

ENDOMMAGEMENT DES OUTILS DE COUPE DU BOIS

I.1.1. Introduction

Lorsque l'on parle d'usinage, bon nombre de personnes pensent systématiquement aux procédés de transformation des matériaux métalliques, plastiques mais presque jamais à l'usinage du bois, pensant abusivement que l'étude de sa coupe est aisée et sans intérêt.

Cette idée fautive est souvent confortée par le fait que d'une part, le bois possède une dureté relativement faible comparée à celle d'autres matériaux et d'autre part, que *ce matériau rustique* n'est actuellement pas utilisé dans les technologies dites 'à la mode' telles que l'aérospatial, le nucléaire ou l'armement militaire.

Or, le secteur de la coupe du bois reste un domaine où les enjeux économiques sont considérables. On réalise actuellement l'importance d'utiliser des matériaux salutaires à l'environnement. De nombreux pays portent une attention toute particulière à la sauvegarde de leurs forêts en les considérant comme une ressource naturelle rare. Si l'on prend l'exemple du Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) avec ses 350 000 ha de peuplement et ses 50 millions de m³ sur pied, la France dispose de plus de la moitié de la ressource européenne.

De nos jours, le bois est employé dans des domaines tels que le bâtiment et le génie civil où le béton et l'acier régnaient en maîtres. Au Canada, la construction d'immeubles de plusieurs étages en bois se développe. Au Brésil, le secteur forestier est responsable d'un revenu annuel de 11 milliards de \$, équivalent à 4% du revenu national brut. Ce secteur emploie 600 000 salariés et touche indirectement 3,5 millions de personnes [1].

Par ailleurs, la production mondiale de matériaux dérivés de bois tels que le MDF (Medium Density Fiberboard) ne cesse d'augmenter (figure.I.1.1). En Chine, la consommation de MDF est actuellement la plus importante d'Asie. Comme exemple, le volume produit de MDF en 1995 dans ce même pays était de 702 000 m³. Le Japon est également un pays où l'utilisation des matériaux dérivés de bois est importante. Les consommations de poutres en lamellés collés et panneaux de LVL (Laminated Veneer Lumber) en 1997 étaient respectivement de 1 100 000 et 187 000 m³.

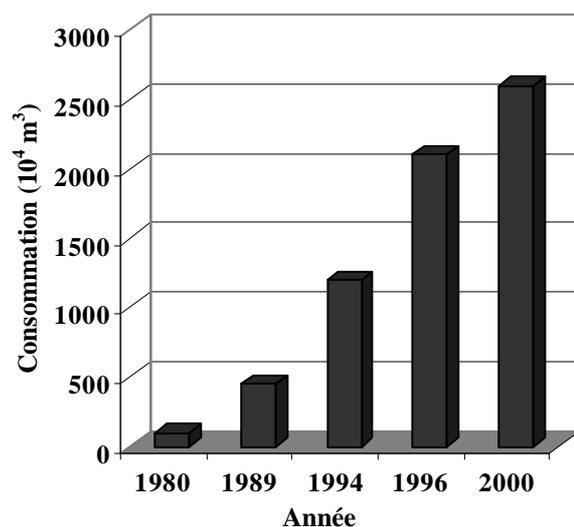


Figure.I.1.1 : Consommation mondiale de MDF [1]

Cependant, il est à souligner que les coûts de production liés à la mise en oeuvre de ces matériaux en bois massif ou dérivés seraient réduits si les outils utilisés dans l'industrie du bois ne subissaient pas des dégradations prématurées lors du procédé d'usinage. Ceci se matérialisant par des pertes économiques conséquentes causées par : des pertes de

production qu'engendrent le changement fréquent d'outils, une élévation des efforts de coupe qui se traduit par l'augmentation de la consommation d'énergie, des vibrations d'outil qui se propagent à l'ensemble de la machine mais surtout, une mauvaise qualité du produit final [2].

De nombreuses interactions se produisent dans la zone de coupe induisant des frottements, des déformations élastiques et plastiques, des réactions chimiques ainsi que de la chaleur générée [3]. L'industrie du bois possède peu de connaissances en ce qui concerne les phénomènes de dégradation des outils. Le nombre important de paramètres entrant en jeu durant l'usinage ainsi que la grande variabilité du matériau bois à usiner rendent difficile la prédiction du comportement des outils [4].

Pour mieux appréhender et comprendre les problèmes auxquels sont soumis les outils de coupe, il faut différencier les deux grands secteurs de la coupe du bois que sont la première et la seconde transformation du bois.

I.1.2. Endommagements des outils utilisés en première transformation du bois (bois vert)

Contrairement aux ébauches métalliques homogénéisées par un traitement thermique adéquat, le bois vert ne présente pas les mêmes propriétés mécaniques sur tout le volume à usiner. En effet, le bois est un matériau hétérogène (figure.I.1.2) [5]. Selon la zone de bois (aubier, duramen, nœud, cernes, etc), 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.

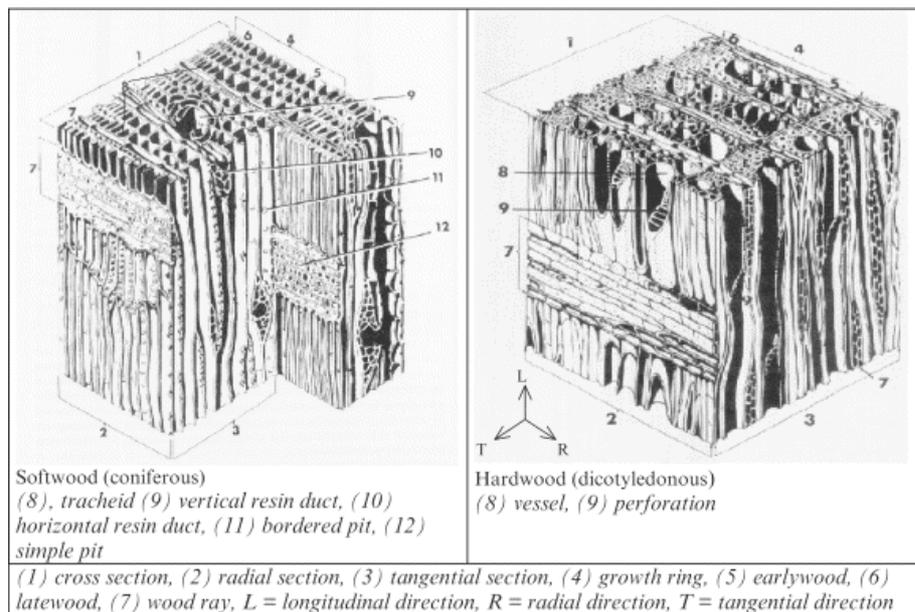


Figure.I.1.2 : Structure cellulaire du bois [5]

De plus, et à l'inverse des matériaux usinés en seconde transformation du bois (généralement des dérivés relativement homogènes), le bois travaillé en première transformation est du bois vert (produit de la forêt).

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.

I.1.2.1. Géométrie des outils

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.I.1.3 montre des exemples d'objets trouvés dans une scierie.



Figure.I.1.3 : (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 [6].

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.

I.1.2.2. Outils aciers

Bien que l'optimisation des conditions de coupe (vitesse de coupe et d'avance, géométrie de l'outil, état de surface, etc) soit importante pour améliorer la durée de vie des outils [7], la connaissance de leur nature et de leurs propriétés est nécessaire dans la prédiction de leur comportement lors du procédé d'usinage.

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.

Afin d'essayer de comprendre la raison du choix des aciers et de faire une synthèse des aciers les plus utilisés en industrie de la coupe du bois, les principaux fabricants et fournisseurs (français et étrangers) ont été consultés. Il en découle que la fluctuation des cours des aciers 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.I.1.4).

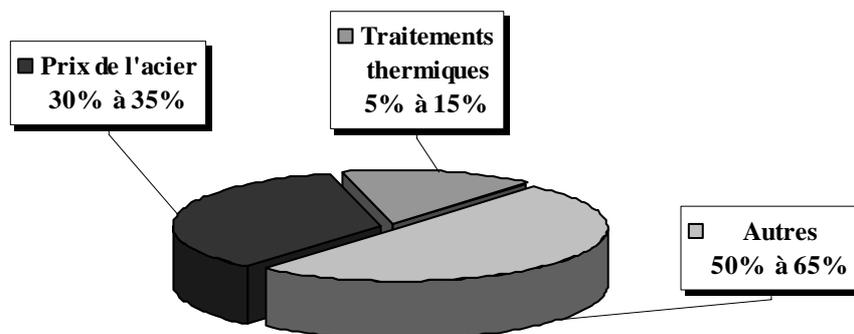


Figure.I.1.4 : Répartition en pourcentage des coûts de production des couteaux de broyage de la société SOGELAM

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 accentue leur endommagement prématuré.

I.1.2.3. Phénomène de corrosion des outils

Dans la littérature, il est admis que seuls les propriétés mécaniques des essences de bois et les paramètres de coupe 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 [8]. 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 [9]. En effet, usiner un bois acide tel que le chêne génère une usure d'outil 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 [4].

Par ailleurs, Kaminski *et al.* [9] affirment 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 [10,11].

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

I.1.3. Problématique des outils utilisés en seconde transformation du bois (dérivés de bois)

Contrairement aux bois usinés en première transformation (bois massif), dans ce secteur on emploie généralement des matériaux à base de bois. L'industrie des matériaux dérivés est relativement jeune (début des années 40) et depuis s'est 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.....) [7].
- L'abondance de résines synthétiques
- L'homogénéité des matériaux ainsi reconstitués
- Un large panel de dimensions
- La compatibilité des produits pour une grande variété d'utilisation (meubles, construction de bâtiments,) ce qui en a fait un matériau avec de nombreux débouchés.

L'utilisation très importante de matériaux dérivés du bois a créé le besoin d'obtenir des outils de hautes performances de coupe, capables de résister 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 [12-14].

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. L'utilisation de ceux-ci a augmenté de façon significative la productivité des industries qui les emploient. Jusqu'à présent ce type d'outils reste le plus utilisé [1].

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. 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. Wayan *et al.* [15] notent 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, Wayan *et al.* [16] constatent 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 [17] 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 due au frottement de l'arête des outils contre le bois agit principalement sur le liant cobalt des outils carbures conduisant 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 [18] 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 devenue ainsi le deuxième domaine d'utilisation de ces outils après le secteur automobile où les outils en PCD sont les plus employés [1]. 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.

I.1.4. Conclusion

Il est évident que les outils d'usinage du bois subissent des dégradations de leur arête coupante, causées par différents phénomènes complexes et qui se produisent dans bien des cas simultanément. Ces endommagements, conduisent à des pertes économiques conséquentes en industrie 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. Le changement des 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.

Par contre, comme les outils n'ont pas subi de modifications, le secteur de l'usinage du bois connaît toujours les mêmes limitations liées à leur usure prématurée. Une solution pourrait provenir de la modification superficielle des outils par des traitements structurels et des revêtements durs. Bon nombre d'études ont été menées sur ce sujet et les constats sont plus qu'encourageants.

I.2. LES MODIFICATIONS SUPERFICIELLES

Introduction

Nous avons réalisé une recherche bibliographique sur les revêtements durs les plus étudiés et utilisés afin d'envisager quels seraient les plus avantageux pour améliorer la durée de vie des outils de coupe du bois.

I.2.1. Les revêtements durs en couches minces

Durant les dernières décennies, les revêtements durs en couches minces ($< 10\mu\text{m}$) déposés par méthodes CVD (dépôt chimique en phase vapeur) puis un peu plus tard par méthodes PVD (dépôt physique en phase vapeur) n'ont cessé d'être introduits dans de nombreux secteurs industriels tels que l'outillage pour l'usinage des matériaux métalliques et plastiques et dans d'autres secteurs métallurgiques tels que le moulage, le matriçage, l'estampage et le poinçonnage afin de palier aux problèmes d'usure et de dégradation de surface des composants métalliques sollicités.

Si l'on prend l'exemple de l'UGV (Usinage Grande Vitesse), l'augmentation de la vitesse de coupe génère une augmentation de la chaleur dissipée vers l'outil ce qui peut provoquer soit la dissolution du matériau de l'outil soit une usure chimique et par conséquent la rupture de l'outil. L'augmentation de la vitesse d'avance provoque d'importantes contraintes mécaniques qui causent au niveau de l'outil une déformation plastique avec pour conséquence l'apparition d'ébréchures et donc l'endommagement de l'arête de coupe.

Par ailleurs, la faible conductivité thermique des revêtements durs génère une barrière thermique sur la surface de l'outil diminuant le transfert de chaleur au cœur de l'outil et favorisant sa dissipation et son évacuation à la surface de coupe avec le copeau produit [19].

Les composants métalliques tels que les moules, les matrices ou d'autres pièces travaillant en usure peuvent être sujets à des dégradations intensives lors du traitement de matériaux métalliques [20], composites ou plastiques qui libèrent du S, F ou Cl lors de l'opération de formage. Cet endommagement est attribué à de l'usure combinée, corrosive et abrasive. Il réduit considérablement la durée de vie de ces composants et a une incidence directe sur la productivité et la qualité du produit [21]. L'application de revêtements durs en couches minces a prouvé son efficacité contre ces phénomènes [20-23].

En général, les revêtements durs se subdivisent en deux groupes : les revêtements possédant une dureté < 40 GPa et les revêtements super durs avec des duretés > 40 GPa. Comparés à un grand nombre de revêtements, ils ne sont que quelques uns à présenter ces propriétés de « super dureté » : le nitrure de bore cubique (c-BN), le carbone amorphe (DLC), le nitrure de carbone amorphe (a-CN_x) et le diamant polycristallin (PCD). Cependant ces revêtements super durs sont instables thermodynamiquement et connaissent une limitation d'utilisation dans plusieurs applications. Pour l'instant, du fait de la haute affinité que possède le carbone pour le fer, l'application des outils de coupe revêtus diamant est limitée à l'usinage de l'aluminium et de ses alliages et à

l'usinage du bois. L'application des revêtements c-BN trouve des problèmes similaires lors de l'usinage des aciers dus à la dissolution chimique du bore dans le fer [24].

Aussi, ces propriétés de dureté sont en étroite relation avec les conditions d'élaborations. Les méthodes de dépôts en font partie, d'où l'intérêt de les décrire.

I.2.1.1. Méthodes de dépôts

A la fin des années 60, les premiers revêtements CVD étaient appliqués aux outils de coupe de l'industrie du métal. Ces revêtements étaient tous à base de titane [19] mais étant donné que l'élaboration de ces revêtements nécessite l'utilisation de hautes températures (900-1000°C) [19,24], il s'est avéré que les techniques de dépôts PVD ne travaillant qu'à des températures <400°C ont été préférées, en particulier pour l'application de revêtements réfractaires sur aciers. Employant de faibles températures lors du dépôt, les PVD permettent d'éviter la dégradation des propriétés mécaniques de surface et minimisent les problèmes dus à des contraintes thermiques d'expansion entre le substrat et le dépôt [25].

Les premiers revêtements PVD ont été introduits au milieu des années quatre-vingt. Depuis, des progrès ont été amenés à ces méthodes et ont permis l'obtention de nouveaux revêtements avec des propriétés spécifiques jusque-là jamais atteintes par les méthodes CVD conventionnelles [19].

Il a ainsi été prouvé depuis de nombreuses années, que l'application de revêtements durs en couche mince par différentes méthodes de dépôts PVD sur les outils d'usinage, améliore nettement les performances de ceux-ci [26].

Les avantages des couches minces élaborées par ces méthodes allient une haute résistance à l'usure, une bonne ténacité, une bonne stabilité chimique et thermique ainsi qu'un faible coefficient de frottement [26,27].

Pour toutes les raisons évoquées ci-dessus et dans un souci de préserver les propriétés superficielles des outils, nous avons utilisé dans nos travaux principalement des films minces élaborés par méthodes PVD afin d'éviter toute altération potentielle de la surface des échantillons revêtus. Les méthodes de dépôts PVD utilisées lors de ce travail de thèse seront décrites dans les chapitres II.1.1.1 et II.1.1.2 de ce mémoire.

I.2.1.2. Les revêtements durs à deux composés « binaires »

Les nitrures des métaux de transition (tels que TiN, CrN, HfN, ZrN, NbN,...) forment une gamme très étendue de matériaux possédant des propriétés physiques intéressantes, grâce auxquelles ils sont très utilisés dans de nombreuses applications industrielles. Ces revêtements durs présentent une haute dureté mécanique combinée à une bonne stabilité thermique et chimique. L'optimisation de ces revêtements est aisée. En effet, on peut ajuster des propriétés comme le paramètre de maille, la dureté, l'élasticité, le coefficient d'expansion thermique ou le comportement en corrosion pour les optimiser. TiN (nitrure de titane) et CrN (nitrure de chrome) font partie des revêtements les plus employés [28].

Le nitrure de titane TiN est le plus ancien des revêtements PVD [20]. Il a fait l'objet de nombreuses études depuis le début des années 80. Ses propriétés particulières ont conduit à son application aussi bien comme couche anti-usure sur les outils de coupe

[20,21] que comme substitut de l'or dans la joaillerie. Il a été utilisé aussi dans la technologie des circuits intégrés comme barrière de diffusion [25]. En raison de son efficacité dans différentes applications industrielles, TiN reste à ce jour le revêtement le plus utilisé. Il représente 90 % du marché des revêtements [28].

Lors d'une étude comparative menée par Rodríguez *et al.* [28] il s'avère que le TiN déposé par méthode PVD (évaporation par arc) possède la valeur de dureté la plus élevée comparée au CrN et ZrN déposés par la même méthode. De par sa haute dureté, TiN est un bon candidat à l'augmentation de la résistance à l'usure des outils de coupe, et des composants sollicités en usure. Cet un revêtement également très performant dans les milieux corrosifs [21,29]. Une étude menée par Sung *et al.* [30] montre que l'application d'une couche de TiN 'Balinit A' d'une épaisseur de 4 μm sur la paroi d'un tube *zircaloy-4* utilisé comme barre de combustible dans les centrales nucléaires coréennes permet de diminuer l'usure de ce dernier d'un facteur allant de 1.2 à 3 fois comparé à un tube non revêtu. Xu *et al.* [31] ont montré auparavant que TiN était plus efficace pour une même application que MoS_2 .

En contrepartie, l'utilisation du nitrure de chrome CrN est très répandue dans de nombreuses applications industrielles où il est nécessaire d'avoir un revêtement qui possède une bonne protection contre l'usure adhésive et corrosive. Généralement ce matériau est employé pour revêtir les moules pour l'injection des plastiques et les matrices pour le formage des métaux [30,32]. De récentes études indiquent que le CrN possède une haute résistance à l'oxydation, un faible coefficient de frottement et une haute ténacité [33]. Bien que ce revêtement présente une dureté inférieure à la majorité des revêtements durs, Rodríguez *et al.* [28] ont montré que le CrN comparé à TiCN, TiN, ZrN ou AlTiN possède la vitesse d'usure la plus faible lors de tests effectués par Calowear avec une bille en acier (100Cr6). Par ailleurs, ces dernières années CrN attire de plus en plus l'attention des chercheurs pour son application contre l'usure et la corrosion des outils de coupe. On trouve aujourd'hui sur le marché des outils revêtus CrN [32].

Quand à TiC, il montre des propriétés similaires au TiN [29]. Le BN a prouvé sa capacité à augmenter la durée de vie de certains composants exposés à des environnements corrosifs et érosifs utilisés en industrie des polymères [21].

Le nitrure d'aluminium AlN a été développé vers la fin des années 1960. Il a été obtenu par méthode CVD. Ce revêtement possède une bonne stabilité thermique et chimique, une grande résistivité électrique et un grand gap optique (6 eV). Les couches minces d'AlN sont des candidats pour des applications plus larges, comme la passivation des circuits électroniques ou la résistance à la corrosion. Inoue *et al.* [34] suggèrent qu'une couche de nitrure d'aluminium possédant un gradient de composition (passant de Al à AlN) peut avoir une plus grande conductivité thermique comparée à une monocouche d'Al ou d'AlN pur et est sujette à de moindres contraintes thermiques [24].

Un autre dépôt dur, ZrN est utilisé comme revêtement pour la coupe des matériaux non ferreux tels que les alliages d'aluminium et nickel [28]. Enfin, le nitrure de bore cubique c-BN, cité précédemment, est un revêtement super dur. Une récente étude menée par Keunecke *et al.* [35] montre que la valeur de dureté de ce revêtement mesurée par nanoindentation est de 65 GPa et que la vitesse d'usure abrasive est clairement inférieure à la vitesse d'usure du TiN.

I.2.1.3. Les revêtements durs à plusieurs composés

Sur la base des composés binaires tels que TiN et TiC, plusieurs stratégies ont été adoptées pour améliorer et adapter les revêtements durs à des problèmes tribologiques spécifiques. Une des approches adoptée est la synthèse de revêtements multicomposés en ajoutant des éléments métalliques ou non aux composés binaires [27].

Les effets dominants dans les systèmes à plusieurs composants sont principalement la formation d'une structure multiphasées permettant une meilleure stabilité thermique et mécanique, la précipitation de phases durcissantes et la formation d'une couche externe (généralement protectrice contre l'oxydation) qui résulte d'une réaction secondaire.

Ainsi l'augmentation du nombre de composants dans le revêtement permet l'obtention d'une microstructure plus fine, une taille de grains plus faible conduisant à une plus grande résilience et élasticité mais aussi à l'absence d'une interface discrète, à de faibles contraintes internes et à une grande résistance à la corrosion [24].

Les premiers revêtements multicomposés qui ont montré de bonnes propriétés sont TiCN et TiAlN généralement utilisés en UGV [27-29]. TiCN est surtout approprié pour réduire l'usure abrasive des arêtes de coupe des outils [28]. TiAlN présente une dureté supérieure à celle de TiN et ceci améliore considérablement la résistance à l'usure abrasive. Sa résistance à l'oxydation est aussi supérieure grâce au fait qu'à haute température, TiN s'oxyde (formation de TiO_2 qui fragilise le revêtement) alors que dans la matrice de TiAlN se forme de l'alumine Al_2O_3 qui joue le rôle de barrière thermique et de diffusion [36]. Ce revêtement possède une température d'oxydation supérieure (200 °C de plus que TiN et CrN) [28]. Dans le processus de perçage, les forets revêtus TiAlN permettent d'améliorer la durée de vie de 3 à 4 fois plus que les forets revêtus TiN. Ces avantages sont dus aux excellentes propriétés thermophysiques, tribologiques et mécaniques que possède ce revêtement. En raison de ces faits, des outils revêtus peuvent être utilisés pour différentes opérations telles que l'UGV comme cité précédemment ou l'usinage avec ou sans lubrification [37].

Il a également été montré que l'addition d'une faible quantité de Cr et Y procure une amélioration de la résistance à l'usure spécialement à haute température de TiAlN [9]. En effet, Yamamoto *et al.* [38] ont observé que la température d'oxydation de (Ti,Cr,Al)N est de 1000°C tandis que la température d'oxydation du TiAlN est de 850°C. Une comparaison des deux revêtements sur outils carbures a été effectuée en fraisage grande vitesse d'acier moulé (AISI H13) et il en a résulté que le (Ti,Cr,Al)N permet une usure plus faible de l'outil après 70 m d'usinage comparé au TiAlN après 50 m (seuil de fin de vie de l'outil).

Merl *et al.* [39] ont étudié la corrosion électrochimique du carbonitride de chrome Cr-(C,N) et de CrN appliqués sur acier et ont montré que Cr-(C,N) permet d'améliorer la résistance à la corrosion de 2 à 6 fois alors que CrN permet une amélioration de 2 fois.

De plus, la résistance à l'oxydation de CrTiN est meilleure que celle des monocouches TiN et CrN [36]. Une étude comparative entre CrTiN, un super-réseau TiN/NbN et un super-réseau de carbone composite appliqués sur des poinçons en SKH51 et testés en estampage, montre que le CrTiN augmente significativement la durée de vie des poinçons non revêtus (3 à 4 fois) et qu'il se comporte dans cette application beaucoup

mieux que les autres revêtements. Ceci est sans doute dû à sa haute dureté, une bonne adhérence et son faible coefficient de frottement [23]. Des mesures de nanoindentation montrent que le CrWN et le CrNbN possèdent des valeurs de dureté respectivement de 27 et 24,5 GPa [33]. Lors d'une autre étude CrVN semble montrer le plus faible coefficient de frottement et le plus faible volume d'usure comparé à CrN et CrAlN [34].

I.2.1.4. Les revêtements durs multicouches

Bien que les revêtements durs monocouches trouvent une étendue d'application dans de nombreux secteurs technologiques, il reste encore plusieurs domaines où les propriétés de ces couches restent insuffisantes [40]. Une solution pour surmonter ces insuffisances est l'utilisation de revêtements multicouches qui combinent les propriétés attractives de chaque couche et, en même temps, présentent de nouvelles propriétés.

En effet, l'augmentation du nombre d'interfaces empêchent la migration des dislocations et donc conduit à l'augmentation de la dureté. On peut prendre comme exemple l'application d'une couche interfaciale qui améliore l'adhérence ou l'application d'une couche externe d'un matériau inerte résistant à l'usure pour réduire la corrosion des outils de coupe. L'introduction d'un grand nombre d'interfaces parallèles au substrat peut guider les fissures ou servir de barrière à la propagation de dislocations augmentant ainsi la ténacité et la dureté du revêtement [41].

En ce qui concerne les applications anti-corrosion, des tests ont montré que dans une solution saline (NaCl 9%) et acide (HCl 3,4%) une sous-couche métallique de Ti, dans le cas du revêtement de TiN-TiAlN, et une sous couche de Cr, dans le cas du CrN, augmentent la résistance à la corrosion [21]. Lors d'une autre étude, il a été montré que la résistance à l'oxydation des multicouches TiN/CrN est largement supérieure à celle du TiN et CrN [41]. La résistance à l'usure de la multicouche Ti/TiN est également supérieure à celle de la monocouche TiN ou Ti pur, pour une même épaisseur [42].

Schulz *et al.* [20] ont montré que l'application d'une couche de TiN avec une couche intermédiaire de Ti, d'une épaisseur totale de 2,4 μm , obtenue sur un outil de formage de glissière en acier à faible teneur en carbone (à partir de feuillés d'acier et d'aluminium) par pulvérisation magnétron R.F permet de réduire l'usure de ce dernier et d'augmenter la force normale de contact.

De plus, Harris *et al.* [43] ont montré que l'application d'une couche de TiN (3 μm) et d'une bicouche de TiAlN (0,8 μm) / TiN (1,2 μm), sur la surface d'un foret en acier rapide à forte teneur en cobalt, permet d'augmenter sa durée de vie de respectivement 1,4 et 2,6 fois, lors de l'usinage à sec de fonte grise.

La multicouche CrAlN + C/C (trois couches : CrAlN, CrAlN + carbone graphite déposé dans une atmosphère réactive (N_2), puis une couche de graphite C) présente une dureté de 29 GPa, un module d'Young de 415 GPa et un faible coefficient de frottement (de 0,4 après 300 m de frottement lors du test du pion-disque). Ce revêtement est un très bon candidat pour les applications de perçage et d'usinage [37].

Une étude menée par Grimanelis *et al.* [44] a montré qu'un revêtement duplex, composé d'une couche de CrTiBCN, et d'une couche supérieure C/CrTiB, appliqué sur des têtes

de fraises possède un meilleur rendement que TiN monocouche lors de tests sous des conditions réelles d'usinage.

Les propriétés intrinsèques de quelques multicouches au terme d'une étude menée par Ding *et al.* [45] sont résumées dans le tableau.2.1. Tous ces revêtements possèdent une dureté supérieure à la dureté du TiN (21GPa).

Multicouches	Dureté (GPa)	Module d'Young (GPa)
TiN/TiCN/TiC	26	355.4
Al ₂ O ₃ /TiC/TiCN/TiC	27.8	263.9
TiN/TiCN/TiC/TiCN/TiC	21.3	292.9
TiN/TiCN/TiC/TiCN/TiC/TiCN/TiC	25.4	354.2

Tableau.I.2.1. Propriétés intrinsèques de quelques revêtements multicouches étudiés par Ding *et al.* [45]

I.2.1.5. Les revêtements durs en super-réseaux

Récemment, une attention particulière a été prêté aux multicouches (métaux ou nitrures) avec une période de quelques nanomètres. Ces multicouches sont connues sous l'appellation de super-réseaux ou hétéro-structures.

Plusieurs études ont été menées sur cette nouvelle génération de multicouches : métal/métal (Cu/Fe, Al/Cu, Al/Ag, Cu/Ni) et céramiques (Ti/TiN, TiN/NbN, TiC/TiB₂, TiC/Mo) et montrent que leur dureté varie et peut atteindre 70 GPa. Il a été défini que les propriétés mécaniques de ces super-réseaux dépendent fortement de la période de modulation λ [35]. En effet, en augmentant le nombre de couches, donc la période λ , on augmente la résistance à l'usure [42]. Pour une période de 7 nm, les tests de nanoindentation sur un super-réseau WC-CrAlN montrent que la valeur de la dureté du film est de 40 GPa [24].

Le coefficient de frottement d'un super réseau TiN/CrN en contact avec du carbure de tungstène est de l'ordre de 0,75-0,95, donc plus faible que celui de TiN commercial (1,0-1,20) et présente une résistance à l'usure plus importante. Avec une dureté maximale de 35,4 GPa, il a été montré que l'usure diminue de 9 % par rapport au TiN [46].

En plus de leur haute dureté, les super réseaux peuvent procurer une haute résistance à l'oxydation (TiN/CrN [47]), une amélioration de la ténacité (TiN/NbN [48]), un faible coefficient de frottement (TiAlN/VN [49]) et une haute stabilité thermique (TiN/NbN [50] ou TiN/AlN [51]). Ces revêtements sont également connus pour leur résistance à l'usure. En effet, les poinçons d'estampage revêtus d'un super réseau CrN/NbN [23] montrent une résistance à l'usure faible et des performances en terme de durée de vie augmentées.

I.2.2. Les traitements structuraux (traitements thermo-chimiques)

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.

I.2.2.1. 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 [52].

C'est un traitement thermo-chimique 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 .

I.2.2.2. La nitruration par implantation ionique

La nitruration par implantation ionique fait partie des principaux procédés de nitruration appliqués aux outils en aciers [53]. Ce procédé consiste à former autour des pièces à traiter un plasma contenant des ions d'azote réactifs qui grâce à des tensions de quelques kV à quelques centaines de kV, viennent bombarder la surface de la pièce à traiter [54]. 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 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 (figure.I.2.1)

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.I.2.1). Ces deux paramètres suffisent à caractériser, en première approximation, la pénétration d'un ion dans une cible.

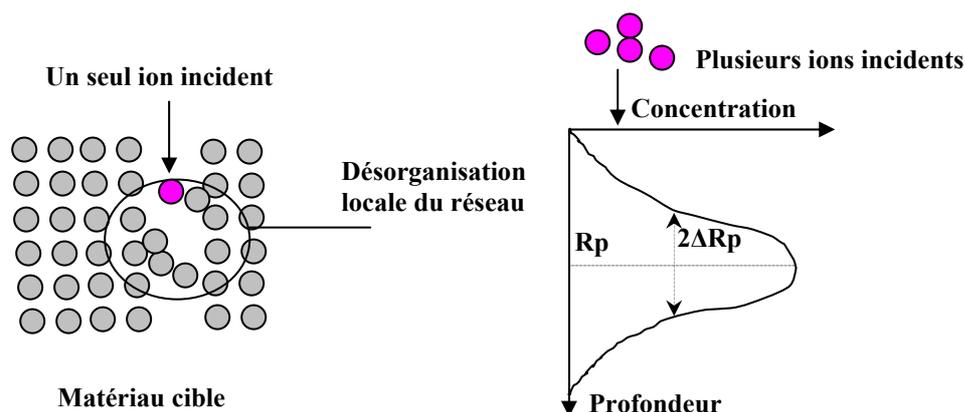


Figure.I.2.1 : Principe de l'implantation ionique [54]

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 surface initiale 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 [55-58]. 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,.....).

I.2.3. Conclusion

Il est évident que modifier la nature de la surface des outils d'usinage ou des composants métalliques par l'application de revêtements durs en couches minces ou bien par des traitements thermochimiques améliore la durée de vie de ceux-ci. Ceci étant, face à ce grand panel de matériaux et procédés ainsi que les tests mécaniques employés, dire quel va être le traitement le plus efficace à appliquer aux outils de coupe du bois n'est pas évident et nécessite de s'intéresser aux travaux de recherche effectués dans ce domaine.

I.3. APPLICATION DE TRAITEMENTS DE SURFACES À L'USINAGE DU BOIS

I.3.1. Introduction

Comme nous l'avons vu précédemment, l'application de traitements de surface aux outils d'usinage des matériaux métalliques et plastiques a connu un succès fulgurant ces dernières années en permettant d'augmenter considérablement leur durée de vie.

De ce fait, l'idée d'appliquer cette même technologie aux outils de coupe du bois afin de remédier aux problèmes de leur usure prématurée était évidente. Après quelques années de recherche, les laboratoires travaillant sur ce thème ont admis qu'il n'était pas aussi aisé d'appliquer ce genre de traitements de surface à l'usinage du bois. Le problème majeur qui se manifeste le plus souvent est la délamination du revêtement à cause d'une faible adhérence.

Néanmoins, les résultats obtenus jusqu'à présent à l'issue d'un bon nombre d'études réalisées dans leur majorité sur des appareillages de laboratoire sont assez prometteurs. Ainsi, par l'application de revêtements durs il a été constaté une augmentation de la résistance à l'usure des outils, mais aussi une diminution des efforts de coupe, du niveau des nuisances sonores, de la consommation d'énergie et une augmentation de la qualité des produits finis.

I.3.2. Travaux réalisés dans le domaine de la coupe du bois

Cette étude bibliographique est un complément d'informations sur les investigations effectuées dans le domaine des traitements de surfaces d'outils destinés à la coupe du bois et de ses dérivés. Elle a été effectuée également afin de décider quelles seraient les modifications de surface à étudier dans ce présent travail.

Des recherches bibliographiques sur ce même thème ont été effectuées dans le cadre du travail de thèse de P. Beer [6] et C. Nouveau [59]. Dans ce qui suivra, sont résumés les articles parus dans des revues scientifiques ou dans des actes de conférences en relation avec les travaux de recherche sur les revêtements durs en couches minces applicables à l'usinage du bois et de ses dérivés.

En ce qui concerne l'application de CrN en usinage du bois, lors d'une étude menée par Djouadi *et al.* [60], 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 qui a permis une réduction de l'usure de l'arête par un facteur de 8 après 8000 m d'usinage.

Par ailleurs, 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.* [61] 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 distorsion 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 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 [62]. 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 connu l'application de multicouches et super-réseaux comme en usinage des métaux et alliages métalliques. Santos *et al.* [63] 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.* [64] ont revêtu de TiN, Ti(N,CN) ou TiAlN₂, réalisés par méthode PVD, des plaquettes carbures. 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 observée par une 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 [65]. Les multicouches TiN/AlN ont montré une meilleure résistance à l'usure quelle que soit la vitesse de coupe.

Pinheiro *et al.* [7] ont constaté, après avoir testé une gamme de revêtements ternaires en défonçage d'OSB, que CrWN permet d'obtenir la plus faible valeur d'usure et que l'ajout d'inter-couches de cuivre au revêtement TiWN améliore l'adhérence de l'ensemble et par là même augmente la résistance à l'usure de l'outil.

Par ailleurs, DLC a fait l'objet de nombreuses études afin de l'utiliser comme couche anti-usure. Toutefois, la majorité des travaux effectués font état du mauvais comportement de ce revêtement en usinage du bois et de ces dérivés [66-67] 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'expansions thermiques entre le dépôt et la majorité des substrats [64]. 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.* [68] 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 de ces 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 obtenues 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 mais également un faible arrondi d'arête.

De plus, Sheikh-Ahmad *et al.* [12], ont constaté que le traitement préalable de l'arête de coupe des 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 observé 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).

Dans cette même optique, Morita *et al.* [69] ont voulu observer l'influence des prétraitements de surfaces de plaquettes carbures sur le comportement de DLC en fraisage (défonçage) de MDF et de bois massifs. Pour ce faire, ils ont utilisé deux solutions chimiques et mécano-chimiques: Murakami/ H_2O_2 - H_2SO_4 et Sand-blasting/ HCl - HNO_3 . Les premières observations réalisées au MEB ont montré que l'application d'un prétraitement au Murakami/ H_2O_2 - H_2SO_4 ne conduisait pas à la 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/ H_2O_2 - H_2SO_4 présentaient de faibles valeurs d'arrondi et de rugosité d'arête comparativement aux outils prétraités avec du Sand-blasting/ HCl - HNO_3 . Ces modifications ont eu une conséquence sur le comportement des plaquettes en terme d'usure. En effet, les résultats récoltés après fraisage de MDF et des bois massifs montrent que la combinaison entre un traitement préalable au Murakami/ H_2O_2 - H_2SO_4 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.

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 [70]. 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. Ceci fut expliqué par le fait qu'il agit sur le liant cobalt et conduit au maintien des grains de carbures durant l'usinage.

I.3.3. Conclusion

A ce jour, les résultats des expérimentations réalisées en laboratoire avec les outils modifiés en surfaces sont loin d'être concordants. Dans certaines études, des améliorations des performances des outils sont notées tandis que dans d'autres c'est le comportement des outils conventionnels qui l'emporte. Ces performances médiocres causées par la délamination des revêtements sont souvent attribuées aux faibles angles

de bec des couteaux utilisés dans la première transformation du bois et aux vitesses de coupe très importantes.

On note également qu'il y a eu très peu d'études réalisées sur des machines industrielles où le comportement des outils à des sollicitations plus importantes sera différent. En déroulage par exemple, les efforts de flexion en fin d'opération, qui s'exercent sur les outils de grandes tailles, sont plus importants et induisent une plus grande sensibilité aux ébréchures. Ainsi, il est intéressant de tester le comportement mécanique en service d'outils modifiés par des traitements jusque-là jamais utilisés, et notamment en industrie, pour valider leur emploi.

I.4. MODIFICATIONS DES SURFACES 'CHOIX DES MATÉRIAUX'

I.4.1. Introduction

Dans cette partie du chapitre I, nous allons faire un état de l'art sur des revêtements dits classiques (TiN, CrN, Cr₂N et DLC) et la nitruration ionique basse température. Nous avons également voulu effectuer une étude bibliographique sur des revêtements nouveaux (CrAlN et ZrBN).

I.4.2. Films minces « classiques »

Comme présentés dans la partie 2 de ce chapitre, TiN et CrN sont très connus et très utilisés, mais en usinage du bois et tout comme d'autres revêtements, ils ne sont que peu étudiés.

Concernant TiN, deux études font le constat d'un comportement mitigé. CrN a été étudié de façon intensive lors du travail de thèse de Nouveau [59]. Il est tout de même à noter que les tests mécaniques employés ont été réalisés sur des équipements de laboratoire (durée des essais limités et conditions favorables). Effectuer des usinages en industrie, constitue ainsi un excellent point de repère quant au comportement des films minces les plus usuels en coupe du bois.

Appartenant à la famille des films dits « classiques », DLC a fait l'objet de nombreuses études sur son emploi éventuel dans le travail du bois. Son extrême dureté, sa haute conductivité thermique et son faible coefficient de frottement font de ce revêtement un très bon candidat comme revêtement pour outils de coupe. Des dépôts CVD basse pression permettent sa synthèse pour des applications en usinage. De nombreuses études font état de son bon comportement lors de l'usinage d'alliages d'aluminium [71]. Cependant et jusqu'à présent son emploi sous forme de revêtement mince n'a pas encore été réalisé en usinage du bois [64]. La limite majeure à son utilisation en tant que tel est sa faible adhérence sur substrat. Or un traitement dit duplex combinant un traitement thermo-chimique de nitruration pourrait améliorer l'accrochage de films DLC.

I.4.3. Films minces « novateurs »

I.4.3.1. CrAlN

L'ajout d'éléments métalliques aux revêtements binaires permet d'optimiser les propriétés et d'obtenir des films minces présentant de bonnes caractéristiques physico-chimiques et mécaniques. CrAlN est un revêtement commercialisé depuis 2004 par la firme BALZERS. L'ajout d'aluminium à CrN permet d'augmenter la dureté, la résistance à la corrosion et la température d'utilisation. Des tests de dureté Knoop montrent que CrAlN est plus dur que CrN [72].

Lors du formage de l'aluminium semi-solide, des mécanismes complexes d'usure dus essentiellement au phénomène d'accrochage de l'aluminium sur la paroi des moules ont lieu. En utilisant la méthode de mesure de l'angle de contact, il s'avère que le CrAlN est

un revêtement qui améliore la résistance à l'usure des moules. Une comparaison avec CrN montre que CrAlN est plus efficace pour cette application [73]. Ainsi, en seconde transformation du bois où la température de l'arête de coupe peut être très élevée, l'étude du comportement d'un revêtement ayant de bonnes caractéristiques thermiques se justifie.

I.4.3.2. ZrBN

Un autre revêtement nous a semblé intéressant à étudier : ZrBN. Avant de citer les avantages que peut procurer l'addition du zirconium au nitrure de bore cubique c-BN pour la synthèse de films durs de ZrBN en vue d'améliorer ses propriétés physico-chimiques et mécaniques, plus particulièrement l'adhérence, il est important de faire un bref rappel sur le nitrure de bore.

Le nitrure de bore BN est un composé binaire. Il est formé par les premiers éléments des colonnes IIIA et VA du tableau de Mendeleïev qui encadrent le carbone : le bore et l'azote. C'est par conséquent le premier et le plus léger des composés III-V. Synthétisé pour la première fois en 1957 sous forme massive [74], sous haute pression et haute température, ce matériau est considéré comme jeune.

La phase cubique du BN, c-BN, présente quant à elle des propriétés intrinsèques exceptionnelles telle qu'une haute dureté, la plaçant en deuxième position après le diamant. Le c-BN est également très stable thermiquement. En effet, il résiste jusqu'à 1400 °C dans l'air sans oxydation ni transformation en nitrure de bore hexagonal [75].

Bien qu'ayant de fortes similitudes avec le diamant (structure cristalline et propriétés semblables), il lui est préféré pour l'usinage des alliages hautes températures et des alliages ferreux. Il est stable en présence du fer jusqu'à des températures avoisinant 1325 °C, contrairement au diamant [76].

Par ailleurs, le c-BN possède une bonne résistivité et est un bon conducteur de chaleur avec un coefficient de conduction thermique de $-47.10^{-3} \text{ W.cm}^{-1}.\text{C}^{\circ-1}$ à 27°C, tandis qu'à la même température celui du cuivre est de $-14.10^{-3} \text{ W.cm}^{-1}.\text{C}^{\circ-1}$.

Actuellement, il existe des outils de coupe en c-BN massif, très fréquemment utilisés dans le secteur de l'usinage grande vitesse des matériaux métalliques, cependant leur inconvénient reste leur haute fragilité et leur coût très élevé.

Il est évident que les qualités que lui confèrent ses propriétés exceptionnelles citées ci-dessus font « potentiellement » du c-BN un très bon candidat pour des applications industrielles en couches minces sur des outils de coupe ou comme revêtements anti-usure. Mais l'obstacle majeur à son application en tant que tel reste principalement la mauvaise adhérence des films produits sur la majeure partie des substrats utilisés dans l'industrie de l'usinage (métallique ou bois), mais aussi leur faible taux de cristallinité et leurs hautes contraintes internes. Plusieurs études menées ces dernières années [77-79] révèlent qu'au-delà de 200 nm d'épaisseur, les films produits se délaminent prématurément après dépôt.

Depuis sa première synthèse en couche mince par Inagawa *et al.* [80] en 1987, de nombreux chercheurs se sont penchés sur les causes de sa mauvaise adhérence et les voies potentielles à emprunter pour y remédier. Ainsi, il a été émis que cette mauvaise

adhérence est attribuée à la présence de contraintes résiduelles résultant du bombardement ionique continu accompagnant la nucléation, la germination et la croissance des films de c-BN. Une autre raison, qui est la plus retenue, est la formation d'une couche de nitrure de bore d'hybridation sp^2 intermédiaire entre le substrat et le film riche en c-BN et que l'on notera sp^2 -BN. Cette interface se forme durant les premières étapes de la croissance de la couche empêchant la consolidation de l'ensemble. Il est à signaler également, qu'un taux excessif en bore dans la couche favorise la réactivité avec l'humidité de l'air ambiant [81-83].

A partir de ces travaux, des progrès ont été récemment atteints dans la réalisation de films épais de c-BN, grâce principalement au chauffage des substrats à de hautes températures ($\geq 1000^\circ\text{C}$) conduisant à la relaxation des contraintes résiduelles internes dans les films produits. Cependant, ces conditions de températures élevées ne sont pas compatibles avec la majorité des substrats et rendent les équipements de dépôts chers et complexes [77,78,84].

Parallèlement à cela, de légers progrès ont été également réalisés dans la réduction de la formation de la couche sp^2 -BN augmentant par là même l'adhérence du film sur le substrat, mais cependant sans pouvoir éviter sa formation. Lors d'une étude menée par Pugsley *et al.* [10] il a été observé qu'au sein d'un film riche en c-BN, de 20 μm d'épaisseur, réalisé par la technique de jet plasma DC à une température comprise entre 1000-1100 $^\circ\text{C}$, une couche sp^2 -BN de 150 nm reste observable. Yamamoto *et al.* [85] ont prédéposé une couche intermédiaire de carbure de bore BC entre la surface du substrat et le film de c-BN dans le but d'atténuer cette manifestation, mais une couche sp^2 -BN a encore été une fois observée.

Dans cette même optique, Freudenstein *et al.* [86] ont constaté que le dépôt préalable d'une couche intermédiaire de h-BN polarisée graduellement permet d'améliorer l'adhérence de la couche riche en c-BN sur le substrat.

Récemment, un grand nombre d'études laisse présager que la solution à cette faible adhérence peut être trouvée dans le système Zr-B-N. En effet, le Zr possède une grande affinité chimique pour le BN. En se combinant, ils forment des composés d'excellentes propriétés physico-chimiques comme citées dans la littérature et explicitées par les équations (I.4.1), (I.4.2) et (I.4.3) [87-89]. La présence de ces composés au sein de la couche diminuerait l'effet de la couche sp^2 -BN.



Les valeurs des énergies libres de Gibbs des réactions citées ci-dessus sont portées dans le tableau.4.1.

Température [$^\circ\text{C}$]	ΔG [kJ/mol]		
	Réaction 1	Réaction 2	Réaction 3
20	-111.66	131.87	-180.50
2127	-98.31	-181	-153

Tableau.I.4.1. Énergie de Gibbs des réactions (I.4.1), (I.4.2) et (I.4.3) [87-89]

Parmi ces produits, ZrB_2 pour ne citer que lui, est un composé réfractaire thermodynamiquement stable, dur et excellent conducteur électrique avec une température de fusion très élevée. Ces excellentes propriétés sont probablement dues à sa structure cristalline dominée par la liaison covalente qui lie les deux atomes de bore de la molécule. Bien que ZrB_2 ne possède pas une dureté plus importante que celle du TiB_2 et HfB_2 il n'en demeure pas moins plus résistant à la corrosion [90].

Des tests de corrosion ont été réalisés sur des échantillons d'acier revêtus de ZrB_2 et de $ZrBN$ dans une solution artificielle sucrée à 37 °C [91]. Aucune perte de brillance schématisée par la constante de brillance L^* après 168 h d'immersion n'a été observée. Les résultats au terme des campagnes d'essais d'usure réalisées au pion-disque sur ces mêmes échantillons ont révélé une très bonne résistance de ZrB_2 à l'usure par abrasion.

De nos jours ZrB_2 est appliqué dans deux domaines : comme revêtement résistant à l'usure sur les outils de coupe [92] et comme absorbeur photo thermal [93,94].

Pour étudier la nature des interactions qui peuvent se produire dans le système Zr-B-N, Benko *et al.* [95] ont utilisé un algorithme appelé VCS (*Virtual Carrier Sense*). Le but de leur étude était de vérifier la fiabilité des résultats obtenus grâce à ce programme par l'expérimentation. Le calcul a été réalisé dans une gamme de pressions comprises entre $1.3.10^{-3}$ et 10^7 Pa, de températures entre 27-2100°C et pour des rapports de ratio molaires de BN/Zr de 1/1 et 2/1. A l'issue de leurs calculs, il a été constaté, que les composés qui peuvent être formés sont : BN (s), ZrB_2 (s) et ZrN (s). Afin de s'assurer des résultats obtenus grâce à ce programme, ils procédèrent à l'expérimentation. Pour ce faire, deux mélanges correspondant à des ratios molaires de 1/1 et 2/1 à partir de poudre de BN (ABN-300, De Beers, taille de grains : 3-5 μ m) et de Zr (HC Starck, taille de grains : 3-5 μ m) ont été réalisés mécaniquement dans de l'éthylène. Par la suite, ils ont compacté les mélanges obtenus sous une pression de 2.10^2 Pa sous forme de pastilles qu'ils ont chauffées entre 1300 et 1600°C et sous différentes pressions pendant 1 heure. Par le biais de la diffraction des rayons X, il a été montré que les trois composés formés étaient bien ceux prévus par la simulation.

Par ailleurs, Wong *et al.* [96] ont étudié un dépôt multicouche (couche de Zr + couche de sp^2 -BN + couche riche en c-BN) élaboré dans une enceinte équipée de 2 canons à ions de type Kaufman (3 cm). Ils ont démontré, par le biais de profils de concentration réalisés par XPS (spectroscopie de photoélectrons X) et des observations par MET (microscopie électronique à transmission), qu'un recuit de cette couche opéré à une température de 900 °C pendant 1 heure transformait complètement la couche intermédiaire d'hybridation sp^2 en une couche formée par des composés de zirconium : Zr pur, nitrure, borure et oxyde de zirconium.

Prieto *et al.* [97] ont constaté que le bombardement ionique d'ions Ar^+ de faible énergie (20-100 eV) d'une multicouche Zr/BN conduisait au mélange total de ces deux couches formant ainsi une couche unique composée de produits ternaires du système Zr-B-N. Cette couche a d'ailleurs exhibé une grande résistance à l'usure. Il fut noté également que le bombardement avec des ions N^+ ne modifiait pas la structure initiale de la multicouche.

Ces dernières années, il est devenu évident que bombarder un film avec des ions durant le dépôt affecte sa microstructure, sa microchimie et ses propriétés physiques [98,99].

Plus récemment, il a été montré que poursuivre le dépôt de multicouches de type M/BN (M=Ti, Zr, Hf,...) par des recuits à des températures moyennes permet l'élaboration de films durs composés majoritairement de boro-nitride de métal [100,101]. Il fut constaté que l'ajout d'une couche intermédiaire de Zr améliore l'adhérence du film et la couche externe de BN stabilise l'ensemble contre l'oxydation.

Concernant le comportement mécanique de ZrBN en usinage, Holzschuh *et al.* [102] ont réalisé des tests de fraisage sur un acier de nuance 40CrMnMo7 de $R_e = 1000 \text{ N/mm}^2$ sans lubrification avec des plaquettes en carbure grade K40 revêtues de ZrBN de 5 à 6.5 μm , TiBN et ZrN. Les conditions d'usinage pour cette campagne d'essais étaient les suivantes : vitesse de coupe de 150 m/min, avance par dent de 0.2 mm, largeur radiale de coupe de 100 mm et profondeur de passe de 3 mm. Durant cette campagne, la largeur du flanc d'usure, les craquelures thermales et le taux de délamination ont été mesurés à des intervalles réguliers à l'aide d'un microscope optique. Sous ces conditions d'usinage, il fut observé que la largeur du flanc d'usure de l'outil revêtu de ZrBN était presque identique à celle de l'outil de TiBN et était moins importante que celle de l'outil revêtu de ZrN.

En usinage du bois, Chala *et al.* [103] ont effectué des tests de microdéroulage sur du hêtre massif. Il en a résulté qu'après 2500 m d'usinage, l'outil revêtu d'une couche de ZrBN de 1 μm a permis de réduire le recul d'arête de moitié.

En traitant l'outil au préalable par nitruration ionique à basse température dans un plasma de 80% de N_2 et 20% de CH_4 , l'auteur a pu usiner 6,5 fois plus de bois qu'un outil témoin pour une même valeur d'usure.

I.4.4. Conclusion

Suite aux résultats de cette recherche bibliographique, étudier le comportement d'outils modifiés par des films connus tels que TiN, CrN et DLC ou bien des traitements de nitruration ionique en usinage de bois industriel se justifie. En effet, la grande majorité des études menées dans le domaine de la coupe du bois a été réalisée en laboratoire où les conditions expérimentales sont fondamentalement différentes de celles utilisées en industrie où les couteaux (de grande tailles) ne sont pas soumis aux mêmes sollicitations : cinétique de coupe, grandes installations (machines de déroulage et tête de fraisage), distance de coupe et temps d'emploi des couteaux, bois très hétérogène, corrosion, chocs.....

Nous nous sommes par la suite intéressés au développement de nouveaux revêtements ternaires (CrAlN et ZrBN) dans le but de les appliquer aux outils de coupe du bois.

CHAPITRE II. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES
