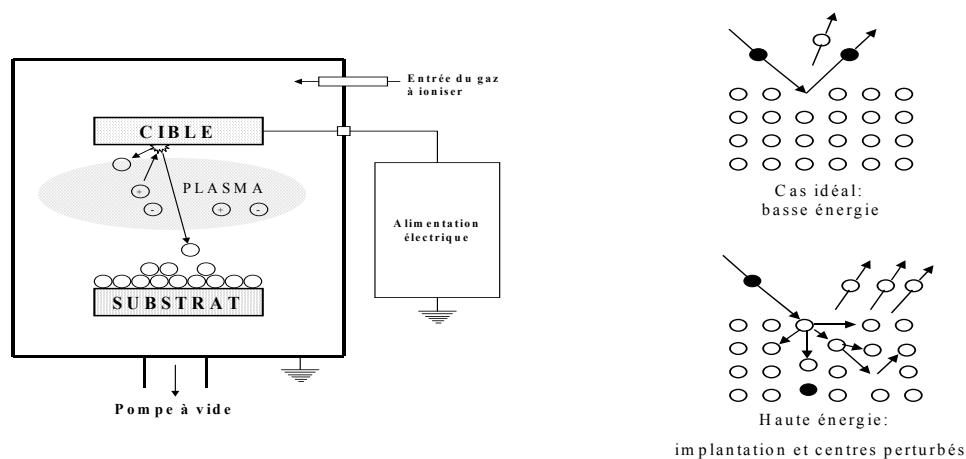


Figure : 1.3.5 : A/ Principe de la pulvérisation –B/ Illustration des interactions ion/solide à basse et haute énergie [3].

La pulvérisation cathodique magnétron présente de très nombreux avantages décrits dans la littérature [3,18] parmi lesquels on peut retenir :

- la reproductibilité des dépôts, ce qui explique le très grand succès de cette technique dans le milieu industriel,
- l'obtention de couches très uniformes par leur aspect et leur adhérence, car cette technique évite les problèmes tels que les gouttelettes et les projections,
- des rapports atomiques dans les couches voisins de ceux de la cible.

Parmi les applications types de la pulvérisation aux dépôts de couches minces, on peut citer :

- les métallisations pour la production de semi-conducteurs,

- les couches transparentes conductrices pour les écrans électroluminescents,
- les résistances à couches minces,
- les couches optiques à longue durée de vie telles que les miroirs pour gyroscopes à lasers,
- les couches dures pour les outils,

les dépôts en continu sur des rouleaux de films plastiques pour des applications architecturales (contrôles thermiques, maisons solaires, ...).

IV.2.1. Pulvérisation magnétron

La cathode magnétron est un perfectionnement de la cathode utilisée en pulvérisation diode classique, qui permet de s'affranchir du filament chaud de W. 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 [18].

L'effet magnétron consiste en une décharge diode D.C. ou R.F. 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 (Figure : 1.3.6).

Si l'on superpose au champ électrique E un champ magnétique B , perpendiculaire à celui-ci, donc parallèle à la cathode et très près de celle-ci (Figure : 1.3.6), les trajectoires électroniques s'enroulent autour des lignes de champ magnétiques, 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.

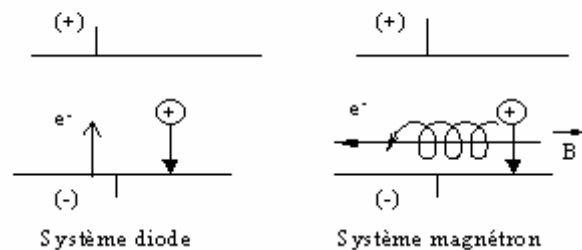


Figure : 1.3.6 : Trajectoires électroniques

Il en résulte :

- l'augmentation de la vitesse de dépôt,
- l'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.

Les pressions de travail se situent entre $6,7 \cdot 10^{-1}$ et $6,7 \cdot 10^{-2}$ Pa.

Les deux types de cathodes magnétrons conventionnels couramment utilisés sont : les magnétrons plans (circulaires (Figure : 1.3.7) et rectangulaires) et les magnétrons cylindriques (cathodes barreaux et magnétrons cylindriques creux).

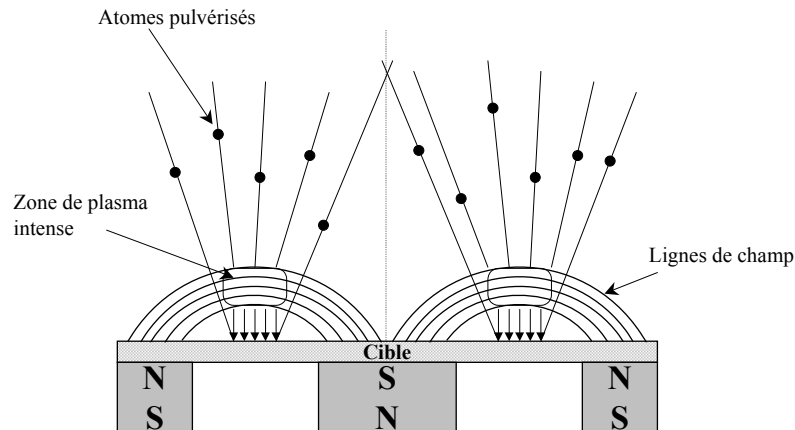


Figure : 1.3.7 : Magnétron plan circulaire conventionnel.

La pulvérisation magnétron peut être effectuée en utilisant une seule cathode ou bien plusieurs cathodes installées en vis-à-vis (Figure : 1.3.7). Ainsi, un système magnétron constitué de deux cathodes (par exemple une cible de titane et une cible de chrome) permet de réaliser aisément des multicouches de composés biphasés (TiN/CrN) et est appelé « dual magnétron » (Figure : 1.3.8b, 8e). Actuellement, ces techniques de pulvérisation à plusieurs cathodes permettent également la synthèse de « superlattices » ou superréseaux nécessitant d'une part la présence de plusieurs cathodes mais aussi une période de couches très faible (inférieure à 10 nm). L'emploi de composés triphasés (comme TiAlN) que l'on retrouve dans les multicouches est également facilité grâce à ces techniques.

Les nouvelles tendances en procédés magnétron consistent en l'emploi de magnétrons déséquilibrés (Figure : 1.3.8a [19]) et à cathode rotative [20].

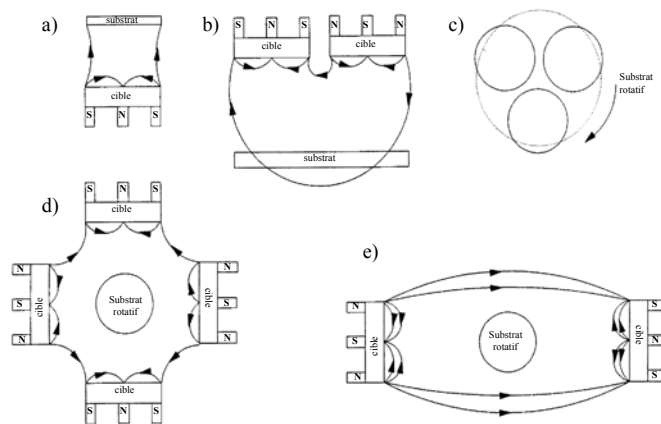


Figure : 1.3.8 : Exemples d'arrangements de cathodes magnétron : a) Magnétron déséquilibré, b) dual magnétron pour copulvérisation, c) tri cathodes pour multicouches ou alliages, d) arrangement à 4 cathodes pour multicouches, alliages, couches réactives, e) dual magnétron face-à-face pour multicouches, alliages et dépôt sur des substrats de géométrie complexe [19,21].

Une cathode magnétron est dite déséquilibrée lorsqu'une partie des lignes de champ issues d'un pôle ne converge pas directement vers l'autre pôle. Par exemple, contrairement à un

magnétron équilibré, on a des lignes de champ vers le porte-substrats d'où la formation d'ions près de celui-ci, grâce aux électrons arrivant sur ces lignes de champ. Ceci permet d'augmenter le flux d'ions. Les magnétrons à cathode rotative cylindrique ont une durée de vie, et donc d'utilisation, supérieure à celle des cathodes planes.

Des recherches ont également été faites afin d'améliorer ces cathodes planes et d'augmenter leur durée de vie [22]. Le procédé Cyclomag a été développé afin de permettre le mouvement des aimants d'une cathode plane magnétron équilibré ou déséquilibré. Ainsi, grâce à ce procédé, la durée de vie d'une cathode plane est doublée voire même triplée. La pulvérisation magnétron permet d'obtenir des vitesses de dépôt plus élevées que les méthodes de pulvérisation plus classiques.

Cette vitesse dépend de plusieurs paramètres :

- le matériau pulvérisé (selon le rendement de pulvérisation),
- le gaz de décharge utilisé : plus la masse moléculaire du gaz est élevée, plus l'effet de pulvérisation est grand,
- la distance cible/substrat,
- la pression : la vitesse de dépôt décroît lorsque la pression augmente (ceci est dû au phénomène du libre parcours moyen),
- la densité de puissance électrique appliquée à la cible.

Par ailleurs, pour un même volume de la chambre de pulvérisation, la pression de travail étant plus faible en pulvérisation magnétron, cela permet de consommer beaucoup moins de gaz.

Ces dernières années des améliorations ont été réalisées sur ce procédé en incluant des micro-ondes ainsi que le Plasma Immersion Ion Implantation (PIII).

IV.2.2. Système micro-ondes

Dans un réacteur plasma magnétron traditionnel, le matériau de la cible est pulvérisé par les ions du plasma, principalement sous forme neutre. Cette vapeur est éjectée de la cible en direction du substrat situé en face du magnétron, et diffuse pour se déposer sur le substrat. Le principe du réacteur conçu est de créer un plasma micro-ondes sur le trajet de la vapeur et d'ioniser par collisions électroniques les atomes pulvérisés du magnétron. L'objectif est d'obtenir, par la vapeur ionisée, un dépôt de meilleures qualités et permettre un effet de polarisation du substrat.

Les caractéristiques du plasma produit par les systèmes micro-ondes (densité et température électroniques) ont été mesurées par une sonde de Langmuir. On obtient typiquement une densité électronique de l'ordre de 10^{12} cm^{-3} pour 30 mTorr (4Pa) d'argon en appliquant 600 ou 800 W de puissance sur chaque système micro-ondes. La densité est maximale entre les deux systèmes et décroît d'un facteur 2 sur 5-6 cm. On peut vérifier que la densité augmente linéairement avec la puissance micro-ondes. La température électronique varie entre 1,5 et 2 eV sur toute la gamme de pression étudiée (10 et 100 mTorr, soit 1,3 et 13 Pa). Elle est homogène spatialement. Quand les caches métalliques de protection sont installés, la température électronique augmente légèrement (de l'ordre de 10-15%) et la densité électronique décroît. La perte de densité dépend de l'ouverture des caches ; elle atteint un facteur 2 pour la plus petite ouverture de 1 cm.

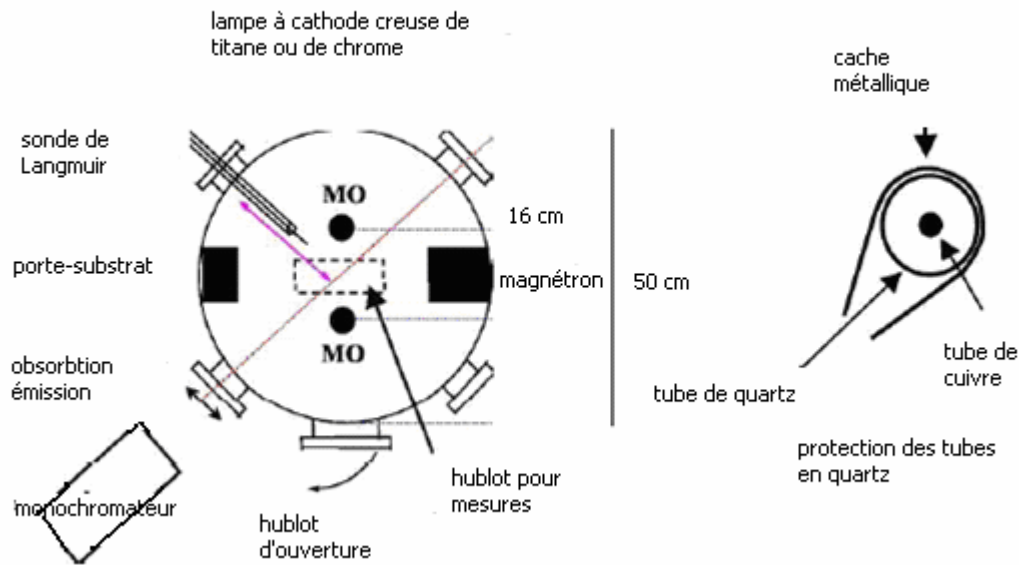


Figure : 1.3.9 : Schéma de principe du réacteur associant magnétron et systèmes micro-ondes pour l'ionisation de la vapeur pulvérisée [23].

Un schéma du réacteur est présenté sur la Figure : 1.3.9, développé par le laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas (LPGP) d'Orsay [23]. Ce réacteur a été conçu pour permettre la mise en place de diagnostics de spectroscopie d'émission, de spectroscopie d'absorption et de sondes électrostatiques. Le réacteur est constitué d'un cylindre de 50 cm de diamètre et de 45 cm de hauteur.

Les mesures peuvent se faire :

- Horizontalement, selon un axe de 45° par rapport à l'axe magnétron-substrat et à mi-hauteur du réacteur. Les mesures optiques sont alors intégrées selon un diamètre du réacteur. La sonde de Langmuir peut quant à elle se déplacer à l'intérieur du réacteur.
- Verticalement, perpendiculairement à l'axe magnétron-substrat, 10 cm de part et d'autre du centre du réacteur. Les mesures optiques sont alors intégrées selon une hauteur du réacteur.

La cathode magnétron est rectangulaire de 22 cm de longueur et de 9 cm de largeur. La distance du magnétron au centre du réacteur peut être ajustée entre 4,5 et 10 cm. Les deux systèmes micro-ondes produisant l'ionisation sont situés perpendiculairement à l'axe magnétron-substrat et sont distants de 8 cm du centre du réacteur. Afin de réduire le dépôt métallique sur les tubes de quartz, des caches métalliques sont réalisés autour des tubes de quartz, caches « ouverts » schématisés sur la Figure : 1.3.9. L'ouverture des caches est de 1 à 3 cm et est orientée à environ 45° vers le substrat. La cathode magnétron est alimentée par un générateur continu 500 V - 3 A et chaque système micro-onde est relié à un générateur de 2,45 GHz et 1,2 kW. Deux cibles ont été utilisées : une en chrome et une en titane. Le gaz utilisé est de l'argon.

La concentration des atomes de chrome et de titane a été mesurée par absorption optique en utilisant une lampe à cathode creuse de chrome ou de titane. Cette lampe est alimentée en régime pulsé avec des impulsions de 100 μ s, un courant de 225 mA et une fréquence de répétition de 100 Hz à l'aide d'un générateur mis au point au laboratoire. Ce système permet

de s'affranchir de la lumière émise par le plasma. Ces mesures ont été effectuées dans un premier temps suivant la visée à 45° et une distance magnétron-antennes de 10 cm pour les deux cibles. Elles ont par la suite été réalisées suivant l'axe vertical pour plusieurs positions entre le magnétron et le substrat et pour une distance magnétron-antennes de 4,5 cm (seulement pour la cible de titane).

IV.2.3. Système de dépôt par ablation Laser (Pulsed Laser Deposition-PLD)

Le dépôt par ablation laser que nous désignerons fréquemment par l'acronyme anglo-saxon PLD (Pulsed Laser Deposition) a démontré, depuis déjà plusieurs années, sa flexibilité. Il est en effet possible de déposer un éventail important de matériaux.

La PLD se caractérise par l'évaporation congruente des espèces qui permet, en principe, la conservation de la composition de la cible dans le film déposé.

On obtient alors :

- un flux instantané considérable de particules sur le substrat pendant la croissance de la couche (supérieur aux autres méthodes de dépôt),
- une énergie cinétique importante des espèces éjectées de la cible (atomes, ions, petites molécules) que l'on peut contrôler en jouant sur les paramètres laser.

Grâce à ces caractéristiques originales, il est possible de déposer des couches cristallisées, voire mono orientées, à des températures de substrat très inférieures aux températures « communes » de cristallisation. Ainsi, la PLD a acquis ses lettres de noblesse pour la réalisation de couches mono orientées d'oxyde d'yttrium baryum cuivre (où YBaCuO), sur des substrats tels que des monocristaux d'oxyde de magnésium, présentant des transitions vers l'état supraconducteur exceptionnellement étroites [24].

La PLD s'avère tout aussi adaptée à la réalisation de couches ultra dures destinées à diverses industries et applications.

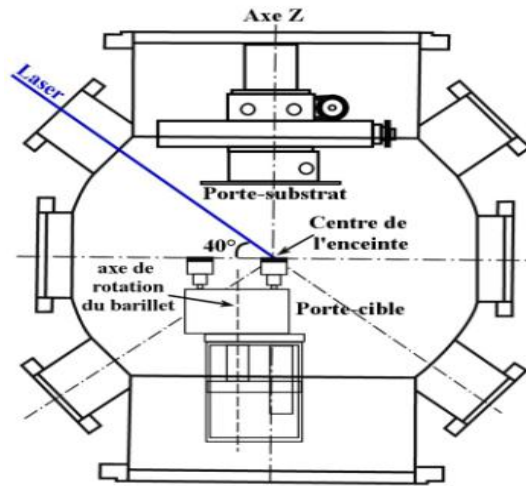


Figure : 1.3.10 : Schéma de principe du réacteur PLD [24].

Le porte-cibles possède deux rotations (Figure 1.3.10). L'une commande la révolution de l'ensemble des cibles (ou barillet), permettant de les amener sous le faisceau laser. La seconde commande la rotation des cibles sur elles-mêmes. Ces mouvements sont pilotés par PC.

Le porte-substrats est placé dans l'enceinte au-dessus du système porte-cibles. Il est équipé de trois micromoteurs destinés à un fonctionnement sous ultra-vide:

- deux d'entre eux assurent les translations suivant les directions x et y,
- le dernier est dédié à la rotation du substrat.

La conversion de la rotation des moteurs en translation de la platine portant le substrat est assurée par une vis sans fin en acier et une roue en bronze-phosphore (pour réduire les risques de blocage).

Les moteurs de ces trois axes disposent de codeurs magnétiques (de type 20B) qui permettent, comme pour le moteur du barillet du porte-cibles, de contrôler son déplacement par l'intermédiaire de cartes ADRES et du logiciel WinTCX.

La préparation des substrats se fait d'une manière classique (nettoyage et décapage), la durée d'un dépôt se fait entre 4 et 5 heures à un vide de $1.3 \cdot 10^{-5}$ Pa.

La particularité de ce procédé est le réglage de la fluence du laser grâce à un calorimètre, il faut ajuster la haute fréquence de ce laser pour obtenir l'énergie voulue (environ 180 mJ par impulsion) [25]. Le centrage des cibles afin que le laser percute la cible en son centre est nécessaire avant chaque dépôt afin de réaliser une prise d'origine du système. Après décapage des cibles et réglage du taux de répétition du laser le dépôt pourra ainsi commencer.

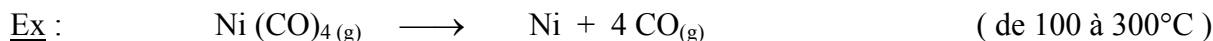
Les dépôts par PLD se distinguent par leurs grandes flexibilités ; cette technique permet de déposer un éventail important de matériaux.

Ils se caractérisent par :

- une évaporation congruente des espèces qui permet, en principe, la conservation de la composition de la cible dans le film déposé,
- un flux instantané considérable de particules sur le substrat pendant la croissance de la couche (supérieur aux autres méthodes de dépôt),
- une énergie cinétique importante des espèces éjectées de la cible (atomes, ions, petites molécules) que l'on peut contrôler en jouant sur les paramètres laser

V. Dépôts chimiques en phase vapeur (C.V.D.- P.A.C.V.D.)

Le procédé connu sous le nom de C.V.D. (Chemical Vapor Deposition) consiste à placer le substrat à recouvrir dans une enceinte dans laquelle on fait circuler le matériau à déposer sous forme gazeuse. Le substrat est chauffé à une température telle que lorsque la molécule du composé gazeux le touche, elle se décompose en un matériau solide (celui que l'on cherche à déposer) et en un composé gazeux qui est pompé.



A l'origine, ce procédé s'utilisait à pression atmosphérique ou au-delà. Mais progressivement, sous l'impulsion des microélectroniciens, ce procédé s'est étendu aux basses pressions (Low Pressure C.V.D.-LPCVD) et même plus récemment, en présence d'une décharge qui a pour effet d'activer la réaction (Plasma Assisted C.V.D.-PACVD).

Avantages et inconvénients des procédés P.V.D. et C.V.D

Les avantages et inconvénients des différentes techniques de dépôt décrites précédemment sont résumés dans le tableau 1.3.3 [4].

Tableau 1.3.3. Avantages et inconvénients des procédés P.V.D. et C.V.D

Procédé	Avantages	Inconvénients
Evaporation sous vide	-vitesse de dépôt élevée -matériel simple -prix de l'équipement faible -faible température du substrat (dépôt sur matières plastiques) -bien adapté pour applications électriques et optiques	-mal adapté pour dépôts réfractaires -difficultés pour déposer alliages -faible pouvoir de recouvrement aux basses pressions -adhérence faible des dépôts -dépôts parfois poreux et non uniformes en épaisseur
Pulvérisation cathodique : Système diode	-possibilité de déposer de nombreux métaux, alliages, composés réfractaires ou non, conducteurs ou diélectriques -maîtrise de la stœchiométrie des composés ou composition des alliages -bonne adhérence des dépôts -bon pouvoir de recouvrement	-faible vitesse de dépôt -coût matériel élevé -dépôts non uniformes en épaisseur
Système Magnétron	-idem système diode -vitesse de dépôt élevée -faible température de dépôt (revêtement sur plastiques) -bien adapté pour applications optiques, mécaniques, électriques et décoration	-dépôts non uniformes en épaisseur -coût matériel élevé -cible pouvant être sensible à la fissuration -réaction possible de la cible avec l'atmosphère gazeuse

Dépôts ioniques	-vitesse de dépôt élevée -bonne adhérence des dépôts -bon pouvoir de recouvrement -faible température de dépôt -possibilités de déposer de nombreux métaux, alliages, composés réfractaires ou non, conducteurs ou diélectriques -bien adapté pour applications mécaniques, électriques	-coût matériel élevé -contrôle de la stœchiométrie du dépôt parfois délicat -dépôts non uniformes en épaisseur
--------------------	---	--

C.V.D.	-très grande pureté des matériaux déposés -dépôts de matériaux sous forme poly- et monocristalline, production de composés amorphes -possibilités quasi illimitées dans le choix des matériaux à déposer -possibilités de contrôler facilement la stœchiométrie des dépôts, la composition, et par conséquent, leurs propriétés -facilité de dopage du dépôt à l'aide de quantités contrôlées d'impuretés -possibilités de dépôt de couches épitaxiales -possibilité de dépôt de substances avec modification continue ou discontinue de la composition du revêtement (structure duplex). -possibilités de dépôt de matériaux réfractaires à des températures faibles -possibilité de dépôt sur des pièces de forme complexe (intérieur de cylindre par exemple) -possibilité de préparer chimiquement <i>in situ</i> le substrat avant dépôt -bonne adhérence entre couche et support -vitesse de dépôt supérieure à celle des P.V.D. -possibilité de travailler à pression atmosphérique.	-connaissances thermodynamiques parfois insuffisantes et cinétique des réactions complexes -température élevée souvent nécessaire d'où : •possibilités de modification de la structure du support •possibilité de déformation des pièces •nécessité de trempe ultérieure •élimination de certains substrats -gaz utilisés en C.V.D. et produits de réaction souvent toxiques, explosifs ou corrosifs -possibilité d'attaque du substrat ou du revêtement par ces gaz corrosifs -dans certains cas, temps de réaction long -l'uniformité des dépôts est parfois difficile à contrôler -précaution à prendre quand au couple dépôt/substrat ; on ne peut déposer n'importe quel matériau sur n'importe quel substrat.
--------	---	---

VI. Les revêtements pour outils coupants

Les fonctions que l'on peut exiger d'un revêtement sont avant tout de protéger l'outil contre toutes les agressions extérieures qu'il subit lors d'une opération d'usinage.

Ces sollicitations sont d'ailleurs fortement variables d'une technique d'usinage à une autre, et d'une application à une autre [26]. Il semble ainsi évident qu'un outil de perçage dans un matériau thermoplastique ne sera pas sollicité de la même manière qu'une fraise-mère dans de l'acier prétraité. Néanmoins, toutes les applications d'usinage présentent des familles de sollicitations voisines, à ceci près, que chacune d'elles n'a ni la même intensité absolue, ni la même importance relative. Afin de décrire les sollicitations induites sur un outil de coupe, il faut se ramener à l'étude de la formation du copeau (Figure : 1.3.11). Il est nécessaire de distinguer 4 zones sollicitant différemment l'outil.

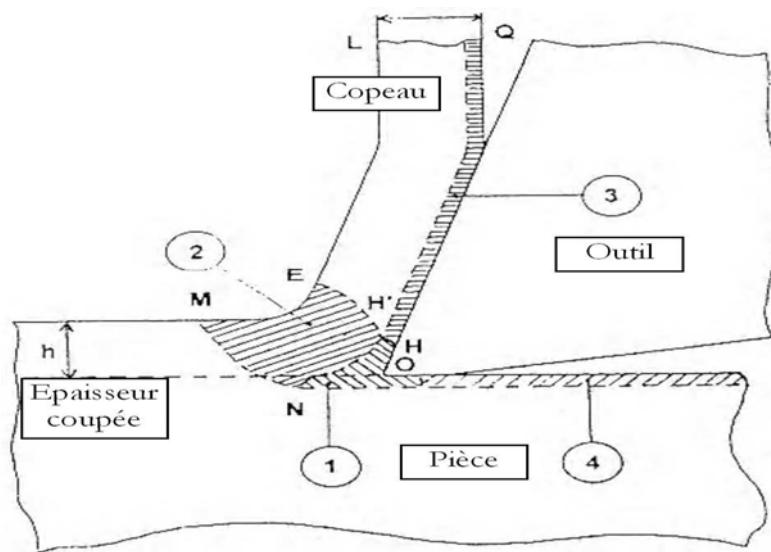


Figure : 1.3.11 : Mise en situation des 4 zones caractérisant le contact du triplet Pièce-Outil-Copeau. [27]

Zone 1 : il s'agit de la zone de séparation du métal en deux. Dans cette zone, qui entoure de manière étroite l'arête de l'outil, il y a une déformation intense par refoulement du métal. Cette zone peut donner naissance à des phénomènes de soudures locales de la matière usinée sur l'outil (arête rapportée) [28], dès lors que l'on travaille avec des vitesses de coupe trop basses et avec des fraises en acier rapide non revêtues. Ces soudures locales se créent et disparaissent fréquemment. Cette forme d'usure provoque principalement des micro-écaillages de l'arête de coupe des fraises [27].

Zone 2 : Zone de glissement plastique (zone de formation du copeau). La ligne MN (Figure : 1.3.11) est le front où la limite élastique est atteinte. La ligne EFF est celle de fin de déformation plastique. Cette zone est couramment dénommée Zone de Cisaillement Primaire (ZCP) et n'étant pas en contact direct avec l'outil, elle n'influence pas directement l'usure de celui-ci. Par contre, les grandes déformations plastiques qui s'y produisent sont à l'origine d'un dégagement de chaleur très important qui va conditionner une grande partie du flux de

chaleur transmise à l'outil. Le niveau de température qu'atteindra le substrat de l'outil sera un des éléments clefs de sa résistance à l'usure.

Zone 3 : Les phénomènes qui se produisent à l'interface copeau/copeau et copeau/outil, sont d'une extrême complexité et ont depuis longtemps interpellé les chercheurs. Il semble que cette interface soit le siège de cohabitations de glissement et/ou d'alternance entre des phénomènes locaux d'adhésion et intenses frottements de glissement [28-30]. Ces phénomènes conduisent à des cisaillements locaux très intenses dans le copeau, alors que la majeure partie de celui-ci s'écoule sans être franchement perturbé.

Il est possible de faire un parallèle avec des phénomènes de couche limite dans le domaine de la mécanique des fluides. Cette zone à frottement et adhésion intense est dénommée Zone de Cisaillement Secondaire (ZCS) et génère une quantité de chaleur très importante (~ 20 à 30 % de la chaleur totale produite selon Trent [30] et Lecalvez [31]. Ce flux de chaleur diffuse à la fois dans l'outil et le copeau. Cette source de chaleur tend à faire accroître les températures dans le substrat des outils et donc à le fragiliser.

Cette ZCS donne lieu à divers phénomènes d'usure : une usure par abrasion et une usure par diffusion. L'usure par abrasion vient de la présence de particules dures dans la matière usinée, issues notamment du traitement de désoxydation des aciers (grains Al_2O_3). Ces particules se comportent comme un outil abrasif à la surface de coupe de l'outil et enlève des micro copeaux. C'est le mode d'usure le plus usuel à toutes les vitesses de coupe, car ces particules ne sont pas influencées par la cinématique relative outil/copeau. Par contre, l'abrasion aura d'autant plus d'effets que la température locale est grande.

En effet, la hausse des températures de coupe, liée à la hausse des vitesses de coupe [30,31], entraîne une diminution de la résistance à l'abrasion des substrats (baisse de la dureté superficielle).

De plus, lorsque les températures de coupe à l'interface outil/copeau augmentent, des phénomènes de diffusion des composés du substrat vers le copeau peuvent se produire. En effet, la diffusion est activée thermiquement et ne peut avoir lieu qu'à partir d'une température minimale. Par contre, la vitesse de diffusion est une fonction exponentielle de la température. Ce phénomène d'usure est donc d'autant plus important que les températures d'interfaces sont élevées.

Zone 4 : La zone d'interface entre la surface usinée et la face en dépouille est une zone clef de l'usure en dépouille des outils. Cette interface est principalement le siège d'un frottement à grande vitesse (= vitesse de coupe). Ce frottement est moins énergétique que celui de la zone de cisaillement secondaire, car la pression locale est bien plus réduite [30]. L'usure par abrasion est le phénomène principal produit à cette interface. Cette usure abrasive est conditionnée par la température de l'outil sur la face de coupe. Le frottement outil/pièce génère une quantité de chaleur qui n'est pas très importante comparativement à celle de la ZCS, mais qui est très localisée, ce qui entraîne des températures d'interface élevées [31,32].

Les phénomènes associés aux quatre zones caractéristiques de la formation du copeau donnent une bonne représentation des sollicitations d'un outil lors d'une opération de coupe continue (tournage, perçage, etc.). Les opérations à coupe interrompue (fraisage, taillage, etc.) se distinguent par le fait que l'outil est en contact avec son environnement extérieur entre deux phases d'usinage : l'air (cas des opérations en usinage à sec) ou le fluide de coupe (émulsion, huile entière). De là, apparaissent d'autres formes de sollicitations :

- l'air ou le fluide vont entraîner des réactions chimiques initiées par les hautes températures à la surface des outils : oxydation de l'outil, décomposition des hydrocarbures du fluide de coupe (particules abrasives résultantes), etc....
- l'air ou fluide de coupe vont refroidir plus ou moins intensément la surface de l'outil, induisant ainsi des contraintes mécaniques internes pouvant conduire à des fissurations par fatigue thermomécanique.

Ces particularités des procédés à coupe interrompue entraînent la dégradation par écaillage : forme d'usure particulièrement difficile à maîtriser lorsqu'elle est prédominante.

L'intérêt de déposer un revêtement sur un outil va donc être de limiter l'influence des sollicitations suivantes : (figure : 1.3.12)

- Adhésion entre la matière usinée et l'outil,
- Abrasion,
- Oxydation,
- Diffusion des composés de l'outil vers la matière usinée.

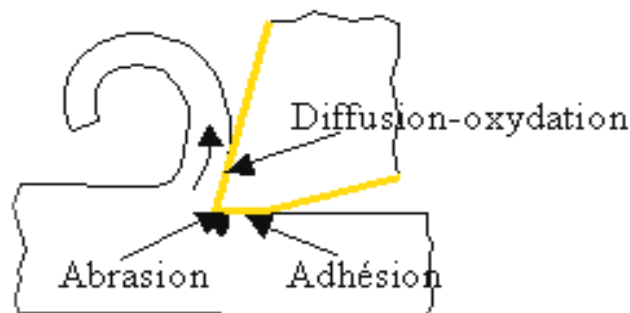


Figure : 1.3.12 : Zone de sollicitations du couple outil/matière

En plus de ces propriétés, il est également possible de demander aux revêtements de :

- Limiter la quantité de chaleur transmise jusqu'au cœur de l'outil (barrière thermique en vue de garder les caractéristiques mécaniques),
- Rendre le mode d'usure en dépouille prépondérant afin de faciliter la maîtrise et la prédétermination des opérations d'usinage.

Propriétés recherchées chez un revêtement

Les fonctions préalablement attribuées à un revêtement doivent se traduire par des objectifs opérationnels.

Ainsi, il est possible de demander au système substrat + revêtement de répondre au cahier des charges suivant (Figure : 1.3.13):

- Une ténacité élevée,
- Une parfaite adhésion sur le substrat,
- Une grande résistance à la formation et à la progression des fissures,
- Une dureté élevée,
- Une inertie chimique élevée,
- Une faible conductivité et diffusivité thermique,
- Une haute résistance à l'oxydation,
- Une épaisseur adéquate,

- Une fonction barrière de diffusion.

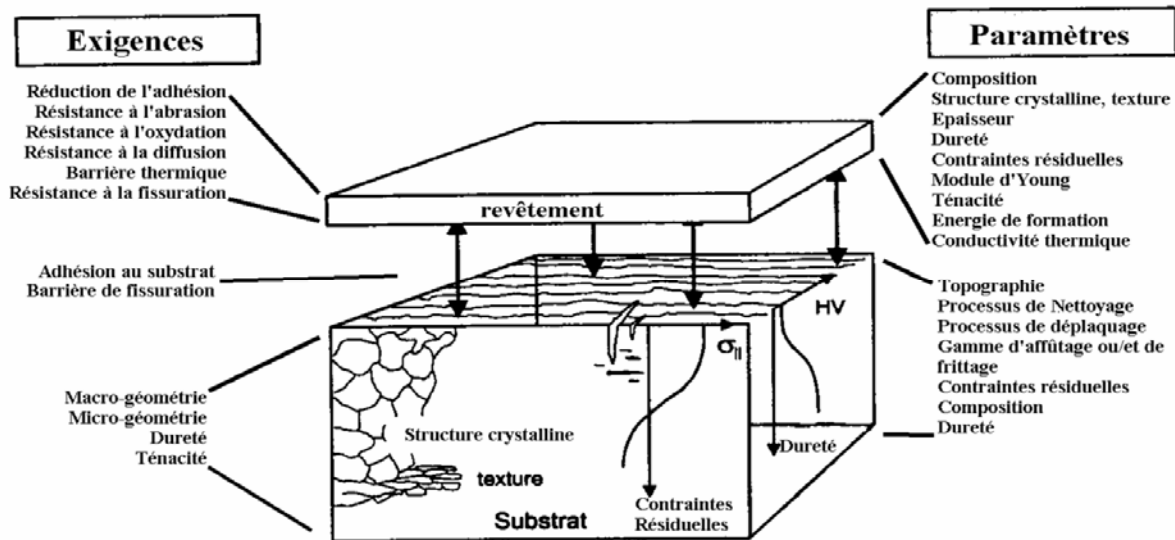


Figure : 1.3.13 : Cahier des charges d'un revêtement [30].

VII. Les traitements structuraux et superficiels (traitements thermochimiques)

Ce type de traitements est largement utilisé pour améliorer les propriétés mécaniques des matériaux par diffusion dans leur masse d'éléments sur de faibles profondeurs (<100 μm).

Des atomes étrangers, formant des solutions solides le plus souvent interstitielles, distordent les réseaux cristallins et augmentent la dureté superficielle en créant des contraintes résiduelles de compression, ce qui améliore la résistance à la corrosion et à l'oxydation.

On distingue :

- La diffusion de métalloïdes, carbone, azote, soufre, bore par voie liquide (bains de sels) ou gazeuse et plus récemment, par bombardement ionique,
- La diffusion de métaux, aluminium et chrome notamment, qui améliore la résistance à l'oxydation à haute température.

VII.1. La nitruration

La nitruration a été découverte en 1923 par un technicien de la firme Krupp qui, après avoir chauffé un acier dans une atmosphère d'ammoniac, observa une dureté superficielle anormalement élevée.

C'est un traitement thermochimique de diffusion consistant à enrichir superficiellement l'acier en azote. L'azote diffuse dans l'acier et forme, avec les éléments d'alliage, des nitrures très fins qui produisent un durcissement structural. La dureté de base des aciers rapides, généralement de l'ordre de 800 à 900 HV, s'accroît alors superficiellement pour atteindre des valeurs supérieures à 1200 HV. Les propriétés des couches nitrurées dépendent dans une large mesure

de leur épaisseur et pour conserver une ténacité convenable aux outils en aciers rapides, il ne faut pas que la profondeur durcie excède 50 μm .

VII.1.2. La nitruration par implantation ionique

La nitruration par implantation ionique fait partie des principaux procédés de nitruration appliqués aux outils en aciers. Ce procédé consiste à former autour des pièces à traiter un plasma contenant des ions réactifs qui, grâce à des tensions de quelques kV à quelques centaines de kV, viennent bombarder la surface de cette pièce [33].

Ce bombardement se traduit par un double effet :

- Chauffage des pièces par dissipation de l'énergie cinétique des ions en énergie calorifique,
- Implantation d'ions dans l'acier, fournissant dans notre cas, l'azote nécessaire à la formation de nitrures métalliques.

En pénétrant dans le matériau, l'ion incident va perdre son énergie cinétique dans des collisions électroniques et nucléaires induisant des phénomènes de freinage. Le freinage nucléaire a pour effet de mettre en mouvement les atomes du substrat, entraînant des collisions en chaînes qui désorganisent localement la structure cristalline du solide.

La répartition finale des ions étant le résultat d'un processus aléatoire, elle est bien représentée par la courbe de Gauss, caractérisée par la position R_p de son maximum et de sa largeur à mi-hauteur $2\Delta R_p$ (Figure : 1.3.14). Ces deux paramètres suffisent à caractériser, en première approximation, la pénétration d'un ion dans une cible.

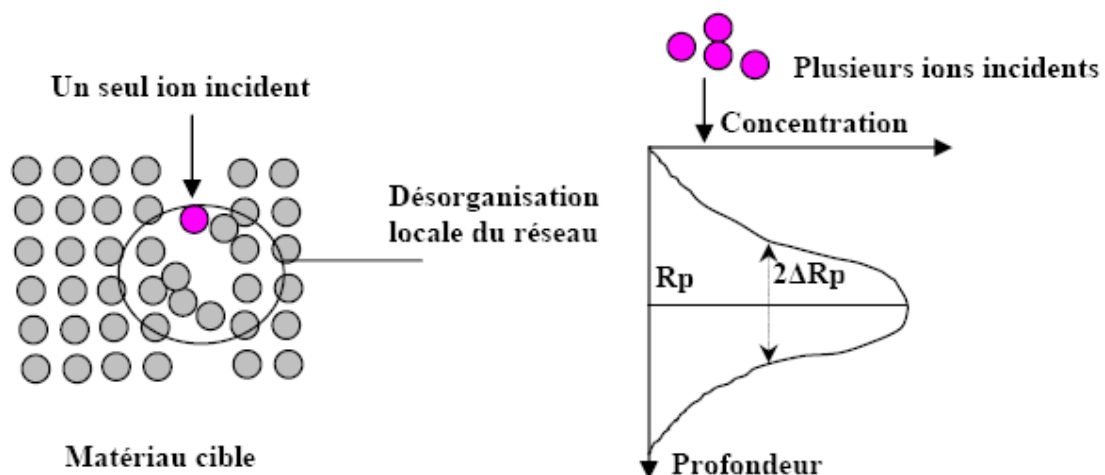


Figure : 1.3.14 : Principe de l'implantation ionique [33].

Les avantages de la nitruration par implantation ionique résident dans la possibilité de traiter des outils de très grandes dimensions et de conserver l'état de surfaces initial des outils, même les plus fines (poli spéculaire par exemple). Par ailleurs, il est possible, par le procédé de nitruration ionique, d'éviter, en contrôlant le procédé, la formation de la couche de combinaison (ou couche blanche) très fragile en surface.

Ceci étant, l'implantation s'accompagne d'un phénomène d'érosion ou pulvérisation de la surface si l'ion incident possède une énergie supérieure à celle de l'énergie de liaison des atomes du solide.

La nitruration ionique, tout comme les revêtements durs, confère aux outils et composants traités un meilleur comportement. En augmentant la dureté superficielle elle diminue la vitesse d'usure des surfaces traitées [34,35].

Cependant, cette technique de nitruration est unidirectionnelle et se prête mal aux exigences de la production industrielle sur des surfaces complexes. La forme simple des outils utilisés n'a donc pas été un obstacle à leur traitement. De plus, le coût de mise en œuvre d'une implantation ionique se répercute directement sur le coût des pièces produites, ce qui a limité l'application de cette technique à des industries à forte valeur ajoutée (nucléaire, microélectronique,...).

VII.1.3. Système d'Implantation ionique par immersion plasma

Principe

Lors de l'implantation ionique, les ions sont accélérés par une grande énergie et sont projetés vers la surface de la pièce à traiter. Ce phénomène d'implantation d'ions engendre une modification de surface. Compte tenu du contrôle de la dose reçue par la pièce et de celui de l'épaisseur finale de la couche modifiée, l'implantation ionique est très utilisée pour le dopage de semi-conducteur.

Récemment, cette technique a été utilisée pour modifier les propriétés de surface de certains matériaux, comme par exemple l'amélioration de la résistance à l'usure d'alliages de titane. L'implantation d'azote dans des outils en acier leur confère de bonnes propriétés vis-à-vis de l'usure. L'épaisseur de la couche modifiée peut atteindre plusieurs centaines d'Å lorsque l'énergie des ions est voisine de 100 keV.

Les avantages de l'implantation ionique sont :

- L'amélioration des propriétés de surface sans affecter les propriétés volumiques des matériaux,
- Pas de problème d'interface ou d'adhérence contrairement aux dépôts,
- Contrôle du processus assez simple durant l'implantation ionique.

Cependant, l'un des inconvénients majeurs de cette technique est son caractère directionnel, il est très difficile de traiter des objets 3D par ce procédé.

Dans le procédé d'implantation ionique par immersion plasma (PIII), la pièce à traiter est directement placée au sein d'un plasma. Des impulsions fortement négativement sont ensuite appliquées à la pièce. Durant le pulse de tension, une gaine plasma se forme autour de la pièce. Les ions positifs sont accélérés et projetés perpendiculairement à l'objet à traiter. L'énergie des ions correspond à la tension appliquée.

a) Avantages de la PIII :

- Le procédé est non-directionnel, les ions positifs frappent la surface simultanément sur toutes les faces. Ceci permet aussi de traiter facilement des pièces à géométrie complexe. La taille des pièces ne détermine pas le temps de traitement,
- Les pulses très courts ne permettent pas à la pièce de chauffer ; ceci permet donc d'avoir une température de traitement peu élevée comparativement aux autres

procédés de nitruration. Ce procédé est donc intéressant pour les matériaux thermosensibles,

- L'implantation ionique ne permet pas de créer des couches très épaisses, elles sont au maximum de l'ordre de 100 nm. Il est cependant assez simple de coupler le procédé PIII avec un procédé de dépôt classique tel que le CVD ou le PVD.

b) Inconvénients de la PIII :

- Lors de l'implantation, aucune séparation de masse ne peut être effectuée; tous les ions positifs présents dans le plasma sont implantés. Il est néanmoins nécessaire que ces ions possèdent une énergie suffisante.
- En théorie, plus les pulses sont importants (très haute tension négative), meilleur sera l'implantation; en réalité, les tensions de travail sont limitées et il est ainsi très difficile d'implanter certains ions. Les tensions limites sont voisines de 100kV. En effet pour ces tensions élevées, le matériel serait trop coûteux et les risques d'amorçage d'arcs trop importants.

VIII. Revêtements utilisés dans le domaine d'usinage bois

De nombreuses études ont déjà été menées sur l'application de revêtements à l'usinage du bois [36-38]. Par ailleurs, Fuchs [39] a testé des outils en carbure revêtus de diamant sur une couche de carbone amorphe qui ont donné des résultats très appréciables lors du défonçage de MDF, ceci fut attribué à la bonne adhérence du film, à une température de coupe très réduite du fait de la structure fine du film d'où la non diffusion du cobalt dans la couche de diamant.

En ce qui concerne l'application de CrN en usinage du bois, lors d'une étude menée par Nouveau [4], on a noté que revêtir des plaquettes carbure d'une couche de CrN cubique sur la face de dépouille permettait d'usiner (en défonçage) 2,5 fois plus de panneaux dérivés de bois de type OSB (Oriented Strand Board) qu'avec un outil conventionnel. Un meilleur comportement a été observé avec les carbures revêtus d'une couche de CrN sur les deux faces, permettant d'usiner jusqu'à 8 fois plus de bois après 8000 m de test. D'un autre côté, Beer [36] a constaté que les traitements duplex (nitruration+revêtement Cr_xN_y) permettait d'usiner 2,5 fois plus qu'un outil conventionnel dans le cadre du déroulage de MDF.

Dans le but d'éviter l'opération de ponçage qui précède l'application de couches de finition (peinture, vernis, ...) des meubles et des menuiseries, Itaya *et al.* [40] ont testé, en défonçage de hêtre et de chêne japonais, des outils carbures revêtus de CrN uniquement sur leur face de dépouille afin d'évaluer l'état de surface du produit. Les observations micrographiques ont montré que la surface présentait moins de grains pelucheux et moins de distorsions des tissus comparativement à la surface du bois usinée avec les outils conventionnels. La rugosité de surface du produit usiné avec les outils revêtus était ainsi plus faible que la valeur mesurée sur la surface du bois usinée avec les outils conventionnels. La consommation d'énergie au cours de l'usinage avec les outils revêtus est restée constante jusqu'à 100 m d'usinage, tandis qu'elle n'a pas cessé d'augmenter avec les outils non revêtus.

Il a aussi été montré que l'application de CrC, TiC et TiCN obtenus par méthode CVD et TiN, TiCN et CrN obtenus par méthode PVD sur des outils en carbure de tungstène réduisait considérablement l'usure des outils mesurée sur la face de dépouille et ceci en rainurage de panneaux de fibres dures et de panneaux de particules [41]. De plus, les dépôts réalisés par PVD étaient plus adhérents que les dépôts réalisés par CVD.

La recherche dans le domaine de l'usinage du bois a aussi mené à l'application de multicouches et super-réseaux comme en usinage des métaux et alliages métalliques. Santos *et al.* [42] ont ainsi montré que revêtir des plaquettes carbures de super-réseaux NbN/CrN, lors du défonçage de MDF, a permis d'augmenter leur résistance à l'usure. Récemment, Sheikh-Ahmad *et al.* [43] ont revêtu par méthode PVD des plaquettes carbures de TiN, Ti(N,CN) ou TiAlN₂. Les tests d'usinage réalisés sur des panneaux de particules ont montré une nette amélioration de la résistance à l'usure de ces outils. Il a également été noté que l'outil revêtu de TiN/TiCN/TiN d'une épaisseur de 5,5 µm présentait une meilleure adhérence (moindre délamination du revêtement sur l'outil). De plus, des outils carbures ont été revêtus de monocouches de TiN, CrN, TiCN et de multicouches TiN/AlN par PVD [41]. Les multicouches TiN/AlN ont montré une meilleure résistance à l'usure quelle que soit la vitesse de coupe dans le domaine du défonçage du MDF. En outre Darmawan *et al.* [44] ont constaté que les revêtements de TiN sur des outils en carbure permettaient de réduire d'une manière significative la force normale lors de l'usinage des essais de tournage du MDF.

Pinheiro *et al.* [45] ont quand à eux constaté, après avoir testé une gamme de revêtements ternaires en défonçage d'OSB, que le système WCrN permettait d'obtenir la plus faible valeur d'usure et que l'ajout d'inter-couches de cuivre au revêtement WTiN améliorait l'adhérence de l'ensemble et par-là même augmentait la résistance à l'usure de l'outil.

Par ailleurs, de nombreuses études ont été menées afin d'utiliser le DLC comme couche anti-usure en usinage du bois. Toutefois, la majorité des travaux effectués fait état du mauvais comportement de ce revêtement en usinage du bois et de ses dérivés [46], causé principalement par une faible adhérence sur les substrats. Sa synthèse, généralement à haute température, diminue fortement la ténacité de l'arête de coupe et induit une augmentation des contraintes internes qui se créent à cause de différents coefficients d'expansion thermique entre le dépôt et la majorité des substrats [47]. Néanmoins, grâce à sa dureté élevée et à l'absence de liant entre les cristaux de diamant, comme c'est le cas pour les outils carbures, il reste tout de même un revêtement très prometteur pour l'usinage du bois. Plusieurs investigations ont été effectuées dans le but de diminuer sa rugosité et d'améliorer son adhérence. Furukawa *et al.* [48] ont en effet testé des outils revêtus de DLC, d'une épaisseur optimale de 20 µm puis polis par meulage sur leurs deux faces (face d'attaque et de dépouille). Des essais en fraisage de 16 matériaux (13 essences de bois de différentes provenances et climats et 3 dérivés de bois) ont été réalisés dans le but d'observer l'effet du polissage du revêtement sur le comportement mécanique des outils. Au terme de la campagne d'essais, il a été constaté que, pour chaque matériau usiné, la consommation d'énergie induite par l'usinage avec les outils revêtus puis polis était plus faible que celle obtenue avec les outils directement testés après revêtement. Les valeurs de l'énergie consommée par les outils non polis étaient proches de celles obtenues avec l'outil non revêtu. Ceci a été attribué au fait que les outils revêtus puis polis présentaient un excellent état de surface (rugosité faible) amoindrissant le coefficient de frottement de l'outil sur le bois et permettant de conserver un faible arrondi d'arête.

De plus, Sheikh-Ahmad *et al.* [47], ont observé que le traitement préalable de l'arête de coupe de plaquettes en carbure de tungstène par pierrage permettait d'augmenter l'adhérence des couches de DLC et de diminuer ainsi l'usure de l'outil. Ils ont montré qu'après 1525 m d'usinage, les outils pierrés et revêtus d'une couche de DLC de 10 et 15 µm ne présentaient pratiquement pas d'élargissement de l'arête de coupe (caractéristique de l'usure), alors que l'outil non pierré et non revêtu présentait une valeur d'élargissement de l'arête beaucoup plus grande que la valeur mesurée avant usinage (30 fois supérieure). Il a été noté également que l'outil non pierré mais revêtu présentait un comportement médiocre (fin de vie après 305 m d'usinage seulement).

Dans cette même optique, Morita *et al.* [49] ont voulu observer l'influence des prétraitements de surfaces de plaquettes carbures sur le comportement du DLC en fraisage (défonçage) de MDF et de bois massifs. Pour ce faire, ils ont utilisé deux solutions chimiques et mécano-chimiques: Murakami/H₂O₂-H₂SO₄ et microsablage ou sandblasting/HCl-HNO₃. Les premières observations réalisées au MEB ont montré que l'application d'un prétraitement au Murakami/H₂O₂-H₂SO₄ ne conduisait à aucune modification de la géométrie de l'arête de l'outil et permettait ainsi de préserver son acuité. Après dépôt, les outils prétraités avec du Murakami/H₂O₂-H₂SO₄ présentaient de faibles valeurs d'arrondi et de rugosité d'arête comparativement aux outils prétraités par microsablage/HCl-HNO₃. Ces modifications ont eu une conséquence sur le comportement des plaquettes en terme d'usure. En effet, les résultats obtenus après fraisage de MDF et de bois massifs montrent que la combinaison entre un traitement préalable au Murakami/H₂O₂-H₂SO₄ et un dépôt d'une couche de DLC de 5, 10, 15 ou 20 µm permettait de diminuer (en fonction de l'épaisseur du dépôt) l'usure des outils et ceci quelle que soit l'essence usinée.

Par ailleurs, Labidi [38] a montré que les traitements préalables effectués sur l'arête de coupe par microsablage permettaient une bonne résistance aux ébréchures de cette dernière qui affectent la qualité des plaquages dans le domaine du déroulage du hêtre.

Chala [37] a également conclu que les traitements duplex (nitruration+ZrBN) utilisés sur des outils de déroulage donnaient une bonne résistance à l'usure ainsi qu'à la corrosion.

Récemment, un nouveau type de traitement de surface, dit traitement cryogénique, semble améliorer la résistance à l'usure de plaquettes carbures et diminuer les efforts de coupe [50]. La mesure des efforts et les observations réalisées sur les arêtes de coupe montrent que ce traitement réalisé à -33°C réduit considérablement l'usure des outils traités en agissant sur le liant cobalt et en conduisant au maintien des grains de carbures durant l'usinage.

Faga [51] a testé des outils en acier 90CrMoV8 en appliquant des revêtements multicouches DLC/CrN et monocouches en CrN. Il a constaté que les outils multicouches présentaient de très bonnes aptitudes à la résistance à l'usure érosive et abrasive, ainsi qu'une bonne adhérence substrat/film, cependant la pointe de l'outil s'émoussait rapidement.

IX. Conclusion

Il est bien évident que la modification de la nature des surfaces des outils d'usinage par l'application de revêtements durs en couches minces ou bien par des traitements thermochimiques améliore la durée de service de ceux-ci. Face au grand choix de matériaux durs ainsi qu'au nombre croissant de techniques de revêtement et de traitement thermochimique, il faut être sûr quant au choix des techniques ou matériaux qui seront les plus adéquats à satisfaire les besoins des industries du bois.

Il est nécessaire de faire des essais en industrie afin d'apprécier au mieux les améliorations ou non des outils modifiés, car les bons résultats réalisés en laboratoire ne concordent pas forcément avec les tests réalisés en conditions réelles.

Le chapitre qui suit est une synthèse des différents moyens d'élaboration et de caractérisations que l'on a utilisés afin de réaliser nos dépôts sur nos outils de coupe.

X. Références bibliographiques

- [1] Holleck H., Schier V., Multilayer PVD coatings for wear protection, *Surf. Coat. Technol.*, vol.76-77, 1995, pp. 328-336.
- [2] Holleck H., Materials selection for hard coatings, *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol.4, 1986, pp. 2661-2669.
- [3] Richardt A., Durand A.M., La pratique du vide et des dépôts de couches minces, Editions In Fine, 1995. 2-84046-038-6, pp. 145-150.
- [4] Nouveau C., Etude de revêtements durs (Cr_xN_y) obtenus par méthodes P.V.D. : réalisation et caractérisations. Applications à l'usinage du bois. Thèse de doctorat ENSAM de Cluny, 2001, n°21-2001.
- [5] Hutchinson I.H., Principles of plasma diagnostics, Cambridge University Press, 1987.
- [6] Chen F., « Introduction to plasma physic and controlled fusion – Volume 1 – Plasma Physics », Plenum Press, 1984, pp. 351-361.
- [7] Bittencourt J.A., « Fundamentals of plasma physics » ISBN 1-8155-1857-2, 1995, pp. 156-166.
- [8] Bunshah R.F., « Handbook of deposition technologies for films and coatings ». Seconde Edition, Publications NOYES, ISBN 0-8155-1337-2, 1994, pp. 266-275.
- [9] Chatterjee S., Deposition methods, properties and metal cutting applications of ceramic films, *Key Eng. Mater.*, vol. 114, 1996, pp. 67-104.
- [10] Nakamura K., Fukube Y., Inagawa K., The application of TiC and TiN thick films by PVD processes, *Proc. of the 3rd Intern Conf on Titanium*, vol. 3, 1982, pp. 2245-2253.
- [11] LeClair P., Berera G.P., Moodera J.S., Titanium nitride thin films obtained by a modified physical vapour deposition process, *Thin Solid Films*, vol. 376, 2000, pp. 9-15.
- [12] Wolfe D.E, Singh J., Titanium carbide coatings deposited by reactive ion beam-assisted electron beam-physical vapour deposition, *Surf. Coat. Technol.*, vol. 124, 2000, pp. 142-153.
- [13] Lopez J.M., Gordillo-Vazquez F.J, Fernandez M., Albella J.M., Caceres D., Vergara I., Investigation of TiC thin films synthesised by low energy IBA from electron evaporation of TiC powder, *Appl. Surf. Sci.*, vol. 172, 2001, pp. 110-116.
- [14] Zehnder T., Patscheider J., Nanocomposite TiC/a-C:H hard coatings deposited by reactive PVD, *Surf. Coat. Technol.*, vol. 133-134, 2000, pp. 138-144.
- [15] Voevodin A.A., Capano M.A., Laube S.J.P., Donley M.S., Zabinski J.S., Design of aTi/TiC/DLC functionally gradient coating based on studies of structural transitions in Ti-C thin films, *Thin Solid Films*, vol. 298, 1997, pp. 107-115.
- [16] Murotani T., Hirose H., Sasaki T., Okazaki K., Study on stress measurement of PVD-coating layer, *Thin Solid Films*, vol. 377-378, 2000, pp. 617-620.
- [17] Karlsson L., Hultman L., Johansson M.P., Sundgren J.-E., Ljungcrantz H., Growth, microstructure, and mechanical properties of arc evaporated $\text{TiC}_x\text{N}_{1-x}$ ($0 < x < 1$) films, *Surf.Coat. Technol.*, vol. 126, 2000, pp. 1-14.
- [18] Richardt A., Durand A.M., La pratique du vide et des dépôts de couches minces, Editions In Fine, 1995. ISBN 2-84046-038-6, pp. 156-162.
- [19] Munz W.-D., Schonjahn C., Paritong H., Smith I.J., Conférence invitée, Nouvelles Tendances en Procédés Magnétron et Arc pour le Dépôt de Couches Minces, 14-15 octobre 1999, Université de Mons-Hainaut
- [20] De Gryse R., Conférence invitée, Nouvelles Tendances en Procédés Magnétron et Arc pour le Dépôt de Couches Minces, 14-15 octobre 1999, Université de Mons-Hainaut.
- [21] Kelly P.J., Arnell R.D., Ahmed W., *Surface Engineering* 9(4), 1993, pp. 287-291.
- [22] De Bosscher W., Conférence invitée, Nouvelles Tendances en Procédés Magnétron et Arc pour le Dépôt de Couches Minces, 14-15 octobre 1999, Université de Mons Hainaut

- [23] Boisse-Laporte C., Marec J., 3rd International Workshop on Microwave Discharges : Fundamentals and Applications, EDP Sciences, Les Ulis France, Journal de Physique IV, Vol.8, Pr7, 1998, pp. 187-195.
- [24] Levin I., Brandon D., Metastable alumina polymorphs: crystal structures and transition sequences J. Am. Ceram. Soc. 81, 1998, pp. 1995-2012.
- [25] Taschner C., Ljungberg B., Endler I., Leonhardt A., Deposition of hard crystalline Al_2O_3 coatings by pulsed DC PACVD, Surf. Coat. Technol. 116-119, 1999, pp. 891-897.
- [26] Cetim, Les revêtements CVD et PVD appliqués aux outils de coupe, document de formation, 1994, pp. 66-75.
- [27] 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, Thèse de doctorat, ENSAM de Cluny, N° 23-2002, 2002.
- [28] Zhua Z., Ping C., Study of cold welding caused by friction in metal cutting, Wear, n°2, vol. 121, 1987, pp. 173-182.
- [29] Zorev N.N., Inter-relationship between shear processes along tool face and shear plane in metal cutting, International Research in Production Engineering ASME, New York, 1963, pp. 42-49.
- [30] Trent E.M., Metal Cutting, Butterworth Heinemann, ISBN 0-7506-1068-9, 1991. pp. 256-266.
- [31] LeCalvez C., Etude des aspects thermiques et métallurgiques de la coupe orthogonale d'un acier au carbone, Thèse de doctorat, ENSAM, 1995.
- [32] R.M'Saoubi, Aspects thermiques et microstructuraux de la coupe – Application à la coupe orthogonale des aciers austénitiques, Thèse de doctorat, ENSAM, 1998.
- [33] Fouquet V., Thèse de doctorat, Université de Poitiers. 2004.
- [34] Dingremont N., Pianelli A., Bergmann E., Michel H., Surface and Coatings Technology 61, 1993, pp. 187-192.
- [35] Navinsek B., Panjan P., Gorenjak F., Surface and Coatings Technology 137, 2001, pp. 255-259.
- [36] Beer P, Etude de l'influence des modifications de la surface de l'outil sur la qualité de la coupe par déroulage, Thèse de doctorat, ENSAM de Cluny, n° 40-1998, 1998.
- [37] Chala A., Dépôt de couches minces pour revêtements durs. Application à la protection contre l'usure et la corrosion. Thèse de doctorat de l'Université de Biskra, 2005.
- [38] Labidi C., Amélioration de la durée de service d'outils d'usinage du bois par traitements de surface et préparation de l'arête de coupe, Thèse de doctorat, ENSAM de Cluny n°58-2007, 2007.
- [39] Fucks I., Endler I., Raatz C., Proceedings of the 14th International Wood Machining Seminar, France, 12-19 september, 1999, pp. 1125-1132.
- [40] Itaya S., Tsuchiya A., Proceedings of the 16th International Wood Machining Seminar Matsue, Japan, August 24 -27, 2003, pp. 1054-1061.
- [41] Darmawan W., Tanaka C., Usuki H., Ohtani T., J. of Wood Sci 47 , 2001, pp. 342- 347.
- [42] Santos J., Carreira P., Oliveira M., Proceedings of the 1st International Seminar on Wood Machining, Vienne, Autriche, 2000, pp. 117-1181.
- [43] Sheikh-Ahmed J., Morita T., Forest Products Journal 52, 2002, pp. 43- 46.
- [44] Darmawan W., Tanaka C., Discrimination of coated carbide tools wear by features extracted from parallel force and noise level, Forest Products Journal, Vol 61, 2004, pp.731-736.
- [45] Pinheiro D., Vieira M. T., Dias J. P, Djouadi M. A., Nouveau C., Proceedings of the 16th International Wood Machining Seminar, Matsue, Japan, August 24-27, 2003, pp. 1133-1138.
- [46] Fuchs I., Endler I., Raatz C., Proceedings of the 14th International Wood Machining Seminar, France, 12-19 september, 1999, pp. 856-861.

- [47] Sheikh-Ahmad J. Y., Stewart J. S., Feld H., *Wear* 255 , 2003, pp. 1433- 1438.
- [48] Furukawa H., Tsutsumoto T., Banshoya K., *Proceedings of the 16th International Wood Machining Seminar*, Matsue, Japan, August 24 -27, 2003,pp. 1125-1132.
- [49] Morita T., Sheikh-Ahmad J.Y., Banshoya K., Tsutsumoto T., Murase Y., *Forest Products Journal* 50(1), 2000, pp. 67- 73.
- [50] Stewart H. A., *Forest Products Journal* 54, 2004, pp. 53- 58.
- [51] Faga M.G., Settineri L., *Innovative anti-wear coatings on cutting tools for wood machining. Surface & Coatings Technology*, Vol 201, 2006, pp. 3002–3007.

Expérimentation

Partie 2 : chapitre 1

Elaboration et expérimentation des outils de coupe traités

I.1. Procédures d'élaboration des films minces

Pour les besoins de notre étude nous avons utilisé un bâti dual magnétron (constitué de deux cibles cofocales), afin de réaliser des couches de CrAlN.

Ce support de dépôts de type « NORDIKO 3500 » peut être subdivisé en trois parties : un système de pompage, une enceinte de dépôts et une armoire électrique (Figure 2.1.1).

a- Le système de pompage

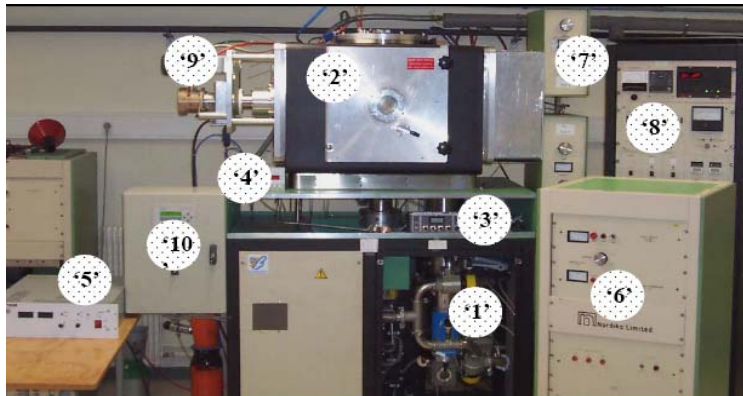
Constitué de deux pompes '1', il permet d'atteindre un vide résiduel de l'ordre de 10^{-5} Pa. Après mise en place des substrats à revêtir, une pompe à palettes assure un vide de l'ordre de 1 Pa. Un système automatisé permet à une électrovanne placée sur le conduit de pompage de passer le relais à une pompe cryogénique qui assure l'obtention du vide secondaire. Dû à l'absence d'un sas d'introduction des échantillons, un pompage de 24 h est nécessaire pour atteindre un vide résiduel satisfaisant ($1-2 \times 10^{-4}$ Pa) ce qui nous a limité à un dépôt/jour.

b- L'enceinte de dépôts

C'est un cube en acier inox dont les parois sont refroidies par une circulation d'eau sur lesquelles viennent se condenser les gaz à évacuer. Le vide dans l'enceinte est estimé grâce à un ensemble de jauges de Pirani et Penning. Des débitmètres massiques '3' permettent de réguler le flux (100 sccm max) d'introduction des gaz. Avant élaboration des films, de l'argon pur est introduit pour nettoyer les substrats et la cible par décapage ionique tandis que de l'azote est admis par la suite pour réaliser les dépôts de nitrure. Le contrôle des pressions partielles et des pressions de travail se fait à l'aide d'une jauge capacitive Baratron '4'. Un porte-substrats (PS) sur lequel sont placés les échantillons, est relié à une alimentation DC '5' afin d'assurer leur polarisation lors de leur nettoyage ou du dépôt. La cible constituée du matériau à pulvériser est reliée à un générateur R.F (13,56 MHz) de puissance variable de 0 à 1250 W '6'. Un aimant permanent est placé au dos de la cible afin d'augmenter la trajectoire des électrons au voisinage de celle-ci et maintenir une décharge plasma stable (effet magnétron). Grâce à des circuits d'accord '7' (adaptateurs de l'impédance du générateur à celle du plasma) placés entre la cible et le générateur, la puissance réfléchie a été maintenue en dessous de 10% de la puissance incidente. La création d'un plasma autour de la cible magnétron suite à l'application de la puissance RF induit une tension d'auto-polarisation. La mesure de cette dernière s'est avérée plus pertinente que la mesure de la puissance RF, elle constitue un paramètre clé pour le contrôle et la reproductibilité des dépôts. Un cache en inox adjacent à la cible permet d'une part de l'isoler durant le nettoyage et d'autre part de bien contrôler le temps de dépôt en ouvrant le cache une fois que le régime permanent sur la cible est atteint. Un hublot situé au centre de la porte de l'enceinte permet une observation du plasma ce qui rend possible sa caractérisation optique par spectroscopie d'émission.

c- Armoire électrique de contrôle '8'

Cet automate est l'interface qui permet l'amorçage ou l'arrêt du pompage, l'ouverture des vannes d'introduction des gaz, la régénération périodique de la pompe cryogénique, la lecture de la pression dans l'enceinte et dans la gorge de la pompe secondaire ainsi que la température de cette dernière.



1' pompe cryogénique secondaire, **'2'** enceinte de dépôt, **'3'** débitmètres massiques, **'4'** jauge Baratron, **'5'** alimentation DC, **'6'** générateur RF 13,56 MHz, **'7'** adaptateur d'impédance, **'8'** système de contrôle du pompage et de la pression, **'9'** moteur de rotation du porte-substrats (PS), **'10'** système de contrôle des caches cibles et substrats

Figure : 2.1.1 Bâti de pulvérisation magnétron

I.1.1. Configuration de l'enceinte du bâti dual magnétron

Le bâti de dual magnétron est constitué essentiellement de (Figure : 2.1.2) :

- Deux cathodes indépendantes (13) (générateurs et caches),
- Un moteur permettant la rotation du porte-substrats (14) avec une vitesse de 0 à 30 tr/min,
- Une microbalance à quartz (15) afin d'évaluer la vitesse de dépôt *in situ*.

Un automate programmable (Siemens SIMATIC C7-621) (10) (figure 2.1.1) gère la rotation du moteur et l'ouverture des caches selon des séquences choisies.



Figure : 2.1.2 : Intérieur de l'enceinte de dépôts

I.1.2. Substrats et protocole de dépôts

Substrats

Les dépôts ont été appliqués sur un grand panel de substrats selon nos besoins. Néanmoins, des substrats de silicium <100> polis deux faces ont été systématiquement utilisés afin de disposer de surfaces propres et de s'affranchir de l'effet de la rugosité de surface. Des échantillons de $10 \times 10 \text{ mm}^2$ ont été découpés à partir de wafers monocristallins (épaisseur de $380 \mu\text{m} \pm 20 \mu\text{m}$). La découpe par clivage a été réalisée minutieusement à l'aide d'une pointe diamant de façon à ce que l'on ne crée pas de substrats précontraints avant dépôt.

Des supports carrés d'acier 90CrMoV8 ont également été préparés. Des dimensions de $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ ont été utilisées pour des analyses telles que l'EDS, la DRX et le scratch-test alors que des échantillons plus volumineux ($20 \times 20 \times 4 \text{ mm}^3$) ont été réalisés pour des tests tribologiques. Avant les dépôts, un polissage au papier abrasif (SiC, Ø 800) a permis de leur conférer une rugosité de surface proche de celle des outils de coupe du bois ($R_a = 0.5$ à $0.9 \mu\text{m}$). Pour les tests par nano-indentation nous avons utilisé des substrats de verre et de silicium.

Après optimisation des conditions de dépôt, des outils de coupe du bois ont été revêtus : des plaquettes en carbures pour les tests de défonçage de MDF et des couteaux en acier pour les tests de microdéroulage de Pin d'Alep et de MDF.

Nettoyage des substrats

a- Nettoyage chimique

Quels que soient les substrats utilisés, leur nettoyage fut identique. Une succession de passages dans des bains de solvant permet d'éliminer toutes les impuretés quelle soit de nature organique (résine, graisses, hydrocarbures,...) ou bien solide (poussière, morceaux de silicium, métaux,...). En effet, toute impureté se trouvant à la surface de l'échantillon peut générer une mauvaise adhérence du film.

Les échantillons sont nettoyés selon la séquence suivante [1] :

- Trichloréthylène (à 99,5%) pendant 5 minutes dans un bac à ultrasons,
- Acétone pure (99,5%) pendant 5 minutes dans un bac à ultrasons,
- Ethanol (99,5%) pendant 5 minutes dans un bac à ultrasons.

A la fin de chaque étape, les substrats sont rincés à l'eau désionisée et stockés dans des piluliers contenant de l'éthanol absolu jusqu'à leur utilisation.

b- Nettoyage ionique (etching)

Ce nettoyage consiste à bombarder le substrat pas des ions argon pour enlever les couches d'oxydes formées après le chargement des substrats dans l'enceinte de dépôts.

c- Nettoyage de la cible

Le nettoyage des cibles par bombardement ionique (argon), permet d'enlever les couches nitrurées formées lors du dernier dépôt, ainsi que les oxydes formés après l'ouverture de l'enceinte.

d- Pré pulvérisation de la cible

L'opération de pré pulvérisation consiste à mettre la cible dans les conditions de dépôt pendant un temps de 5 à 10 minutes. En effet, après nettoyage ionique, la cible n'est pas nitrurée. Il existe donc un état transitoire pendant lequel la pulvérisation est effectuée et du matériau est déposé sans apport en azote. Comme certains des dépôts ont des durées de l'ordre de 5 à 10 minutes, cet état transitoire induit d'une part une erreur qui peut être non

négligeable au niveau du calcul des vitesses de dépôt et d'autre part une composition non homogène de la couche obtenue. Il est donc nécessaire de nitrurer la cible avant chaque dépôt.

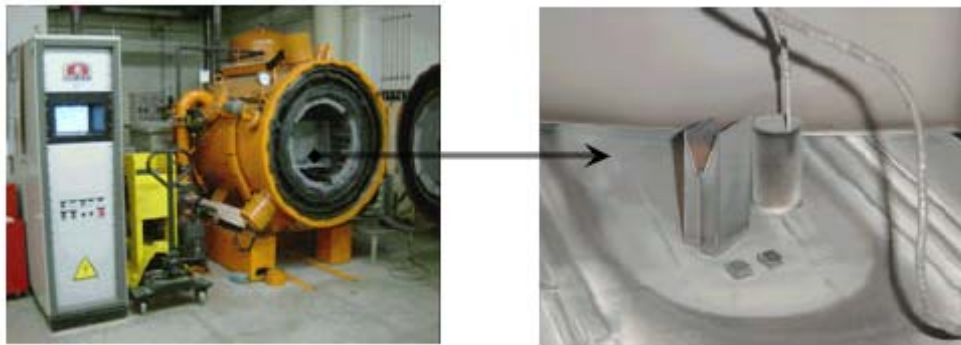
II.2. Le système de nitruration ionique

Tous les traitements de nitruration et pré-nitruration ont été effectués dans un four BMI B83 TIC qui est un four sous vide horizontal, à double paroi refroidie par circulation d'eau. Il constitue une installation autonome, à cycles de traitement automatique (Figure 2.1.3).

L'automate est supervisé par un micro-ordinateur équipé d'un logiciel (GRAPHTIL) qui permet la programmation des cycles de traitement, le dialogue avec l'automate et la restitution de toutes les grandeurs physiques en fin de traitement pour l'analyse du déroulement du cycle.

Il s'agit d'un four prototype polyvalent réalisé par la société BMI dans l'optique d'effectuer des traitements thermiques basse pression (cémentation, carbonitruration) ; des traitements de brasage, mais également des traitements par plasma (nitruration).

La disposition des échantillons est illustrée par la figure 2.1.3b où l'on voit à l'intérieur du four les couteaux de déroulage, deux petites pièces et le thermocouple fixé sur un cylindre.



(a) Vue générale

(b) Échantillons à l'intérieur du four

Figure: 2.1.3. Four BMI B83 TIC.

La chambre de traitement comporte :

Une porte de chargement frontale, solidaire de la porte de l'enceinte avec placage par un vérin.

Des ouvertures longitudinales pour le passage du flux de refroidissement. Elles sont obturées en phase de chauffage par des trappes commandées par des vérins pneumatiques extérieurs.

Les supports de charge.

Les blocs d'amenée de puissance électrique, en cuivre, refroidis par circulation d'eau avec contrôle de sécurité de température.

Le chauffage radiant est obtenu par un résistor de barreaux en graphite sous forme de cage qui entoure la charge pour un transfert de chaleur optimal. Une radiation multidirectionnelle permettant un chauffage uniforme de la charge.

Le refroidissement rapide et homogène de la charge est obtenu par convection forcée de gaz inerte refroidi par un échangeur. L'ensemble de refroidissement est inclus dans l'enceinte étanche.

La création du plasma est assurée par l'application d'une haute tension (1000V environ) entre les parois du bâti et les substrats sous l'effet de l'introduction des gaz réactifs tels que l'hydrogène, l'azote et le méthane.

II.2.1. Traitement thermique

Une nitruration nécessite un traitement préalable des pièces (trempe et revenu) qui va leur conférer des caractéristiques mécaniques à coeur compatibles avec leur utilisation future.

Dans notre étude, le traitement thermique a été le suivant :

- chauffage à 600°C et maintien pendant 15 minutes
- chauffage à 850°C et maintien pendant 15 minutes
- chauffage à 900°C puis refroidissement sous azote (5 bar)
- revenu à 550°C pendant 1 heure
- refroidissement lent sous azote (1 bar)

La dureté obtenue à coeur après ce traitement est d'environ 480-500 HV.

II.2.2. Conditions de nitruration

Pour cette étude, plusieurs traitements de nitruration ont été réalisés. Les paramètres de nitruration (enchaînement des séquences, débits des gaz...) ont été déterminés en se basant sur une étude précédente effectuée sur l'acier 90CrMoV8 [2]. Un certain nombre de paramètres ont été fixés selon cette étude ; il s'agit de la pression totale des gaz en séquence de nitruration (3 mbar), du débit du gaz nitrurant (6,7 l/min), de l'intensité du plasma et des conditions de refroidissement (1 bar d'azote). Les seuls changements sont intervenus sur la température de nitruration, le temps total du traitement et la composition du mélange gazeux utilisé pendant la séquence de nitruration.

II.3. Etude de la stabilité thermique des films

La stabilité thermique consiste à étudier le comportement des dépôts à haute température. Pour faire les recuits, nous avons utilisé un four de dilatométrie (Figure 2.2.4).

Il se compose de trois parties :

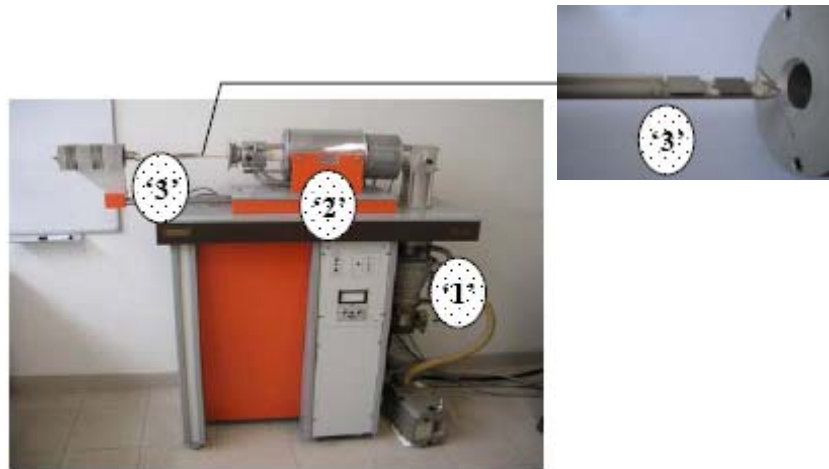
: Un système de pompage '1' qui comprend une pompe primaire et une pompe secondaire (à diffusion) afin d'obtenir un vide dans l'enceinte de l'ordre de 10^{-5} mbar nécessaire pour faire un recuit sans oxygène.

Une enceinte '2' ne pouvant contenir que des échantillons de petite taille grâce à un porte échantillons '3'. La température maximale que l'on peut obtenir est 1200°C en consigne soit ~1100°C au coeur du four.

Un système d'acquisition '4' (Fig.2.1.5) qui permet de définir un cycle de chauffage.

'1' système de pompage, '2' enceinte de recuit,

'3' porte- échantillons



‘1’ système de pompage, ‘2’ enceinte de recuit,
‘3’ porte- échantillons

Figure : 2.1.4 : Dilatomètre.

Nous avons fait des recuits à 600, 800 et 1000°C sur des aciers revêtus de CrAlN. Grâce au système d’acquisition dont nous disposons (Figure : 2.1.5), nous avons élaboré un cycle thermique (Figure : 2.1.6) selon les paramètres suivants :

Chauffage de 10°C/min jusqu’à la température souhaitée (attention, il y a une différence entre la température de consigne du four et celle de l’échantillon, par exemple, si l’on veut un recuit, donc un échantillon à 1000°C, le four doit être chauffé jusqu’à 1110°C)

Maintien de la température pendant une heure

Refroidissement rapide jusqu’à 50°C.



Figure : 2.1.5 : Système d’acquisition

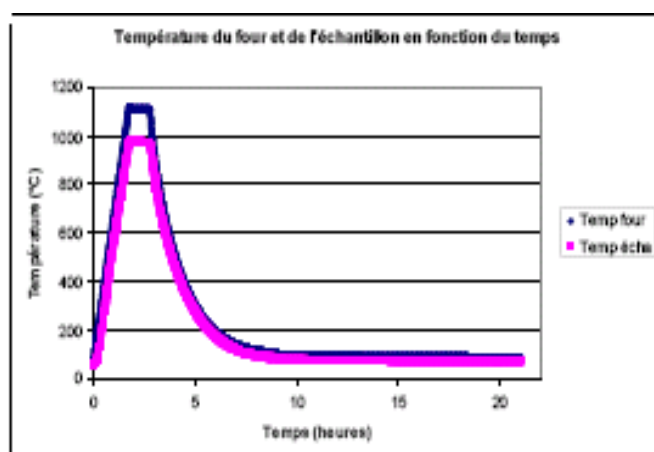


Figure : 2.1.6 : Cycle thermique

Après chaque recuit, nous avons procédé à plusieurs analyses :

DRX pour connaître les phases en présence et leur taux de cristallinité,

EDS pour déterminer la composition des couches recuites et en particulier s'il y a présence d'oxygène ou non,

Microscopie optique (MO) pour observer l'état de surface des couches.

II.4. Techniques et moyens de caractérisations physico-chimiques

II.4.1. Microscopie électronique à balayage (MEB)

Le principe de fonctionnement du MEB (figure : 2.1.7) est basé sur l'interaction rayonnement/matière [3]. En effet, quand un faisceau d'électrons incident interagit avec la surface de l'objet à analyser divers phénomènes se produisent : diffusion et diffraction d'électrons, émission d'électrons secondaires, d'électrons rétrodiffusés, d'électrons Auger, de photons X,... Si on associe à chaque type d'émission le détecteur correspondant, une grande diversité d'informations sur l'échantillon peut-être obtenue. L'optique électronique et la courte longueur d'onde du faisceau permettent l'obtention d'images avec une grande résolution (d'un ordre de grandeur de 4 nm) et une bonne profondeur de champ.

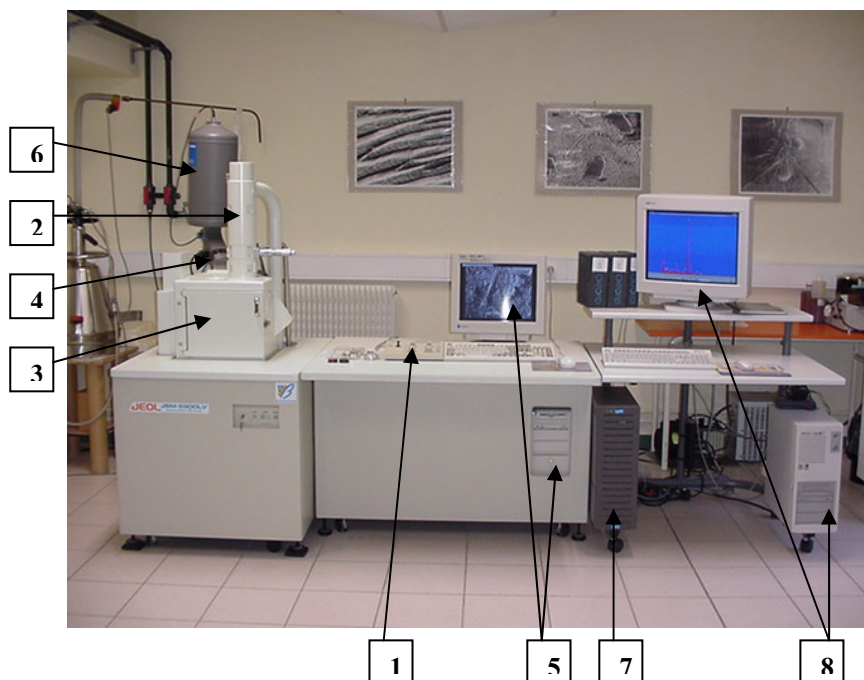


Figure : 2. 1.7 : MEB "Jeol JSM-5900 LV"

- (1) : Boîtier de pilotage manuel.
- (2) : Colonne électronique permettant de générer et piloter le faisceau d'électrons.
- (3) : Chambre.
- (4) : Détecteur permettant de collecter les électrons émis par l'échantillon.
- (5) : PC de pilotage du MEB et d'acquisition d'images.
- (6) : Réservoir d'azote liquide permettant de refroidir le détecteur de rayonnements X destiné à l'analyse chimique.
- (7) : Analyseur multicanaux destiné à traiter et amplifier les informations en provenance du détecteur de rayonnement X.

(8) : Système informatique pourvu d'un logiciel assurant le traitement des informations en provenance de l'analyseur.

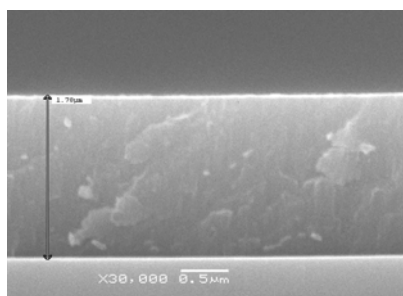
Fonctionnement

La production du faisceau d'électrons se fait dans un canon à électrons par effet thermoélectronique à partir d'un filament de tungstène porté à une température de l'ordre de 3000 °C. Les électrons produits sont accélérés grâce à une tension appliquée entre le canon à électrons et l'objet à analyser. Les tensions d'accélération appliquées se situent entre 0 et 30 kV. Des bobines électromagnétiques et des diaphragmes assurent le guidage, la focalisation et le balayage du faisceau jusqu'à la surface de l'échantillon.

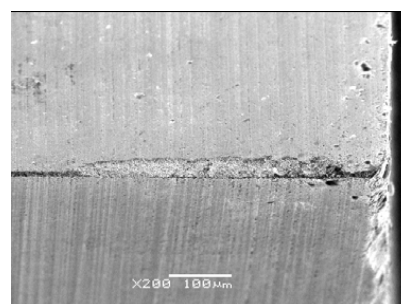
Les électrons secondaires et rétrodiffusés sont récoltés chacun par leur détecteur respectif. Le signal est modulé par une chaîne électronique et synchronisée avec le balayage d'un tube cathodique.

L'opération se déroule sous un vide se situant entre 10^{-4} et 10^{-5} Pa constamment maintenu dans la colonne et la chambre d'analyse afin d'éviter tous risques de contamination de l'enceinte, d'oxydation de la source ou de l'échantillon et pour éviter les collisions qui peuvent se produire entre électrons et particules de l'air (phénomène de freinage). Les échantillons ne nécessitent pas de préparation spécifique mais le dépôt d'un film conducteur d'or ou de carbone s'impose lorsque l'on veut observer des échantillons isolants. La préparation des échantillons se réduit à un nettoyage à l'éthanol éventuellement dans un bain d'ultrasons. Dans le cas de matériaux diélectriques, la recherche d'une imagerie de grande qualité se fera après évaporation d'une couche d'or ou de carbone. Par ailleurs, le fonctionnement en mode 'vide partiel' permet d'obtenir une très bonne qualité d'image sans application d'aucun revêtement spécifique et autorise ainsi l'analyse des surfaces.

Nous avons observé au MEB les surfaces des couches produites et fait des mesures d'épaisseur. Ces observations ont aussi été utilisées comme une première caractérisation de la morphologie interne des films. Une illustration de la morphologie d'un film de CrN est représentée sur la figure 2.1.8.a. Avant dépôt, des observations sur les arêtes des plaquettes carbures ont été systématiquement réalisées, afin de s'affranchir d'une erreur d'interprétation des résultats que peut engendrer l'emploi de plaquettes préalablement endommagées. Lors de l'acquisition de ces images, il s'est avéré que très souvent, ces dernières présentent régulièrement des ébréchures (Figure 2.1.8.b). La fragilité de l'arête, conférée par l'arrachement aisé des grains de carbures lors de l'affûtage ou du transport, a conduit à éliminer une grande partie de ces outils pour les essais d'usinage. Une attention très particulière a été portée quand à l'état initial de l'arête des outils.



a



b

Figure : 2.1.8 : Images MEB : (a) Coupe transverse d'une couche de CrN, (b) Arête de coupe endommagée d'une plaquette carbure avant dépôt

II.4.2. Spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS)

Couplé au MEB, le détecteur EDS permet de faire des analyses chimiques de surface, qualitatives et quantitatives avec une pénétration d'environ 1 μm (poire d'interaction) variant selon l'énergie du faisceau d'électrons incident et la densité du matériau.

Le détecteur se présente sous forme d'un monocristal de silicium compensé partiellement au lithium. Son positionnement adéquat (dans notre cas, en croisant la surface de l'échantillon à une distance de 10 mm de la sortie de colonne) permet de récolter un maximum de photons X caractéristiques, émis lors du changement de niveau d'énergie des électrons (désexcitation).

Chaque raie d'émission est caractéristique de l'élément excité, un logiciel permet de traiter le spectre obtenu et de déterminer les proportions massiques et atomiques. Ainsi avec cette analyse, la stoechiométrie des films a pu être obtenue. La résolution du système est de 129 eV pour une tension de 20 kV appliquée sur un échantillon de manganèse. Nos travaux ont été réalisés avec une tension de 5 kV afin de localiser le volume d'interaction sur l'épaisseur du dépôt (ordre de grandeur : 300 nm dans une couche de nitrure de chrome), cette résolution était ainsi encore meilleure et a permis de travailler sur les raies de basse énergie. Une analyse par EDS a été systématiquement réalisée après chaque dépôt. La figure 2.I.9 présente le spectre EDS issu de l'analyse d'une couche de CrAlN. Compte tenu des profils obtenus, nous avons constaté la présence des trois éléments Cr, Al et N. Aucune trace d'impureté en particulier d'oxygène, n'a été observée, ce qui montre la pureté des couches.

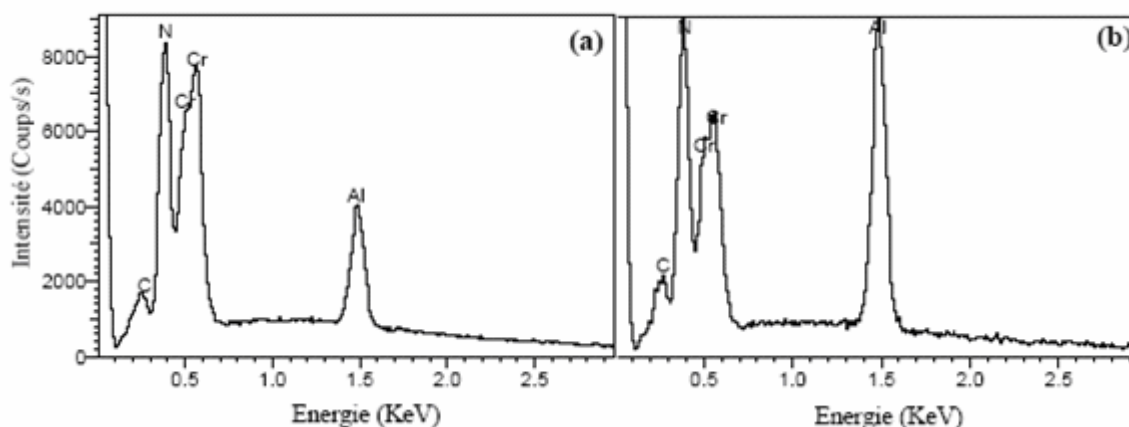


Figure : 2.I.9 : Spectre EDS : dépôts de CrAlN obtenus avec une tension appliquée à la cible d'Al de : (a) -500V et (b) -700V

Les taux d'oxygène mesurés par EDS sont très importants et empêchent toute étude sérieuse sur des nitrures car à ces taux nous sommes plutôt en présence d'oxynitrures. Un système de détection de fuite a donc été utilisé, « ASM 10 », il comprend deux ensembles :

- Un ensemble appelé « bloc analyseur » (Figure : 2.1.10.a) qui contient le cœur de l'appareil (la cellule d'analyse) avec un groupe de pompage composé d'une pompe à palette et d'une pompe à diffusion. C'est une cellule d'analyse par spectrométrie de masse, qui est réglée sur la masse de l'hélium ($m/e = 4$) ou une autre « masse légère », masse 2 ou 3

où m/e est le rapport de la masse du spectromètre de la particule sur le nombre d'électrons perdus à l'ionisation.

- Un ensemble appelé « Coffret électronique » (Figure : 2.1.10.b) sur lequel se trouve un galvanomètre de lecture de fuite.



(a)

(b)

Figure : 2. 1.10 : Détecteur de fuites ASM 10 : (a) Bloc analyseur, (b) Coffret électronique

Le bloc analyseur est connecté au bâti et on met l'ensemble sous vide. Après mise sous tension du coffret électronique qui est quant à lui, relié au groupe de pompage, on procède à la détection. A l'aide d'une soufflette on pulvérise de l'hélium sur l'emplacement potentiel des fuites (joints toriques, jointures métalliques, cordons de soudures,...). Un signal sonore retenti si la température du filament d'une jauge Pirani baisse, signifiant une entrée intempestive d'hélium et donc une augmentation de la pression de gaz. Grâce à ce dispositif, on a pu localiser les fuites.

II.4.3. Diffraction de rayons X (DRX)

La diffraction de rayons X permet une étude cristallographique des couches minces sur toute leur épaisseur. Outre l'identification de la structure cristalline des phases formées dans le film, les diffractogrammes obtenus renseignent sur l'orientation des grains, leur taille, leurs défauts ainsi que leur état de contraintes.

Principe

Lorsqu'un faisceau de rayons X rigoureusement monochromatique (une seule longueur d'onde λ) interagit avec un solide, il n'y a diffraction que si les atomes de ce solide sont ordonnés (cristal). Une partie du faisceau incident est diffractée par les atomes sous forme d'un rayonnement X de même longueur d'onde. Si les rayonnements diffusés sont en phase, l'intensité du rayonnement X réémise sera observable et formera un faisceau diffracté (Figure : 2.1.11).

La condition nécessaire pour que cette interférence soit constructive est donnée par la loi de Bragg :

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (1)$$

où d_{hkl} : distance entre deux plans réticulaires d'indice de Miller h,k,l consécutifs,
 θ : angle que forment les rayons X incidents ou diffractés avec le plan réticulaire,
 n : nombre entier appelé ordre de la réflexion,
 λ : longueur d'onde du faisceau incident..

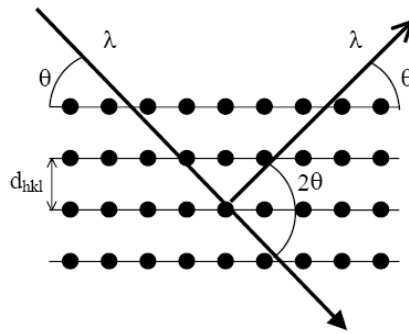


Figure : 2. 1.11 : Condition de Bragg, principe de la diffraction de rayons X

Configuration Bragg-Brentano

En diffraction X, la configuration Bragg-Brentano, (Figure : 2.1.12) appelée aussi $\theta/2\theta$ est la plus utilisée. L'angle d'incidence θ séparant le faisceau incident de rayons X et la surface de l'échantillon est égal à l'angle de mesure entre le détecteur et la surface de l'échantillon. Cela signifie que les plans qui sont dans la situation de réflexion de Bragg sont toujours parallèles à la surface.

L'échantillon tourne autour de l'axe du goniomètre à une vitesse $\omega = d\theta/dt$ constante. Le détecteur placé sur le même cercle que la source X se déplace avec une vitesse double $\omega' = 2\omega$. Avec cette géométrie, la technique de diffraction X est de moins en moins sensible quand l'épaisseur des couches minces devient de plus en plus faible. Et ce, à cause de la pénétration des rayons X dans la matière qui augmente avec l'angle d'incidence. Dans cette étude, nous avons utilisé un diffractomètre « SIEMENS type D 500/501 » avec une anticathode de cuivre ($\text{CuK}\alpha$, 1,54Å) ou de cobalt ($\text{CoK}\alpha$, 1,78Å).

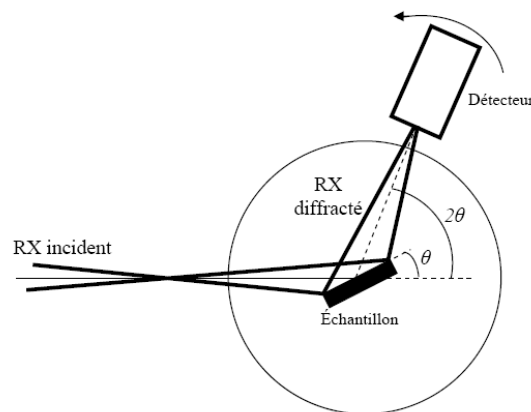


Figure : 2. 1.12 : Configuration Bragg-Brentano.

II.5. Techniques de caractérisations mécaniques

Introduction

La caractérisation d'un revêtement est entendue comme la quantification de ses propriétés physiques et de sa tenue en service lors de son application industrielle.

Des méthodes de caractérisations chimiques et structurales des revêtements comme la profilométrie, la rugosimétrie 2D et 3D, la microscopie optique, la microscopie électronique à

balayage, à transmission ou à effet tunnel, la diffraction des rayons X, les spectrométries, les sondes EDS ou WDS ont été développées par Nouveau [2].

Il paraît dès lors clair que la sélection des revêtements parmi l'ensemble disponible sur le marché devra se faire sur la base d'essais prenant en compte ces conditions de sollicitation.

Il devra ainsi reproduire les mêmes modes d'usure que ceux mis en évidence précédemment (abrasion, adhésion, diffusion, fatigue, oxydation) avec en plus les contraintes technico-économiques suivantes :

- Essais peu onéreux,
- Essais rapides,
- Essais faciles à contrôler et à instrumenter,
- Essais flexibles (variation facile des paramètres pour d'autres applications d'usinage),

Il existe deux types d'essais que sont :

- ✓ **Les essais fondamentaux** qui sont très nombreux et ont tous pour objectifs d'isoler et de quantifier un nombre limité de propriétés du système revêtu. Seuls seront cités les essais les plus utilisés :

- Scratch test → Caractérisation de l'adhérence
- Test d'indentation → Caractérisation de l'adhérence et de la dureté
- Les mesures de dureté → Mesure de dureté et du module d'Young
- Les essais pion disque → Mesure des coefficients de frottement et de l'usure
- Le Calotest → Quantification de la résistance à l'abrasion et des épaisseurs
- Les essais de fatigue → Quantification de la résistance à la fatigue

- ✓ **Les essais appliqués** qui sont quant à eux tous liés à la mise en œuvre d'une opération d'usinage à l'aide du même couple substrat + revêtement. Parmi l'ensemble des essais possibles, il est nécessaire de distinguer deux familles d'essais : les essais de qualification et les essais de quantification. Les essais de qualification ont pour objectifs de comprendre les mécanismes de dégradation des revêtements durant l'usinage, alors que les essais de quantification auront pour objectifs de quantifier les performances du système revêtu au plus près des conditions industrielles.

II.5.1. Contraintes résiduelles des films

Généralités

L'étude des contraintes des revêtements PVD au niveau de l'interface substrat/revêtement est importante puisque les sollicitations imposées aux premières couches d'atomes du revêtement pendant l'élaboration affectent grandement la croissance des couches suivantes.

Les contraintes internes des revêtements PVD sont généralement des efforts en compression qui peuvent atteindre plusieurs GPa. Des contraintes en tension peuvent aussi apparaître mais beaucoup plus rarement et d'une moindre amplitude [4,5].

D'une manière générale, la présence de contraintes internes dans les films minces peut être à l'origine de la rupture de l'ensemble film/substrat selon plusieurs mécanismes.

Dans le cas de contraintes en tension, des fissures naissent le plus souvent dans l'épaisseur et se propagent à l'interface, voire dans le substrat. Si au contraire, les contraintes sont en compression, l'endommagement est sous forme de décollement de la couche et ceci pour adopter une morphologie qui minimise l'énergie élastique emmagasinée lors de la croissance du film. On parle alors de délaminage ou flambage [6]. Ces phénomènes sont un obstacle à une bonne adhérence des films.

$$(\sigma_{\text{int}}) = (\sigma_g) + (\sigma_t) \quad (2)$$

La contrainte interne d'un revêtement est le résultat d'une contrainte σ_t due à la différence de coefficient de dilatation thermique entre le substrat et le revêtement et d'une contrainte σ_g liée au processus de croissance dont la valeur est fortement dépendante du type de technologie PVD utilisée et des paramètres de dépôt [7]. La contrainte thermique σ_t s'exprime principalement au voisinage de l'interface substrat/revêtement puis se relaxe progressivement au sein du dépôt.

Oettel *et al* [8] proposent un terme supplémentaire σ_{ep} rendant compte des différences structurales entre le revêtement et le substrat, mais minimisent son importance par rapport aux deux autres.

La contrainte interne globale est directement liée à la phase d'élaboration. Globalement, les contraintes seront d'autant plus importantes que l'énergie des particules incidentes sera grande. Cette dernière condition sera remplie pour [9,10];

- une température du substrat faible,
- une grande polarisation du substrat,
- une faible pression totale dans l'enceinte,
- une forte pression partielle des gaz réactifs,
- une épaisseur de dépôt mince,

Les contraintes « internes ou résiduelles » dans un film ont principalement deux origines : les contraintes thermiques et les contraintes de croissance. Certains auteurs [11] ajoutent une troisième contrainte due au changement de phase. Étant donné que les contraintes de croissance et de changement de phase sont de même nature et sont étroitement liées à la morphologie du film, l'association des deux contraintes est identifiée par la contrainte intrinsèque du film produit.

La contrainte thermique σ_{th} est liée à la différence des coefficients de dilatation thermique $\Delta\alpha$ du film et de son substrat, à la différence de température ΔT , au coefficient de poisson ν_f et au module d'Young E_f du film, elle est calculée par la relation (3).

$$(\sigma_{\text{Th}}) = E_f \Delta\alpha \Delta T / (1 - \nu_f) \quad (3)$$

Dans le cas de notre étude, cette grandeur a été considérée comme négligeable car la température qu'atteignent les substrats lors du dépôt par pulvérisation magnétron a été évaluée environ à 200°C. A cette température et en considérant les coefficients de dilatation thermique du silicium et de nos nitrures, la contrainte thermique engendrée est de l'ordre de 0,1- 0,2 GPa ce qui correspond aux erreurs de mesure. Par contre, dans le cas d'autres procédés de dépôts, la différence de température peut excéder 1000°C induisant des contraintes de l'ordre du GPa [12].

En ce qui concerne la contrainte intrinsèque, elle peut être produite à partir de plusieurs sources : soit par la présence d'une contamination en surface du substrat précédant ou pendant le dépôt, soit par la technique d'élaboration du film qui joue également un rôle important dans la genèse de cette contrainte. Par ailleurs, dans de nombreux systèmes, la contrainte

intrinsèque, due à la croissance du film, provient des défauts créés durant l'élaboration. L'exemple le plus connu est la contrainte d'épitaxie.

Lors de notre travail, seule la valeur de la contrainte résiduelle calculée après mesure expérimentale a été étudiée.

Mesure des contraintes résiduelles

La mesure de la contrainte résiduelle dans les films élaborés est basée sur le principe émis par Stoney [13]. Si l'on considère que la contrainte est isotrope dans le plan du substrat, que le film ainsi produit est une portion de sphère de rayon R , que la composante σ_z du tenseur de contrainte vaut zéro et que l'épaisseur du film est négligeable devant l'épaisseur du substrat alors la contrainte s'exprime par la formule (4) :

$$\sigma_{Rés} = \pm \frac{E_s}{6(1-\nu_s)} \times \frac{e_s^2}{e_f} \left[\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right] \quad (4)$$

où :

- E_s : module d'Young du substrat.
- ν_s : coefficient de Poisson du substrat.
- e_s : épaisseur du substrat.
- e_f : épaisseur du film.
- R_0 : rayon de courbure avant dépôt.
- R : rayon de courbure après dépôt.

Dans le cas où la courbure de la couche produite est de forme concave, elle traduit alors une contrainte en tension. Par convention internationale, on lui attribuera un signe positif.

Dans le cas opposé (forme convexe), elle traduit une contrainte en compression, la valeur sera négative (Figure : 2.1.13).

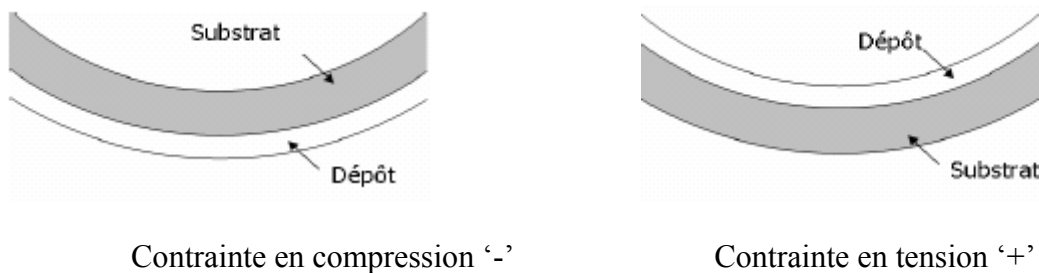


Figure : 2. 1.13 : Déformation de l'ensemble film/substrat en fonction du type de contrainte.

Dans le cadre de nos recherches, la courbure des films a été mesurée par interférométrie (méthode des anneaux de Newton).

Mesure par interférométrie

Cette méthode de mesure du rayon de courbure est connue sous plusieurs appellations : méthode des anneaux de Newton en hommage à celui qui en donna les premières assises, des franges d'égale épaisseur ou bien d'interférométrie optique (interférences lumineuses).

La méthode consiste à éclairer un échantillon déposé sur une lame en verre à faces parallèles sur le côté revêtu à l'aide d'une lampe à vapeur de sodium ($\lambda = 589,3$ nm) sous incidence normale. Un réseau de franges circulaires centré au point de contact naît alors entre la calotte sphérique formée par la surface de l'échantillon et la lame (Figure : 2.1.14). Une frange

sombre est observable à chaque fois que la distance entre la lame et la couche vérifie la relation

(5) :

$$h = m \frac{\lambda}{2} \quad (5)$$

où h, R et le diamètre de l'anneau sont reliés par la formule (6) :

$$h = R - \sqrt{R^2 - \frac{d_m^2}{4}} \quad (6)$$

Les franges sont observées à l'aide d'un appareil photo numérique à haute résolution et les photos sont ensuite transférées et traitées à l'aide du logiciel de traitement d'images « Analysis ». Les anneaux dans la majorité des cas avaient une forme elliptique, une moyenne des quatre rayons mesurés a été calculée. Pour minimiser les erreurs de mesure, on a tracé la courbe de régression linéaire et le rayon de courbure du film produit s'exprime alors par la relation (7) :

$$R = \frac{1}{4\lambda} \frac{\Delta d_m^2}{\Delta m} \quad (7)$$

où m est l'indice de l'anneau.

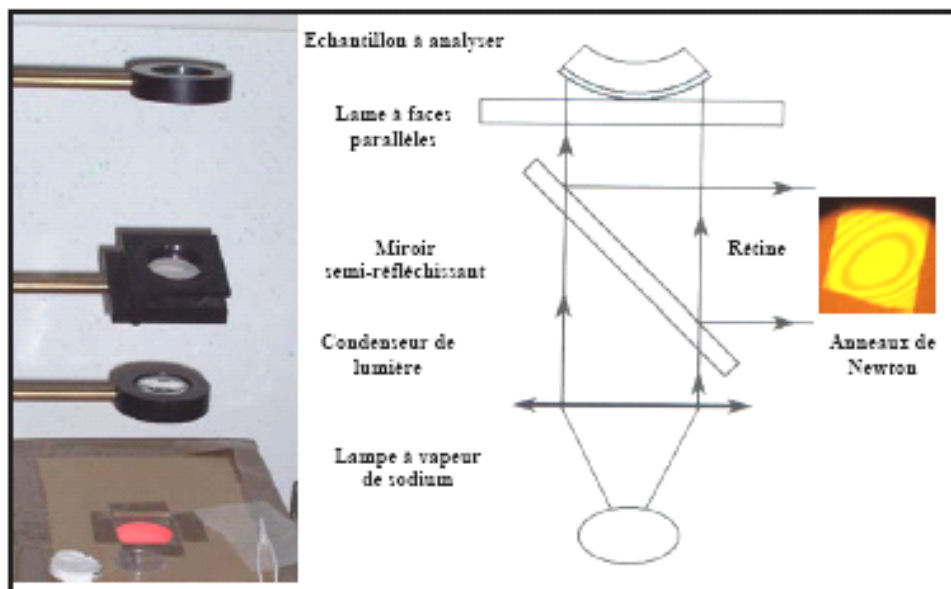


Figure : 2.1.14 : Dispositif de mesure des rayons de courbure par la méthode des anneaux de Newton

II.5.2. Adhérence

Après dépôt et selon leur structure et leurs propriétés mécaniques intrinsèques, les films obtenus n'auront pas le même accrochage mécanique sur les substrats, c'est là qu'intervient la

notion d'adhérence du film. Cette notion est plus que capitale si l'on veut statuer sur le comportement en coupe du bois de l'outil revêtu. Si l'adhérence du film élaboré est faible, il est évident que le revêtement ne jouera aucun rôle de protection, ainsi on retombe dans le cas de l'usinage avec un outil conventionnel.

Afin d'obtenir cette information, nous avons réalisé des tests de rayage mono passe à charge croissante, plus connu sous l'appellation '*Scratch-test*'. Cette méthode très largement utilisée consiste à faire glisser, à vitesse constante, un indenteur en diamant chargé avec une force normale et croissante F_N sur la surface du revêtement à caractériser. Une force tangentielle F_T est mesurée durant l'essai et un capteur acoustique enregistre l'intensité du signal sonore émis par l'échantillon. A partir d'un graphique (Figure : 2.1.15) sur lequel est reportée l'évolution de la force tangentielle et de l'émission acoustique en fonction de la force normale, la pente de la droite (dans un cas idéal) donne la valeur du coefficient de frottement.

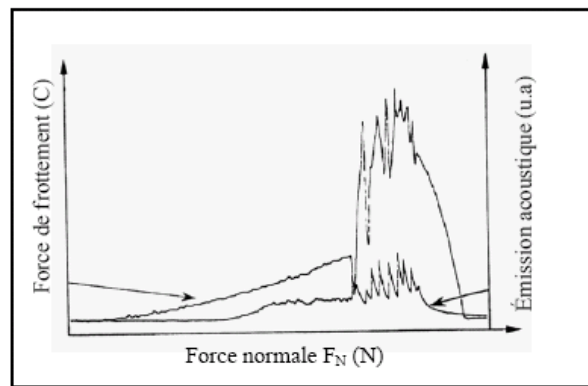


Figure : 2.1.15 : Courbe caractéristique obtenue après Scratch-test

La rupture correspond à l'arrachement de la couche et correspond à une valeur limite de la force normale. Cette valeur notée L_{C2} dépend de plusieurs facteurs tels que : les propriétés du substrat, les propriétés du film, le coefficient de frottement, l'état de surface et l'environnement, la vitesse de montée en charge et de déplacement de l'indenteur, le rayon et l'usure de l'indenteur ainsi que les facteurs instrumentaux. Une illustration d'un endommagement d'une couche correspondant à cette valeur L_{C2} est montrée sur la figure : 2.1.16.

Les scratch-tests ont été réalisés avec un microtesteur commercial MST-CSEMEX® (CSEM, Neuchâtel, Suisse) équipé d'un microscope optique. Il est également muni d'un système de détection d'émission acoustique ainsi que d'un capteur de force tangentielle d'une sensibilité de l'ordre de 10 mN. Durant le chargement normal, l'échantillon a été déplacé horizontalement avec une vitesse constante (dx/dt) jusqu'à l'apparition de l'endommagement du film. L'indenteur est une pointe diamant Rockwell avec un angle au sommet du cône de 120° et un rayon R de 0,2 mm. Durant le test, la charge normale appliquée fut linéairement augmentée de 0 à 30 N avec une vitesse constante de chargement (dF_N/dt). Les vitesses de rayage ainsi que celles du chargement ont été respectivement de 2 mm^{-1} et 10 N.min^{-1} .

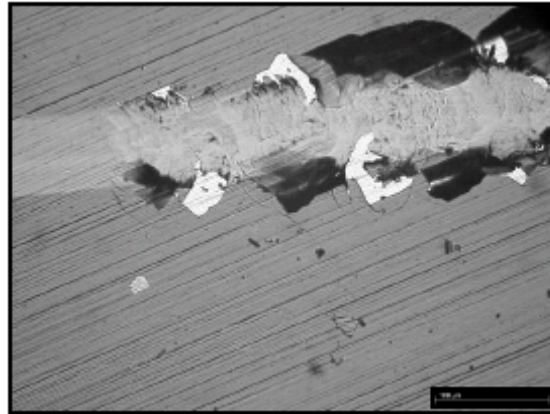


Figure : 2.1.16 : Micrographie de l'endommagement d'un film

II.5.3. Dureté

La dureté est définie comme étant la résistance à la pénétration locale du matériau considéré. Elle dépend non seulement des caractéristiques de ce matériau, mais aussi de la nature et de la forme du pénétrateur et du mode de pénétration. La dureté permet d'apprécier, dans une certaine mesure, la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion, la difficulté d'usinage,.... D'une façon synthétique, la dureté H d'un matériau est définie comme sa résistance à la déformation plastique créée par un indenteur et elle s'exprime par la formule suivante :

$$H = \frac{P_{\max}}{A} \quad (8)$$

où :

- $P_{\max}$: force maximale appliquée par l'indenteur,
- A : surface calculée à partir de la mesure de la déformation résiduelle après pénétration.

Usuellement et selon la forme de l'indenteur, on répertorie trois différents types d'essais : essai Rockwell 'R', Brinell 'B' et Vickers 'HV'. Chaque géométrie des indenteurs induit une différente déformation plastique du matériau et de ce fait, les résultats de ces diverses méthodes peuvent difficilement être comparés. Il est donc important de noter que la dureté n'est pas une propriété intrinsèque du matériau mais sa résistance à un test mécanique normalisé. Bien souvent, ces trois méthodes sont réalisées sur des matériaux massifs.

Microdureté

La mesure de la microdureté, à la différence de la mesure de dureté, intéresse un domaine très réduit de la matière (quelques microns) et sous de faibles charges. Elle permet donc d'obtenir des informations intéressantes en ce qui concerne en particulier :

- les petits échantillons (aiguilles, fils, rubans minces),
- les couches superficielles (couches cémentées, nitrurées, dépôts électrolytiques),
- les matières dures et fragiles (carbures, verres) susceptibles de se fissurer, sauf sous une très faible charge,
- les divers constituants des alliages : on peut apprécier la variation de dureté dans les grains d'une solution solide non homogène, en fonction de la diffusion des éléments ou de celle des différentes phases précipitées.

Nanoindentation

Cette troisième catégorie de mesure de dureté est la plus appropriée et la plus utilisée pour l'étude des couches minces. Au vu de la faible épaisseur des films, si l'effort de pénétration est trop important, l'influence du substrat sur la mesure sera non négligeable. Ainsi, la profondeur d'indentation ne doit pas dépasser 10% de l'épaisseur de la couche. Les charges de pénétration s'échelonnent généralement entre 10^{-6} et 10^{-3} N, on parle ainsi de nanodureté ou bien encore de nanoindentation.

L'indentation est une méthode assez ancienne de mesure des propriétés mécaniques des matériaux. De façon synthétique, il s'agit d'appliquer sur la surface du matériau un cycle charge/décharge (Figure : 2.1.17) localisé et d'observer sa réponse, à la fois plastique et élastique.

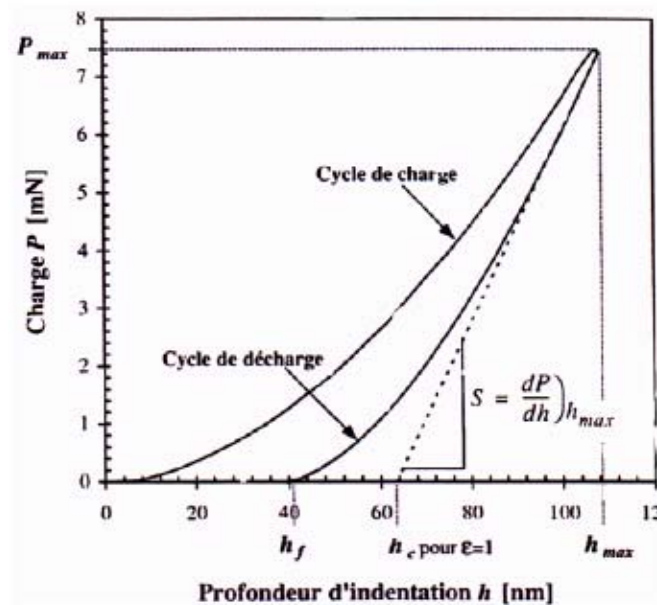


Figure : 2. 1.17 : Courbe caractéristique de charge/décharge obtenue après un test de dureté

La transposition de cet essai à l'échelle nanométrique, la nanoindentation, permet, grâce à une méthode développée par Oliver *et al.* [14] la mesure à l'échelle locale du module élastique réduit et de la dureté d'un matériau.

Après un cycle charge/décharge, la déformation plastique résiduelle a une profondeur h_f .

La pente à la tangente de la courbe de décharge représente la raideur S du matériau. Le module élastique réduit s'exprime alors par l'équation (9) :

$$E_r = \frac{S\sqrt{\pi}}{2\sqrt{A}} \quad (9)$$

De plus, E_r est fonction des modules d'Young et des coefficients de Poisson E et ν de l'échantillon et E_i et ν_i de l'indenteur selon la relation (10) :

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \quad (10)$$

La surface de contact projetée A est déterminée à partir de la profondeur h_c et de la géométrie de l'indenteur. h_c est la profondeur réelle de pénétration de l'indenteur à charge maximale et est exprimée comme $h_c = h_{\max} - h_s$, où h_s est la contribution de la déformation élastique (Figure 2.1.18), varie en fonction de la géométrie de l'indenteur et peut être exprimée par :

$$h = \varepsilon \frac{P_{\max}}{S} \quad (11)$$

où ε est une constante géométrique de l'indenteur et vaut 1 dans le cas d'un indenteur cylindrique et 0,72 dans le cas d'un indenteur conique.

Toutes les autres géométries prennent des valeurs comprises entre 0,72 et 1. La dureté se calcule à partir de la profondeur de contact h_c déterminée à l'aide de la raideur S .

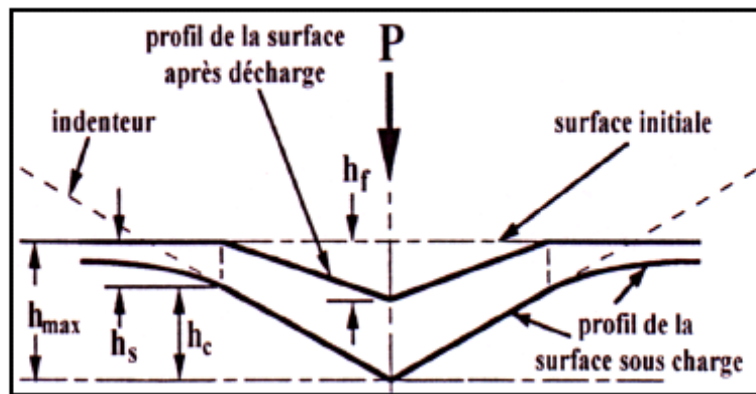


Figure : 2.1.18 : Section d'une indentation [14].

Le matériel utilisé pour réaliser nos tests est un nanoindenteur NHT de CSM instruments avec un indenteur Berkovich (pyramide à base triangulaire) (Figure : 2.1.19). Pour réaliser les indentations nous avons utilisé le mode Sinus. Dans le mode sinus on ne fait pas une indentation simple. L'indenteur pénètre dans la matière en suivant une progression sinusoïdale. Ce mode permet de sonder la couche jusqu'au substrat (ou jusqu'à ce que son influence se fasse sentir). Nous obtenons alors la dureté et le module d'Young des couches en fonction de la profondeur d'indentation (Figure : 2.1.20) Une moyenne est prise sur 10 indentations effectuées sur chaque échantillon. Les conditions d'analyses utilisées sont :

- Charge maximale : 10 mN
- Vitesse de charge : 5 mN/min
- Vitesse de décharge : 5 mN/min
- Fréquence du sinus : 1 Hz
- Amplitude du sinus : 1 mN

Ces mesures ont été faites au Laboratoire de Microanalyse des Surfaces (LMS) de l'ENSSM de Besançon.



Figure : 2.1.19 : Nanoduromètre NHT.

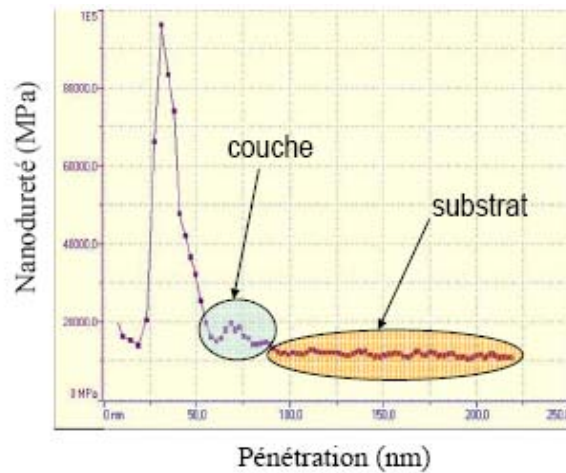


Figure : 2.1.20 : Courbe représentant la nanodureté en fonction de la profondeur de pénétration.

II.5.4. Usure

Étant donné que les couches dures de nitrures trouvent principalement des applications dans les domaines tribologiques, la dureté et l'adhérence sont deux paramètres que l'on ne peut pas négliger mais qui restent insuffisants pour statuer sur le comportement en service des pièces revêtues. Cette hypothèse est d'autant plus vraie si on rajoute à cela le fait que le choix de la couche protectrice doit être effectué en fonction des conditions d'utilisation de la pièce revêtue (charge, vitesse de frottement, lubrification, nature de la contre pièce, présence de débris d'usure dans le contact, environnement chimique,...).

La dureté et l'adhésion ne sont donc pas des paramètres suffisants. La résistance à l'usure permet d'apporter une information complémentaire sur les propriétés mécaniques des couches. Dans de nombreux domaines, c'est la résistance élevée à l'usure des revêtements durs à basse ou à haute température qui est le plus souvent recherchée. L'usure est une conséquence du frottement. D'une manière générale, le frottement apparaît lorsqu'on déplace deux corps en contact l'un par rapport à l'autre comme c'est le cas en usinage. Alors, l'usure est définie comme la perte progressive de matière de la surface d'un corps par suite du mouvement relatif d'un autre corps en contact.

L'usure n'est donc pas une propriété des matériaux mais une conséquence du frottement. Elle caractérise tout phénomène de frottement : perte de cote, de forme et de poids par émission de débris.

Notons que l'usure des matériaux en frottement est très variable. En conséquence, il n'existe ni bon ni mauvais matériau de frottement mais des couples de matériaux qui, pour des conditions données, forment des troisièmes corps compatibles ou non avec les caractéristiques de frottement et d'usure souhaitées [15].

Au cours du phénomène d'usure, il y a passage du contact à deux corps au contact à trois corps. En effet, les débris provenant de l'usure se trouvent piégés dans l'espace confiné formant ainsi une couche pulvérulente appelée « troisième corps ».

Dans notre cas, bien que la formation du troisième corps ait été prise en considération lors du traitement des résultats, elle reste négligeable en usinage de bois vert. L'évacuation rapide des débris formés est assurée par l'eau présente dans le bois lors de l'usinage.

L'usure est un phénomène complexe, généré par de nombreux processus physiques, chimiques et mécaniques. En général, on distingue deux modes fondamentaux : l'usure adhésive et l'usure abrasive.

- L'usure adhésive se traduit par le transfert de matière d'une pièce frottant sur la surface du solide antagoniste.
- L'usure abrasive quand à elle est produite par l'action de corps étrangers, durs et pulvérulents, présents entre deux surfaces en mouvement relatif ou encastrés dans l'une des deux surfaces.

Il ressort donc que le comportement tribologique n'est pas une propriété intrinsèque des matériaux mais qu'il dépend des caractéristiques mécaniques et structurales des deux matériaux en frottement et des conditions de sollicitation.

Les essais d'usure ont également été menés au LMS à l'aide d'un tribomètre dans la configuration pion-plan (Figure : 2.1.21). Le pion est une bille en acier (100Cr6). Le plan est animé d'un mouvement rotatif alternatif. Cette configuration entraîne une expulsion des débris d'usure en dehors de la zone de frottement. La charge appliquée au contact est de 5N avec un frottement alternatif toutes les 8s. Le temps de frottement est de 10 mn.



Figure : 2.1.21 : Tribomètre en configuration pion- plan.

De plus, grâce au tribomètre, nous pouvons avoir une idée qualitative de l'adhérence de la couche sur le substrat. En effet, si lors d'un essai la couche ne résiste pas au frottement et qu'elle se désagrège, ou si des fissures apparaissent ainsi que des arrachements le long de la trace d'usure, c'est qu'elle n'a pas une bonne adhérence.

Calotest

D'autres essais d'usure abrasive ont été réalisés sur Calotest de marque CSEM. Cet appareil permet aussi de déterminer l'épaisseur du film.

Le Calotest est constitué d'une bille d'acier de diamètre $\varnothing = 12.5$ mm, recouverte d'une préparation à base de diamant de granulométrie $1/4 \mu\text{m}$. Elle est mise en rotation sur l'échantillon à l'aide d'un moteur. Ce test permet de réaliser des cratères sur les différents

types d'échantillons qui sont ensuite étudiés à l'aide d'un microscope optique muni d'un logiciel d'acquisition, ou à l'aide du profilomètre optique.

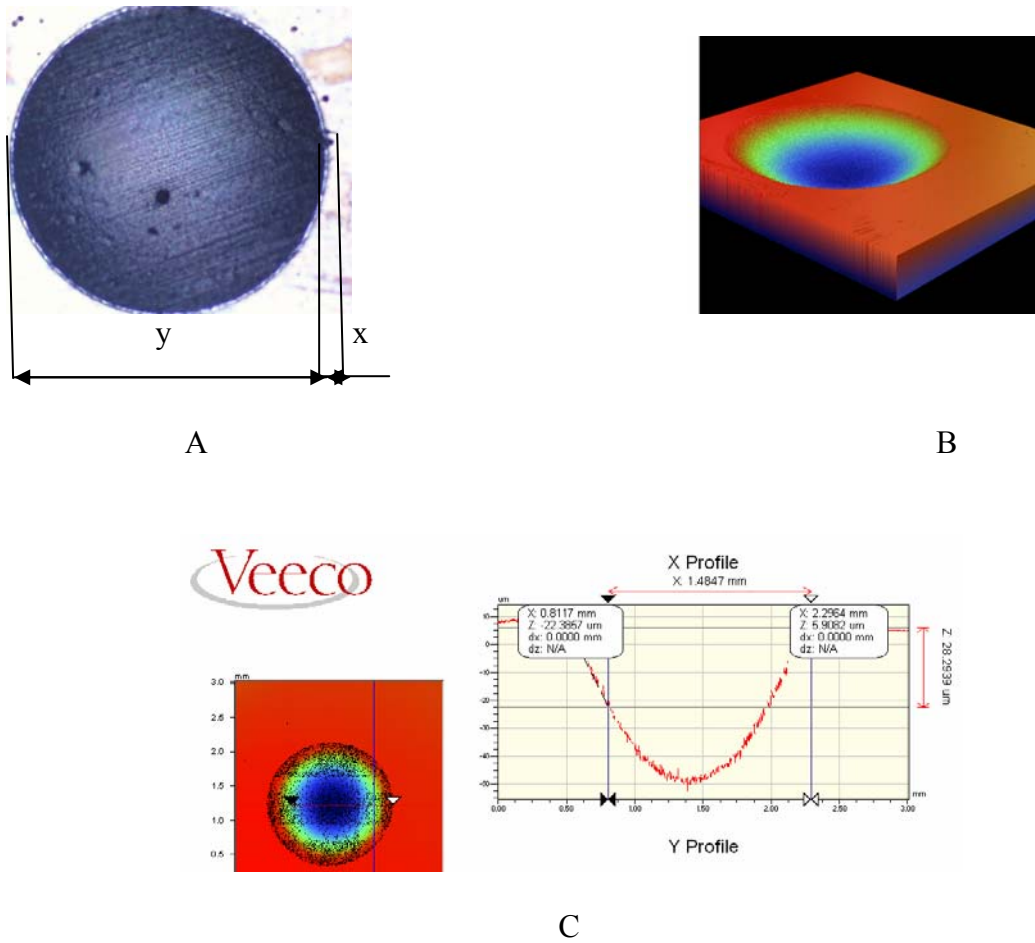


Figure : 2.1.22 : Exemple de cratère obtenu, (a) : vue par microscope optique, (b) : vue par profilomètre optique, (c) exemple de mesure par profilomètre.

En mesurant les paramètres x et y, l'épaisseur de la couche peut être calculée par la formule suivante :

$$t = \frac{xy}{2R} \quad (12)$$

où : R rayon de la bille.

Pour le test d'abrasion, le volume d'usure du film V_c peut être déterminé par la relation suivante :

$$V_c = \frac{x \left(\frac{x+y}{2} \right)^2}{64R} \quad (13)$$

II.6. Essais d'usinabilité

Introduction

Les tests d'usinage réalisés durant notre étude appartiennent aux deux grands secteurs de la coupe du bois : la première et la seconde transformation.

Des tests d'usinage ont été réalisés exclusivement en laboratoire :

- En première transformation, le principal de nos essais a été réalisé par déroulage de MDF, avec une micro dérouleuse instrumentée.

- En seconde transformation nous avons réalisé du défonçage (fraisage de bois sec) sur une défonceuse à commande numérique en utilisant du Pin d'Alep ainsi que du MDF.

II.6.1. Opérations de déroulage

Les conditions de coupe optimales ont été déduites des précédentes recherches de Nouveau [2] et de Labidi [16].

Le déroulage est un procédé de première transformation du bois au cours duquel un billon est mis en rotation devant un couteau faisant toute la longueur de ce billon. Ce couteau est animé d'un mouvement de translation proportionnel à la rotation du bois. Ces mouvements combinés produisent un ruban continu de placage d'épaisseur constante.

Le *déroulage*, tout comme le *sciage*, est l'une des deux grandes technologies de « première transformation » permettant une mise en œuvre aisée du bois en passant d'une géométrie approximative (bois ronds) à des éléments industrialisables (respectivement placages et avivés) [17].

Du fait du caractère anisotrope (orthotrope) du bois que lui confère sa structure, il faut éviter de parler de l'usinage du bois de façon générale. Pour comprendre la nature de la coupe quelle qu'elle soit, il est primordial de connaître la position de l'outil ainsi que sa direction d'avance relative (outil/bois) dans le repère orthogonal du bois (R 'radial', T 'transversal', L 'longitudinal'). En tenant compte de cette position et dans le cas d'une arête de coupe unique, la coupe sera ainsi parfaitement décrite [18], ainsi l'opération de déroulage peut être définie comme un mode d'usinage (0/90). C'est le mode qui exige les plus faibles efforts de coupe : pour un même bois et dans les mêmes conditions d'usinage, l'effort de coupe dans ce mode sera respectivement deux à cinq fois moins important qu'en mode 90/0 ou qu'en mode 90/90 [19]. C'est pourquoi la coupe dans ce mode s'effectue avec un outil de faible angle de bec, compris généralement entre 19 et 23° [17,20], sans risque d'endommagement de l'arête.

Simulation de coupe avec une microdérouleuse instrumentée

Pour le besoin des recherches menées à l'ENSAM de Cluny sur l'usinage du bois, une microdérouleuse instrumentée a été développée (Figure : 2.1.23). Elle permet de faire une simulation de la coupe par déroulage en utilisant des rondelles de bois et des couteaux de faibles dimensions.

Cette machine permet de mesurer les efforts de coupe (X_c , Y_c et par conséquent la résultante F_c), le coefficient de frottement outil/matière et les déplacements du plan de coupe. Un patin de frottement métallique (modifié ou non) vient s'appuyer de manière élastique avec une force normale F_N contre l'éprouvette en bois (disque) tournant à vitesse périphérique constante. Ce patin est fixé sur un capteur piézoélectrique permettant de mesurer la force de frottement F_T et donc le coefficient de frottement. L'acquisition se fait à l'aide d'un logiciel développé sous Labview. Le patin de frottement s'appuyant contre le bois après que sa surface ait été rafraîchie par l'usinage, la surface du bois conserve donc les mêmes

caractéristiques que celles de la surface de contact de la lame lors de l'usinage. L'erreur totale de mesure est de l'ordre de 2% [21].

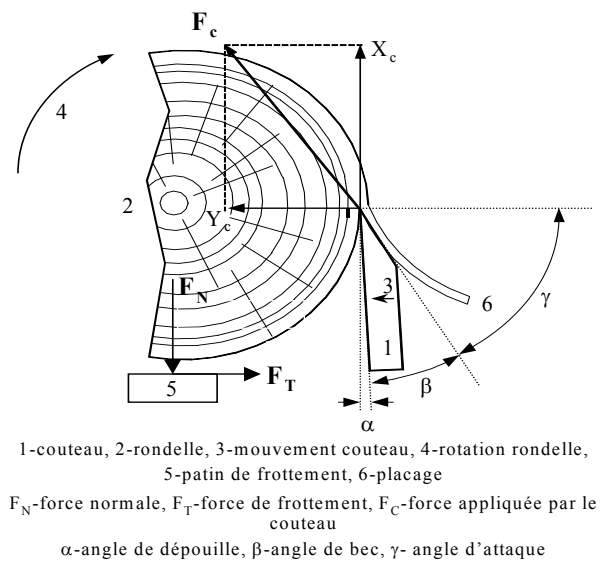
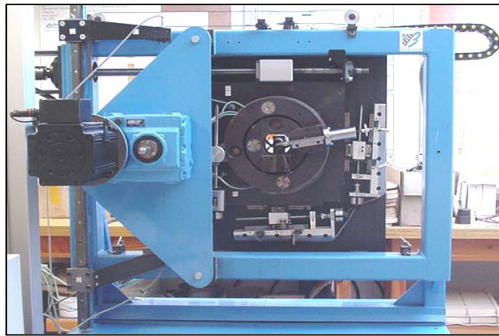
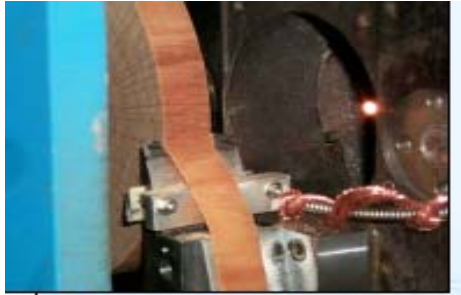


Figure : 2.1.23 : Micro dérouleuse et procédé de déroulage.

Géométrie des outils de coupe

Les outils que nous avons utilisés sont du type ‘monobloc’. La géométrie est représentée sur la figure : 2.1.24. Avant dépôt, tous les outils ont été polis au papier abrasif (SiC, Φ 800). Dans la majorité des cas, le revêtement a été appliqué sur les deux faces de l’outil (face d’attaque et face de dépouille) avec une épaisseur de 1 à 3 μm . Des tests ont été également menés avec des outils revêtus sur une face, généralement la plus sollicitée lors de la coupe (face en contact avec le copeau, « face d’attaque »).

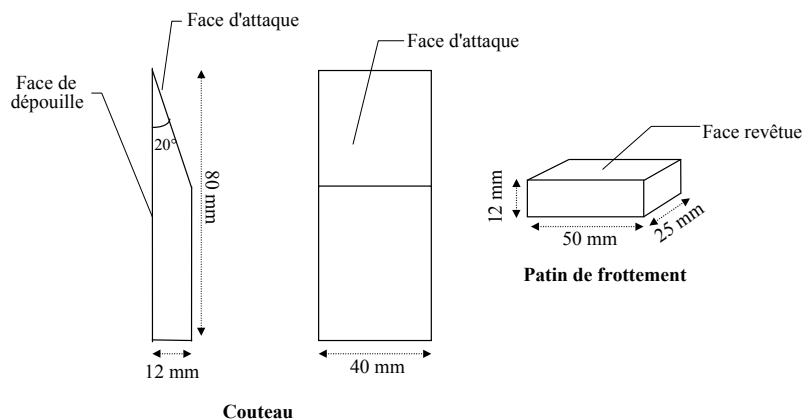


Figure : 2.1.24 : Outils de déroulage et patins de frottements

Matériaux usinés

Afin de réaliser des tests rapides d'usure et de comparer les différentes modifications réalisées sur les outils en acier, des rondelles de MDF (Figure : 2.1.25) ont été utilisées. C'est un dérivé du bois massif (bois fragmenté en panneaux), non déroulable mais très utilisé en seconde transformation. Selon les essences et la provenance des bois, le MDF peut être plus ou moins abrasif (présence de minéraux tels que la silice). Il est à noter qu'il est souvent plus abrasif que le bois massif.

On a aussi utilisé du Pin d'Alep dans le cadre du programme CMEP Tassili, les différents travaux de ce dernier sont résumés en Annexe 1.

Les caractéristiques principales du MDF sont données dans le tableau 2.1.1.



Figure : 2.1.25 : Rondelles de MDF

Tableau 2.1.1 : Caractéristiques techniques du MDF usiné

MDF	Densité (kg/m ³)	Taux d'humidité (%)	Proportion de minéraux (%)
1	760	5,4	1,3

Conditions de coupe

Les conditions de coupe utilisées pour le déroulage du MDF sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 2.1.2 : Paramètres de coupe retenus pour le déroulage du MDF.

	Vitesse linéaire (m/s)	Epaisseur du copeau (1/10 ^{ème} mm)	Angle de dépouille (°)
MDF	0.5	6	3

Mesure de l'usure

En déroulage, le recul d'arête est représentatif de l'usure de l'outil car il traduit une usure globale ayant aussi pour conséquence la modification significative de la cote verticale dans le cas du déroulage avec barre de pression. Cette méthode de quantification de l'usure de l'arête d'un outil tranchant est communément utilisée en usinage bois [22,- 24].

La méthode optique conventionnelle utilisée est représentée sur la figure 2.1.26. Une valeur moyenne est calculée à partir de points de mesure pris tous les 350 μm , la ligne de base étant matérialisée par la partie de l'arête n'étant jamais en contact avec le bois lors de l'usinage.

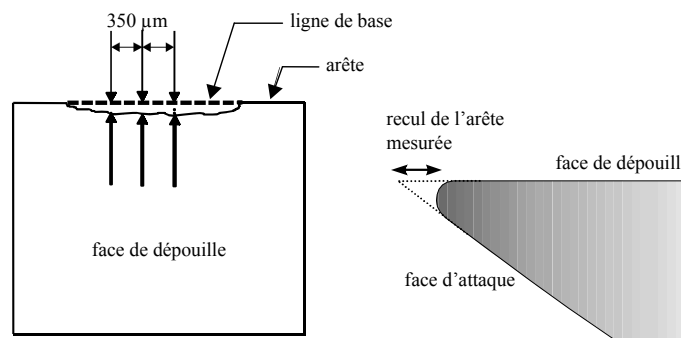


Figure : 2.1.26 : Mesure du recul de l'arête d'un couteau de déroulage

L'observation de l'usure est réalisée à l'aide d'un microscope optique OLYMPUS Vanox-AH2 permettant des grossissements de 20 à 1500 fois. Un capteur numérique monté sur ce microscope permet de visualiser l'usure en parallèle sur un ordinateur. La mesure de l'usure de la lame s'effectue par ordinateur grâce à un logiciel d'acquisition « ANALYSIS » avec une précision de 0,5 μm et pour un grossissement de 590 fois, ce qui donne une erreur de mesure de l'ordre du micron.

II.6.2. Opérations de défonçage

Afin de constater l'apport de la modification de surface des outils de coupe en seconde transformation du bois, nous avons réalisé des tests de défonçage de MDF.

L'équipement utilisé est une défonceuse à commande numérique de type RECORD1 fabriquée par SCM S.p.A. (Société Italienne) (Figure : 2.1.27). Cette défonceuse est une machine à 3 axes, équipée d'un système de commande numérique classique de type NUM1020. L'axe Z portant la broche est réalisé par un système de potence. La table et le bâti de la machine sont en aluminium.



Figure : 2.1.27: Défonceuse 3 axes à commande numérique

Les capacités maximales de la machine sont :

- une vitesse d'avance de 40 m/mn,
- une vitesse de rotation de la broche de 18 000 tr/min.
- déplacement en X : 2135 mm
- déplacement en Y : 985 mm
- déplacement en Z : 250 mm

La puissance maximale de la broche est de 7,5 kW.

Géométrie de l'outil et matériau usiné

L'outil (Figure 2.1.28 a) est une fraise deux dents formée de deux plaquettes carbures de 50 mm et de deux araseurs permettant la finition de la surface usinée. Les plaquettes (Figure : 2.1.28 b) sont en carbure de tungstène fritté avec un angle d'arête de 55° et proviennent de la société LEITZ Corp.

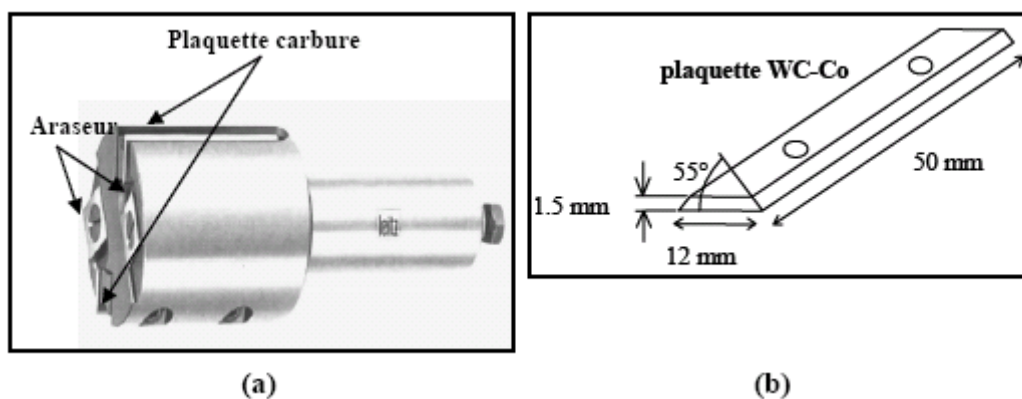


Figure : 2.1.28 : (a) Outil de fraisage (défonçage), (b) géométrie des plaquettes carbures

L'outil est constitué d'un mandrin à pince de précision pour serrage d'outils à queue et d'un porte-outils à dresser / feuillurer à plaquettes réversibles (Figure : 2.1.28a).

Cet outil permet un feuillurage sans éclat grâce aux araseurs et la forme du corps permet un usinage sans trop de vibrations.

L'équilibrage de l'outil à de telles vitesses de rotation est particulièrement important si on ne veut pas créer des dégâts au niveau de la machine.

Conditions de coupe

Les paramètres de coupe ont été fixés de manière à obtenir une usure rapide. Les capacités de la machine sont limitées à une vitesse de rotation de 18 000 tr/min et une vitesse d'avance de 40 m/min. Afin de déterminer à quelle vitesse de rotation et d'avance nous allons travailler, nous avons appliqué la formule de Schlesinger [2] sachant que nous voulions obtenir une épaisseur de copeau moyenne de l'ordre de 0,2 mm.

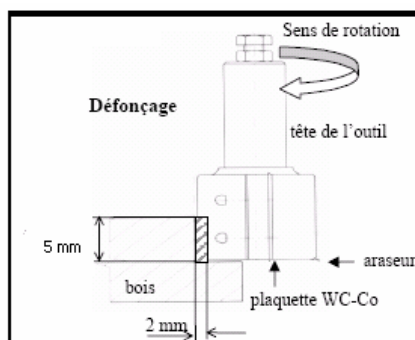
$$e_m = \frac{V_f}{N \cdot z} \sqrt{\frac{a_e}{D}} \quad (14)$$

avec e_m l'épaisseur moyenne du copeau, V_f la vitesse d'avance, N la vitesse de rotation, z le nombre de dents, a_e l'engagement radial et D le diamètre de l'outil.

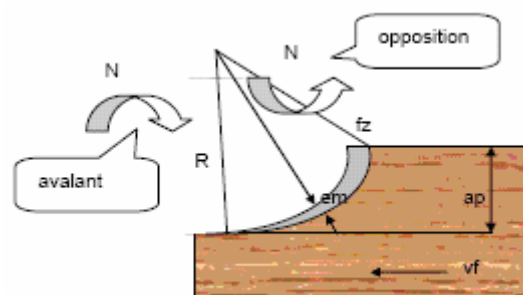
D'après cette relation nous avons donc choisi la vitesse de rotation maximale de 18000 tr/min et une vitesse d'avance de 30 m/min.

La hauteur de coupe est de 5 mm, ce qui permet d'obtenir une partie usée suffisante sans utiliser trop de bois. De même, l'engagement radial n'étant pas le facteur influent le plus prépondérant de l'usure des plaquettes, nous avons choisi une valeur de 2 mm afin de réaliser des tests d'usinage relativement rapides tout en consommant un minimum de bois.

Un programme d'usinage permettant de réaliser le maximum de longueur d'usinage en un temps minimum a été réalisé. Celui-ci a permis de travailler toujours en avalant avec les deux dents de la fraise qui travaillaient (Figures : 2.1.29 a et b).



(a)



(b)

Figure : 2.1.29 : Principe du défonçage

Les conditions de coupe utilisées pour le défonçage de MDF sont résumées dans le tableau 2.1.3.

Tableau 2.1.3 : Paramètres de coupe en défonçage.

	SCM - 3 axes
Diamètre outil (mm)	40
Plaquettes WC-Co : composition	98% WC + 2% Co
Angle d'arête (°)	55
Géométrie (mm)	1,5x12x50
Nombre de dents	2
Vitesse d'avance (m/mn)	30
Vitesse de rotation (trs/mn)	18 000
Engagement radial (mm)	2
Hauteur de coupe (mm)	5
Orientation de coupe (°)	90/0

Mesure de l'usure

L'appareil offrant les meilleures possibilités d'observation de notre outil s'est avéré être un microscope optique OLYMPUS Vanox-T AH-2. L'avantage de cet appareil réside surtout dans sa grande profondeur de champ qui nous a permis d'observer les plaquettes carbure montées sur leur porte-outil, lui-même monté sur un mandrin. Il est en effet important de pouvoir mesurer l'usure des plaquettes sans avoir à les démonter du porte-outil, sans quoi des dispersions au niveau des résultats auraient pu survenir, l'équilibrage des plaquettes n'étant pas reproductible à 100%. On a donc observé l'arête de la plaquette toujours montée sur l'outil parallèlement à sa face d'attaque et l'on mesure ce que l'on peut appeler « le plat » de l'arête qui s'accroît avec l'usure (Figure : 2.1.30).

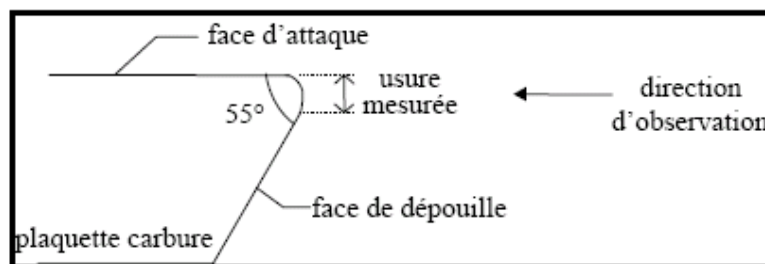


Figure : 2.1.30 : Mesure de l'usure de l'arête des plaquettes carbures.

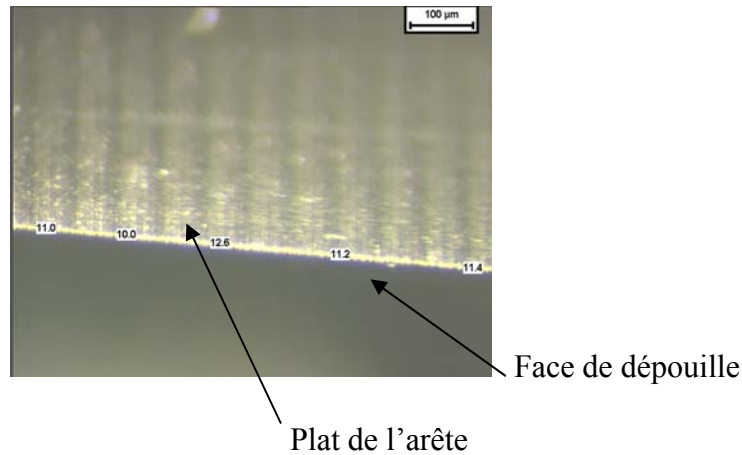


Figure : 2.1.31 : Exemple d'acquisition de mesure de l'usure sur microscope optique OLYMPUS

Le microscope optique est équipé d'une caméra CCD Sony reliée à un ordinateur. Une carte d'acquisition permet le traitement d'images à l'aide du logiciel « ANALYSIS » grâce à des mesures directement effectuées sur les photos prises. Les mesures (environ une cinquantaine) sont réalisées au grossissement maximal ($\times 100$) et sur toute la longueur de la partie usée. La résolution de la caméra ainsi que celle de l'écran de l'ordinateur nous permettent d'avoir une précision de $2\text{ }\mu\text{m}$ au plus fort grossissement.

III. Analyse de la qualité des surfaces usinées

Des tests de qualité de surfaces usinées en prenant en compte la rugosité des surfaces déroulées, ainsi que l'état de surface des arêtes de coupe sont réalisés grâce à un profilomètre optique par interférométrie Wyko NT-1100 de VEECO (Figure : 2.1.32). il possède deux modes de mesure *Vertical scanning interferometry* (VSI) et *Phase shifting interferometry* (PSI).

Le mode PSI est fiable pour les surfaces lisses dans lesquelles le changement de la hauteur entre deux points adjacents est approximativement de 160nm pour une longueur d'onde de la mesure nominale de 640nm . Le mode VSI est plus recommandé pour les surfaces rugueuses. Cet appareil nous permet entre autre de mesurer les épaisseurs des films, ainsi que les contraintes grâce à son option « stitching », il nous permettra de mesurer les rayons de courbure générés par les contraintes sur toute la surface du substrat.



Figure : 2.1.32 : Profilomètre optique Wyko

IV. Conclusion

Dans ce chapitre un bilan des différents équipements employés, des différentes techniques d'élaboration et de caractérisation des couches minces, des opérations d'usinage et de caractérisation de l'usure ou de la qualité des surfaces usinées a été fait. Les équipements utilisés sont en majorité implantés au LaBoMaP de l'ENSAM de Cluny. Le chapitre suivant relate les résultats obtenus lors de mes travaux de thèse ainsi que leur exploitation.

IV. Références bibliographiques

- [1] Kern W., Puo-Tinen D.A., RCA rev. 31, 1970, pp. 187- 192.
- [2] Nouveau C., Etude de revêtements durs (CR_xN_y) obtenus par méthodes P.V.D. : réalisation et caractérisations. Applications a l'usinage du bois. Thèse de doctorat ENSAM de Cluny, n°21-2001
- [3] Maurice F., Meny L., Tixier R., Microanalyse et Microscopie Électronique à Balayage, Les Éditions de Physique d'Orsay-Paris, ISBN 2- 902731-03-5, 1978, pp. 156-167.
- [4] Yoshitake M., Thanana A., Aizawaki T., Yoshihara A., Micro-XPS analysis of slide-tested TiN films with/without Cl⁺ implantation surface and interface analysis, Surface and coatings Technology, 34, 2002, pp. 698-702.
- [5] Kocker G.M., Gross T., Santner E., Influence of testing parameters on the tribological behaviour of self-mated PVD coatings, Wear 179, 1994, pp . 5-10.
- [6] Cleymand F., Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 1992.
- [7] Huq M.Z., Cels J.P., Meneve J., Stals L., Schryvers D., Oscillating sliding wear of mono- and multilayer ceramic coating in air, Surface and coatings Technology 113, 1999, pp. 242-250.
- [8] Oettel H., Wiedermann R., Residual stresses in PVD hard coatings, Surface and coatings Technology 76-77 ,1995, pp. 265-273.
- [9] Bull S.J., Jones A.M., Mc Cabe A.R., Residual stress in ion-assisted coatings, Surface and coatings Technology 54-55, 1992, pp. 173-179.
- [10] Oden M., Almer J., Hakansson G., The effect of bias voltage and annealing on the microstructure and residual stress of re-evaporated Cr-N coatings, Surface and coatings Technology 120-121, 1999, pp. 272-276.
- [11] Mikarimi P B., Appli Phsic Letter 21, 1966, pp. 2813- 2820.
- [12] Hutchinson J W., SUO Z., Adv. Appl. Mech 29, 1992, pp. 63-69.
- [13] Stoney G.G., Proc. R. Soc. (London) A82, 1909, pp. 172-179.
- [14] Oliver W.C., Pharr G.M., Journal of Materials Research 7(6), 1992, pp. 1564-1571.
- [15] Colombie C., Thèse de doctorat, École centrale de Lyon, 1986.
- [16] Labidi C, Amélioration de la durée de service d'outils d'usinage du bois par traitements de surface et préparation de l'arête de coupe, Thèse de doctorat, ENSAM Cluny n°582007.2007.
- [17] Decès-Petit C., Etude des phases transitoires au cours du déroulage de bois, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Cluny, 1996.
- [18] Thibaut B., Thèse de Doctorat d'État mention Sciences, Université Montpellier II, 1988.
- [19] Marchal R., Thèse de Doctorat Sciences du Bois, INPL, 1989.
- [20] Butaud J.-C., Mémoire d'Ingénieur CNAM en mécanique industrielle, ENSAM, 1994.
- [21] Beer P, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Cluny et Université d'Agriculture Varsovie, 1998.
- [22] Aratake S., Mokuzai Gakkaishi 39(4), 1993, pp. 389-395.
- [23] Morita T., Banshoya K., Tsutsumoto T., Murase Y., Forest Products Journal 48(5),1998, pp. 43-50.
- [24] Warren S., Forest Products Journal 39(5), 1989, pp. 37-38.

Expérimentation

Partie 2 : chapitre 2

Résultats et interprétations

Introduction

L'application des films binaires dans différents domaines (usinage des matériaux durs, électronique, optique, décoration...) a donné des résultats importants. Des études récentes ont montré que l'addition d'un deuxième élément au système binaire améliore considérablement ses propriétés stoechiométriques, structurales, mécaniques et tribologiques. Il a été noté que l'ajout de l'aluminium au TiN ou CrN transforme en mieux les propriétés intrinsèques de ces deux systèmes [1,2].

Les nitrures des métaux de transition tels que TiN ont été largement utilisés comme revêtement durs pour la protection des outils de coupe afin d'améliorer leur tenue en service [3,4]. Cependant, l'inconvénient principal de TiN est sa faible résistance à l'oxydation à haute température ($\approx 700\text{ }^{\circ}\text{C}$). Par l'addition d'éléments tel que l'aluminium [5,6], sa tenue à l'oxydation à haute température a été améliorée. Pour cette raison, TiAlN a été développé comme alternative à TiN. TiAlN présente une haute résistance à l'oxydation ($\approx 900\text{ }^{\circ}\text{C}$) et une haute dureté ($\approx 30\text{ GPa}$) [7]. Le CrN quand à lui a également été utilisé comme revêtement dur pour la protection d'outils de coupe [8,9]. Parmi les nombreux avantages qu'offre CrN on note : de faibles contraintes internes permettant d'élaborer, sur une gamme très étendue de substrats, des films pouvant atteindre $40\text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur [10]. De plus CrN 'optimisé' possède non seulement un faible coefficient de frottement, une haute résistance à la corrosion et à l'usure mais également une haute ténacité [11].

Cependant, ses applications en films minces sont limitées par sa faible adhérence sur la majorité des substrats. En effet, de nombreuses études ont révélé qu'au-delà de 200 nm d'épaisseur, le film se délamine automatiquement de son substrat [12]. Des travaux ont été menés afin d'améliorer son adhérence par le chauffage du substrat [12,13] ou par la réalisation de sous-couches entre le substrat et le film [14,15].

Dans cette étude, nous avons réalisé des dépôts de CrAlN avec différents pourcentages d'aluminium afin d'étudier l'effet de ce dernier sur les propriétés structurales, mécaniques et tribologiques des couches obtenues. Des essais d'usinage de MDF ont été réalisés en utilisant des outils carbures revêtus sur deux faces afin d'étudier l'effet de l'addition de l'aluminium dans les couches de CrN sur leur résistance à l'usure.

Des films de CrSiN développés par l'institut FEMTO/ST de Besançon, ainsi que des couches de TiAlN obtenues industriellement ont été testés en défonçage de MDF. Enfin, nous avons étudié le comportement à l'usure d'outils de coupe traités par nitruration ionique ou revêtus lors du déroulage de MDF.

Les films de CrAlN ont été réalisés par pulvérisation dual magnétron en utilisant deux cibles, l'une de chrome pur et la deuxième d'aluminium pur. On a d'abord fixé la tension appliquée à la cible de chrome à -900 V et on a fait varier celle appliquée à la cible d'aluminium de 0 jusqu'à -900 V (tension maximale pouvant être atteinte).

I. Dépôts de films de CrAlN par pulvérisation dual magnétron

Il est bien connu que les propriétés des revêtements obtenus par des méthodes de dépôts PVD dépendent fortement des paramètres du procédé employé. Les revêtements CrAlN ne font pas exception à cette règle. En effet, les propriétés de ce revêtement dépendent de la concentration molaire en Al [16,17], de la polarisation des substrats, de la proportion d'azote dans le mélange gazeux [18]... Dans le cadre de ce travail de thèse, nous nous sommes basés sur des

études antérieures dans lesquelles le pourcentage d'azote dans le milieu gazeux avait été optimisé [19]. Les conditions de dépôts sont données dans le tableau 2.2.1.

Nous avons réalisé des caractérisations physico-chimiques et mécaniques dans le but d'optimiser les revêtements, puis des tests de fraisage.

Tableau.2.2.1. Conditions de dépôts des couches de CrAlN

Films	Pression de travail (μbar)	Pourcentage d'azote (%)	Tension appliquée à la cible de Cr (-V)	Tension appliquée à la cible d'Al (-V)	Temps de dépôt (mn)
CrN	4	20	900	0	90
CrAlN				300	
				500	
				700	
			900		
				500	
700					

Les films ont été déposés sous un plasma constitué de 80% d'argon et 20% d'azote. Les conditions choisies sont les conditions optimales obtenues lors d'une étude précédente [20] et nous permettent d'avoir des films CrN stoechiométriques ($N/Cr = 1$) en utilisant le bâti de pulvérisation dual magnétron de notre laboratoire.

I.1. Propriétés physico-chimiques

I.1.1. Analyses chimiques par EDS

Les spectres obtenus après analyse par EDS des échantillons sont résumés sur la figure.2.II.1. Ils montrent clairement la présence des éléments Cr, N et Al. En effet, on observe la raie K_{α} de l'azote à 0,392 keV, les raies $L_{\alpha1,2}$ du chrome à 0,572 keV, L_1 à 0.500 eV et la raie $K_{\alpha1}$ de l'aluminium à 1,486 keV.

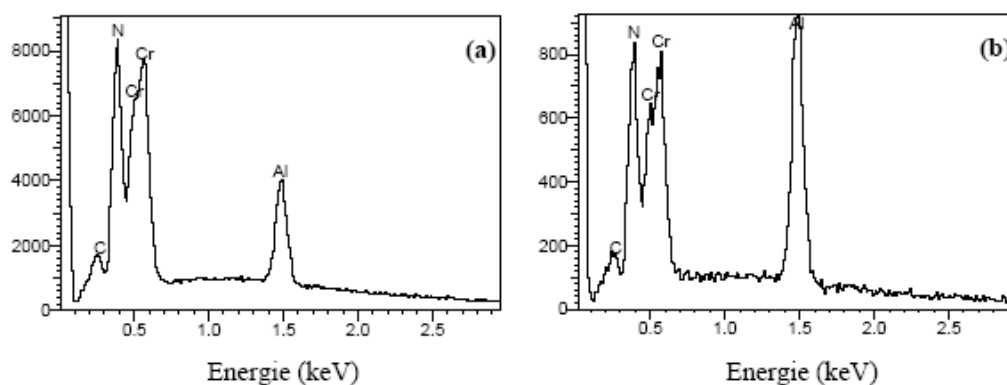


Figure : 2. 2.1 : Spectres EDS des films CrAlN déposés sous différentes tensions appliquées à la cible d'aluminium : (a) -500V et (b) -900V

Afin de bien visualiser l'effet de la tension appliquée à la cible d'aluminium sur la composition des films de CrAlN, nous avons réalisé des analyses EDS sur tous les échantillons de la série (Figure : 2. 2.2).

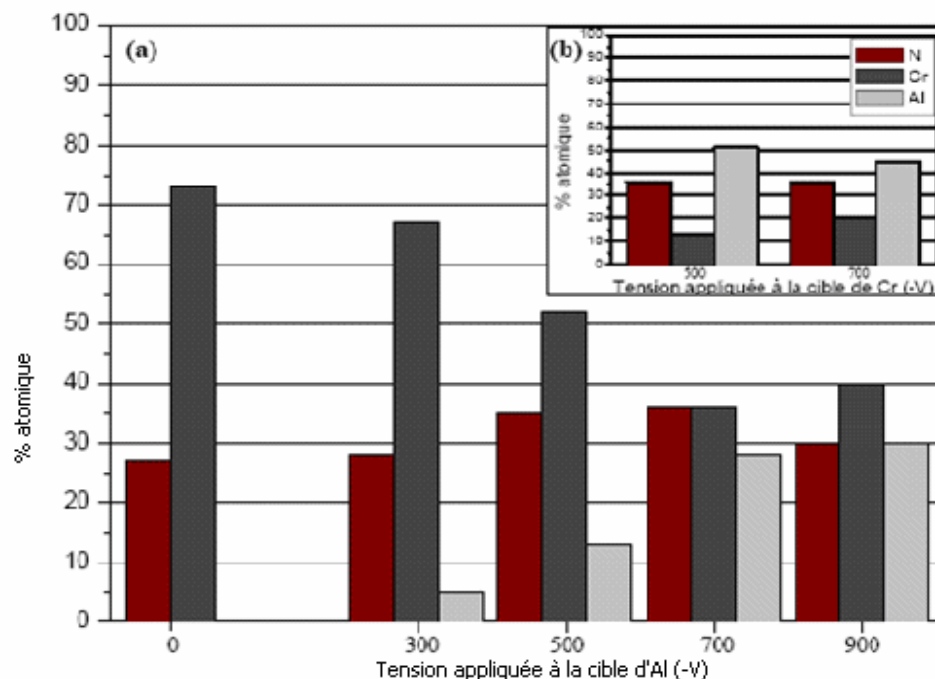


Figure : 2.2.2 : Pourcentage atomique des différents éléments en fonction de la tension appliquée à la cible : (a) d'aluminium, (b) de chrome.

D'après la figure 2.2.2-a, l'analyse EDS du film de CrN donne un rapport atomique N/Cr de 0.4, ce qui indique que la couche déposée n'est pas stoechiométrique. Avant de commencer la série de dépôts de CrAlN, nous avons voulu vérifier les conditions de dépôt de CrN afin d'avoir des couches stoechiométriques. Ces conditions ont été obtenues au cours de travaux antérieurs [19]. Néanmoins, à cause d'une modification effectuée à l'intérieur de l'enceinte du bâti magnétron (passage d'une cible en deux cibles confocales), ces conditions ne sont plus optimales, ce qui explique le rapport atomique N/Cr obtenu.

De plus, on constate que le pourcentage d'Al augmente en fonction de la puissance appliquée à la cible d'Al. En effet, on augmente alors le nombre et l'énergie des ions argon arrivant sur celle-ci et par conséquent on augmente la vitesse de pulvérisation de la cible et la proportion d'Al dans le plasma ainsi que dans les couches déposées. Lorsque la tension appliquée passe de -700 à -900V, on observe une légère augmentation du pourcentage d'Al (on passe de 28 à 30%) et il est à noter que le % d'Al est toujours inférieur à celui de Cr. Ceci s'explique, selon Ding *et al.* [21], par le fait que pour une même tension appliquée aux deux cibles, le chrome a un plus grand taux de pulvérisation que l'aluminium ce qui explique d'une part pourquoi on a toujours plus de Cr que d'Al dans les couches mais aussi l'augmentation du chrome par rapport à l'aluminium à -900V.

On note aussi la légère augmentation en pourcentage d'azote dans les films de CrAlN (on passe de 28 à 36%) ce qui montre que l'ajout de l'aluminium favorise la stoechiométrie des films de CrN.

Pour cette série de dépôts de CrAlN, le pourcentage maximal d'Al dans les films est de 30% et correspond à la tension maximale (-900V) atteinte par notre générateur R.F. Afin de compléter cette campagne d'essais, nous avons décidé de maintenir la tension de l'aluminium à -900V et de faire varier la tension de la cible de chrome. Deux dépôts ont été réalisés (à -500V et à -700V). La figure 2.2.2-b, montre la variation des pourcentages atomiques des éléments en fonction de la tension appliquée à la cible de chrome. On a obtenu des films avec un pourcentage d'Al supérieur à celui du chrome pour les deux tensions. En effet, on a atteint une valeur de 50% en Al alors qu'avec -900V sur les deux cibles, on atteint au maximum 30%. On constate aussi que le pourcentage d'azote dans les films est du même ordre que celui dans les films déposés en faisant varier la tension appliquée à la cible d'Al.

Au début de notre étude, nous avons d'abord fait varier la tension sur la cible d'aluminium pensant qu'elle influencerait plus sur son pourcentage atomique dans les couches ; mais suite aux résultats obtenus, il s'avère que c'est la variation de la tension sur la cible de chrome qui est le paramètre prépondérant ceci peut être expliqué par le fait que le taux de pulvérisation du chrome est supérieur à celui de l'aluminium.

I.1.2. Variation de l'épaisseur des couches de CrAlN

L'épaisseur des films de CrAlN a été mesurée par microscope électronique à balayage en faisant des observations en coupes transverses sur des échantillons clivés (Fig.2.2.3).

La figure. 2.2.3, montre la variation de l'épaisseur des films CrAlN en fonction de la tension appliquée à la cible d'Al.

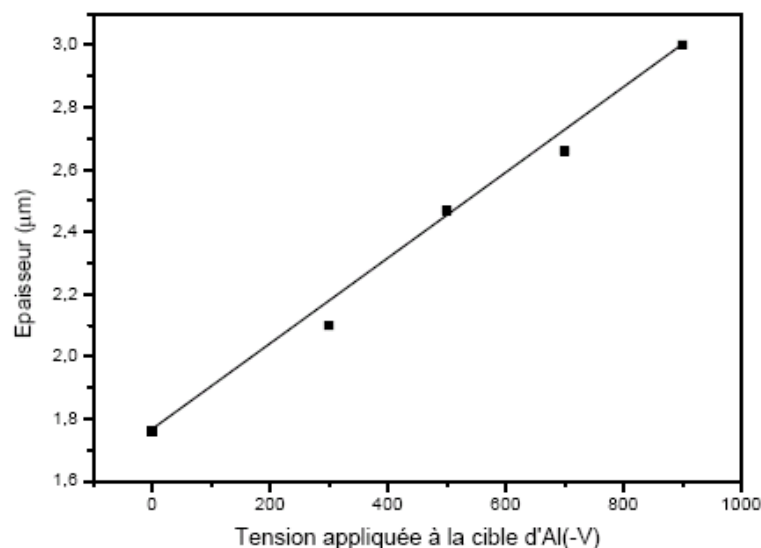


Figure : 2. 2.3 : Variation de l'épaisseur des films CrAlN en fonction de la tension appliquée à la cible d'Al.

On constate que l'épaisseur des films CrAlN augmente linéairement avec la tension appliquée à la cible d'Al. En effet on passe d'une vitesse de dépôt de 20 nm/mn pour les films de CrN (0V) à une vitesse de 33nm/mn pour les films déposés à -900V. On peut expliquer cet effet par l'augmentation de la vitesse de pulvérisation de la cible d'Al et par conséquent de la vitesse de dépôt en fonction de la tension appliquée.

I.1.3. Analyses structurales par DRX

La figure 2.2.4, présente les diffractogrammes des films de CrAlN déposés avec différents pourcentages d'Al. Un large pic a été observé sur le spectre DRX du film de CrN, ce qui montre que la couche déposée est quasiment amorphe. En ajoutant de l'Al, le pic CrN(200) apparaît et devient de plus en plus étroit, ce qui montre que l'addition de l'Al améliore la cristallisation des films de CrN. Le même résultat a été obtenu par X. Ding *et al.* [21]. Il est important de noter l'apparition du pic (111) de CrN bien défini à 13% d'Al et moins bien détectable à 28%, et comme l'analyse EDS de ces films de CrAlN montre qu'en ces points le rapport N/Cr est le plus faible, alors on estime que ces films sont constitués de nanocristaux de CrN/AlN. on note aussi l'apparition de pics d'AlN (311) pour les films à 13,28 et 45% d'Al.

De plus, on observe une translation du pic CrN(200) vers les grands angles, ce qui montre que les films de CrAlN contiennent des contraintes en compression, résultats déjà observés dans d'autres études [22].

Il est important de noter que la morphologie des films CrAlN déposés en faisant varier la tension appliquée à la cible de chrome (Figure 2.2.5) montre que l'augmentation en pourcentage d'Al favorise la cristallisation des couches comme vu précédemment. En effet la structure colonnaire apparaît très nettement pour un pourcentage de 45% en Al. Cette structure devient ensuite amorphe à 51% d'Al.

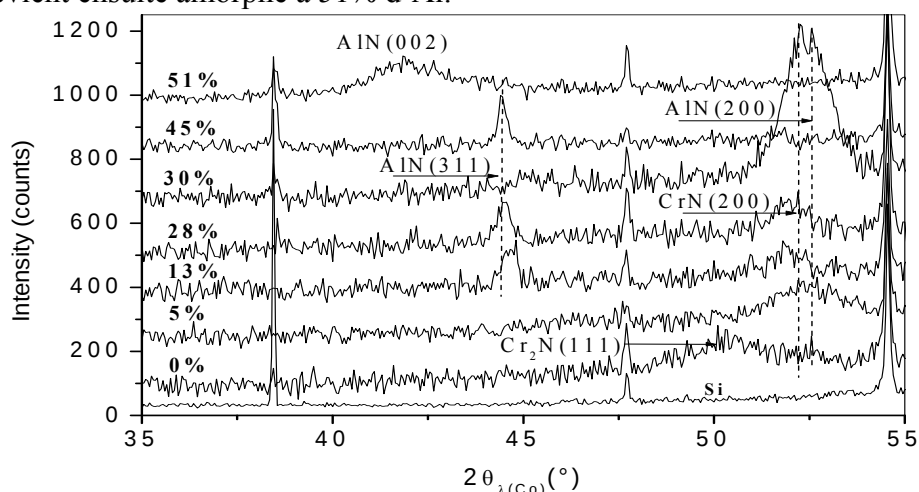


Figure : 2.2.4 : Diffractogrammes des films de CrAlN déposés avec différents pourcentages d'Al.

I.1.3. Morphologie des couches

L'observation de la morphologie des couches a été réalisée au MEB sur des échantillons de Si revêtus puis clivés grâce à une pointe diamant. La figure 2.2.5, montre les structures obtenues. On observe clairement que le film de CrN est dense et amorphe, alors qu'en ajoutant de l'Al, les films présentent une structure dense et colonnaire.

Cette structure est clairement visible pour un pourcentage de 13 et 28% d'Al. D'après l'analyse DRX, on avait noté l'apparition de l'orientation CrN (111) pour ces films, alors on peut dire que cette morphologie est due à la formation des nanocristaux CrN/AlN.

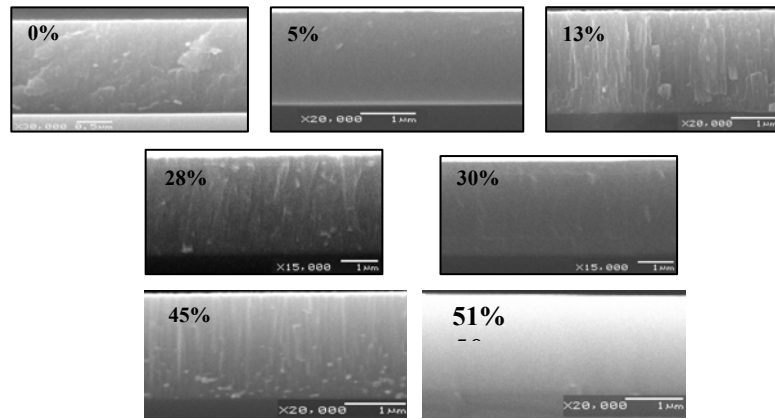


Figure : 2. 2.5 : Morphologie des films de CrAlN déposés en faisant varier la tension appliquée à la cible d'aluminium.

L'observation de la morphologie des couches a été réalisée grâce au MEB sur substrat de silicium. La figure. 2.2.5, montre clairement que la structure du film CrN est dense et amorphe. En ajoutant de l'Al, les films ont une structure dense et colonnaire clairement visible pour 13, 28 et 45 % d'Al.

D'après l'analyse XRD, nous notons l'apparition d'AlN (311), nous pouvons donc expliquer cette morphologie par la formation de la phase AlN. Il est aussi important de noter le changement morphologique de films CrAlN déposés avec 30% d'Al, en effet, on remarque la disparition d'AlN (311) à cette valeur et la présence du CrN (200) et AlN (200). La morphologie des films de CrAlN déposés avec 51% d'Al montre une structure amorphe qui est en corrélation avec l'analyse DRX de ces couches.

I.2. Propriétés mécaniques

I.2.1. Contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles des couches de CrAlN ont été calculées par la méthode des anneaux de Newton.

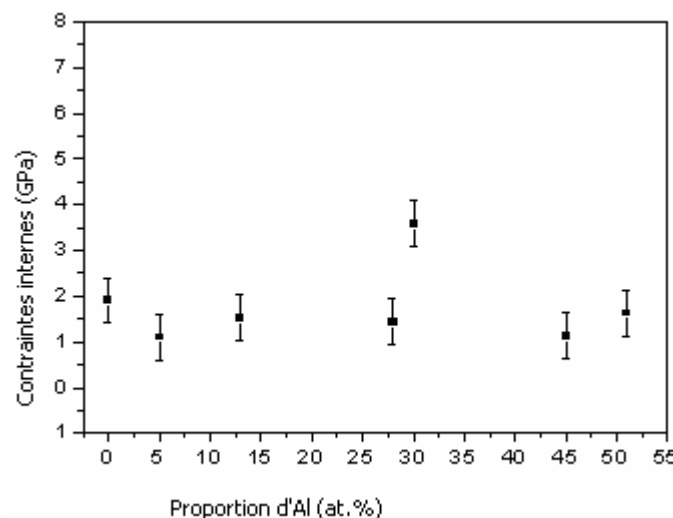


Figure : 2. 2.6 : Contraintes résiduelles en fonction de la proportion d'Al dans les films de CrAlN.

On observe des contraintes compressives qui varient de -1,1 à -3,6 GPa (Figure 2.2.6) et qui ont déjà été obtenues lors d'études antérieures [23]. La contrainte résiduelle des couches de CrN est de l'ordre de -2 GPa, elle décroît avec l'augmentation du pourcentage d'aluminium puis se stabilise. Après l'observation des coupes transverses au MEB, nous pouvons expliquer ce résultat par la formation d'une structure colonnaire qui est moins dense et donc moins contrainte que les structures amorphes. Une augmentation du pourcentage d'aluminium jusqu'à 30% tend à augmenter la contrainte résiduelle à -3,6 GPa. On peut supposer ici que cela est dû à la substitution des atomes de chrome par l'aluminium qui a un rayon atomique plus petit et est donc responsable de l'augmentation des contraintes compressives dans les couches (diminution du paramètre de maille).

I.2.2. Dureté

La figure 2.2.7 montre la dureté et le module d'Young des couches de CrAlN en fonction du pourcentage d'aluminium. Ils présentent une courbe similaire à celle des contraintes résiduelles comme cela a déjà été observé par Reiter *et al* [24]. Tous les films de CrAlN montrent une forte dureté et un module d'Young important, qui varie respectivement de 23 à 36 GPa et de 380 à 460 GPa. Des valeurs similaires ont déjà été obtenues [23]. De plus, celles-ci sont supérieures aux valeurs obtenues avec une seule cible (CrAl 50/50% atomique) [25]. Pour 30% d'aluminium dans les couches, on obtient les valeurs maximales de dureté et de module d'Young.

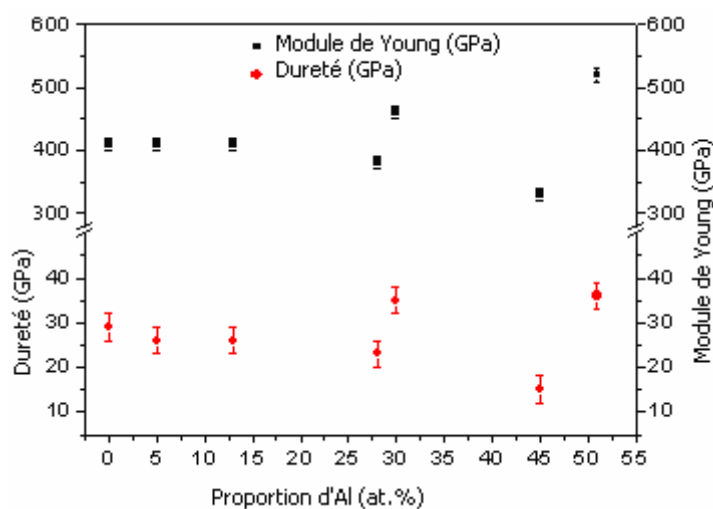


Figure : 2.2.7 : Dureté et module d'Young en fonction de la proportion d'Al dans les films de CrAlN.

On note aussi, que la dureté des films déposés avec 45 et 51% d'Al (en faisant varier la tension sur le Cr) est respectivement de l'ordre de 15,8 et 36,4 GPa, et le module d'Young de l'ordre de 331,4 et 520 GPa. Ces valeurs sont élevées et montrent bien l'effet de l'ajout de l'Al sur les propriétés mécaniques du système binaire CrN. Des résultats similaires ont été obtenus par Hones *et al* [25].

Les valeurs maximales de dureté et du module d'Young sont observées à 30 et 51 % d'aluminium respectivement, qui se révèlent être les pourcentages qui ont donné les valeurs maximales des contraintes internes, cela se traduit par la formation des composés de CrN / AlN et de AlN.

I.2.3. Coefficient de frottement

Seules les couches obtenues en faisant varier la tension sur la cible d'aluminium ont été testées.

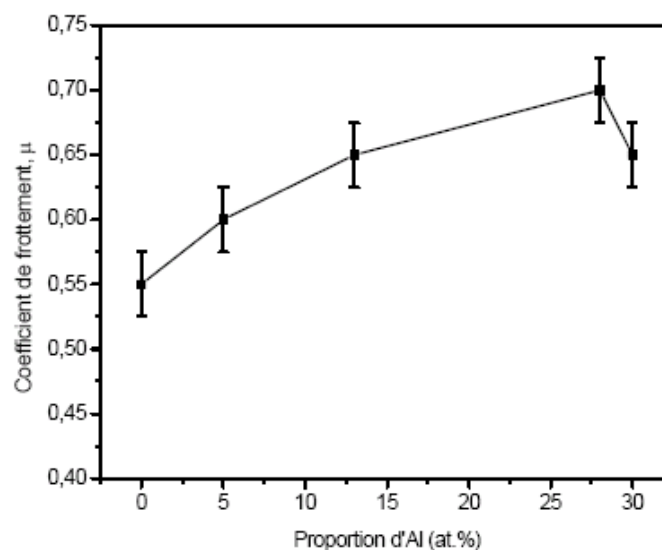


Figure : 2.2.8 : Coefficient de frottement μ en fonction du pourcentage d'aluminium contenu dans les dépôts.

Selon les résultats de la figure 2.2.8, le coefficient de frottement varie entre 0,55 et 0,7 comme cela a déjà été observé [26]. Le coefficient de frottement augmente avec le taux d'aluminium. Or, à -900V sur les deux cibles, on note que le coefficient de frottement diminue. Il se trouve que le taux de chrome dans la couche est alors supérieur à celui de la couche obtenue à -700V pour un même pourcentage d'aluminium. Comme le nitrure d'aluminium a un coefficient de frottement plus grand que celui du nitrure de chrome [27], alors avec l'augmentation en pourcentage d'aluminium on augmente le taux d'AlN dans les films de CrAlN et par conséquent on augmente le coefficient de frottement. A -900V, le coefficient de frottement diminue de 0,7 à 0,65, en effet à cette tension, le pourcentage de chrome augmente un peu par rapport à celui de l'aluminium ce qui explique cette diminution. La morphologie des surfaces après des tests de frottement a été observée par microscope optique (Figure 2.2.9). On observe que la bille est scratchée à la surface des films (sauf celui de 30% d'Al), ce qui montre les grandes valeurs du coefficient de frottement des films et leur bonne dureté.

On observe aussi l'augmentation de volume de l'usure de la bille avec le pourcentage d'Al ce qui est en corrélation avec la variation du coefficient de frottement obtenu sur la courbe précédente. En plus, aucune trace n'a été observée sur l'échantillon de 30% d'Al ce qui montre la diminution du coefficient de frottement à ce pourcentage.

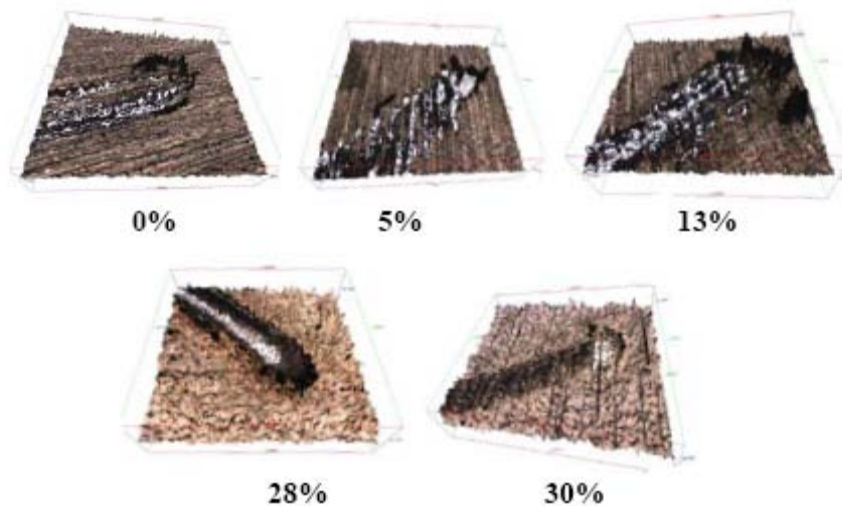


Figure : 2.2.9 : Morphologie des surfaces après tests de pion disque.

I.2.4. Essais sur Calotest sur les revêtements CrAlN

Des mesures sur "Calotest" des différents revêtements de CrAlN ont donné des résultats (figure : 2.2.10), qui vérifient et confirment ceux obtenus au niveau des tests de dureté (figure : 2.2.7). On remarque, que la valeur d'usure abrasive du film CrN est le plus réduit, par contre celui de CrAlN à 30% possède la valeur la plus grande. ce qui nous laisse supposer que l'ajout d'Al n'améliore pas forcément la tenue à l'usure abrasive des films de CrN.

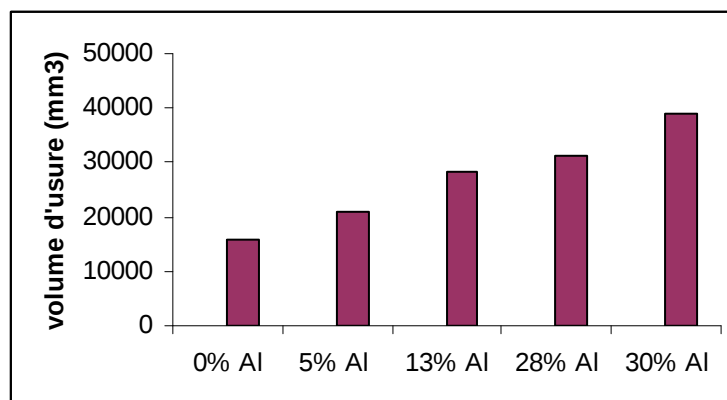


Figure : 2.2.10 : Volume d'usure sur Calotest des revêtements de CrAlN

I.3. Etude de la stabilité thermique

I.3.1. Analyses structurales par DRX

- Avant recuit

La figure 2.2.11 présente les diffractogrammes des films CrAlN déposés sur acier de nuance 90 CrMoV8 avec différents pourcentages d'Al avant recuit. On constate que tous les films déposés en faisant varier la tension appliquée à la cible d'Al montrent une structure amorphe, aucun pic n'a été observé. Par contre les films CrAlN déposés en faisant varier la tension

appliquée à la cible de chrome présentent deux orientations différentes. La première de (101) de nitrure d'aluminium hexagonal à $44,32^\circ$ pour les films de 45% en pourcentage d'Al, la deuxième de (002) de nitrure d'aluminium hexagonal à $42,10^\circ$.

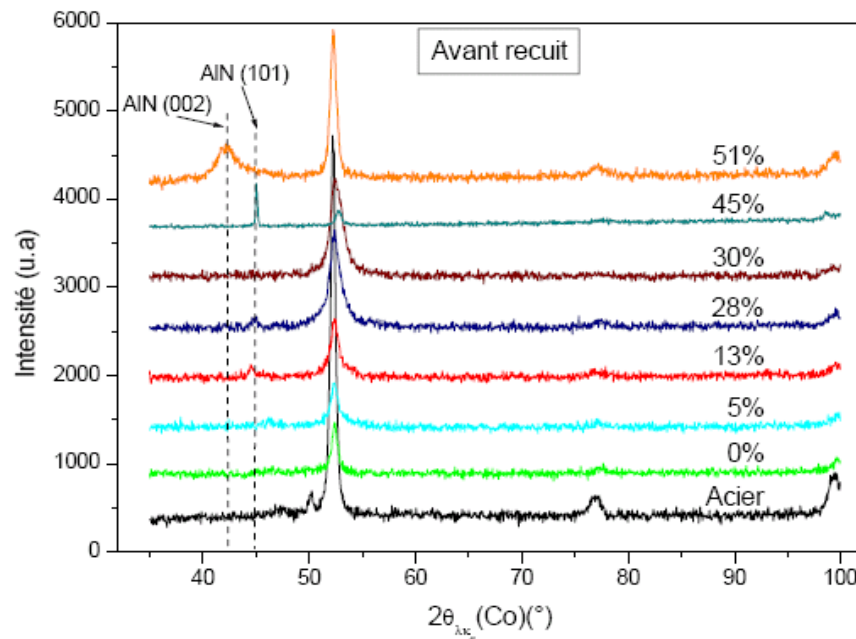


Figure : 2.2.11: Diffractogrammes des films CrAlN déposés sur acier avec différents pourcentages d'Al avant recuit.

- Après recuit à 600°C

Après recuit à 600°C , aucun pic d'oxyde n'a été détecté comme le montre la figure 2.2.12. En plus il est important de noter l'apparition des pics (200) de CrN et (111) de Cr_2N pour les films ayant un pourcentage inférieur ou égal à 30% d'Al, ainsi que l'orientation (202) de AlN pour ceux ayant un pourcentage de 45% en Al, ce qui montre que les films sont mieux cristallisés.

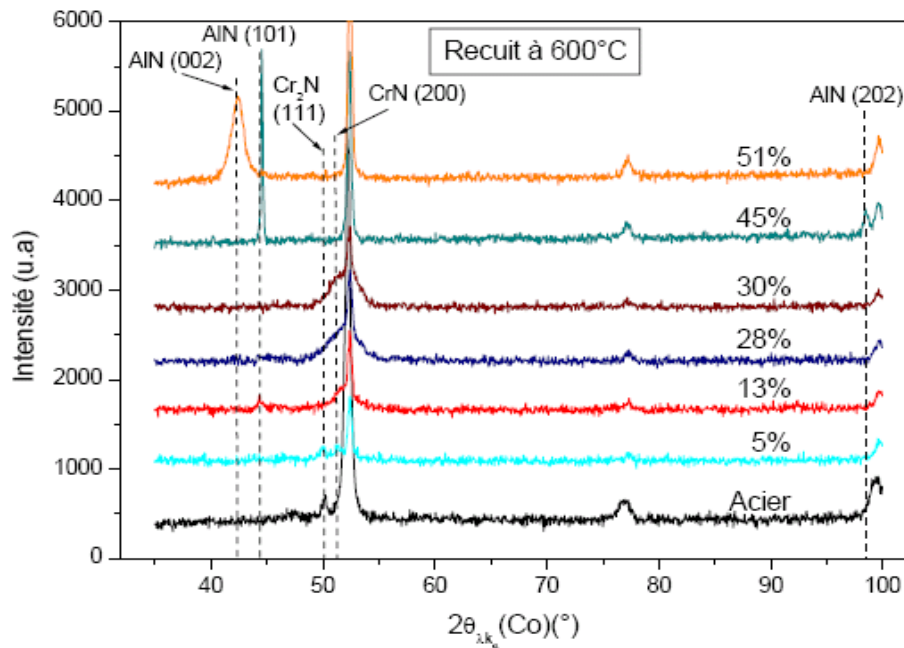


Figure : 2.2.12: Diffractogrammes des films CrAlN déposés sur acier avec différents pourcentages d'Al et recuits à 600°C.

- Après recuit à 800°C

A 800°C (Figure 2.2.13), les films montrent une grande stabilité thermique et aucune trace d'oxyde n'a été observée. Les pics de CrN (200) et Cr₂N (111) deviennent de plus en plus étroits et bien définis. En plus, on note l'apparition du pic (111) de CrN. Les films CrAlN déposés en faisant varier la tension appliquée à la cible d'Al montrent une grande stabilité thermique qui reste inchangée par l'effet de l'augmentation de la température.

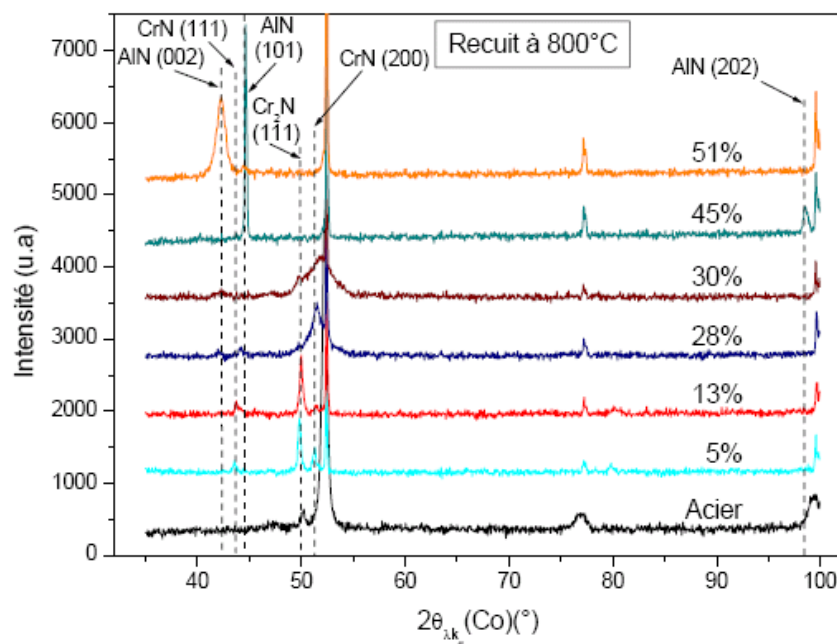


Figure : 2.2.13 : Diffractogrammes des films CrAlN déposés sur acier avec différents pourcentages d'Al et recuits à 800°C.

- Après recuit à 1000°C

A 1000°C (Figure 2.2.14), on constate la disparition complète de la phase CrN contrairement à la phase Cr₂N qui apparaît mais avec des intensités plus faibles qu'à 800 et 600°C. A cette température les pics de (202) et (110) d'oxyde de chrome Cr₂O₃ apparaissent à 51,80° et à 42,28° respectivement, ce qui montre que l'oxydation est importante. Par contre ces deux pics ne sont pas présents pour les films ayant 45 et 51% d'Al. En effet les deux pics d'AlN (101) pour les films CrAlN avec 45% en aluminium ainsi que celui de d'AlN (002) pour ceux avec 51% d'Al sont toujours présents, ce qui montre la grande stabilité thermique de ces films.

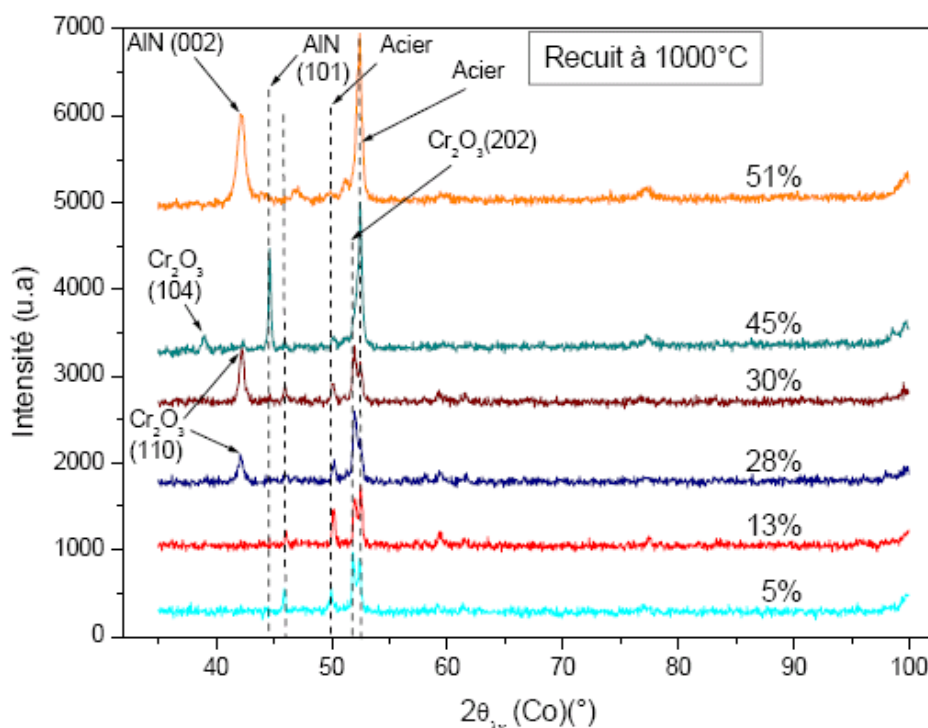


Figure : 2.2.14: Diffractogrammes des films CrAlN déposés sur acier avec différents pourcentages d'Al et recuits à 1000°C.

I.3.2. Analyses de composition par EDS après recuit

- Sur les films CrAlN obtenus en faisant varier la tension d'aluminium

La figure 2.2.15 montre que la couche obtenue avec 5% d'Al s'oxyde dès 600°C mais la quantité d'oxyde n'est pas suffisante pour la voir par DRX. On constate aussi la présence de chrome et d'azote à 600 et 800°C ce qui explique l'apparition des pics CrN (200), CrN (111) et Cr₂N (111). L'azote disparaît complètement à 1000°C pour laisser place à l'oxygène.

En effet, à cette température on voit nettement la présence du pic Cr₂O₃ (202). La couche est complètement délaminée et fissurée à 1000°C où du carbone et du fer sont détectés en EDS. A cause de la disparition de l'azote, le taux de chrome augmente puisque l'analyse EDS n'a plus que trois éléments au lieu de quatre. Cette couche présente donc une très mauvaise stabilité thermique. De plus, les images optiques le confirment : présence d'oxyde et fissuration de la couche bien visibles.

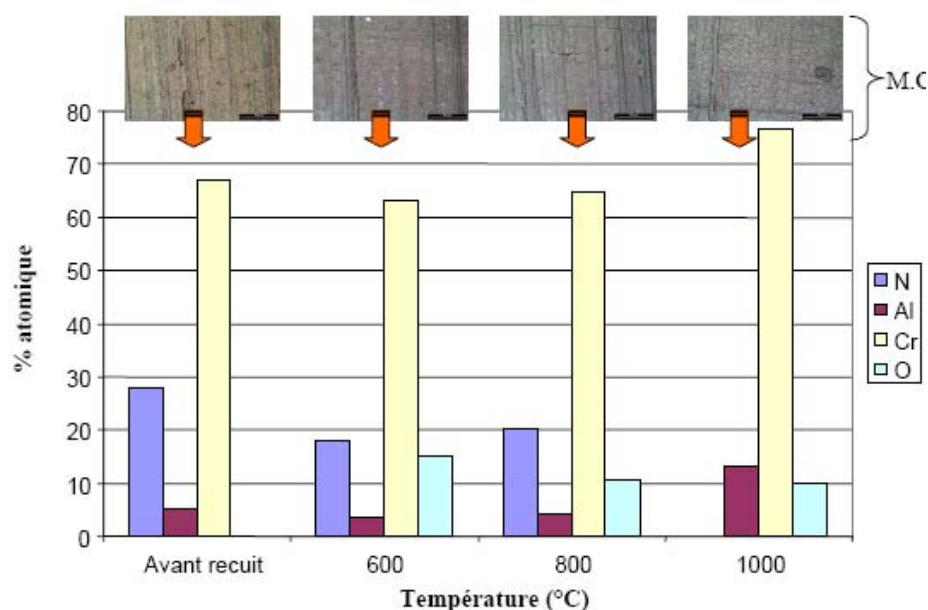


Figure : 2.2.15 : Pourcentage atomique des différents éléments en fonction de la température de recuit pour les films de CrAlN déposés avec 5% d'Al.

Les films de CrAlN contenant 13% d'Al (Figure 2.2.16) montrent une variation similaire de leur composition à ceux contenant 5% d'Al à 600 et 800°C. En effet, les analyses DRX le confirment. Par contre, à 1000°C, on voit que le pourcentage d'Al et d'oxygène augmente considérablement et que celui de chrome diminue. L'analyse DRX de ces films montre que l'oxyde de chrome est bien cristallisé, en effet le pic (202) de Cr_2O_3 est apparu très net et aucune trace d'oxyde ou bien de nitrure d'aluminium n'a été détectée. Afin de trouver une explication à ce résultat, on a refait des analyses EDS et on a observé les deux surfaces différentes telles qu'observées sur l'image optique obtenue à 1000°C. Ainsi, on a pu déterminé que la première zone grise était riche en aluminium alors que la seconde, plus claire, l'est moins mais que son taux d'Al reste toujours supérieur à celui de chrome.

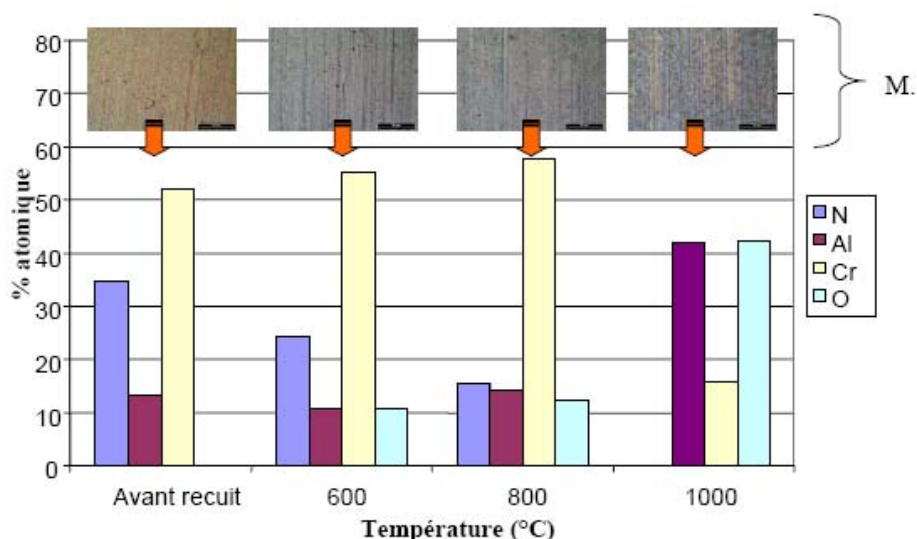


Figure : 2.2.16: Pourcentage atomique des différents éléments en fonction de la température de recuit pour les films CrAlN déposés avec 13% d'Al.

Les films de CrAlN déposés avec 28% d'Al (Figure : 2.2.17) montrent une meilleure stabilité thermique que ceux déposés avec 5 ou 13% d'Al. En effet le taux d'oxygène est minimum à 600 et 800°C. Par contre, à 1000°C on a obtenu le même résultat que les films de CrAlN réalisés avec 13% d'Al. Les taux d'aluminium et d'oxygène augmentent et ceux de chrome et d'azote diminuent considérablement. De plus, l'image optique obtenue à 1000°C montre la présence des deux surfaces observées précédemment.

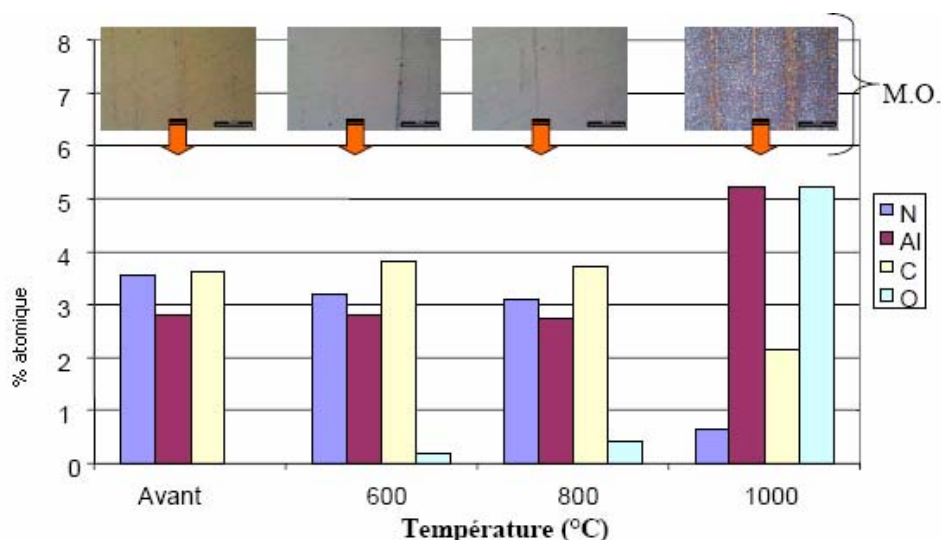


Figure : 2.2.17 : Pourcentage atomique des différents éléments en fonction de la température de recuit pour les films CrAlN déposés avec 28 % d'Al

Les films de CrAlN déposés avec 30% d'Al (Figure : 2.2.18) montrent une bonne stabilité thermique ce qui corrobore les analyses EDS et DRX vues précédemment.

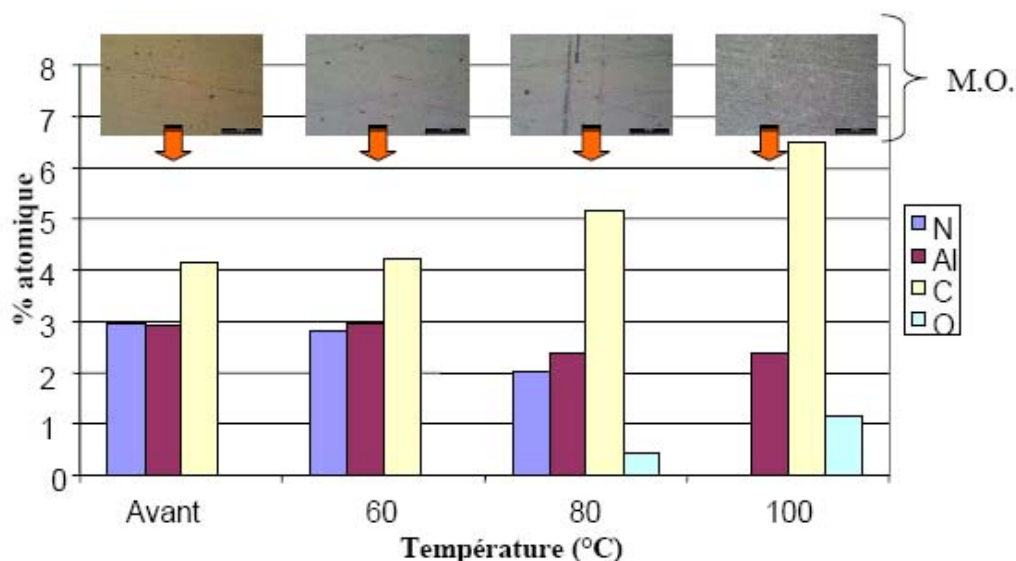


Figure : 2.2.18 : Pourcentage atomique des différents éléments en fonction de la température de recuit pour les films CrAlN déposés avec 30% d'Al.

- Sur les films CrAlN obtenus en faisant varier la tension de chrome

Lorsque l'on a fait varier la tension de la cible de chrome (Figure : 2.2.19 et 20), on a obtenu une stabilité thermique encore meilleure avec l'apparition d'oxyde à seulement 1000°C et toujours présence de nitrure. Par contre, on remarque une proportion d'oxyde plus importante à -500V par rapport à -700V ce qui est confirmé en microscopie optique.

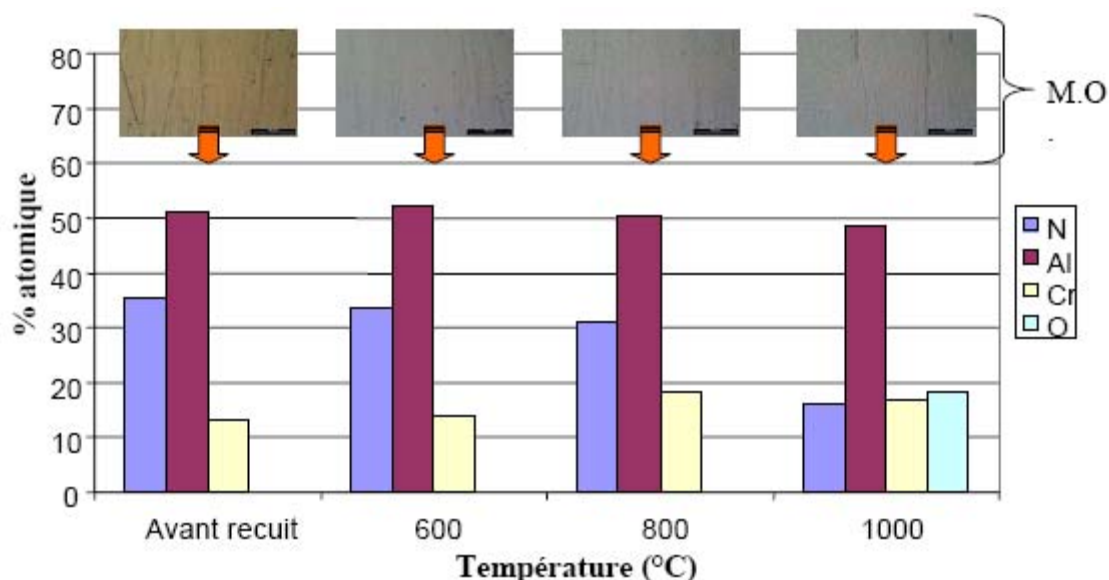


Figure : 2.2.19 : Pourcentage atomique des différents éléments en fonction de la température de recuit pour les films CrAlN déposés avec 45% d'Al.

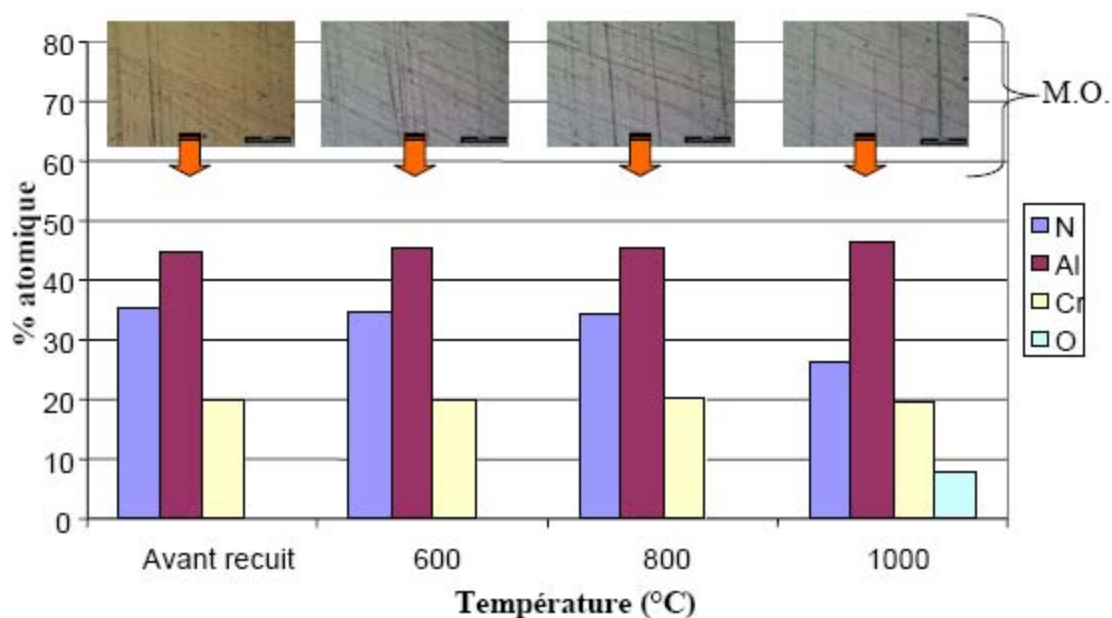


Figure : 2.2.20 : Pourcentage atomique des différents éléments en fonction de la température de recuit pour les films CrAlN déposés avec 51% d'Al.

II. Dépôts de films de CrSiN par pulvérisation magnétron

Ces dépôts ont été réalisés par le l'institut FEMTO/ST de Besançon dans le cadre d'un projet de recherche. Les conditions de dépôts sont données dans le tableau.2.2.2 et les caractéristiques des films obtenus sont résumées dans le tableau.2.2.3.

Tableau.2.2.2 : Conditions de dépôts de CrSiN réalisé au CREST CNRS de Montbéliard

Revêtement	Tension appliquée à la cible de Si (-V)	Tension appliquée à la cible de Cr (V)	Pression de travail (μbar)	Ratio de N2 (%)	Ratio de Ar (%)	Temps de dépôt (mn)
CrSiN	183	380	4	40	60	105
	256					
	317					
	440					

Tableau.2.2.3 : Caractéristiques des films de CrSiN

Revêtements	Tension appliquée à la cible de Si (-V)	Si (at.%)	Epaisseur (μm)	Dureté (GPa)	Module de Young (GPa)	Coefficient de frottement
CrSiN	183	1.2	0.77	16,5	260	0.44
	256	5	0.55	26	350	0.35
	317	7.5	0.65	28	470	0.30
	440	14.3	0.68	24	320	0.4

III. Dépôts de films de TiAlN par pulvérisation magnétron

Ces dépôts ont été réalisés par la firme Métatherm S.A. de Vermondans, France.

On donnera juste un récapitulatif des conditions de dépôts réalisées sur des outils de coupe en carbure, fournis par la firme Métatherm S.A. (tableau 2.2.4).

Les dépôts ont été réalisés sur une machine Alcatel SCM 441 avec une cathode magnétron de 4 pouces, en partie inférieure et un porte-substrats refroidi ou chauffant en position supérieure.

La cathode est alimentée avec un générateur Huttinger 1000W RF et le porte-substrats avec un générateur 500W RF.

Le bâti est équipé d'une pompe primaire Alcatel 2063 et d'une pompe secondaire turbomoléculaire 5402 CP, le tout monté en série derrière une vanne de laminage manuelle permettant le réglage de la pression en fonction du débit de gaz.

Avant chaque cycle de dépôt, le pompage est réalisé jusqu'à 5-6 mbar, ensuite un cycle de décapage du substrat est réalisé simultanément avec le décapage de la cible en atmosphère d'argon. Un cache protège le substrat.

La montée en température se fait en même temps que le décapage puis le cache est retiré pour la couche d'accrochage de deux minutes de TiAl. L'azote est ensuite introduit pour la réalisation du nitrure durant 90 min.

Tableau.2.2.4 : Conditions de dépôts de TiAlN réalisé en industrie.

	Type de pièce	Tps de dépôt	Pression de travail	Puissance	Débit N2	Débit Ar	condition	Température
TiAlN I	Outils de coupe	90min	5°-3mbar	404W 250V 25W bias	12sccm	5sccm	Laminage 2min TiAl	Non imposée
TiAlN II	Outils de coupe	90min	5°-3mbar	404W 250V 25W bias	12sccm	5sccm	Laminage 2min TiAl	200°C
TiAlN III	Outils de coupe	90min	5°-3mbar	404W 250V 25W bias	12sccm	5sccm	Laminage 2min TiAl	300°C

IV. Dépôts de films (CrN/CrAlN) par pulvérisation dual magnétron

Des dépôts multicouches CrN/CrAlN ont été réalisés sur des outils en acier 90CrMoV8 destiné au microdéroutage afin de tester leur comportement lors de l'usinage de MDF. Un ensemble de caractérisations ont été faites sur ces dépôts mais on se contentera de ne donner que les résultats de dureté sur la figure 2.2.21, qui montre la dureté en fonction du déplacement de l'indenteur à l'intérieur du film. On voit bien que la dureté superficielle est maximum pour atteindre environ 5 GPa à 2000 nm.

Ces multicouches ayant été réalisées dans le cadre de la thèse de doctorat de Brahim Tlili.

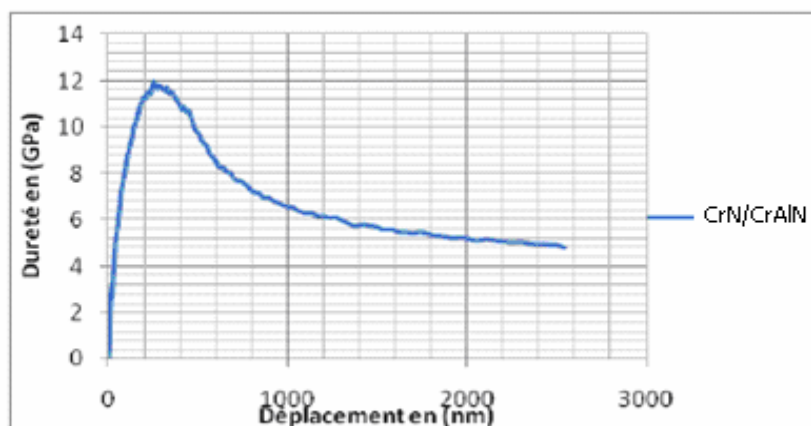


Figure : 2.2.21 : Représentation de la variation de la dureté avec la charge d'indentation pour les multicouches CrN/CrAlN

Les dépôts de CrAlN ainsi CrAlN/CrN, sont exclusivement réalisés au niveau du LaBoMaP de Cluny, par contre ceux de CrSiN sont développés au niveau du CREST CNRS de Montbéliard dans le cadre du projet .

Les dépôts de TiAlN sont réalisés industriellement.

Cet état de fait nous oblige à ne donner que les caractérisations des dépôts de CrAlN réalisés au niveau de notre laboratoire, on se limitera juste à donner les résultats de l'usure des outils revêtus par ces derniers.

V. Application de traitements duplex sur l'acier 90 CrMoV8

Introduction

Pour augmenter la performance des outils de coupe on fait appel aux revêtements divers. Pour démontrer la bonne tenue de couteaux revêtus de nitrure de chrome en usinage bois, plusieurs études [28,29] ont été menées. Cependant le problème d'adhérence n'est pas entièrement résolu ; et la solution de procéder à une nitruration préalable de la surface, mise en œuvre sur l'acier 60SMD8, a donné des résultats probants [28].

Lors de ma thèse de doctorat, on s'est proposé de mener une étude similaire en utilisant, une nuance d'acier très utilisée pour les outils de coupe destinés à la première transformation du bois, le 90CrMoV8. On déterminera les conditions optimales de la nitruration afin d'appliquer des traitements duplex.

Pour les revêtements on appliquera ceux qui ont donné de bons résultats lors du défonçage de MDF.

V.1. Préparation des substrats

Dans cette présente étude, l'acier 90CrMoV8 a été nitruré. La composition chimique de l'acier est donnée comme au-dessous:

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0.5	1.0	0.5	8.0	1.5	0.5

Le traitement de nitruration nécessite un traitement préalable des échantillons (trempe/revenu) qui va leur conférer des caractéristiques mécaniques à cœur compatibles avec leur utilisation future. Pour l'acier 90CrMoV8, le cycle de traitement a été le suivant : la première étape a consisté à maintenir les échantillons dans la chambre de nitruration à une température de 1035°C pendant 10 min. La vitesse de chauffe est de 10°C/min. Le refroidissement se fait en injectant de l'azote à une pression de 3 bars et à une température de 20°C pendant 50mn. Les échantillons ont ensuite été adoucis à 520°C pendant 1h, ils présentent alors une dureté approximative de 60 HRC. Le cycle de traitement est représenté sur la figure.2.2.22.

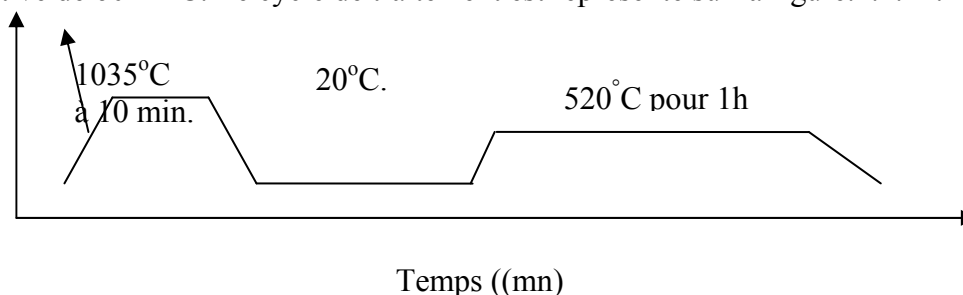


Figure : 2.2.22 : Cycle de trempe revenu pour l'acier 90CrMoV8

Une série l'expérience a été menée en faisant varier le temps de nitruration de 6 à 12h à une température de 500°C.

Les échantillons ont été coupés à des dimensions de 15 x 15 x 3 mm, puis polis à 9 puis 3 μm . Avant le processus de nitruration ionique, les échantillons ont été nettoyés dans de l'acétone et dans un bain ultrasonique pendant 20 minutes, puis séchés et placés sous vide à 5.10^{-3} mbar. Le cycle du processus de nitruration est donné sur la figure.2.2.23.

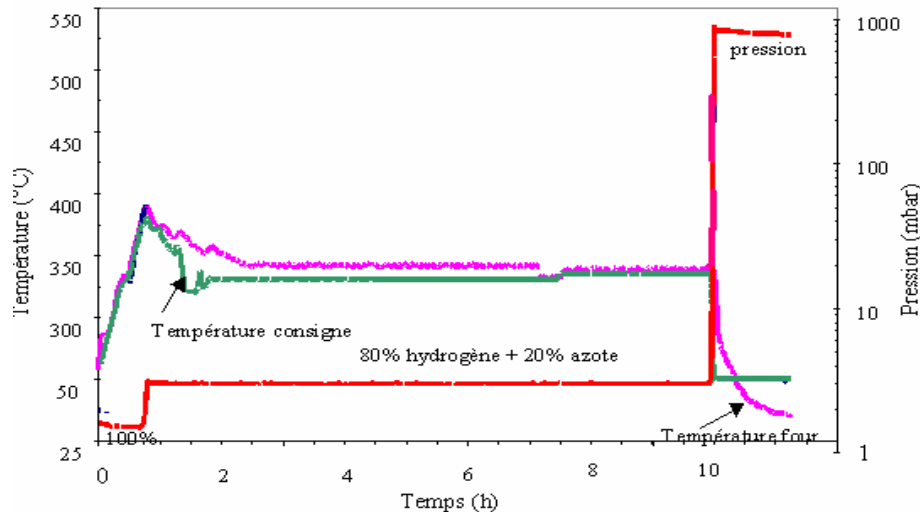


Figure : 2.2.23: Cycle de nitruration à 500°C pendant 8h

Le temps du traitement a varié de 6 à 12 heures. Avant la nitruration les échantillons sont nettoyés avec de l'argon *in situ* à une pression de 8 mbar. Les conditions de traitements sont représentées ci-dessous.

Conditions de nitruration et caractéristiques du four
- Charge maximale : 150Kg - Température maximale : 1250°C - Pression de travail : $1 < P < 10$ mbar - Refroidissement : $1 < P < 410^5$ bar - Temps de nitruration : 6, 8, 10 et 12 h - Température de nitruration : 520°C - Mélange gazeux : 20% N_2 + 80% H_2,

Une série de caractérisations a systématiquement été faite afin de déterminer les conditions optimales de nitruration, afin de procéder par la suite à un traitement duplex (nitruration/revêtement).

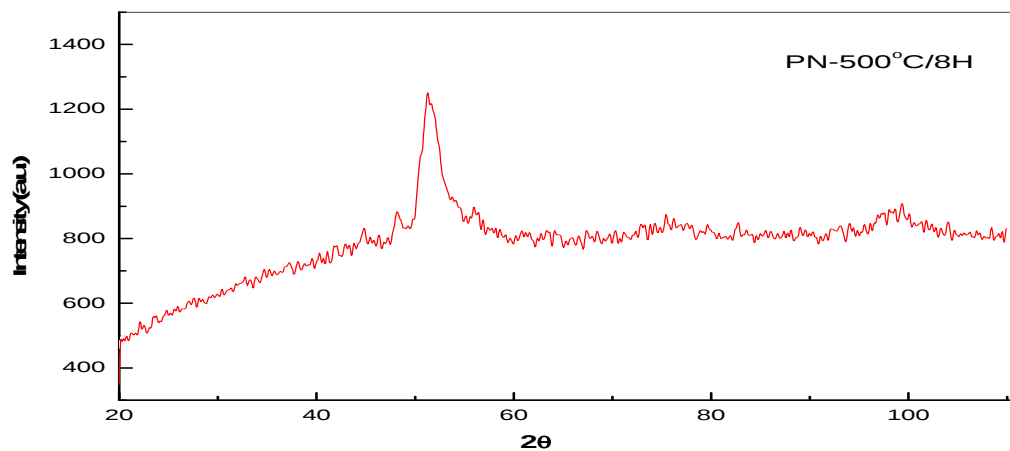
V.2. Caractérisation des échantillons nitrurés

a) Analyse DRX

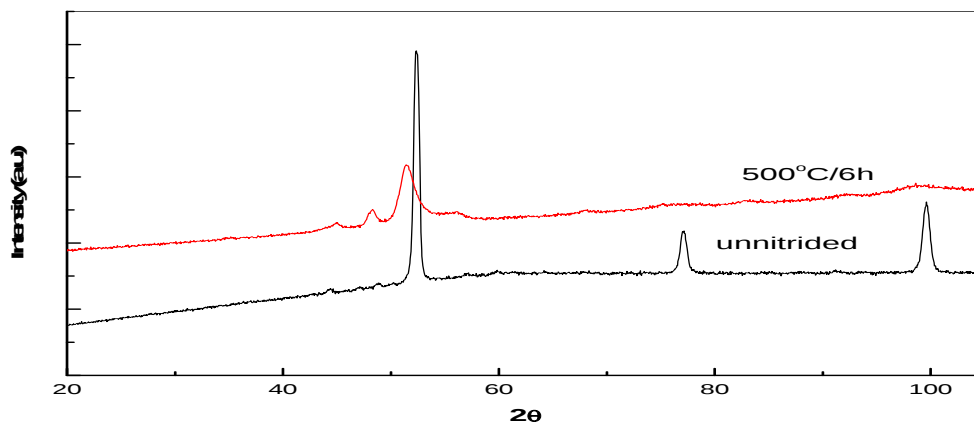
Des analyses par DRX de l'acier avec et sans nitruration ont été réalisées avec une anticathode de Co de longueur d'onde $\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$ (figure.2.2.24). Les échantillons ont été choisis pour représenter les phases typiques formées après le traitement de nitruration lors de la variation du temps de traitement. Les observations révèlent que les pics de Fe s'élargissent et sont tradés vers des angles plus faibles lorsque le temps de traitement augmente. Cela suppose que l'azote introduit dans la solution solide induit des contraintes. Par ailleurs, comme prévu, le temps de nitruration augmente la formation des nitrures de type ϵ et γ .

Avec l'augmentation du temps de traitement la phase ϵ devient prédominante, ce qui donnera des phases plus résistantes à l'usure et aussi à la corrosion, résultats déjà déterminés par Chala [28].

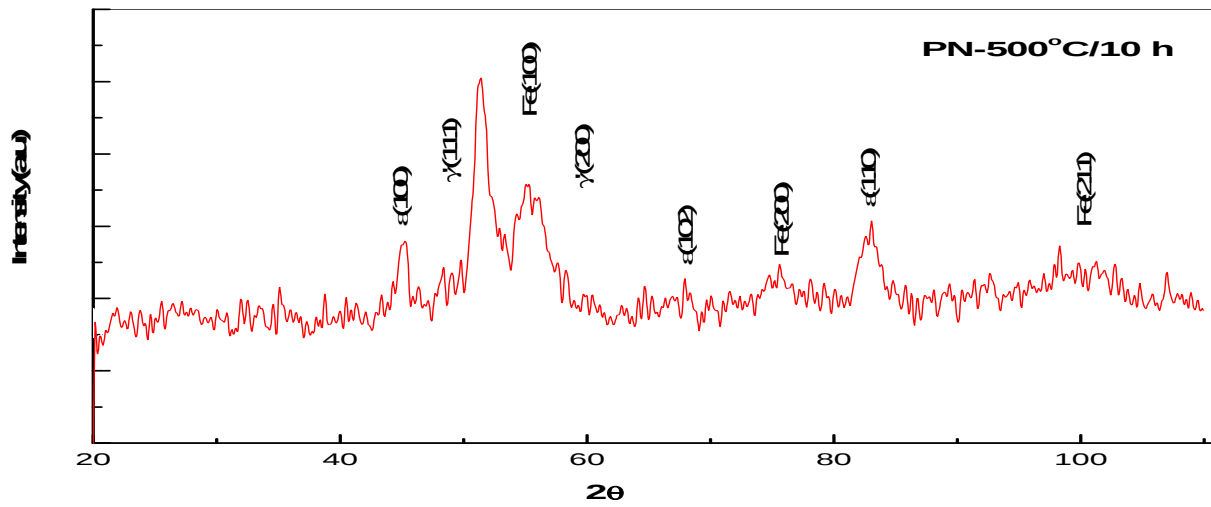
A



B



C



D

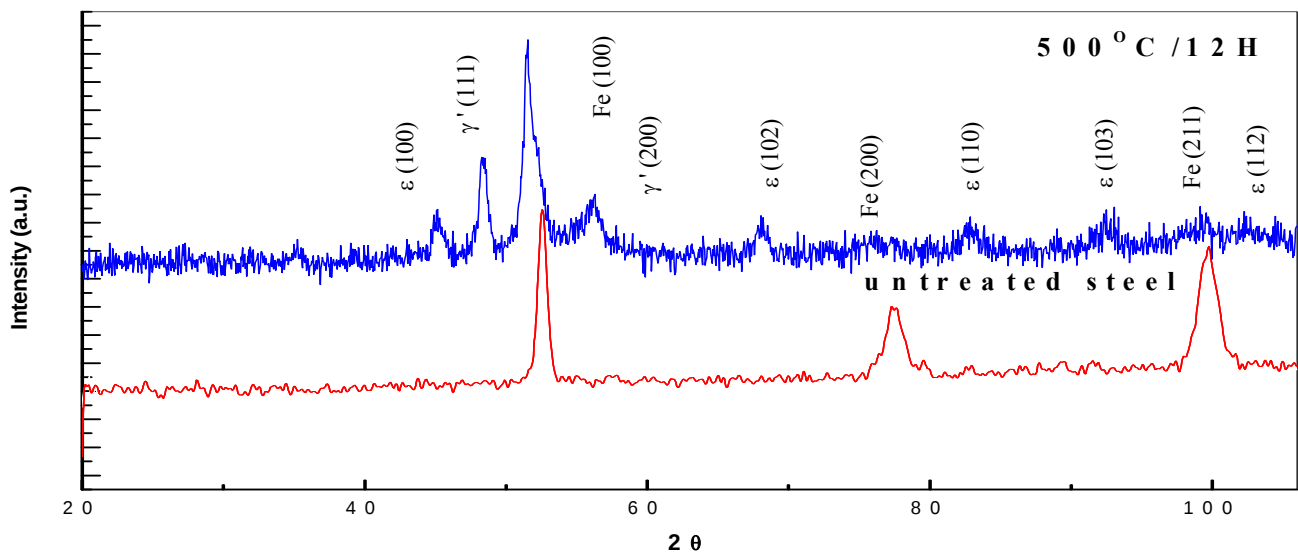


Figure : 2.2.24 : Diffractogrammes de l'acier 90CrMoV8 à 500°C pendant : (a) 6h, (b) 8h, (c) 10 h et (d) 12 h.

b) Analyse EDS et microscopique

Des coupes transverses des échantillons nitrurés ont été analysées par EDS après enrobage et poli miroir (Fig.22.25).

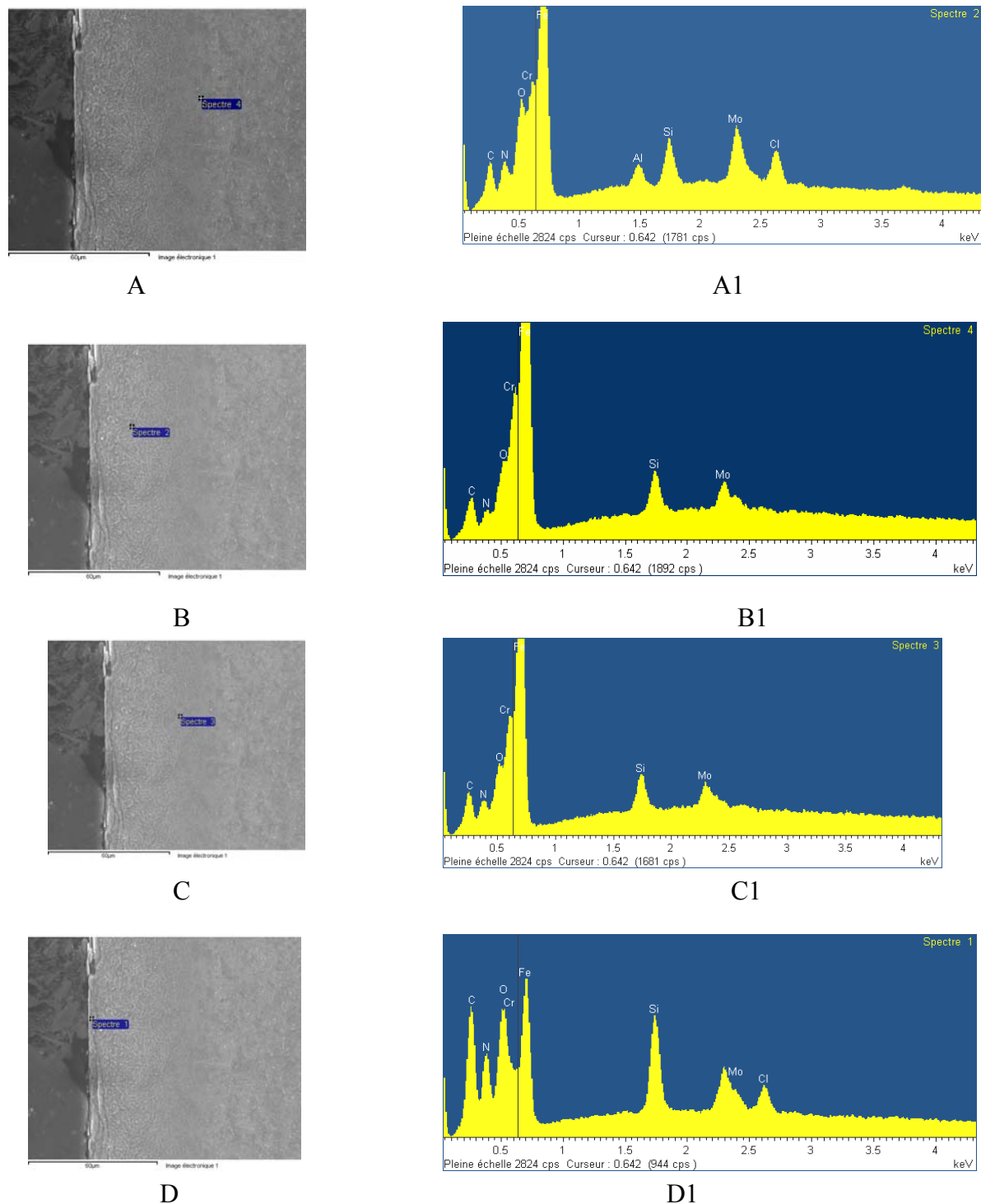


Figure : 2.2.25 : Spectres EDS en surface et au cœur des échantillons nitrurés.

La figure.2.2.25, a1-d1, montre l'analyse élémentaire par EDS d'échantillons nitrurés. Les micrographies montrent les modifications de la structure de la couche représentée par la variation du contraste vers le cœur de l'échantillon. En effet, au cours de la nitruration, de nouvelles phases (solutions solides, nitrures et carbonitrures) se développent à partir de la surface des aciers traités. De plus, les analyses EDS révèlent la variation du taux d'azote dans la couche de diffusion : on voit ainsi que une présence plus dense de l'azote à la surface du

matériau, avec une concentration décroissant régulièrement jusqu'à retrouver la composition de cœur de l'acier de base.

C Analyse de la microdureté

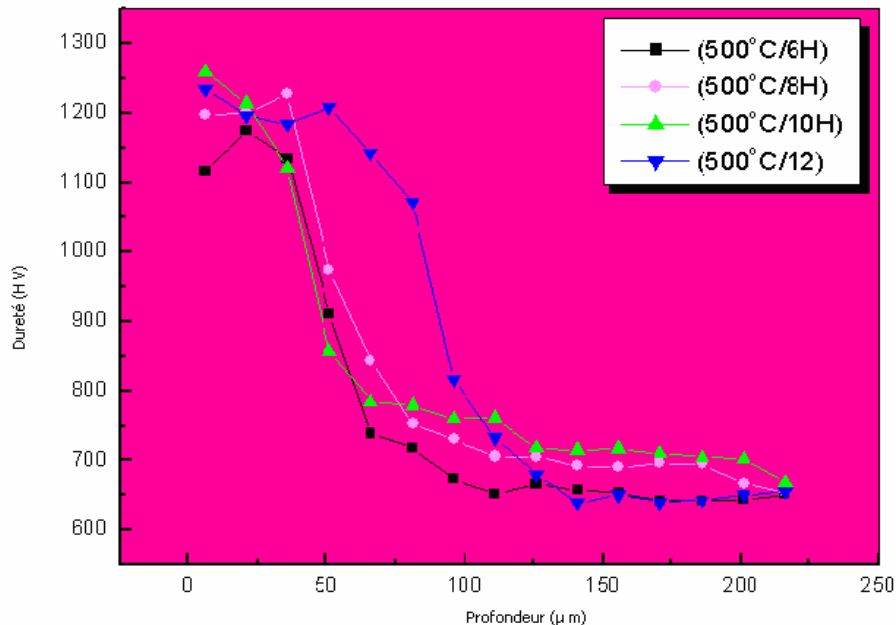


Figure : 2.2.26 : Evolution de la microdureté en fonction de la profondeur de la couche nitrurée et du temps de nitruration

Les profils de dureté des échantillons sont représentés sur la figure.2.2.26. La variation de la dureté est sensible à l'augmentation de la durée du traitement.

Presque dans tous les échantillons traités à 500°C pour des durées de traitements de 6, 8, 10 et 12 h, on atteint une valeur approximative de 1200 HV, alors que la dureté de l'acier non traité est autour de 600HV, ce qui nous donne une multiplication par deux de la dureté de l'acier de base après nitruration.

On peut conclure que la nitruration de l'acier 90CrMoV8 à 500°C amplifie considérablement la dureté de la couche quelle que soit la durée de nitruration. Néanmoins, on remarque que le temps de nitruration influe sur la dureté en profondeur du matériau. Plus le temps est grand, plus la dureté est en profondeur.

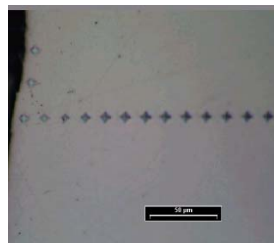


Figure : 2.2.27 : Empreintes de microdureté obtenue sur un échantillon d'acier 90CrMoV8 nitruré

Conclusions

La nitruration ionique montre que l'on améliore considérablement la dureté superficielle de l'acier 90CrMoV8. La variation du temps de traitement est le facteur permettant d'obtenir une profondeur souhaitée. Avec l'augmentation du temps de nitruration, il y a une augmentation de la profondeur de la surface nitrurée, qui sera utile pour les propriétés de résistance à l'usure de l'acier.

La nitruration améliore donc considérablement la dureté superficielle de l'acier 90CrMoV8, ce qui est positif pour améliorer sa résistance à l'abrasion mais il faudra vérifier si cela n'engendrera pas de problèmes au niveau de sa résistance aux chocs, en le rendant trop fragile...lors des tests en usinage bois.

VI. Test d'usinage bois

VI.1. Déroulage

Lors d'une étude précédente, Beer [30] a testé des dépôts de nitrure de chrome en déroulage de hêtre sur des outils en acier allié (nuance 60SMD8) et en acier rapide (Z90WDCV06.05.04.02) d'angle d'arête de 20°.

Ces études ont montré que la durée de vie des outils revêtus sur deux faces était similaire à celle des outils revêtus seulement sur la face d'attaque. Aussi, cela permet de ne revêtir que la face d'attaque de l'outil, la face de dépouille pouvant être réaffûtée comme en industrie.

Lors de la présente étude, quatre outils seront testés en usinage de MDF. Un suivi de l'usure en fonction de la longueur déroulée a été réalisé pour tous les outils testés et traités ou non par CrSiN, CrAlN à 5% d'Al, nitruration, multicouche (CrN/CrAlN) et par duplex (nitruration et revêtement CrAlN à 5% d'Al).

La qualité des surfaces usinées est un facteur très important d'autant plus que ces surfaces sont amenées à recevoir des colles, peintures, vernis...etc, de ce fait un suivi de la qualité des surfaces usinées avec les différents outils a été fait à l'aide d'un profilomètre optique.

Des relevés de profil de l'arête de coupe avant et après usure sont réalisés afin de voir l'évolution de l'usure le long de celle-ci.

Enfin, un test de choc a été initié afin de tester la résilience des outils pour déterminer un compromis entre la dureté et la résilience de l'arête de coupe.

VI.1.1. Recul de l'arête

La figure 2.2.28, montre le comportement à l'usure des différents outils traités ou non et testés en usinage de MDF; on remarque clairement que le comportement des outils diffère en fonction du type de traitement.

On remarque clairement que l'outil revêtu de CrSiN possède la plus faible. On remarque aussi que l'outil nitruré s'use plus rapidement que les autres outils, cela est dû probablement à la fragilité du bec de l'outil due à sa grande dureté superficielle, résultats déjà constatés par Labidi [20]. Le fait marquant est que les outils ayant subi un traitement duplex (nitruration + CrAlN) ou simplement revêtus de CrN ont un comportement similaire à l'outil nu; bien que d'autres études [19, 27,28] ont montré l'amélioration du comportement à l'usure apportée par les revêtements de CrN et Cr₂N, réalisés toutefois dans d'autres conditions. Cette différence de résultats peut s'expliquer par la qualité d'élaboration des couches ou les erreurs de mesure de l'usure. Il serait intéressant de faire des essais en milieu industriel afin d'avoir des résultats concrets permettant de classer les traitements développés ici.

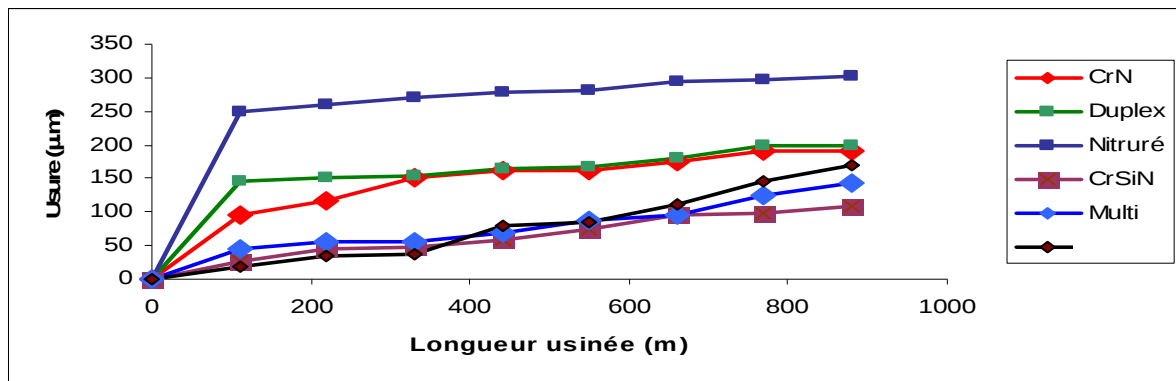


Figure : 2.2.28 : Recul de l'arête en fonction de la longueur usinée lors du microdéroutage de MDF.

VI.1.2. Acquisition des efforts de coupe

Efforts de coupe en fonction de la longueur usinée

La figure 2.2.29, montre l'évolution des efforts de coupe en fonction de la longueur usinée, on remarque une différence de comportement entre les différents outils testés. Le fait notable est le comportement au début de l'usinage (figure.2.2.30) où l'on constate un refus de coupe qui se traduit par la plongée de l'outil ce qui nous donne un effort horizontal positif pendant quelques secondes. On note une corrélation directe entre le comportement à l'usure des outils ainsi que la valeur des efforts de coupe, à titre d'exemple on peut citer le comportement à l'usure du revêtement de CrSiN qui possède la plus faible valeur d'usure ainsi que le plus faible effort de coupe. Ce résultat a été déjà constaté par les travaux de Decès-Petit [31] et Labidi [20].

Le comportement des efforts lors du déroulage est aussi conditionné par la variation des épaisseurs du copeau ainsi que par la variation des surfaces de contact entre l'outil et le billon [34]; ces deux paramètres n'ont pas été pris en considération dans cette étude. On remarque aussi que l'effort de l'outil nitruré est important au début de l'usinage, cela est dû à la grande vitesse d'usure constatée dès les premiers mètres d'usinage.

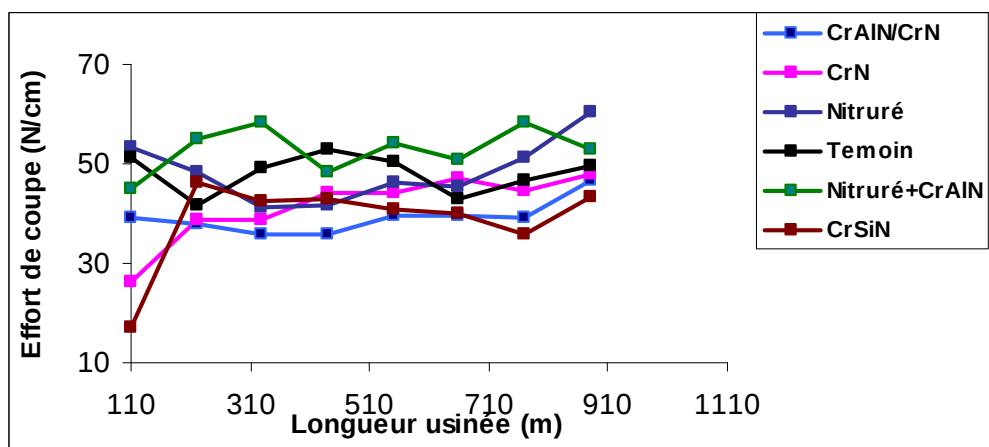


Figure : 2.2.29 : Effort de coupe sommaire en fonction de la longueur de coupe

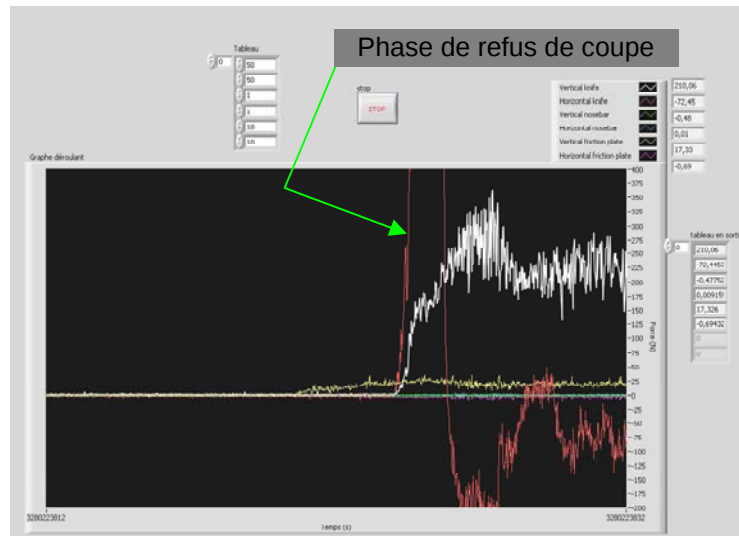
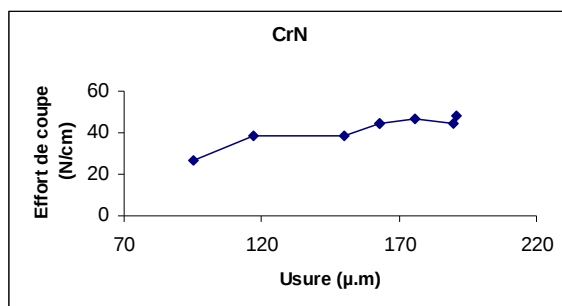


Figure : 2.2.30 : Acquisition des efforts de coupe pendant le microdéroutage de MDF

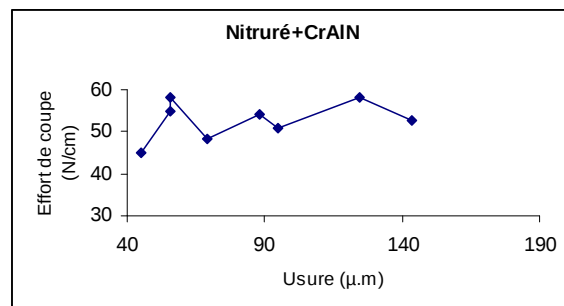
Efforts de coupe en fonction de l'usure

Plusieurs travaux ont montré une corrélation directe entre l'usure et les efforts de coupe [32,33]. Lors de notre étude on a voulu vérifier si les efforts augmentaient avec l'augmentation de l'usure.

La figure 2.2.31 montre qu'effectivement quel que soit le type de traitement, les efforts augmentent avec l'augmentation de l'usure. Pour l'outil nitruré on remarque que l'effort de coupe est au maximum juste au début de l'usinage, cela s'explique par la grande vitesse d'usure dès les premiers mètres d'usinage. Pour l'outil ayant subi un traitement duplex le même constat peut être fait, c'est-à-dire que l'effort dès les premiers mètres se traduit par une grande vitesse d'usure et est légèrement similaire ou supérieur à l'effort mesuré après plusieurs mètres de coupe, lorsque l'usure de l'outil entre dans sa phase d'usure normale. On peut dire que l'effort de coupe est directement lié avec la vitesse d'usure de l'outil de coupe. On remarque aussi que l'effort est stable pour les outils traités avec CrSiN, CrN et CrN/CrAlN; ils ne subissent pas de grandes fluctuations, contrairement aux autres outils testés.



(a)



(b)

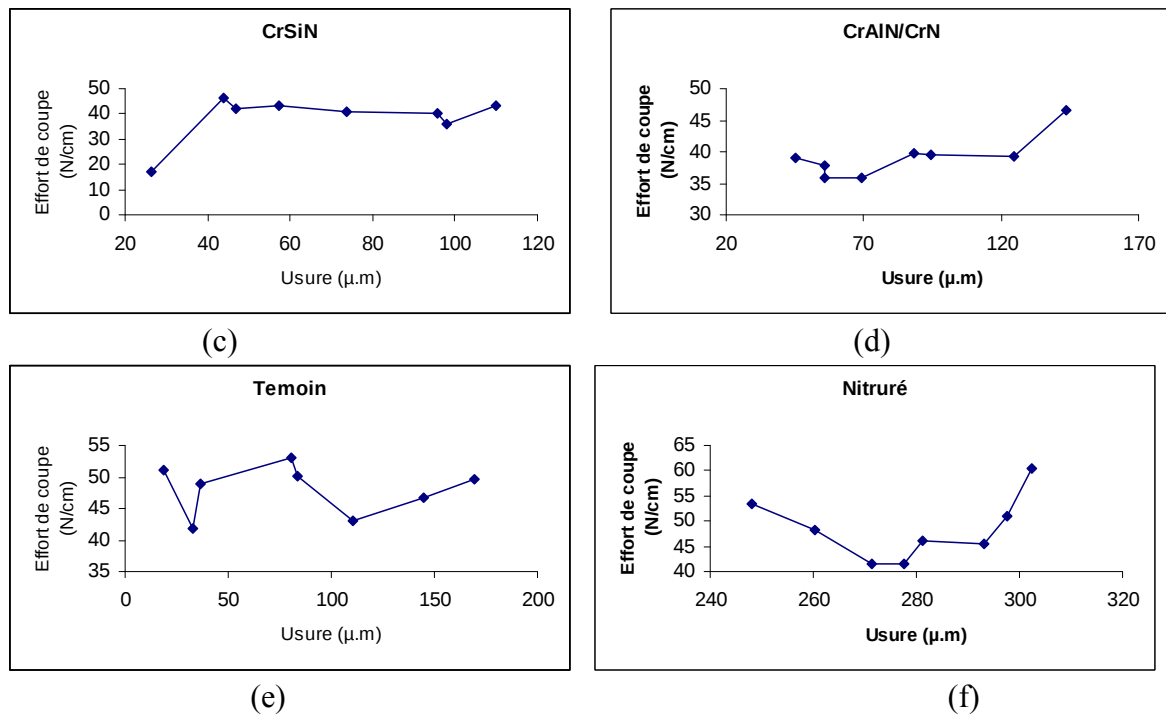


Figure : 2.2.31 : Evolution des efforts de coupe en fonction de l'usure des outils, a)CrN b) Duplex, c) CrSiN, d) CrN/CrAlN, e) Témoin, f) Nitruré

Détermination du coefficient de frottement

Des mesures de coefficient de frottement de patins traités ou non ont été réalisées en parallèle à ces tests d'usinage avec une force normale appliquée de 100N.cm^{-1} , d'après des études précédentes le coefficient de frottement se stabilise à cette pression [28]. Les résultats de ce test sont donnés sur la figure 2.2.32.

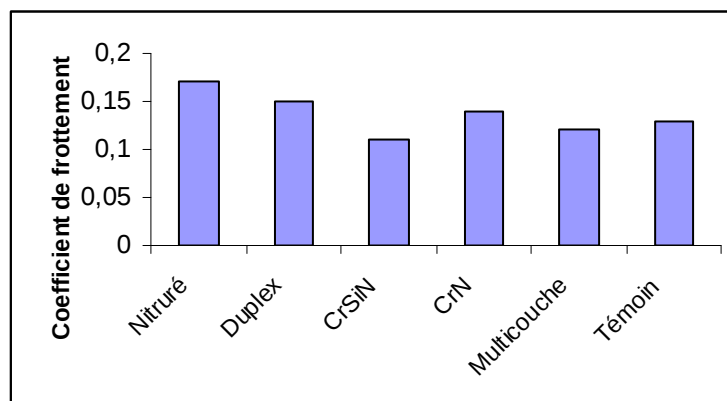


Figure : 2.2.32 : coefficients de frottement métal/bois

Les patins revêtus ont un coefficient de frottement plus faible que les patins en acier de base ou nitruré. On remarque que le revêtement en CrSiN possède le coefficient de frottement le plus faible, ce qui expliquerait sa bonne aptitude au déroulage de MDF. Les résultats obtenus ici sont en parfaite adéquation avec les résultats obtenus lors des tests d'usure et expliquent les performances de chaque outil : l'outil le plus performant en déroulage a été celui qui présente le plus faible coefficient de frottement.

On peut donc conclure à une parfaite corrélation entre la résistance à l'usure et le coefficient de frottement des traitements testés, contrairement aux efforts de coupe.

VI.1.3. Test de qualité des surfaces déroulées

La qualité des surfaces usinées est très importante, car toute surface usinée est destinée à recevoir soit des vernis soit des surfaces en contact, il est donc important de déterminer la qualité des surfaces déroulées. Dans des précédentes études, Goli *et al.* [34] a montré que le type de revêtement n'influçait aucunement la qualité des surfaces usinées. Dans le cadre de mes travaux de recherche, j'ai effectué des tests de qualité de surface en fonction de l'usure des outils, en retenant comme facteur déterminant, la rugosité des surfaces usinées.

Le suivi de cette rugosité a été fait par profilométrie optique. Des mesures ont été prises après chaque 110 m de MDF déroulé sur des copeaux de 2cm². Les résultats sont donnés dans le (tableau 2.2.5).

La figure 2.2.33, montre un exemple d'acquisition par profilométrie optique d'une surface usinée après 110 m de déroulage avec un outil de coupe revêtu de CrN.

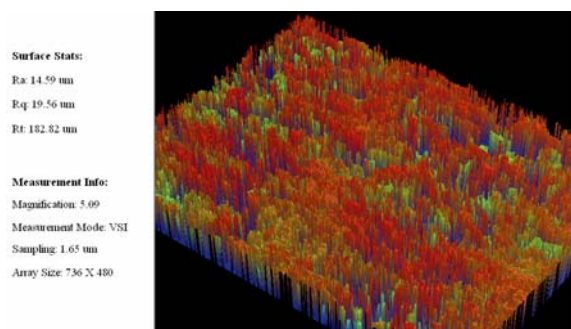


Figure : 2. 2.33 : Exemple de relevé topographique d'une surface usinée par un outil revêtu de CrN après 110 m d'usinage

Tableau. 2. 2.5 : Rugosité (µm) de copeaux obtenus avec des outils traités :

Distance usinée (m)	110	330	660	990	1320
CrN	14.59	14.65	18.90	17.63	18.30
CrSiN	11.86	11.26	16.99	12.48	10.53
CrAlN/CrN	23.19	21.45	30.05	15.10	27.9
Nitruré	17.62	22.54	19.65	21.46	25.92
Nitruré+CrAlN (5% Al)	19.28	18.32	17.68	13.20	19.32

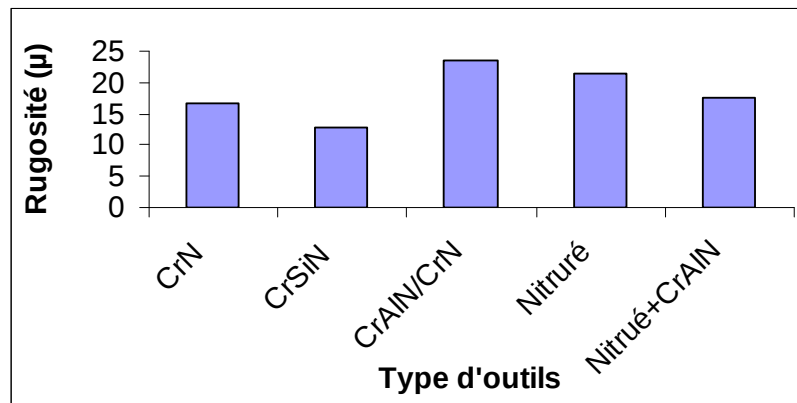


Figure : 2.2.34 : Rugosité moyenne des copeaux déroulés

On constate à travers cette figure que l'outil revêtu de CrSiN permet d'obtenir de meilleurs états de surfaces que les autres outils traités. On remarque que la valeur de l'usure en elle-même n'est pas un facteur qui pourra être déterminant sur la valeur moyenne de la rugosité dans le processus de déroulage; mais surtout les ondulations générées. Cela se confirme par la valeur moyenne de la rugosité de l'outil revêtu de CrN/CrAlN, malgré son usure faible il ne génère pas des surfaces de bonnes qualités en prenant comme indice de qualité la rugosité. On remarque une corrélation directe entre l'usure et la qualité de surface, néanmoins pour l'outil revêtu de CrN/CrAlN, la qualité était moindre malgré son bon comportement à l'usure, cela est dû aux fortes ondulations constatées sur la partie active.

VI.1.4. Test de chocs

Lors de l'opération de déroulage, les outils subissent des dégradations dues aux nœuds. Ces derniers ont des densités supérieures aux autres parties d'un billon, aussi la position du nœud qui peut être en travers de la fibre, pourra faire subir aux outils d'énormes dégradations. Il est intéressant de voir le comportement de nos outils face aux chocs que pourraient causer des nœuds. Pour cela des simulations ont été réalisées. On a placé sur des disques de MDF des tourillons en hêtre de 8 mm de diamètre, ces derniers sont au nombre de 4 avec un pas de 90°, le sens des fibres des tourillons est perpendiculaire à l'arête de coupe augmentant ainsi la dureté locale de contact simulant l'orientation des fibres d'un nœud. La distance déroulée est de 50m. Le test de choc a été réalisé comme suit : des photos par microscope optique ont été prises sur l'arête de l'outil avant et après déroulage, afin de simuler les nœuds qui engendreront les chocs, une acquisition d'efforts est faite pour déterminer l'influence de la nodosité sur l'opération de déroulage. La figure 2.2.35, montre la position des tiges sur le disque de MDF.

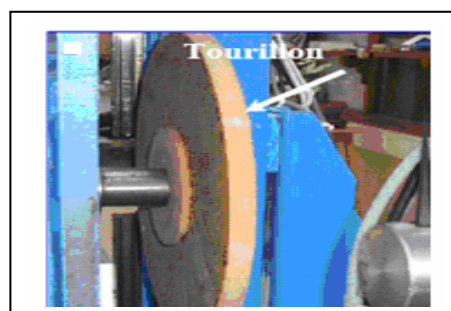


Figure : 2.2.35 : Mise en place de la pièce pendant l'essai de chocs.

Efforts moyens après le choc

Sur la figure 2.2.36 sont représentés les efforts moyens après 50m de déroulage. On remarque que l'outil revêtu de CrSiN possède une moyenne la plus faible et que l'outil nitruré a l'effort moyen le plus conséquent. Le choc causé par les tiges en hêtre influence différemment les efforts induits sur les outils traités. Cette analyse d'effort moyen ne peut être à elle seule un élément significatif pour apprécier l'influence du choc sur l'outil, pour cela des micrographies des arêtes des outils ont été prises avant et après chaque choc (figure.2.2.37).

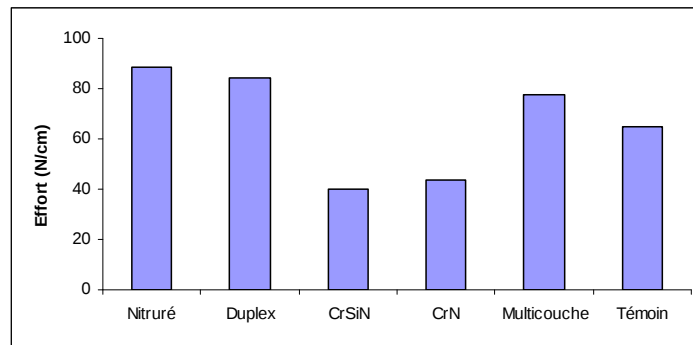


Figure : 2.2.36 : Efforts moyens pendant les essais de chocs.

Outil CrN

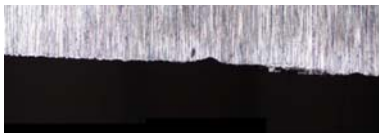


Avant le choc



après le choc

CrSiN

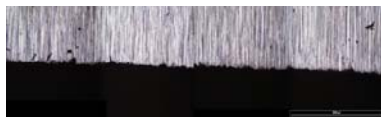


Avant le choc



après le choc

Outil duplex



Avant le choc



après le choc

Outil multicouche



Avant le choc



après le choc

Outil nitruré



Avant le choc



après le choc

Outil témoin



Avant le choc



après le choc

Figure : 2.2.37 : Micrographies des outils de coupe avant et après le choc

Il apparaît clairement que les chocs influent négativement sur l'arête de l'outil, or on remarque les traces des chocs qui se traduisent par une dégradation de la partie active de l'outil. Néanmoins cette dégradation diffère d'un outil à l'autre.

Ces micrographies nous permettent d'apprécier la différence de comportement des outils lors du choc. En industrie les chocs sont causés par les nœuds ainsi que par les corps étrangers qui peuvent s'incruster à l'intérieur d'un tronc d'arbre. On peut clairement conclure que l'outil revêtu de CrSiN et à un degré moindre celui revêtu de CrN présentent une faible dégradation alors que l'outil nitruré a subi la dégradation la plus importante.

Si on se réfère à la figure 2.2.36, on remarque que les deux outils présentant les plus faibles dégradations (CrSiN et CrN) sont ceux qui ont les moyennes des efforts lors de l'essai de chocs les plus faibles. Il faut aussi noter que c'est la force verticale qui se voit augmenter pendant les chocs comme le montre la figure 2.2.38, alors que la force horizontale subit moins d'influence.

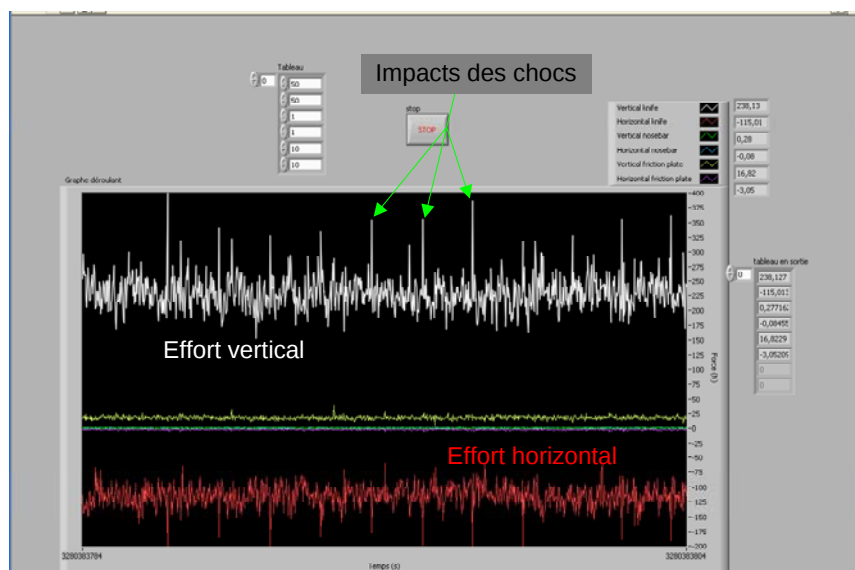


Figure : 2.2.38 : Exemple acquisitions pendant le test de choc

Conclusion

Suite aux essais de déroulage des différents outils, on peut dire que l'outil revêtu de CrSiN présente les meilleures performances en terme de résistance à l'usure par abrasion et aux chocs. Les tests de qualités ont aussi confirmé ce résultat. Mais ces tests restent incomplets tant qu'une application à l'échelle industrielle ne sera pas faite pour les vérifier.

VI.2. Défonçage

Dans cette étude, une série d'outils ont été testés en défonçage de MDF avec des carbure traités ou non. Les outils sont à l'origine en carbure, mais on a aussi essayé de tester des outils en acier 90CrMoV8 revêtu de CrAlN.

Les revêtements utilisés sont le CrAlN développé au niveau de notre laboratoire et aussi le CrSiN développé par le laboratoire de Besançon, ainsi que le revêtement TiAlN développé industriellement.

Une comparaison a été faite entre ces trois revêtements afin de déterminer lequel est le plus apte à rendre un outil plus résistant à l'usure.

VI.2.1. Résultats de l'usure des outils revêtus de CrAlN

Les résultats de la figure 2.2.39 montrent l'évolution de l'usure des outils revêtus de CrN et de CrAlN avec différents pourcentages d'Aluminium pour une longueur totale de défonçage de MDF de 1530m. Il apparaît que la valeur de l'usure du revêtement à 0% d'Al autrement dit le CrN est la plus faible, cela voudrait dire que les outils revêtus sans apport d'Aluminium résistent mieux aux sollicitations à l'usure lors du défonçage de MDF. Toutefois, l'outil revêtu de CrAlN avec 5% d'Al présente des performances similaires. On peut donc conclure que l'ajout d'Al améliore peu le comportement des outils à la résistance à l'usure et qu'il ne doit pas dépasser 5%at. On remarque une corrélation indirecte entre le coefficient de frottement et la valeur de l'usure, ce qui laisse penser que lors du défonçage l'usure abrasive est prédominante.

On constate aussi que l'usure des outils passe par une phase d'usure rapide appelée communément « rodage », qui est presque équivalent à une longueur d'usinage de 510 m.

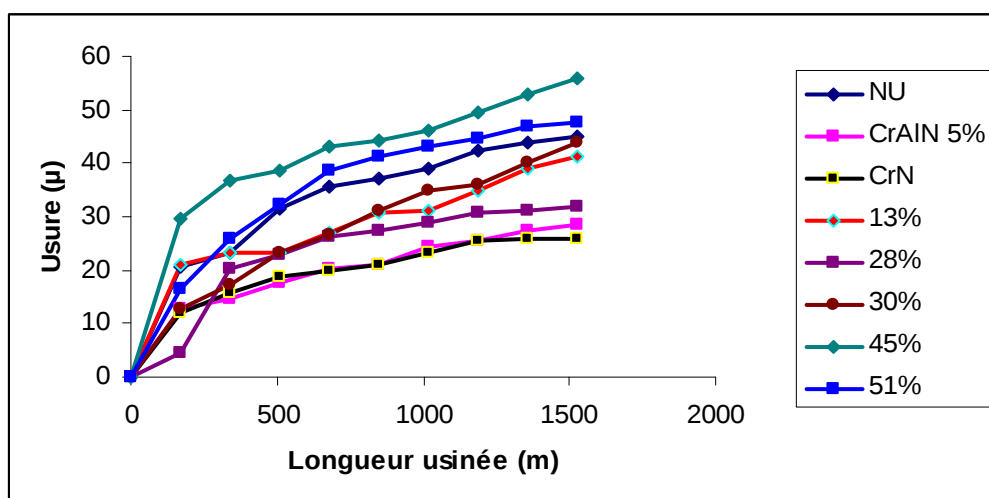


Figure : 2.2.39: Evolution de l'usure des outils traités en fonction de la longueur d'usinage.

VI.2.2. Résultats d'usure pour les outils de CrSiN

Les tests d'usure réalisés sur les 4 outils revêtus de CrSiN (figure.2.2.40) montrent une différence notable de leur comportement en fonction des paramètres de dépôts appliqués. Or on constate que le dépôt CrSiN 111, qui a un pourcentage de silicium de 7%, présente l'usure la plus faible après 1530 m de défonçage. Le même constat est observé pour le CrAlN dans le sens où l'usure abrasive est prédominante étant donné que la valeur du coefficient de frottement du CrSiN 111 présente le coefficient de frottement le plus faible.

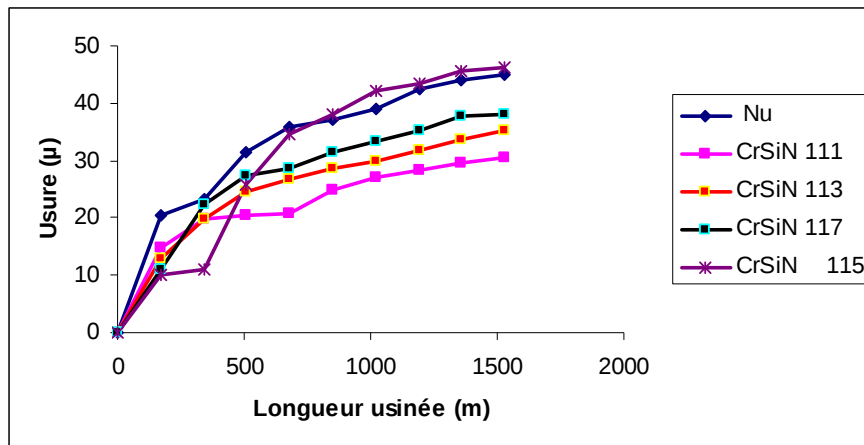


Figure : 2.2.40 : Evolution de l'usure des outils revêtus de CrSiN en fonction de la longueur d'usinage.

VI.2.3. Résultats d'usure pour outils de TiAlN

Trois outils revêtus industriellement avec des paramètres de dépôts différents ont été testés. On remarque qu'après une distance de 1530 m de défonçage de MDF, les trois outils revêtus ou non présentent la même courbe d'usure (figure.2.2.41).

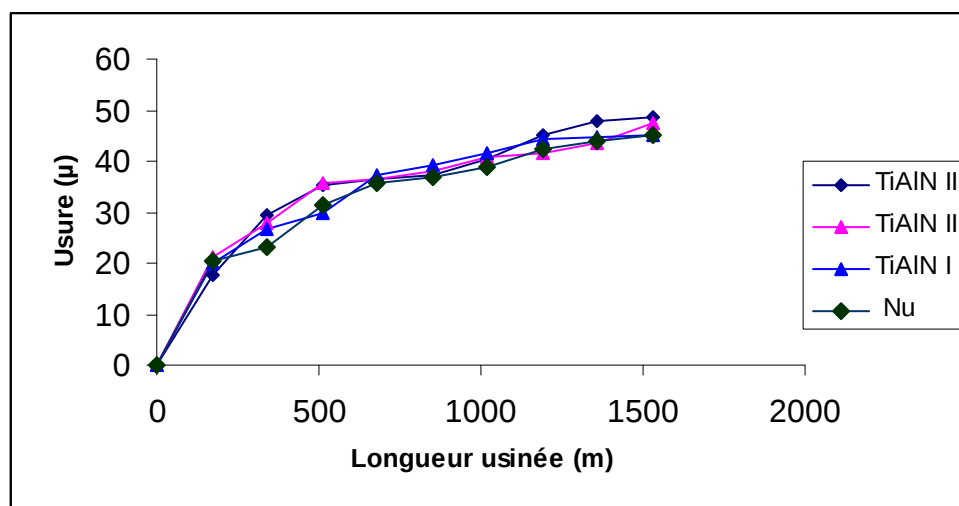


Figure : 2.2.41 : Evolution de l'usure des outils revêtus de TiAlN en fonction de la longueur d'usinage

VI.2.4. Usure comparative entre les revêtements testés

Afin d'apprécier le revêtement le plus indiqué pour le défonçage de MDF, on a comparé le comportement du meilleur de chaque type de dépôts.

La figure.2.2.42 montre le comportement de ces revêtements après 1530 m de défonçage de MDF. Ces courbes montrent bien que l'outil revêtu de CrN présente une meilleure résistance à l'usure pour le procédé de défonçage sur la distance indiquée, suivit par celui revêtu de CrSiN, on remarque aussi le bon comportement du film CrAlN à 5% d'al. On remarque aussi que l'outil revêtu de TiAlN industriellement n'améliore en aucun cas la résistance à l'usure des outils en carbure, ce qui laisse supposer que le film n'a pas adhéré.

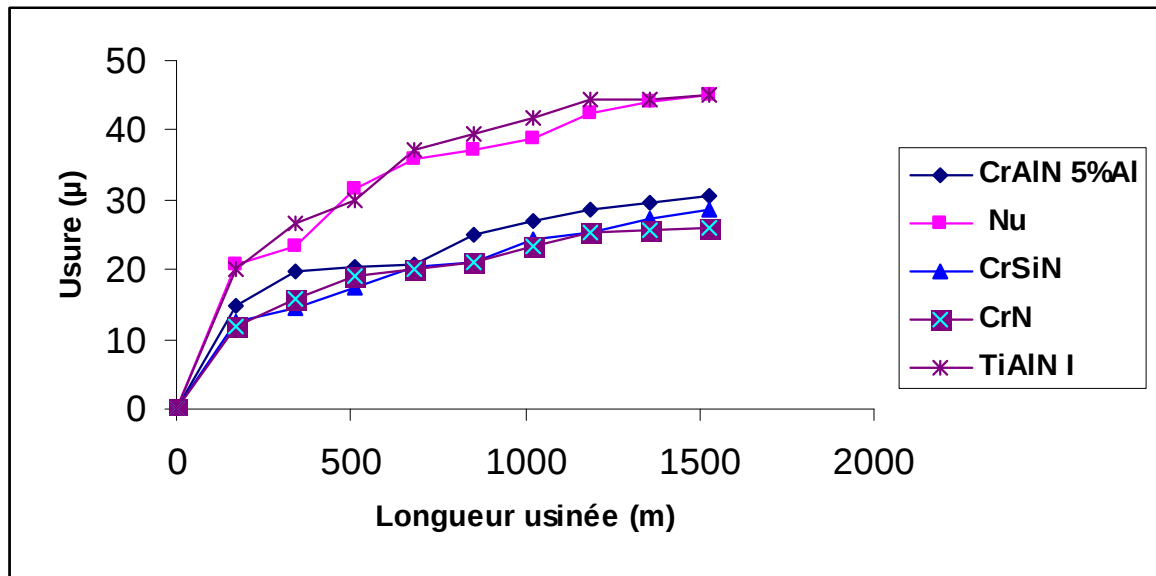


Figure : 2.2.42 : Evolution de l'usure des outils TiAlN, CrN, CrSiN, CrAlN ou non traités en fonction de la longueur d'usinage

Les vitesses d'usure de ces outils ont été calculées, les résultats sont résumés dans le tableau 2.2.6

Tableau.2.2.6 : Vitesses d'usure des outils revêtus de CrSiN, CrN, TiAlN ou non

Vitesse d'usure ($\mu\text{m/m}$)	
CrN	3.23
CrSiN	3.36
TiAlN	5.01
Nu	5.00

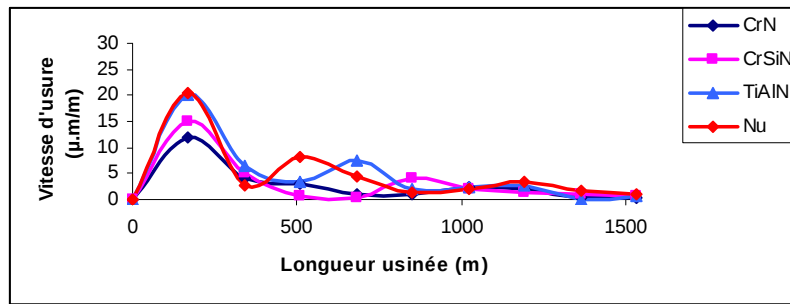


Figure : 2.2.43 : Évolution des vitesses d'usure en fonction de la longueur usinée

On voit bien que les vitesses d'usure des outils considérés passent par une phase de rodage qui se traduit par un optimum comme le montre la figure 2.2.43. Après presque 340 m de défonçage les valeurs des vitesses d'usures chutent considérablement ce qui se traduit par la phase de maturité de l'outil de coupe. Mais on constate de l'outil revêtu de CrN possède la vitesse d'usure la plus faible. On voit bien qu'il existe une corrélation directe entre les vitesses d'usure et les valeurs du recul de l'arête lors du défonçage de MDF.

Conclusions

Après avoir testés les différents types de revêtements réalisés en laboratoire pour (CrN et CrSiN) et le CrAlN et industriellement pour le TiAlN, on peut conclure que les revêtements à base de nitrure de chrome sont les mieux indiqués pour améliorer la résistance à l'usure abrasive. D'après les résultats obtenus sur des essais en laboratoire, le revêtement de CrN présente la meilleure tenue à l'usure, néanmoins ces outils doivent être testés en milieu industriel jusqu'à l'effondrement de l'arête afin de mieux apprécier les performances de ces outils. Pour les films CrAlN, le plus résistant à l'usure par défonçage est celui avec 5% d'Al. On remarque que la phase de rodage est très importante pour la suite de l'évolution de l'usure, tous les outils ayant de grandes vitesses d'usure pendant cette période ont de grandes usures après 1530m de défonçage, ce qui nous permet de conclure que le pré rodage des outils serait un paramètre intéressant à vérifier.

VI.2.5. Essais de défonçage sur des outils en acier

Une étude exploratoire a été faite sur des outils en acier de type 90CrMoV8, en fraisage de MDF. On sait que les outils à base d'acier sont surtout utilisés en première transformation du bois, mais on a voulu tester de tels outils en seconde transformation du bois revêtus afin de vérifier si le dépôt permettrait de remplacer un outil carbure par un outil acier revêtu ou pas.

La figure 2.2.44 montre l'évolution de l'usure en fonction de la longueur usinée. On constate que par rapport aux outils en carbure l'usure est très grande pour l'outil non traité. Par ailleurs, l'outil revêtu présente la même courbe d'usure que l'outil témoin. Après 600m de défonçage l'usure des deux outils est la même et elle se situe autour de 300µm, ce qui est une valeur bien au-delà des tolérances acceptées en industrie du bois (les outils sont en général changés dès que l'usure atteint 100µm). On voit bien sur cette figure presque un effondrement de l'arête juste après 700m de défonçage pour les deux outils testés.

Cet état de dégradation avancé de l'outil revêtu peut s'expliquer par la faible adhérence du revêtement. Le mode d'élaboration des outils a été l'usinage, contrairement aux outils en carbure qui sont frittés, de ce fait la qualité de la surface active s'est vue altérée par les vibrations générées lors de leur mise en œuvre (figure 2.2.45). La contrainte rencontrée lors

de la fabrication des plaquettes d'outil en acier, est leurs dimensions. Le mode de fixation de la plaquette sur le porte-outils nous oblige à prévoir des plaquettes en acier de mêmes dimensions que celles des outils en carbure, alors que la masse volumique est inférieure à celle des carbures. De ce fait, lors de l'usinage, des vibrations sont constatées sur les plaquettes ce qui se traduit par des bruits à la limite supportable mais qui contribuent aussi à la fragilisation du revêtement d'où la délamination du film de CrAlN.

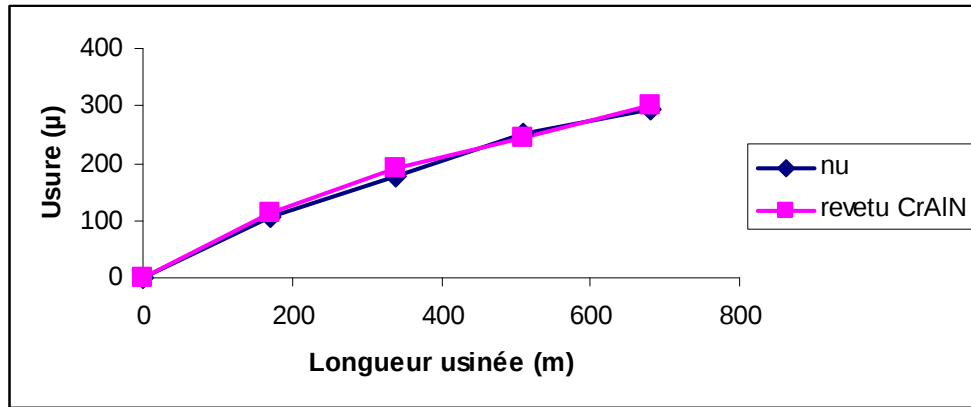
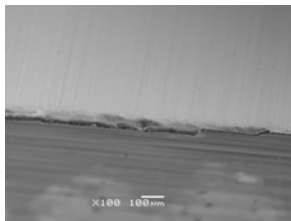
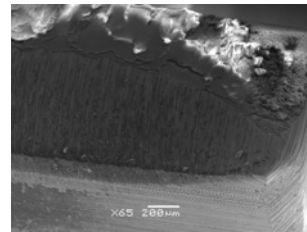


Figure : 2.2.44 : Evolution de l'usure des outils en acier revêtus ou non en fonction de la longueur d'usinage



Outil avant usinage



outil après usinage

Figure : 2.2.45 : Micrographie d'outils revêtus en aciers après 600m d'usinage.

Conclusion

Les essais de défonçage faits sur des outils en acier, ont montré que ces derniers ne sont pas adaptés pour le défonçage de MDF. Les outils revêtus n'ont pas donné de bons résultats. Il serait toutefois intéressant de faire d'autres essais sur du bois massif et non composite.

VII. Références bibliographiques

- [1] Makino Y., Setsuhara Y., Miyake S., Proc 9th Intl. Conf. on Ion Beam Modification of Materials, Canberra, Australia, Feb. 1995, pp. 735- 736.
- [2] Roos J.R., Celis J.P., Vancoille E., Veltrop H., Boelens S., Jungblut F., Ebberink J., Homberg H., Thin Solid Films 193-194, 1990, pp. 547- 552.
- [3] Sproul W.D., J. Vac. Sci. Technol., A 4, 1986, pp. 2874- 2879.
- [4] Sproul W.D., Rothstein R., Thin Solid Films, 126, 1985, pp. 257-262.
- [5] Vaz F., Rebouta L., Andritschky M., Da Silva M.F., Soares J.C., J. Mater. Process. Technol. 92–93, 1999, pp. 169-172.
- [6] Otani Y., Hofmann S., Thin Solid Films, 287, 1996, pp. 188- 195.
- [7] Munz W.D., J. Vac. Sci. Technol., A 4, 1986, pp. 2717- 2723.
- [8] Chiba Y., Omura T., Ichimura H., J. Mater. Res. 8 , 1993, pp. 1109-1111.
- [9] Bin T., Xiaodong Z., Naisai H., Jiawen H., Surface and Coatings Technology, 131, 2000, pp 391-392.
- [10] Kubinski J.A., Hurkmans T., Trinh T., Fleischer W., Van Der Kolk G.J., Plat. Surf. 1999, pp. 20-26.
- [11] Sue J.A., Chang T.P., Surface and Coatings Technology, 76–77, 1995, pp 61-65.
- [12] Matsumoto S., Zhang W., Diamond Relat. Mater, 10, 2001, pp. 1868-1872.
- [13] Mirkarimi P.B., Mc Cathy F.F., Medlin D.L., Mater. Sci. Eng. R21, 1997, pp. 47-51.
- [14] Inagawa K. J. Vac. Sci. Technol, A 5, 1987, pp. 2697-2702.
- [15] Kolitsch A., Wang X., Manova D., Fukarek W., möller W., Oswald S., Diamond Relat Mater, 8, 1999, pp. 110-18.
- [16] Makino., Nogi K., Surface and Coatings Technology, 98, 1998, pp.1008-1011.
- [17] Kimura A., Kawate M., Hasegawa H., Suzuki T., Surface and Coatings Technology, 169–170, 2003, pp. 367-374.
- [18] Harish C. Barshilia, N. Selvakumar, B. Deepthi K.S. Rajam, Surface and Coatings Technology, 201, 2006, pp. 2193- 2199.
- [19] Nouveau C., Etude de revêtements durs (CR_xN_y) obtenus par méthodes P.V.D. : réalisation et caractérisations. Applications a l'usinage du bois. Thèse de doctorat ENSAM de Cluny, n°21-2001
- [20] Labidi C, Amélioration de la durée de service d'outils d'usinage du bois par traitements de surface et préparation de l'arête de coupe, Thèse de doctorat, ENSAM de Cluny n°582007.2007.
- [21] Ding X Z., Zeng X.T., Surface and Coatings Technology, 200, 2005, pp. 1372-1377
- [22] Hirai M., Ueno Y., Suzuki T., Jiang W.H., Grigoriu C., Yatsui K., JPN. J. Appl. Phys, 40, 2001, pp.1056-1162.
- [23] Kim G.S., Lee S.Y., Surface and Coatings Technology, 201, 2006, pp. 4361-4370.
- [24] Reiter A.E., Derflinger V.H., Hanselmann B., Bachmann T., Sartory B., Surface and Coatings Technology, 200, 2005, pp. 2114-2120.
- [25] Hones P., Sanjines R., Levy F., Surface and Coatings Technology, 94-95, 1997, pp. 398-403.
- [26] Ding X.-Z., Zeng X.T., Surface and Coatings Technology, 200, 2005, pp.1372-1378.
- [27] Bobzin K., Lugscheider E., Nickel R., Bagcivan N., Kramer A., Wear behaviour of Cr1–xAlxN PVD-coatings in dry running conditions, Wear, 2007, in press.
- [28] Chala N., Dépôt de couches minces pour revêtements durs Application à la protection contre l'usure et la corrosion. Thèse de doctorat université de Biskra, 2005.
- [29] chekour L, Analyse des propriétés structurales et mécaniques de couches minces dures déposées par PVD, thèse de doctorat université de Constantine, 2003.

- [30] Beer P., Etude de l'influence des modifications de la surface de l'outil sur la qualité de la coupe par déroulage, Thèse de doctorat, ENSAM de Cluny, n° 1998-40.
- [31] Decès-Petit C., Etude des phases transitoires au cours du déroulage de bois, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Cluny, 1996.
- [32] Stewart, H.A., Tool forces and edge recession from cutting MDF. Forest Prod. J. 38, 1988, pp. 51–54.
- [33] Ravindra, H.V., Srinivasa, Y.G., Krishnamurthy, R.,. Modelling of tool wear based on cutting forces in turning. Wear 169, 1993, pp. 25–32.
- [34] Goli G., Aknouche H., Sandak J., Negri M., Nouveau C., Evaluation de la qualité du défonçage du pin d'Alep par une nouvelle méthode laser. 1^{er} Colloque Euro maghrébin sur les Bois Méditerranéen. Boumerdes Algérie. 2008.

Conclusions générales et perspectives

Les outils de coupe destinés à l'usinage du bois subissent des dégradations importantes causées par des phénomènes complexes. Les conséquences de ces dégradations affectent d'une manière négative la bonne marche des entreprises de transformation du bois. Les avancées technologiques dans les industries de transformations du bois se sont développées ces dernières années, mais cet essor est surtout axé sur l'automatisation des machines ; ce qui a fait augmenter les cadences imposées aux outils de coupe.

L'objectif principal de cette recherche est de trouver un moyen d'augmenter la productivité des outils de coupe dans l'usinage du bois.

L'application des revêtements durs a été le moyen retenu pour améliorer la tenue à l'usure des outils de coupe.

Dans le but d'augmenter la production, des améliorations ont été apportées aux outils existants. L'apparition de nouvelles nuances d'aciers en première transformation du bois, l'emploi d'outils en PCD en seconde transformation ainsi que l'utilisation de machines techniquement très performantes pour la préparation des outils ont permis d'augmenter la productivité. L'automatisation de l'appareil productif ainsi que l'amélioration technique des machines a imposé aux outils des cadences très poussées, ce qui pousse les outilleurs à prévoir des modifications aux outils de coupe. Des solutions pourraient provenir des modifications superficielles par des traitements structuraux et des revêtements durs.

Il est bien évident que la modification de la nature des surfaces des outils d'usinage par l'application de revêtements durs en couches minces ou bien par des traitements thermochimiques améliore la durée de service de ceux-ci. Face au grand choix de matériaux durs ainsi qu'au nombre croissant de techniques de revêtement et de traitement thermochimique, il n'est pas évident de choisir laquelle des techniques ou matériaux est plus adéquate pour les industries de bois.

Dans cette étude, les revêtements ternaires sont élaborés par pulvérisation cathodique puis testés en déroulage et fraisage du MDF. Le choix du nitrure de chrome comme base de ces revêtements est motivé par de nombreuses études qui présentent d'intéressantes propriétés mécaniques et tribologiques de ces nitrures. L'ajout de l'aluminium pour avoir des revêtements CrAlN qui sont considérés par certains chercheurs comme

De ce fait on a élaboré des revêtements CrAlN avec deux cibles Cr et Al en faisant varier la tension de la cible d'Al dans un premier temps et ensuite fixer celle de l'Al et faire varier celle de chrome, ce qui nous a permis de faire varier le pourcentage des deux composants et trouver le revêtement possédant les meilleures caractéristiques mécaniques, tribologiques et structurales.

La caractérisation de ces revêtements nous a permis de voir l'influence de l'Al sur la structure ainsi que la stabilité thermique et les propriétés mécaniques et tribologiques des films. On note quelques influences :

- L'addition de l'Al au système Cr-N améliore ses propriétés structurales et morphologiques. En effet, les couches deviennent mieux cristallisées et montrent une structure colonnaire.
- Les films de CrAlN présentent des contraintes résiduelles compressives qui varient de -1.1 GPa à -3.58 GPa, la valeur maximale a été obtenue pour un pourcentage de 30% d'Al.
- Les films de CrAlN sont stables jusqu'à 1000°C.

Notre étude nous a amenée à collaborer avec d'autres laboratoires de recherches notamment Montbéliard, ou un travail commun a été réalisé. Des tests d'usinage ont été réalisés sur des revêtements de CrSiN développé par ce laboratoire dans le cadre d'un projet de recherche, ainsi que du TiAlN déposé industriellement.

Des simulations d'usinage, en utilisant des opérations de défonçage et de déroulage sont réalisées afin de comparer le comportement des différents revêtements en usinage bois.

De cette comparaison, on a remarqué que leurs vitesses d'usure sont différentes pour les deux procédés envisagés.

Les tests de déroulage ont montrés que l'outil revêtu de CrSiN possède le recul d'arête le plus petite. Cet outil est d'autant plus intéressant que lors des tests de chocs pour simuler les nœuds, présente des micrographies de sa partie active la moins dégradée. Il est aussi intéressant de noter que les tests de qualités des surfaces déroulées avec différents outils a montré que l'outil revêtu de CrSiN est le mieux lotis.

Les tests de défonçage réalisé dans un premier temps pour les revêtements CrAlN, nous a renseigné que l'ajout n'améliore pas la tenue à l'usure, ce qui nous amène a retenir les outils avec des films de CrN.

Des tests sur l'opération de défonçage on été aussi réalisé pour les outils en CrSiN déposés a différents paramètres ainsi que ceux de TiAlN déposé industriellement.

Il s'en est suivi une étude comparative des trois films, cette dernière nous a montré que les outils de CrN développé au sein du LaBoMaP présenté une meilleur résistance à l'usure comparativement autres films considérés.

Bien que ce travail de thèse ait apporté quelques solutions à un certain nombre de problèmes liés à l'usure des outils de coupe du bois, il est donc évident que beaucoup d'autres pistes restent à explorer dans l'avenir :

- Etudier la stabilité thermique des films CrAlN à des températures élevées et sous différentes atmosphères.
- L'utilisation de traitements duplex par l'utilisation de techniques originales comme la PIII (implantation ionique en plasma immergé) in situ ou le rechargement laser,...
- Etude de la possibilité du pré rodage des outils avant les dépôts vu l'influence de la phase de rodage sur le comportement à l'usure des outils de coupe.
- Etude de la géométrie de l'outil en optimisant des micro- biseaux dans le cadre du déroulage.
- Explorer d'autres revêtements durs tels que le ZrBN qui reste encore non optimisé.

Annexes

Annexe 1

Activités dans le cadre de l'accord CMEP

Studies on wear properties of carbide tipped tools before and after CrN coating for routing application of Aleppo Pine

H. Aknouche¹, A. Zerizer², C. Nouveau¹, Y. Benlatreche¹

1 LaBoMaP ENSAM, Rue Porte de Paris, F-71250, Cluny, France,
hamid.aknouche@ensam.cluny.fr

2 LMMC Université M'Hamed Bougara, rue de la liberté Boumerdes
3500 Alegria, www.umbb.dz

Summary

This work aims to present an experimental step related to a technique of wood machining in order to evaluate wear for the case of the breaking up of the pine of Alep.

In our case the study has been done with on untreated and one CrN-coated carbide tools by magnetron sputtering.

The deposition conditions were already optimized in previous studies [1].

The coating microstructure was studied by X-ray diffraction (XRD), the chemical composition was obtained by energy dispersive X-ray analysis (EDX). Mechanical properties of these coatings were studied by scratch and microhardness testing. Morphology of coating surface, ball scars, wear tracks and wear debris were examined by scanning electron microscopy (SEM).

The routing machine was equipped with a numerical control **RECORDI**, manufactured by the Italian firm **SCM** spa and located at the ENSAM of Cluny.

Keywords: wear, PVD, carbide, CrN, routing.

Etude du comportement à l'usure des outils carbure nus et revêtus au CrN dans le domaine du défonçage du pin d'Alep

H. Aknouche¹, A. Zerizer¹, C. Nouveau², Y. Benlatreche²

- 1 LMMC Université M'Hamed Bougara, rue de la liberté Boumérdes
3500 Alegria,
- 2 LaBoMaP ENSAM, Rue Porte de Paris, 71250, Cluny, France

Résumé

Ce travail a pour objectif de présenter une démarche expérimentale liée à une technique d'usinage de bois afin d'évaluer l'usure pour le cas du défonçage du pin d'Alep, une essence bien implantée en Algérie.

Dans notre cas l'étude se fera sur deux outils de coupe en carbure dont l'un est revêtu de CrN, déposé par pulvérisation magnétron.

Les conditions de dépôts sont déjà optimisées par de précédentes études.

Les essais d'usure ont été réalisés sur une défonceuse à commande numérique de marque **RECORDI**, fabriquée par la firme italienne **SCM s.p.A** au niveau du laboratoire de l'ENSAM de Cluny.

Les revêtements des outils sont réalisés par PVD magnétron.

Mots clés : CrN, Revêtements, Pin d'Alep, Défonçage, Usure.

**Comparison of the surface quality of Aleppo Pine (*Pinus halepensis* Mill.):
different tool materials evaluated by using non-contact laser sensor
on a novel-approach wood specimen (wood-wheel)**

Aknouche H.¹, Sandak J.², Goli G.³, Negri M.², Nouveau C⁴

1. Université M'hamed Bougara - Boumerdès (Algeria)

2: IVALSA/CNR - San Michele all'Adige (Italy)

3. DISTAF – University of Florence (Italy)

4. LaBoMaP- ENSAM de Cluny (France)

Introduction

The final quality of wood machined is strictly connected with the grain orientation toward the cutting vector. By machining a novel kind of wood specimen wheel-shaped by peripheral routing, we notice that the quality along the wheel profile changes very much depending on the grain direction. This is because a wheel is made of two semi-portions of 180° each, where the grain orientation changes continuously. In fact the process evolve from processing along the grain to processing with the grain, and then processing on top to processing against the grain and then to come back again to processing along the grain. Being well known that processing with different grain orientations leads to get very different surface quality this property can be used as fast method in order to compare different processes and the resulting final qualities. The use of laser technologies in order to estimate the final quality of a surface obtained processing a wood wheel can be then used as a fast method to compare processes and materials. The machining of a wheel in fact is a very rapid task using a CNC machine and the same for its analysis by using laser technologies. The idea of using rounded shapes to generate defects has already been used by Cyra [1996] in order to verify the behaviour of adaptative control systems, but the use of a wheel as fast method in order to compare processes has never been introduced before.

Keywords: Aleppo Pine, laser sensor, wear, routing.

Influence de l'orientation du fil sur les efforts de coupe dans le défonçage du Pin d'Alep

H. Aknouche¹, A. Zerizer¹, C. Nouveau², R. Marchal², J.C. Butaud²

1 **L.M.M.C** Université M'hamed Bougara de Boumerdes

2 **La.Bo.Ma.P** CER E.N.S.A.M Cluny France

Résumé

Ce travail a pour objectif de présenter une démarche expérimentale liée à une technique d'usinage de bois afin de mesurer la variation des efforts de coupe pour le cas du défonçage du pin d'Alep, une essence bien implantée en Algérie. Comme l'orientation du fil à une importance primordiale sur le comportement du bois, ce travail permettra aussi de proposer une méthode de mesure des efforts de coupe en fonction de l'orientation du fil.

L'acquisition des efforts de coupe nous renseigne sur la qualité des surfaces usinées ainsi que sur l'état de l'usure des outils.

Pour cela, un outil carbure a été utilisé, ainsi qu'une table dynamométrique kistler 9257A à trois axes montée sur une défonceuse 3 axes à commande numérique pour l'acquisition des efforts de coupe (fig1).

Les résultats sont traités à l'aide d'un logiciel DASYLAB.



Fig. 1. Défonceuse 3 axes à commande numérique

Mots clés : Pin d'Alep, Défonçage, Usure, orientation du fil, table Kisler.