

APPLICATION DE REVETEMENTS CLASSIQUES (TiN, CrN, DLC,.) A L'USINAGE DU BOIS

III.1. Introduction

Ce travail de thèse trouve sa source dans une étude antérieure, dont le but était de comparer le comportement mécanique d'outils modifiés en surface (revêtements durs et traitements thermo-chimiques) en usinage du bois ; plus exactement en examinant la manière avec laquelle agissent ces modifications sur l'usure des outils [6,134]. Pour la réalisation de cette étude, les auteurs ont utilisé des films durs classiques en couches minces : TiN, (Ti,Zr)N, Cr, Cr_xN_y et W-C :H (carbone amorphe hydrogéné : DLC) mais également la nitruration par implantation ionique à basse température.

En ce qui concerne les aciers des outils, la première nuance 60SMD8 (57-59HRC) utilisée, est un acier allié fréquemment employé en France pour la fabrication de couteaux de dérouleuse. Dans la seconde partie de l'étude, TiN industriel et Cr_xN_y optimal ont été appliqués sur des outils en acier rapide : Z90WCDV2 (64-66 HRC, nuance d'acier fréquemment utilisée en Pologne pour la fabrication de couteaux d'usinage du bois). Les revêtements ont été déposés sur les deux faces des outils : face d'attaque et face de dépouille afin de vérifier l'influence des faces de couteaux à revêtir.

Les tests de microdéroulage (§II.2.2) ont été menés sur du hêtre homogène sans nœud afin d'étudier uniquement le recul des arêtes de coupe. Les paramètres de coupe ont été maintenus constants durant les tests d'usinage (vitesse de coupe : 1 m/s, angle de dépouille : 1° , épaisseur de copeau : 0,3 mm).

Les traitements de surface prennent une part importante dans le processus du recul d'arête des couteaux (figure.III.1). Nitrurer l'outil retarde son usure. En effet, après 2000 m de déroulage, le recul d'arête a été réduit de moitié (50%). Le résultat le plus probant est obtenu par le revêtement Cr_xN_y avec lequel le recul d'arête de l'outil a été diminué de 63%. Au-delà de cette distance (2000 m), les courbes décrites par l'outil témoin et l'outil revêtu de CrN sont presque parallèles, ce qui nous pousse à dire que cette amélioration du recul d'arête (70 μ m) peut être constante jusqu'à des distances de déroulage plus importantes, augmentant par là même la durée de service de l'outil revêtu. Pour vérifier cela, il faudrait dérouler d'importantes quantités de bois et en laboratoire ce n'est souvent pas possible (contraintes d'appareillages, de moyens et de temps). Néanmoins, ces résultats dégagent des tendances et pour une meilleure fiabilité des résultats il est impératif de multiplier les essais en industrie.

Par ailleurs et afin d'expliquer ces comportements, des observations micrographiques sur la face de dépouille des outils ont été réalisées. Il en ressort que les revêtements qui n'ont pas amélioré la résistance à l'usure se délaminèrent ou craquelèrent après seulement quelques dizaines de mètres de coupe (phase de rodage de l'outil). Grâce à une bonne adhérence, seul Cr_xN_y a pu protéger l'arête de coupe (et ce jusqu'à 4000 m).

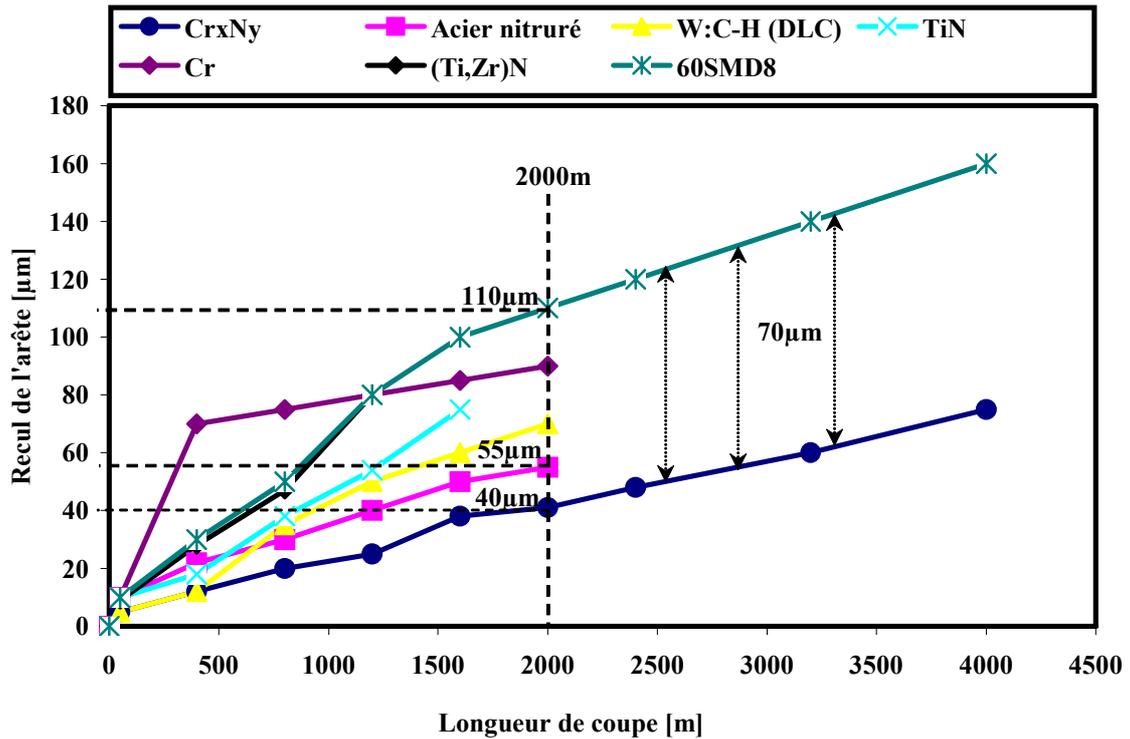


Figure.III.1 : Recul d'arête des outils en fonction de la longueur de coupe

Dans le but de mieux comprendre le comportement obtenu avec Cr_xN_y , des mesures d'efforts de coupe et des coefficients de frottement ont été réalisés. Concernant les efforts de coupe (figure.III.2), l'allure des courbes est similaire, qu'il s'agisse de l'outil conventionnel ou de l'outil revêtu. L'effort \bar{X}_c augmente et \bar{Y}_c 'diminue' avec l'usure des outils mais la dynamique reste tout de même différente.

De plus, après 4000 m de déroulage, les valeurs des composantes \bar{X}_c et \bar{Y}_c de l'effort de coupe rapportées à la longueur de l'arête des outils étaient respectivement égales à 52 et -38N/cm pour l'outil non revêtu alors que pour l'outil revêtu Cr_xN_y elles étaient de 38 et -2N/cm (figure.III.2).

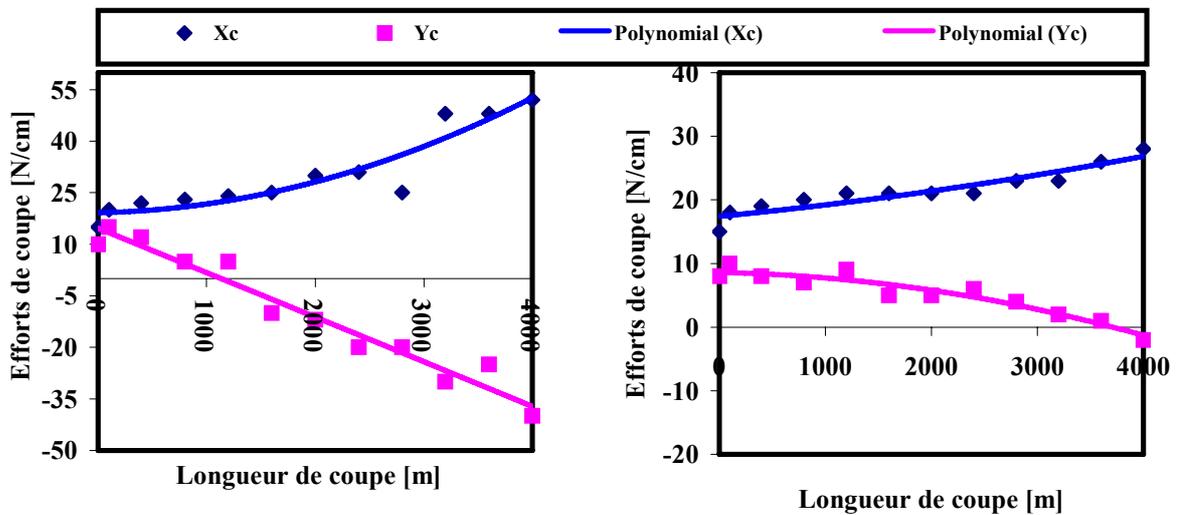


Figure.III.2 : Efforts de coupe en fonction de la longueur de coupe :
 (a) couteau non revêtu, (b) couteau revêtu sur les deux faces

L'augmentation de \bar{X}_C parallèlement à l'éroussement de l'arête de coupe indique une élévation de la consommation d'énergie du moteur qui est la plus importante dans le cas de l'outil non revêtu [6,134]. La mesure de l'effort \bar{Y}_C indique quant à elle soit une aptitude à la coupe (valeurs positives) soit un refus de coupe (valeurs négatives). Dans le cas où le signe de cette grandeur physique est négatif, le bois tend ainsi à repousser l'arête de la zone de coupe, les vibrations augmentent et la variation de l'épaisseur des placages devient importante. Le début du refus de coupe pour l'outil non revêtu a été atteint après 1100 m d'usinage alors que pour l'outil revêtu Cr_xN_y , il n'a été atteint qu'après 3800 m.

La mesure des coefficients de frottement entre le bois et les surfaces modifiées des outils a été effectuée (figure.III.3) sur la microdériveuse en même temps que les tests d'usinage. L'effort normal appliqué sur le patin de frottement (§II.2.2) était de 25 daN.

Sur la figure.III.3, nous constatons que les valeurs des coefficients de frottement mesurées sont relativement faibles. L'eau contenue dans le bois vert joue le rôle de lubrifiant diminuant ainsi les efforts s'exerçant entre le bois et la surface. La valeur la plus importante a été mesurée pour le revêtement (Ti,Zr)N ($\mu=0,37$) et la plus faible pour Cr_xN_y ($\mu=0,27$).

Les résultats obtenus indiquent que le bon comportement de l'outil revêtu d'une couche de Cr_xN_y est dû d'une part, au faible coefficient de frottement qui a conduit à amoindrir les efforts de coupe exercés sur

l'arête de coupe et d'autre part à l'accrochage du film sur l'outil qui a permis la protection de l'arête tranchante du couteau.

La deuxième partie de cette étude a consisté à vérifier le comportement de couteaux en acier rapide revêtus de TiN déposés industriellement en microdériveuse de hêtre. L'utilisation d'acier allié nécessite une température de dépôt de TiN inférieure à 300°C pour éviter les risques de détérioration des propriétés structurales des outils. Afin de tester TiN industriel en dérivation de hêtre, les auteurs ont utilisé l'acier rapide Z90WCDV2.

TiN a été déposé industriellement (évaporation par arc) sur les deux faces de l'outil (face d'attaque et de dépouille) avec une épaisseur de 2,8 μm . Du Cr_xN_y de 1,6 μm d'épaisseur a été déposé en laboratoire par pulvérisation triode uniquement sur la face d'attaque de l'outil. En effet, les résultats obtenus à l'issue des travaux de thèse de

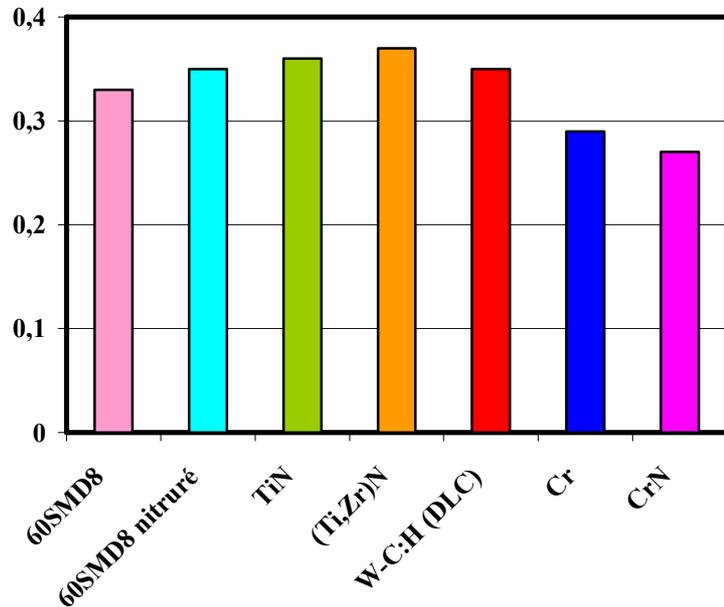


Figure.III.3 : Coefficients de frottement μ des surfaces modifiées

Nouveau [59], montrent qu'appliquer Cr_xN_y sur les deux faces des outils n'est pas nécessaire et que revêtir seulement la face d'attaque (face en contact du copeau) permet à l'outil d'avoir les mêmes performances.

L'usure des outils en fonction de la longueur de coupe a été mesurée (figure.III.4). L'allure des courbes obtenues pour le couteau en acier rapide et celui revêtu de TiN est similaire. Ceci peut s'expliquer par la faible adhérence du film sur l'outil. Durant l'opération de déroulage, le revêtement s'est rapidement décollé (après 400 m) et n'a plus protégé l'arête de coupe. L'outil revêtu de Cr_xN_y a montré un meilleur comportement. En fin de test (4000 m) de coupe, la réduction du recul d'arête était 15 μm plus faible que celle de l'outil conventionnel.

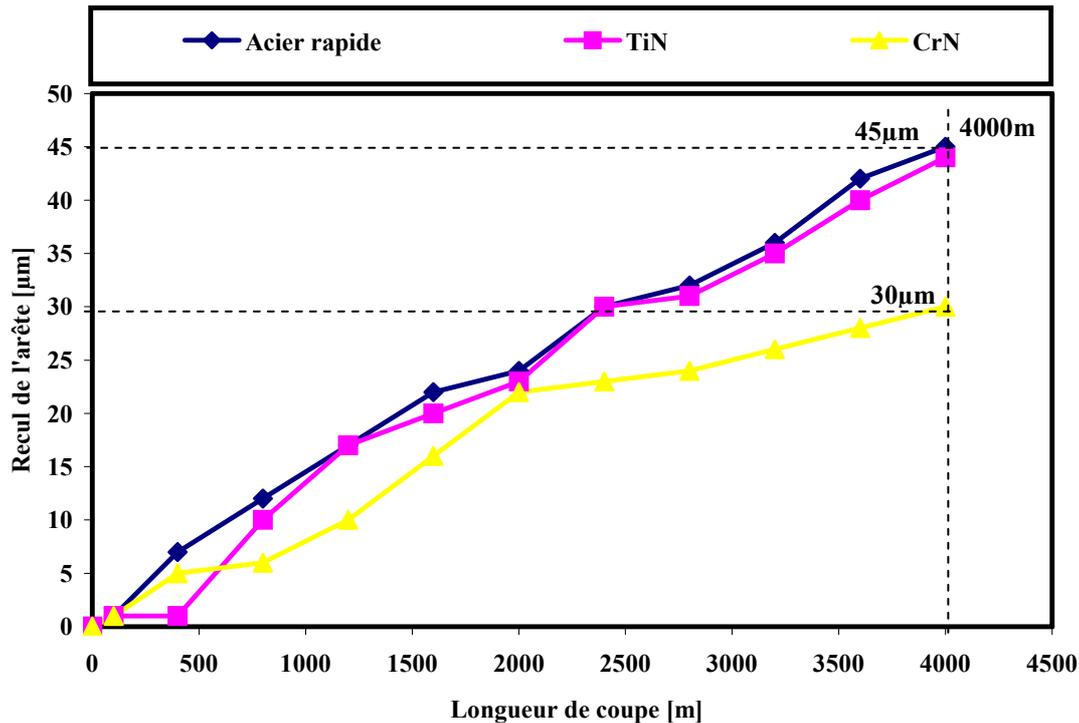


Figure.III.4 : Microdéroulage de hêtre avec des outils en acier rapide revêtus ou non

Conclusion

De cette étude, on peut conclure que la modification de la surface des outils améliore la tenue en coupe de ces derniers qu'il s'agisse d'un substrat en acier allié ou d'un substrat en acier rapide. Ceci étant, ces améliorations ne sont pas du même ordre. Nous avons pu voir que CrN possède des propriétés mécaniques lui conférant un meilleur comportement en usinage du bois vert. Une bonne adhérence du film permet la protection de l'arête de l'outil et un faible coefficient de frottement une diminution des efforts de coupe. D'un autre côté, TiN a montré un mauvais comportement en usinage. De ce fait, une question reste en suspens : comment se fait-il que TiN, le revêtement le plus ancien et le plus utilisé en usinage de façon générale montre un comportement médiocre et ne permette pas d'améliorer la résistance à l'abrasion, spécialement dans le cas de l'outil en acier rapide ?

En effet, TiN a été déposé industriellement, et donc aurait dû posséder de bonnes caractéristiques mécaniques. Mais ceci ne s'est pas confirmé. Ainsi, nous nous sommes fixés comme objectif de faire une étude similaire mais cette fois avec TiN synthétisé en laboratoire et de comparer son comportement avec CrN en déroulage.

III.2. Dépôts de TiN par pulvérisation magnétron R.F

Sachant que la dureté et les propriétés de protection contre l'usure de TiN sont directement affectées par les paramètres du procédé de dépôt [19], nous avons effectué des dépôts sous différentes conditions. Dans un premier temps, nous avons fait varier la tension appliquée à la cible, le temps de dépôt et la pression de travail afin de montrer l'influence de ces paramètres expérimentaux sur la structure et la vitesse de dépôts [135,136]. À l'issue de ces études préliminaires, nous avons retenu une pression de travail et une tension d'auto-polarisation de cible pour la suite de l'étude (tableau.III.1). Par la suite, nous avons fait varier la fraction volumique d'azote dans le plasma.

Quatre revêtements de TiN correspondant à différentes pressions partielles d'azote ont été retenus (tableau.III.1) et appliqués sur des substrats de silicium (Si (100)) et d'acier (90CMV8) pour être caractérisés. Les temps de dépôts ont été fixés afin d'obtenir une épaisseur de couche égale à 1,5 μm .

Films	Tension de cible (-V)	Pression de travail (μbar)	Proportion d'azote dans le plasma (%)	Temps de dépôt (mn)
(1)	500	8	5	35
(2)			10	42
(3)			20	47
(4)			50	84

Tableau.III.1 : Conditions d'élaborations des films de TiN

Pour clore cette étude, des dépôts ont été réalisés sur des couteaux et testés en microdéroulage de MDF.

III.2.1. Morphologie et stœchiométrie des films

Pour les quatre revêtements observés par microscopie optique, la surface montre un aspect régulier sans anomalie apparente (figure.III.5.a), à l'exception de quelques taches noires que l'on aperçoit et qui s'avèrent être des trous dus à l'enlèvement de morceaux de revêtement (figure.III.5.b). Un écaillage de la couche (délamination) a été également observé de façon très aléatoire sur certains dépôts effectués sur substrats en silicium (figure.III.5.c). Dans ce cas ce dépôt a été refait.

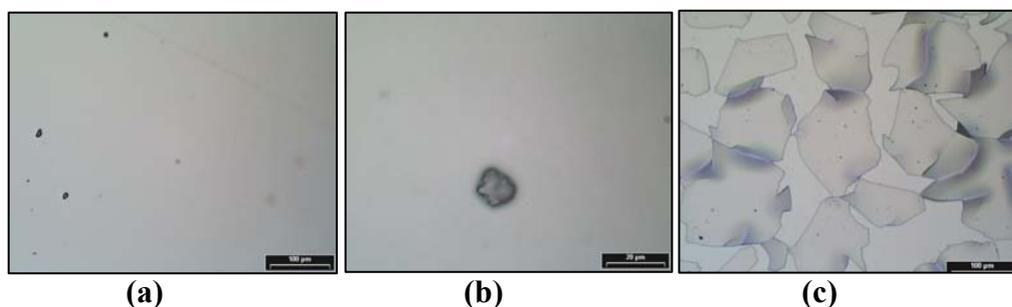


Figure.III.5 : (a) Surface d'un dépôt de TiN à 5 % de N_2 sur silicium, (b) Trou dû à l'enlèvement d'un morceau de revêtement, (c) Phénomène d'écaillage d'une couche de TiN à 50 % de N_2 déposée sur silicium.

Les observations effectuées au MEB montrent que les films obtenus sont homogènes sur toute la surface qui recouvre les substrats (figure.III.6.a) et présentent une structure

colonnaire (figure.III.6.b). D'après la littérature, les revêtements PVD se caractérisent en général par une microstructure colonnaire [137].

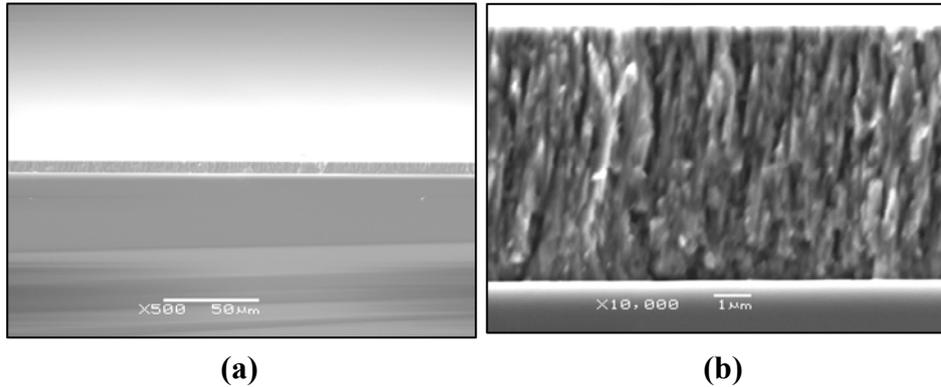


Figure.III.6 : (a) Observation en coupe transverse d'une couche de TiN obtenue à 5 % de N_2 ($7.4 \mu m$), (b) Structure colonnaire de la couche obtenue

Des analyses EDS ont été réalisées sur les premières couches élaborées. Les spectres obtenus (figure.III.7) ne révèlent pas la présence d'oxygène, ni celle d'autres éléments chimiques tels que le carbone, ce qui indique que l'enceinte de dépôt ne contenait pas d'impuretés susceptibles de polluer les couches élaborées.

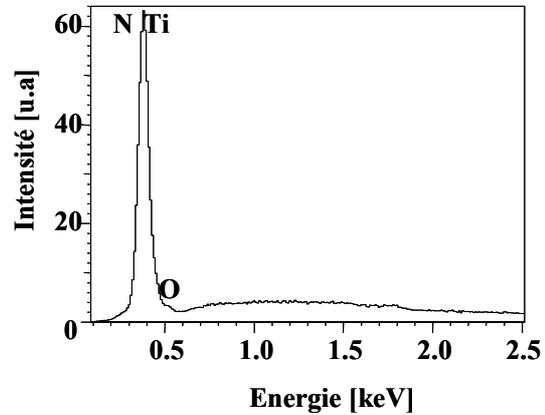


Figure.III.7 : Spectre EDS d'une couche de TiN obtenue à 5 % de N_2

Toutefois, à cause de la superposition des pics caractéristiques du titane ($L_{\alpha_1\alpha_2}$ à $0,4522 keV$) et de l'azote (K_{α} à $0,3924 keV$), l'analyse quantitative n'a pas pu être réalisée. Malgré l'utilisation très large de ce matériau, son analyse reste problématique. La plupart des méthodes d'analyse de surface classiques telles que l'EDS ou la WDS ne permettent pas la quantification exacte du ratio N/Ti [25].

Ainsi, en raison des problèmes inhérents à évaluer la composition précise en utilisant ces techniques, Manory [25] s'est référé à une approximation de la composition en se basant sur la couleur du revêtement produit comme l'ont proposé auparavant Chevalier *et al.* [138] (figure.III.8).

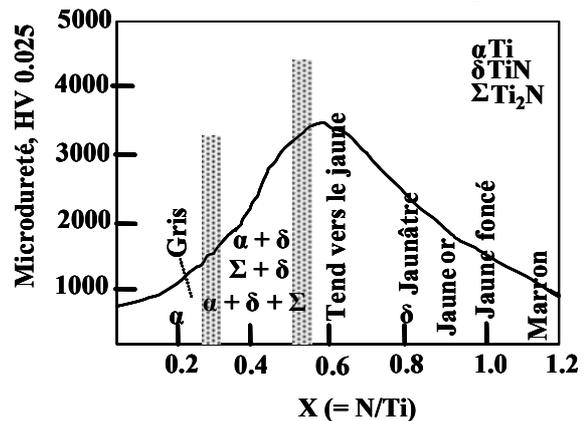


Figure.III.8 : Microdureté, couleur et phases des films de TiN_x en fonction du ratio N/Ti [138]

Dans notre cas, au vu de la similarité des couleurs obtenues, se prononcer sur la stœchiométrie exacte des couches est en somme quelque peu hasardeux. Ce que nous pouvons constater avec certitude est que 5 et 50 % de proportion d'azote dans le plasma ne conduisent pas à obtenir des couches stœchiométriques (figure.III.9).

En effet, la couleur grise du dépôt à 5% et la couleur marron de celui à 50%, selon Chevalier [138], indiquent que le premier est sous-stœchiométrique alors qu'au contraire le second est quant à lui sur-stœchiométrique en azote.

Tout en gardant des réserves, TiN cubique peut être obtenu dans une fourchette de proportion d'azote comprise entre 10 et 30%.

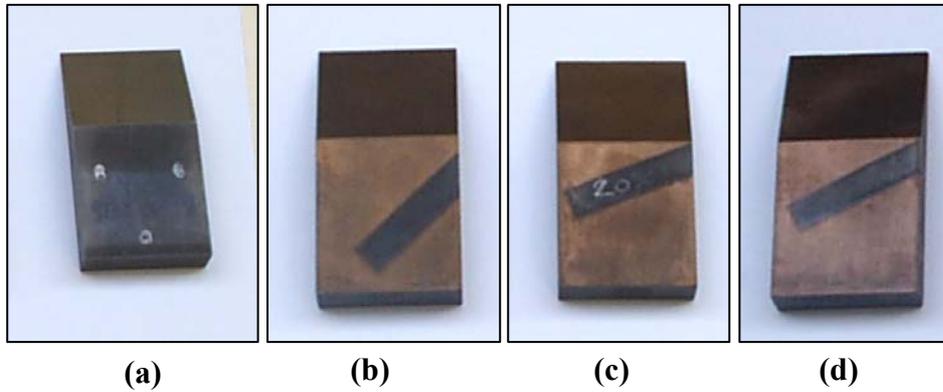


Figure.III.9 Couleur des couches de TiN déposées sur couteaux de microdéroutage à : (a) 5%, (b) 10%, (c) 20% et (d) 50% d'azote

III.2.2. Structure cristalline

La figure.III.10 montre les diffractogrammes obtenus pour un échantillon de silicium (100) non revêtu et des couches de TiN obtenues à différents pourcentages de N_2 . Nous observons que l'orientation cristalline (311) est prédominante aux faibles teneurs en azote tandis que l'orientation (200) prédomine à 50% de N_2 dans le mélange gazeux.

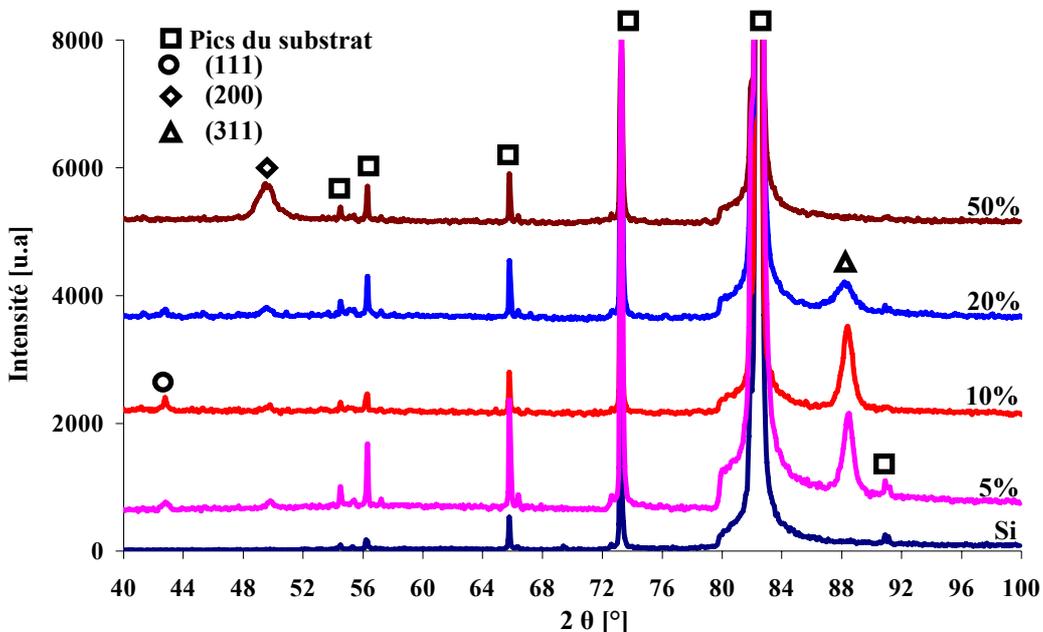


Figure.III.10 : Diffractogrammes des couches de TiN obtenues sur silicium

Nous remarquons aussi la disparition de l'orientation (111) à 50 % de N_2 . La largeur à mi-hauteur du pic TiN (200) à 50 % de N_2 nous indique que les couches possèdent un

faible taux de cristallisation alors que celles obtenues pour des faibles pourcentages d'azote semblent mieux cristallisées. L'orientation des films suivant l'augmentation de la teneur en azote dans le mélange gazeux passe donc de l'orientation cristalline (311) à (200). On peut donc conclure que sur silicium, augmenter le taux d'azote dans le plasma tend à densifier les couches (puisque ce sont les plans les plus denses (200) qui prédominent à 50% de N_2) donc à accroître les contraintes des couches, ce qui explique la délamination de la couche de TiN obtenue à 50% de N_2 (Fig.III.5.c).

La figure.III.11 représente les diffractogrammes de substrats d'acier revêtus de couches de TiN obtenues à différents pourcentages d'azote. Nous remarquons que pour un pourcentage d'azote dans le plasma inférieur à 50 % les couches présentent les orientations cristallines (111), (200) et (311). A 50 % de N_2 on note l'apparition du pic (220) et la quasi disparition des orientations (111), (200) et (311). On notera aussi que jusqu'à 20 % de N_2 les orientations cristallines (111) et (311) prédominent. La finesse des pics d'orientation (111), prédominants à 5 et 10 % de N_2 , est un indicateur sur le bon taux de cristallisation de cette phase au sein des films obtenus.

Contrairement aux dépôts obtenus sur Si, augmenter le taux d'azote rend les couches amorphes ou développent des couches avec des grains trop petits pour être détectés par DRX. Par ailleurs, la prédominance des plans les moins denses (111) ou même (311) laisse supposer que les contraintes résiduelles des couches de TiN sont moindres sur acier que sur Si. Les dépôts sur couteaux de microdéroutage ont été réalisés en même temps que ces échantillons d'acier, on peut donc supposer que les phases en présence sur couteaux soient de même nature.

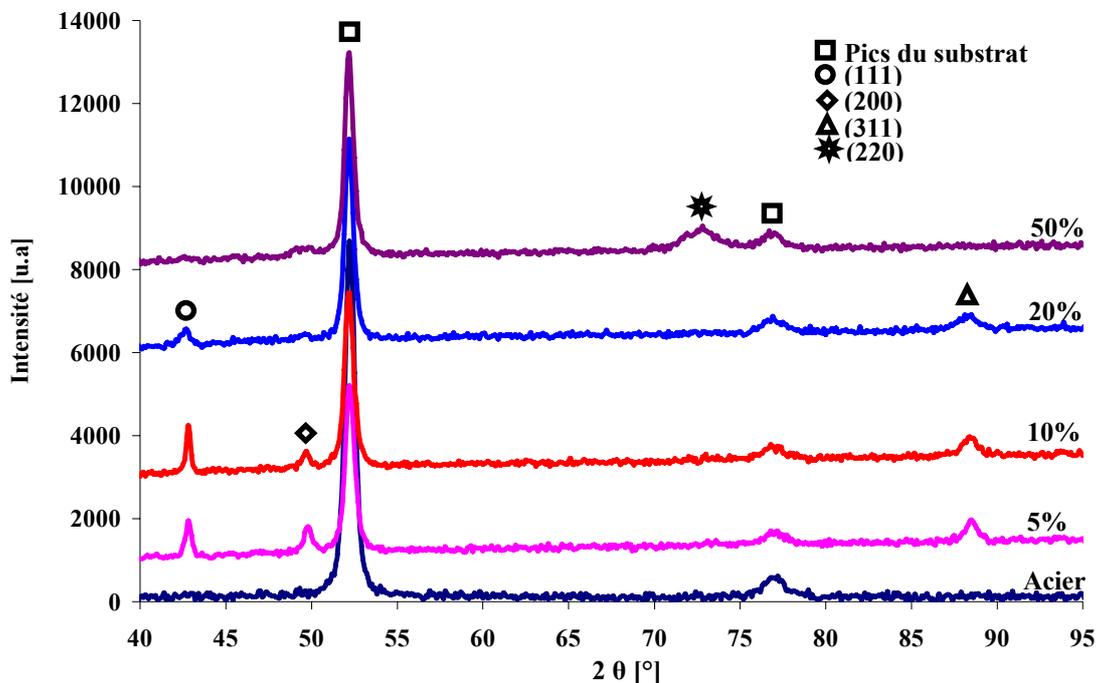


Figure.III.11 : Diffractogrammes de couches de TiN obtenues sur acier

III.2.3. Usure et contraintes internes

Des tests d'usure ont été réalisés par Calotest[®]. Les résultats sont résumés sur la figure.III.12.

L'usure est fonction du substrat utilisé. En effet, dans la majorité des cas le volume d'usure de la couche de TiN déposée sur substrat en acier est inférieur au volume d'usure obtenu sur silicium. Cela peut s'expliquer par la différence de structure cristalline obtenue sur l'un et l'autre des substrats (figure.III.10. et figure.III.11) et par l'influence du matériau de base, acier ou Si (rugosité).

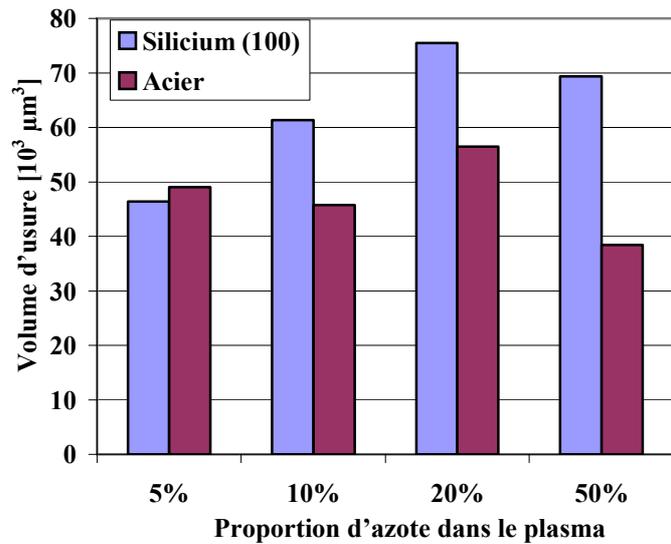


Figure.III.12 : Volumes d'usure mesurés sur les films de TiN déposés sur Si et acier

Une plus grande dispersion est obtenue à partir de 10 % de N₂. Sur silicium les couches obtenues à faibles taux de N₂ (5-10 %) sont plus résistantes que celles obtenues à partir de 20 % de N₂. Les couches présentant l'orientation cristalline (111) et (311), donc les plans les moins denses et les moins contraints (pour 5 et 10 % de N₂), sont plus résistantes à l'abrasion que celles présentant l'orientation (200) (20% et surtout 50% de N₂) ce qui peut s'expliquer par une meilleure ductilité de celles-ci.

Sur acier, les couches ont un comportement similaire sauf à 20 % de N₂ où le volume d'usure est maximal. Au vu des résultats nous notons également que le volume d'usure des couches diminue pour 50 % de N₂. Les couches sont donc plus résistantes à l'usure par abrasion lorsque les couches sont amorphes ou présentent des grains fins.

Les contraintes internes des films sont résumées sur la figure.III.13. Nous observons que les couches ont des contraintes en compression à l'exception de celles obtenues à 20% de N₂.

On vérifie bien ici que les couches les plus contraintes (1,5-2 GPa) sont celles présentant l'orientation cristalline la plus dense contenant les plans (200) et obtenues pour 50% de N₂. Les autres couches présentent des contraintes relativement faibles (0-0,5 GPa).

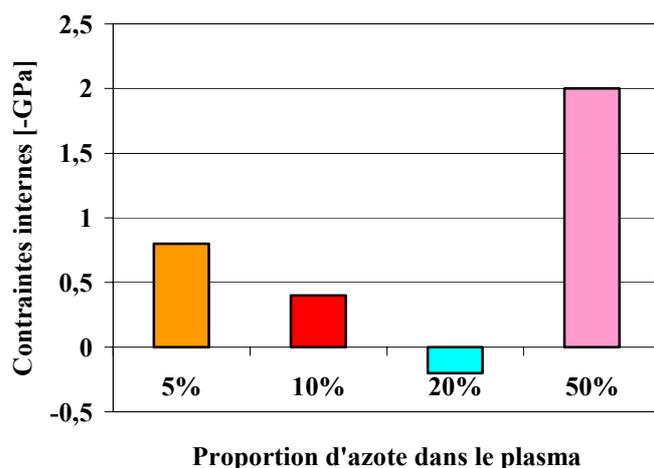


Figure.III.13 : Contraintes internes des films de TiN sur silicium

III.2.4. Tests de microdéroutage

III.2.4.1. Microdéroutage d'outils revêtus de TiN

Les conditions de microdéroutage et les dimensions des rondelles de MDF utilisées sont résumées dans le tableau.III.2.

Vitesse linéaire de déroulage (m/s)	Épaisseur du plaquage (mm)	Angle de dépouille du couteau (°)	Rondelles de MDF	
			Diamètre (mm)	Épaisseur (mm)
0,5	0.3	3	320	6

Tableau.III.2 Conditions de déroulage et dimensions des rondelles utilisées

La figure.III.14 représente l'usure des outils de coupe en fonction de la longueur usinée. D'après ce graphique nous constatons que le couteau non revêtu (témoin) présente la valeur d'usure la plus élevée après 1400 m de déroulage. Le couteau revêtu d'une couche de TiN obtenue à 50% de N₂ dans le plasma possède une valeur d'usure sensiblement inférieure à celle du couteau témoin mais un comportement similaire. Même si le revêtement de cet outil a présenté une bonne résistance à l'usure durant les tests par Calotest[®], il ne semble pas avoir les mêmes capacités à résister à l'usure une fois déposé sur outil de coupe. Ce comportement est peut être dû au faible taux de cristallisation de la couche observé en DRX et surtout à sa faible adhérence. Par ailleurs, les couteaux revêtus à 5, 10 et 20 % d'azote dans le plasma possèdent un comportement très proche. Il existe ainsi un niveau de pression partielle d'azote dans le plasma à partir duquel les performances du revêtement deviennent médiocres suite à un changement de structure (contraintes, dureté, adhérence).

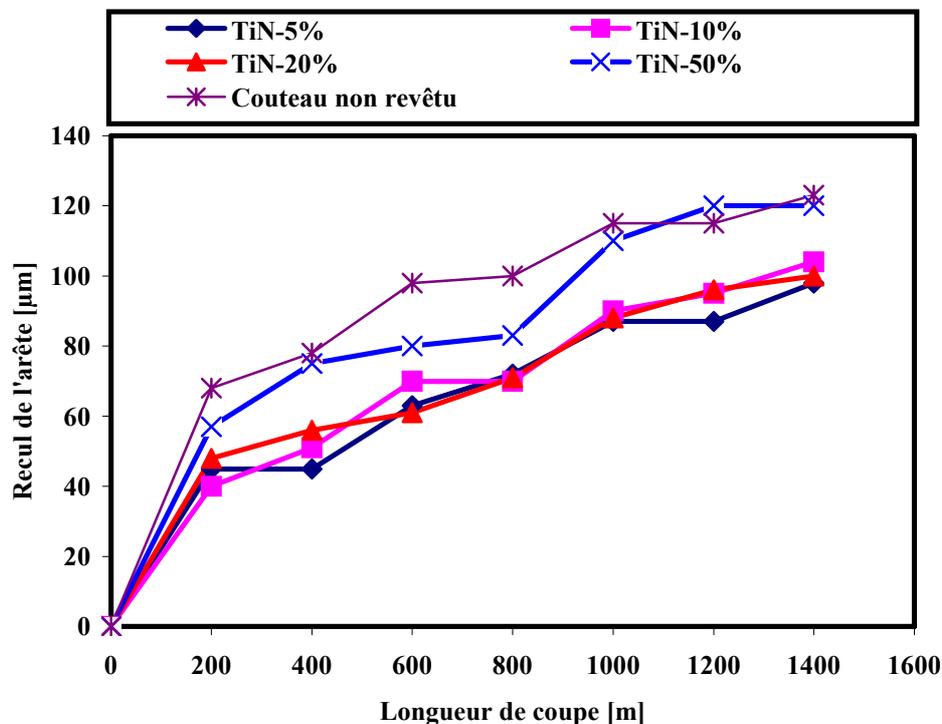


Figure.III.14 Usure en fonction de la distance de microdéroutage des couteaux non traités et traités TiN

Les tests concernant les couches obtenues à 5, 10 et 20 % de N₂ ont été vérifiés une seconde fois. Les résultats concordent parfaitement et confirment les précédents. Grâce à de faibles contraintes internes, autrement dit une bonne adhérence sur substrats mais aussi un bon niveau de cristallisation des couches, ces revêtements permettent d'usiner plus qu'avec des outils conventionnels. Cependant, il faut considérer que ce test réalisé sur seulement 1400 m de microdéroutage d'un matériau qui n'est pas du bois massif, ne dégage qu'une tendance.

III.2.4.2. Comparaison TiN-Cr_xN_y optimaux

Les tests avec les outils revêtus de couches de CrN « optimales » [59] ont été réalisés dans les mêmes conditions de coupe que lors de la précédente campagne de microdéroutage (avec les outils revêtus TiN).

Sur la figure.III.15 sont reportées les mesures d'usure des outils en fonction de la longueur de microdéroutage. Nous notons que CrN appliqué sur la face d'attaque de l'outil montre une résistance à l'usure élevée en comparaison avec l'outil témoin et aux autres outils revêtus. De plus, appliquer ce film sur la face d'attaque est plus efficace durant la coupe que sur la face de dépouille. Cela confirme les résultats obtenus par Nouveau [59] lors d'essais de microdéroutage de hêtre.

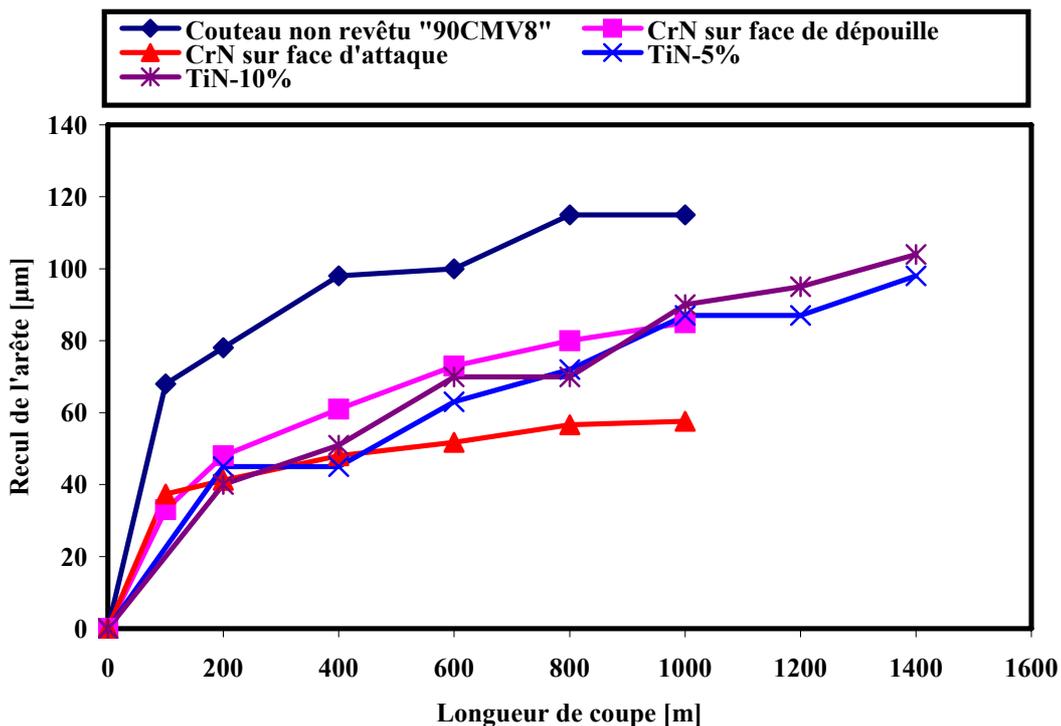


Figure.III.15 Microdéroutage avec outils revêtus TiN et CrN

Par ailleurs, les couches de TiN « optimales » retenues pour cette campagne d'essais (5 et 10% de N₂ dans le mélange gazeux) ont un comportement similaire à l'outil dont la face de dépouille est revêtue d'une couche de CrN et améliorent tout de même la tenue en service de l'outil sur 1000 m. Il est à retenir que TiN optimal permet d'augmenter la résistance à l'émoussement de l'arête par abrasion mais son comportement reste moins prometteur que la couche de CrN. Ces résultats sont en phase avec ceux obtenus par Beer [6].

III.2.5. Conclusions

Cette étude a permis de tester le comportement d'outils de microdéroutage revêtus de couche de TiN et de vérifier la tendance qui s'est dégagée au terme des travaux menés par Beer [6]. Revêtir des outils d'usinage du bois avec une couche de TiN améliore très peu leur résistance à l'usure. Certes, les essais ont été conduits sur une faible longueur de coupe mais les résultats obtenus laissent présager du mauvais comportement de ces films pour une distance de coupe plus importante. Lors d'une autre étude [139], TiN a montré un comportement médiocre dans un environnement humide, c'est peut-être là que réside l'explication. C'est pourquoi nous avons réalisé des essais sur MDF (matériau sec). Les résultats obtenus montrent une légère amélioration des propriétés de protection de TiN.

Enfin, nous avons voulu comparer des outils revêtus de CrN, matériau moins dur que TiN. Après 1000 m d'usinage, la tendance semble se confirmer et les couches de CrN sont plus performantes et améliorent le recul d'arête des outils en comparaison avec TiN. Le bon comportement qu'a montré ce revêtement a motivé la poursuite d'investigations, dans le cadre d'un projet de recherche européen (CRAFT), afin de réaliser des essais d'usinage en milieu industriel. Les essais réalisés ainsi que les résultats obtenus sont présentés dans le paragraphe III.3.

III. 3. Résultats obtenus dans le cadre du projet CRAFT

III.3.1. Introduction

Dans le cadre d'un projet européen de recherche, des tests industriels de transformation du bois vert ont été menés. Ce projet intitulé « Innovative and Efficient Knives Surfaces Modification in First Transformation of Wood (chipper, canter and peeling machine) » soit KNIWOOD avait pour partenaires : des PME d'usinage du bois, des fabricants d'outils, un industriel des dépôts ainsi que des laboratoires et équipes de recherches spécialistes des traitements de surfaces et/ou de l'usinage du bois.

L'objectif principal de ce projet est d'améliorer les performances (résistance à l'usure et aux chocs) des couteaux pour l'usinage du bois par l'application d'une nouvelle génération de modifications de surfaces.

À partir des besoins exprimés par les entreprises partenaires de transformation du bois, une synthèse des problématiques qu'elles rencontrent a été établie et a permis aux laboratoires de recherche, de définir un panel de matériaux et traitements de surfaces à tester sur les outils de coupe. Ces traitements sont l'application : de revêtements durs (DLC, CrN et Cr₂N 'cubique et hexagonale'), de nitruration ionique basse température et de traitements duplex qui combinent la nitruration préalable des substrats puis l'application de films durs en couche mince à base de chrome (mono ou multicouche). Systématiquement après chaque campagne de modification des surfaces, des caractérisations physico-chimiques et mécaniques ont été réalisées, dans le but de déterminer les traitements optimaux à appliquer sur les outils de coupe.

Nous avons débuté les essais d'usinage du bois par des tests d'usure rapide en réalisant du microdéroutage de MDF (§ II.2.2). Ensuite, des tests de microdéroutage, ont été

effectués pour constater l'effet des modifications de surfaces en usinage avec du hêtre (l'une des principales essences déroulées en industrie).

Disposant d'une dérouleuse industrielle dans notre laboratoire, nous avons déroulé des billons de hêtre avec des copeaux de 950 mm de long (§ II.2.3.1). Les copeaux testés ont été modifiés, avec les revêtements et traitements qui se sont montrés les plus performants lors des essais de microdéroulage. Des essais en industrie de déroulage et de production de plaquettes (fraisage de bois vert) ont ensuite été réalisés pour finaliser le projet. Tous les essais ont été faits dans un premier temps avec l'application des modifications de surface sur les deux faces des copeaux (face d'attaque et de dépouille). Dans un second temps, nous les avons effectués après réaffûtage (traitements uniquement sur une face).

Il faut noter que compte-tenu du caractère confidentiel de ce projet, certaines informations, en particulier celles liées aux travaux de nos partenaires, ne peuvent être précisées dans ce mémoire de thèse.

III.3.2. Matériaux des outils

Pour répondre aux interrogations quant au rôle joué par le matériau de base (dureté et structure métallurgique) des copeaux, nous avons utilisé un acier allié 90CMV8 (nuance d'acier fréquemment utilisée en France pour la fabrication d'outils de coupe du bois), un acier rapide HSS18 (nuance d'acier fréquemment utilisée en Pologne pour la fabrication d'outils de coupe du bois) et un acier fritté S390. Les nuances données sont propres à chaque fabricant (Tableau.III.3).

Éléments chimiques (% at)	Acier allié '90CMV8'	Acier rapide 'HSS18'	Acier fritté 'S390'
C	0,5	0,7-0,78	1,6
Si	1	0,4	-
Mn	0,5	0,4	-
P	-	0,03	-
Si	-	0,03	-
Cr	8	4,5	4,8
Mo	1,5	-	2
W	-	18	10,5
V	0,5	1,2	5
Co	-	-	8
Trempe (C°)	1020-1050	1230	
Revenu (C°)	520-580	530	-
Dureté (HRC)	55-56	62	-

Tableau.III.3 : Appellation et composition chimique des aciers utilisés

III.3.3. Les modifications superficielles

Durant ce projet, différents traitements de surfaces ont été testés.

III.3.3.1. Nitruration ionique basse température

En plus des films durs en couches minces, nous avons également étudié le comportement mécanique d'outils dont la surface a été durcie par des traitements de nitruration ionique basse température. Ces traitements ont été réalisés par l'un de nos partenaires polonais PW-WIM (Politechnika Warszawska-Wydział Inżynierii Materialowej). D'après les données fournies par ce laboratoire, seule la température d'élaboration variait, les autres paramètres d'obtention sont confidentiels.

Dans le Tableau.III.4 sont résumées l'appellation donnée par ce laboratoire pour chaque traitement, la température d'élaboration ainsi que la dureté Vickers maximale mesurée sur la surface modifiée. Nous remarquons que pour une même température de nitruration, la dureté change selon le substrat utilisé. Nous notons également que la dureté du substrat ainsi que sa structure métallurgique influent énormément sur la dureté finale après traitement.

Appellation du traitement de nitruration basse température	Température de nitruration (°C)	Dureté Vickers (HV _{0,1})
Nitruration type H	500	1500, 'HSS 18'
Nitruration type L	300	1300, 'HSS 18'
Nitruration type D	300	1600, '90CMV8'
Nitruration type T	500	1400, '90CMV8'
Nitruration type U	350	1800, '90CMV8'

Tableau.III.4 : Types de traitements de nitruration réalisés par PW-WIM

Dans un premier temps, les nitrurations H et L ont été réalisées sur l'acier rapide HSS18. La nitruration de type H présente une couche de diffusion d'une épaisseur inférieure ou égale à 200 µm, constituée principalement de Fe₄N tandis que la nitruration de type L présente une couche de diffusion inférieure ou égale à 40 µm (Figure.III.16).

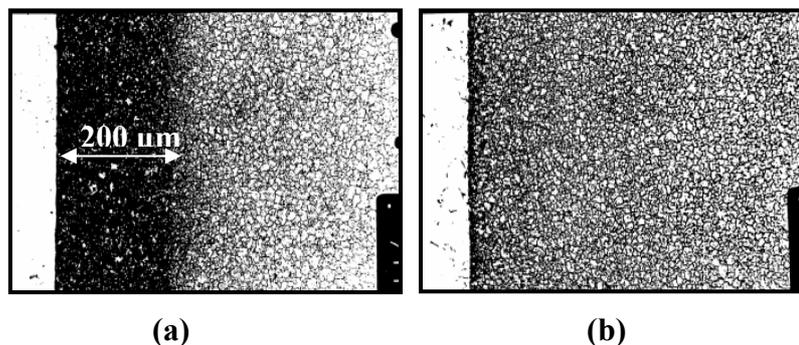


Figure.III.16 : Couche de nitruration (a) type H, (b) type L

Le profil de dureté Vickers en fonction de la distance d'indentation mesurée à partir de la surface modifiée a été calculé (Figure.III.17.a). La nitruration de type H présente une

valeur de dureté nettement supérieure (environ 1550 HV) à celle du substrat (1000 HV) et de la nitruration de type L (environ 1300 HV).

D'après la micrographie de la figure.III.17.b, nous remarquons que ce genre de traitement fragilise l'arête de coupe des outils en acier rapide, avant même la réalisation de tests d'usinage.

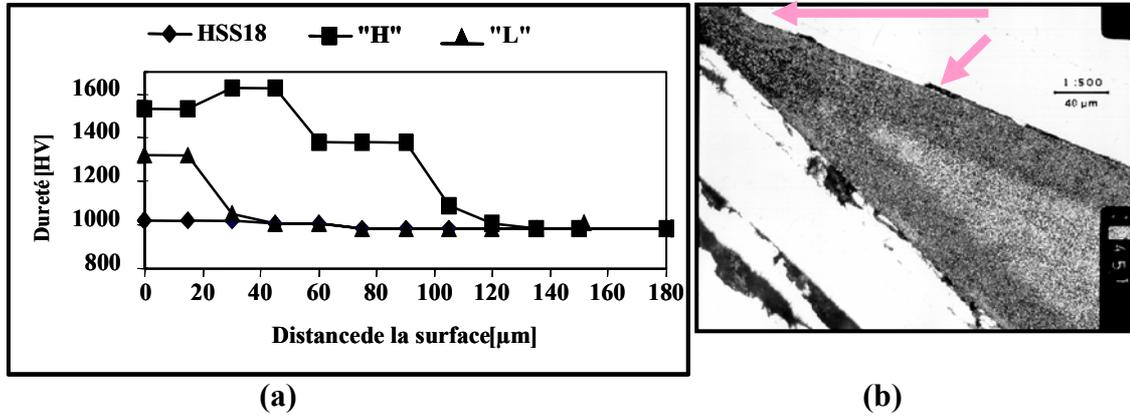


Figure.III.17 : (a) Profil de dureté des nitrurations de type H et L, (b) Arête fragilisée d'un outil en acier rapide HSS18 nitruré H

Ce même constat a été retenu pour les outils en acier allié (90CMV8) (Figure.III.18).

Suite à ces problèmes de fragilisation de l'arête de coupe, trois autres types de nitruration ont été réalisés sur acier allié '90CMV8' (type T, D et U).

La dureté de ces différents traitements a été mesurée (Figure.III.19). Nous notons que la nitruration de type U confère à l'acier allié la valeur de dureté la plus importante (environ 1900 HV).

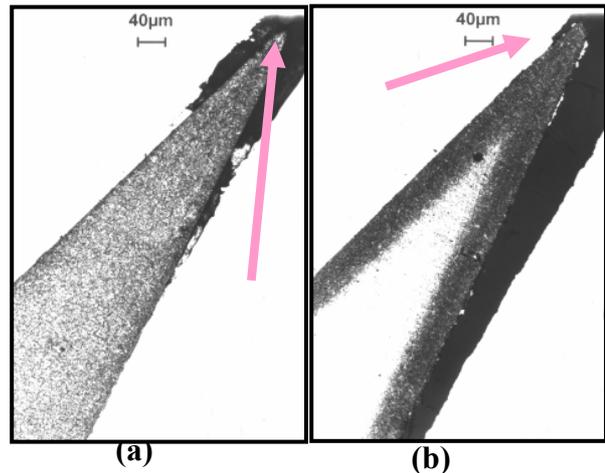


Figure.III.18 : Arêtes fragilisées d'outils de coupe en 90CMV8 nitrurés : a)- type H, b)- type L

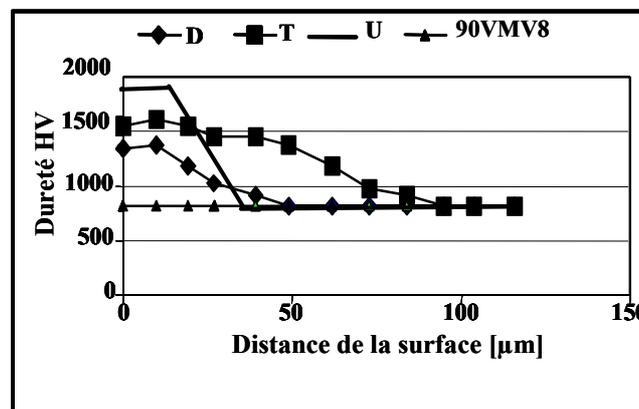


Figure.III.19 : Profil de dureté des nitrurations type D, T et U

III.3.3.2. Films durs

Les films de DLC testés durant le projet ont été élaborés dans des conditions optimales par un laboratoire suisse (CSEM, Centre Suisse d'Électronique et de Microélectronique). Selon la méthode d'élaboration, trois films DLC ont été synthétisés (Tableau.III.5) et ont été appliqués sur substrats en couche simple ou en association avec un traitement de nitruration dans le but d'augmenter l'adhérence des films.

Films DLC	Méthodes d'élaboration
DLC 1	Dépôt chimique en phase vapeur activé par plasma – radio fréquence
DLC 2	Pulvérisation cathodique par arc évaporation
DLC 3	Pulvérisation magnétron assistée par plasma

Tableau.III.5 : Films de DLC synthétisés par CSEM

Une étude approfondie des propriétés des films minces de CrN et Cr₂N a été menée lors du travail de thèse de Nouveau [59]. Cette étude a permis de définir les conditions optimales d'obtention des phases cubique CrN et hexagonale Cr₂N. Aussi, des couches de CrN et Cr₂N ont été appliquées sur substrats acier en monocouches, multicouches (CrN+ Cr₂N) ou en traitements duplex (nitruration ionique+Cr_xN_y).

III.3.3.3. Traitements duplex

Nous avons testés le comportement d'outils durcis superficiellement par nitruration ionique basse température suivi d'un dépôt de films minces (CrN, Cr₂N ou DLC) afin de voir l'apport du pré-traitement sur la tenue en usinage des outils (adhérence des films).

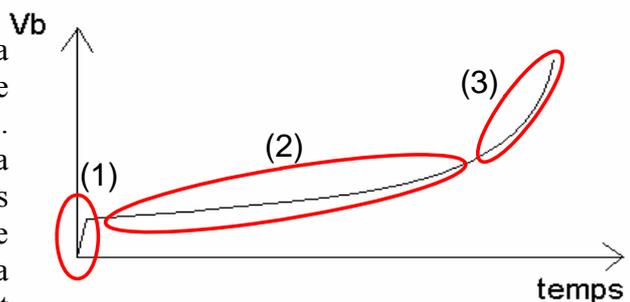
III.3.4. Tests d'usinage du bois

Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé différents traitements de surface et un grand nombre d'équipements d'usinage du bois. Pour une meilleure lecture de ce manuscrit, un synopsis sous forme de tableau est joint en annexe.

Usure des outils

La figure.III.20 est l'illustration de la vitesse d'usure V_b d'outils d'usinage des métaux en fonction du temps. Nous y distinguons trois zones. La zone 1 correspond aux premiers instants de l'usinage, traduisant une usure très rapide de l'outil. Pour la mettre en évidence, une cassure est ajoutée pour relier l'origine aux premières mesures.

La zone 2 correspond au régime où la vitesse de l'usure est moins importante. La zone 3 représente le début de la dégradation de l'outil et sa fin de vie.



Courbe du deuxième ordre qui ne passe pas par l'origine. Une cassure est ajoutée pour en tenir compte.

Figure.III.20 : Courbe type d'une usure d'un outil d'usinage des métaux

En ce qui concerne les courbes d'usure des outils de coupe du bois, elles ont la même allure mais le début de dégradation des outils (zone 3) est atteint beaucoup plus loin qu'en usinage des métaux. En effet, une courbe d'usure telle que celle montrée sur la figure.III.20 est atteinte en quelques minutes contre plusieurs jours en usinage du bois (selon les conditions de coupe).

Les tests réalisés en laboratoire ont donc comme but premier de constater l'apport des modifications de surface des couteaux, spécialement dans la zone 1 (rodage de l'outil) et la zone 2. Les traitements les plus efficaces seront testés par la suite en industrie.

III.3.4.1. Microdéroutage de MDF

Dans le but d'étudier le comportement mécanique en usinage des outils modifiés, des tests d'usure par microdéroutage de MDF ont été réalisés. La reproductibilité des essais a été vérifiée en testant deux outils identiques (modifiés ou non).

III.3.4.1.1. Outils nitrurés

La figure.III.21 montre une comparaison des performances entre les outils en acier allié, rapide et nitrurés (type T, D et U) en microdéroutage de MDF. Nous constatons que pour une même valeur du recul d'arête ($82\ \mu\text{m}$), avec l'outil en acier allié nous avons usiné 400 m alors qu'avec l'outil en acier rapide nous avons usiné 1000 m de MDF. Ainsi, remplacer l'outil en acier allié par un outil en acier rapide a diminué la valeur du recul d'arête de fin de test de $58\ \mu\text{m}$. De plus ces courbes semblent diverger, ce qui laisserait présager que cette différence sera plus marquée après une distance d'usinage plus importante.

Par ailleurs, nitrurer l'outil en acier allié par des nitrurations de type T ou D permet de diminuer l'usure de l'arête de $90\ \mu\text{m}$. Aussi, nitrurer un outil de la même nuance (acier allié '90CMV8') par un traitement de nitruration de type U réduit le recul de l'arête de coupe du couteau de $112\ \mu\text{m}$.

À partir des résultats obtenus, nous observons que les modifications de surface des outils agissent principalement durant la phase de rodage de ces derniers (zone 1). En effet, plus la pente des courbes d'usure est faible en début de procédé et plus l'outil montre une bonne résistance à l'usure. Le comportement de l'outil aux tout premiers instants d'usinage conditionne donc sa résistance à l'usure.

Néanmoins, il est important de signaler que ces gains ne sont pas directement représentatifs de la durée de service des outils. En effet, pour avoir des éléments de réponse sur les comportements prévisibles en déroulage des outils modifiés, il est impératif de mener des campagnes d'usinage avec une essence de bois déroulable jusqu'à la fin de vie des outils. C'est-à-dire sur des distances beaucoup plus importantes (jusqu'à 20 000 m) ce qui est difficile à réaliser en laboratoire.

Cependant, les résultats comparatifs obtenus donnent des éléments de réponse quant aux traitements les plus efficaces à retenir pour la suite des expérimentations (nitruration de type U). Le bon comportement qu'ont montré les outils nitrurés, plus spécialement l'outil durci par la nitruration de type U peut s'expliquer par l'augmentation de la dureté

superficielle des outils, ce qui a conduit à une augmentation de la résistance à l'usure de ces derniers (diminution du recul d'arête).

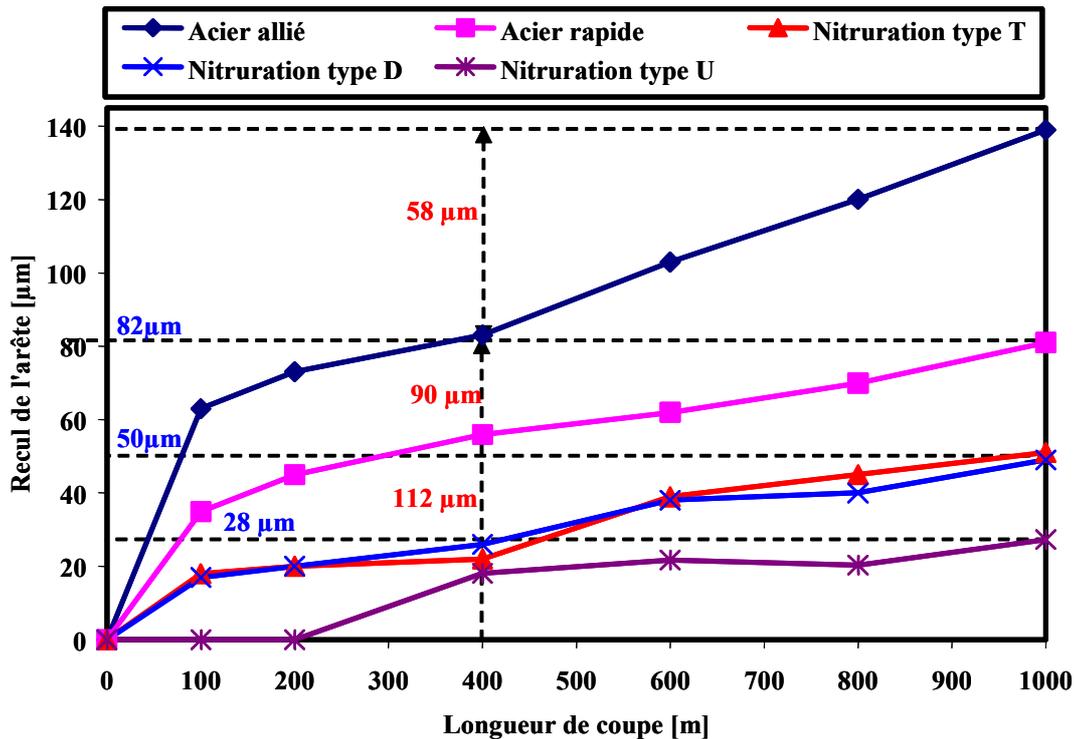


Figure.III.21 : Recul de l'arête en fonction de la longueur de coupe d'outils nitrurés et d'un outil de référence

III.3.4.1.2. Outils revêtus CrN et Cr₂N

La figure.III.22 présente les résultats obtenus à l'issue de la campagne de microdéroutage avec les outils revêtus de monocouches de CrN (face d'attaque et/ou face de dépouille) et multicouches CrN/Cr₂N.

Aussi, et afin d'observer l'effet du positionnement des revêtements, la monocouche de CrN ainsi que la multicouche CrN+Cr₂N n'ont été appliquées que sur la face de dépouille des outils. Nous observons donc que, même si leurs performances sont quelques peu similaires, le couteau revêtu de CrN sur sa face de dépouille a un meilleur comportement, spécialement durant son rodage. Il permet de réduire le recul d'arête de 55 μm. En effet, après 1000 m d'usinage, l'outil revêtu de CrN présente un recul d'arête de coupe de 82 μm tandis que cette valeur est atteinte par l'outil non revêtu après seulement 416 m d'usinage.

Cette différence peut être expliquée par l'évolution des efforts de coupe X_c et Y_c (figure.III.23). A partir de ce graphique nous observons que l'outil revêtu de CrN possède une faible valeur de l'effort de coupe X_c comparée à celle de l'outil revêtu de la multicouche qui quant à elle augmente avec la distance de bois usinée.

De plus, l'effort Y_c de l'outil revêtu CrN possède des valeurs avoisinant zéro et semble rester constant alors que dans le cas de l'outil revêtu de la multicouche, la composante de l'effort de coupe Y_c présente des valeurs plus importantes et augmente de -4,5 à -7N/cm (effort rapporté à la longueur de l'arête de coupe) durant l'usinage.

Ces résultats (usure et efforts), confirment que CrN en monocouche appliqué sur un outil de coupe en microdéroutage lui confère une meilleure résistance à l'abrasion.

En vue d'optimiser le dépôt de la monocouche de CrN, un outil revêtu sur ses deux faces (faces d'attaque et de dépouille) et un outil revêtu seulement sur sa face d'attaque ont également été testés (figure.III.22).

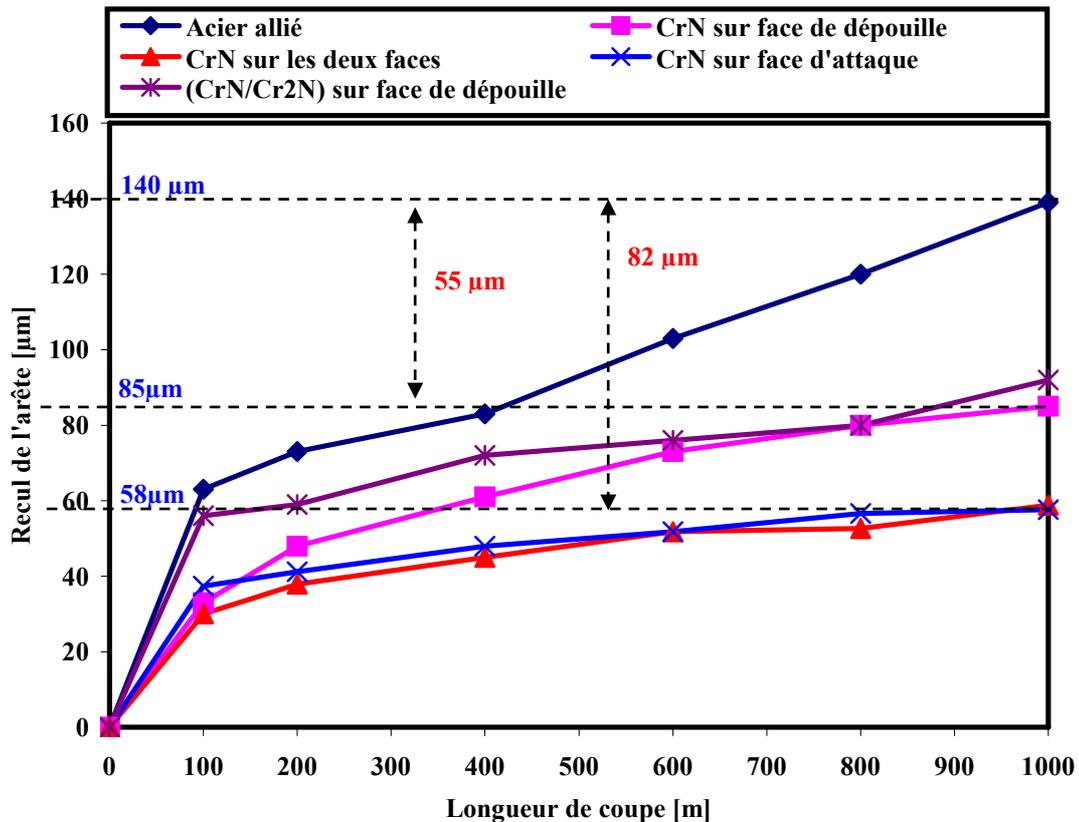


Figure.III.22: Recul de l'arête en fonction de la longueur de coupe des outils revêtus CrN, Cr₂N et de l'outil de référence

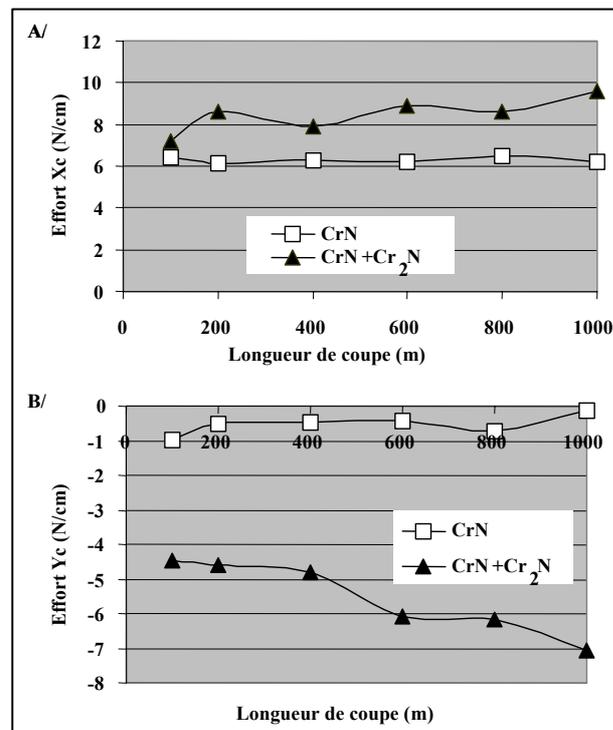


Figure.III.23: Évolution des efforts de coupe en fonction de la longueur de coupe: A/- Xc, B/- Yc

Nous notons que pour une même valeur de recul d'arête ($58 \mu\text{m}$), ces deux outils présentent un comportement proche et permettent de diminuer le recul d'arête de $82 \mu\text{m}$ en comparaison avec l'outil témoin. Il n'est donc pas nécessaire de revêtir les deux faces de l'outil. Par ailleurs, nous notons que l'application du dépôt sur la face d'attaque (face en contact avec le copeau donc la plus sollicitée pendant la coupe et pour une dépouille optimale) est plus efficace que son application sur la face de dépouille. Ce résultat confirme celui noté dans le §III.1 [59] et a pour avantage de permettre un réaffûtage des outils. En effet, en industrie du déroulage le réaffûtage des outils s'effectue sur la face de dépouille (face biseautée de l'outil), appliquer le revêtement sur la face d'attaque ne gênera donc pas cette opération et permettra donc une utilisation multiple de l'outil revêtu.

III.3.4.1.3. Outils revêtus de DLC et CrN monocouches

Nous avons effectué des tests de microdéroulage de MDF pour observer le comportement d'outils revêtus par les films durs : CrN (monocouche sur la face d'attaque) et DLC1 et DLC2. Sur la figure.III.24 sont résumés les résultats obtenus. L'outil revêtu de DLC2 présente un bon comportement durant l'étape de rodage. Après 1000 m de coupe, les deux types de DLC (DLC1 et DLC2) présentent le même taux d'amélioration. En effet, pour une même valeur de recul d'arête ($73 \mu\text{m}$), ces deux outils permettent de diminuer le recul de l'arête de coupe de $67 \mu\text{m}$, en comparaison avec l'outil de référence.

Par ailleurs, si l'on compare les revêtements, nous remarquons que la couche de CrN appliquée sur la face d'attaque permet de diminuer l'usure de $82 \mu\text{m}$ par rapport à l'outil témoin. Même si en début de microdéroulage, ce n'est pas ce couteau qui possède la plus faible pente, en fin de test, il est plus performant que les autres couteaux testés.

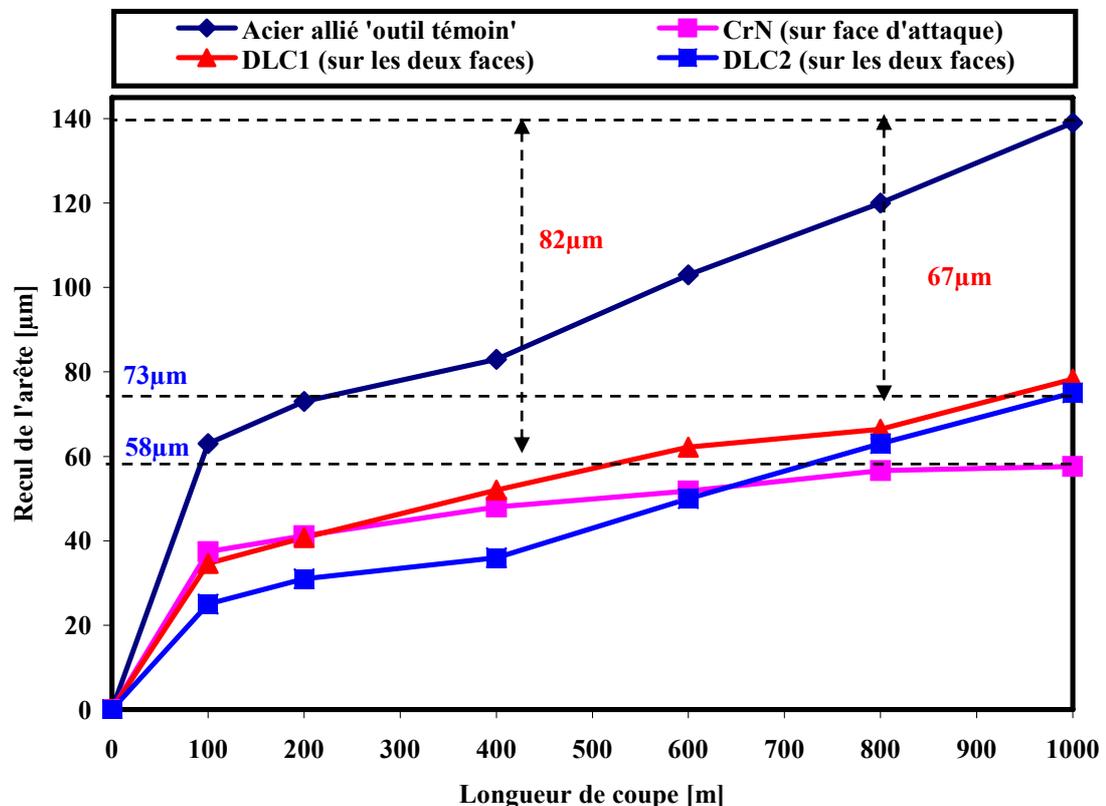


Figure.III.24 : Recul de l'arête de coupe en fonction de la longueur de coupe des outils : témoin, revêtus DLC et CrN monocouches

Cette différence de performance entre CrN et DLC peut être expliquée par la meilleure adhérence que présente la couche de CrN sur substrat en comparaison à l'adhérence des couches de DLC (figure.III.25). Après 1000 m d'usinage, la couche de CrN est toujours présente sur l'arête de coupe et la protège bien tout en présentant une apparence homogène sur la face d'attaque de l'outil. La couche de DLC1 est réduite sur la face de dépouille et ne protège plus l'arête de coupe de l'outil. Or, les revêtements DLC1 et DLC2 ont des épaisseurs respectivement de 4-6 μm et 1 μm tandis que la couche de CrN possède une épaisseur de 2 μm . Il faut rappeler qu'il existe une épaisseur optimale des revêtements sur outils [140,141]. Dans le cas de CrN, l'épaisseur optimale est de l'ordre de 2 à 3 μm [59].

Il est également admis qu'une importante épaisseur du film peut favoriser la création de contraintes internes donc une faible adhérence sur substrats. Par contre, une faible épaisseur de film peut conduire à son inefficacité contre l'usure. Ainsi, en plus de la mauvaise adhérence de DLC sur la majorité des substrats (constat bibliographique), sa moindre performance pourrait également être expliquée par son épaisseur non optimisée.

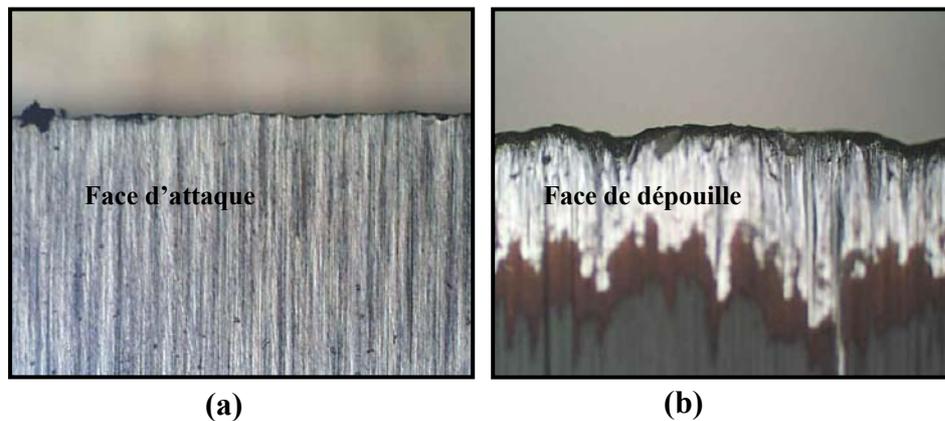


Figure.III.25 : Images optiques d'outils revêtus de : (a) CrN, (b) DLC après 1000m de microdéroutage

III.3.4.1.4. Outils traités duplex

En continuité de nos travaux, nous avons également étudié l'influence que peut induire un durcissement de la surface d'outil par traitement thermochimique (nituration ionique) précédant le dépôt de films de CrN et CrN/Cr₂N sur le comportement en microdéroutage de MDF. Dans ce cas, la notion de modification de l'adhérence des couches sur leurs substrats prend toute son importance.

A partir du graphique porté sur la figure.III.26, nous constatons qu'il n'y a pas de différence notable entre les outils nitrurés et leurs correspondants duplex (nituration suivie d'un dépôt).

Avec la nituration de type T et D, le recul d'arête des outils en fin d'usinage a été réduit de 70 μm . Le même seuil d'amélioration a été noté pour les outils duplex (nituration type T ou D + CrN ou CrN/Cr₂N). Des performances légèrement meilleures sont obtenues grâce aux outils nitrurés U et leurs duplex (nituration type U + CrN- usure réduite de 110 μm) mais restent toute de même proches de celles obtenues avec la simple nituration des outils.

Le fait que les traitements duplex ne soient pas plus efficaces que la simple nitruration des outils peut être expliqué par les valeurs de dureté des couches nitrurées qui sont proches de celles obtenues pour les couches de CrN et Cr₂N. Ainsi, en usinage de MDF (ne présentant pas la structure du bois massif), c'est la dureté de surface de l'outil qui prime sur le comportement des outils. En effet, CrN et Cr₂N présentent des duretés Vickers respectivement de 1900 et 2100 HV [59] et les nitrurations de type U, T et D présentent des duretés Vickers respectives de 1900, 1600 et 1400 HV.

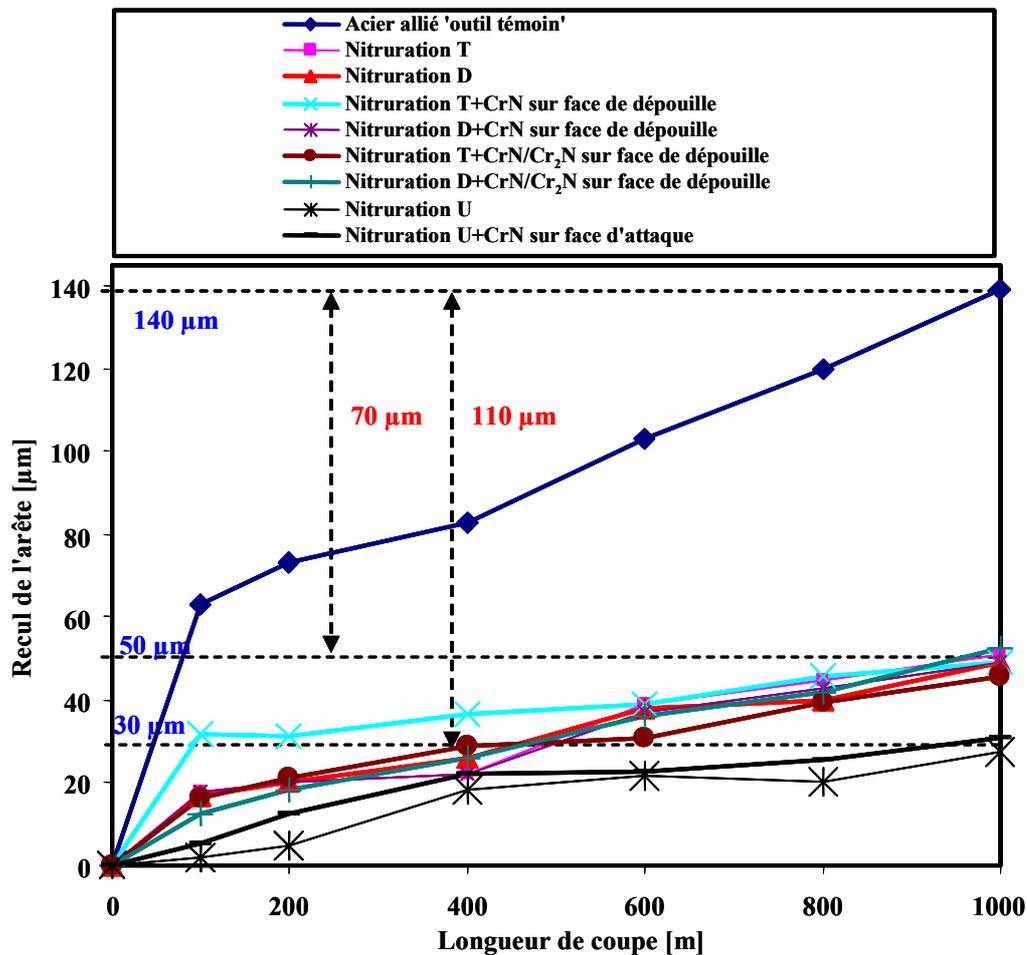


Figure.III.26 : Recul de l'arête de coupe en fonction de la longueur d'usinage de l'outil de référence et d'outils nitrurés et traités duplex

Une autre explication peut également être ajoutée et réside dans la mauvaise adhérence des couches de CrN sur les surfaces nitrurées, spécialement les surfaces nitrurées T. Cette hypothèse est confirmée par les micrographies de la figure.III.27. En effet, on constate que pour les deux types de revêtement utilisés, CrN ou CrN/Cr₂N la couche se délamine en mettant à nu le substrat. Néanmoins, la dureté de surface de l'acier nitruré a permis de garder les mêmes performances de coupe en terme de résistance à l'usure.

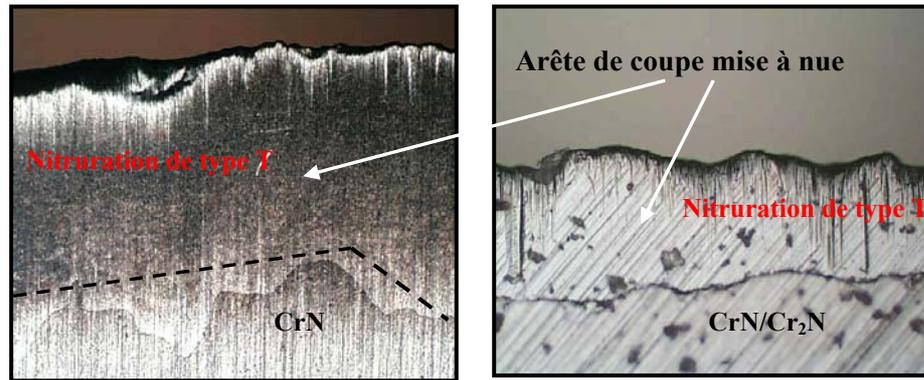


Figure.III.27 : Micrographies d'outils traités duplex : (a) nitruration type T+CrN, (b) nitruration type T+CrN/Cr₂N

III.3.4.1.5. Conclusion

Les conclusions suivantes résument les résultats obtenus au terme de la campagne de tests d'usure d'outils modifiés en microdéroutage de MDF :

- Il est plus efficace de nitrurer l'acier allié que de le remplacer par un acier rapide de plus haute dureté et ténacité et surtout plus onéreux.
- Par ailleurs, nous avons noté et confirmé les résultats obtenus lors du travail de thèse de Nouveau [59]. En effet, la face des outils à revêtir en priorité pour avoir un comportement d'outil le plus optimal possible est la face d'attaque du couteau car c'est celle qui est en contact avec le copeau et donc la plus sollicitée pendant la coupe.
- CrN cubique et DLC2 semblent les revêtements les plus prometteurs pour une application sur outils de coupe industriels. De plus CrN cubique a montré un comportement meilleur que DLC2 durant ces tests d'usure (usinage de MDF).
- Le meilleur comportement des outils nitrurés est attribué à l'outil dont la surface a été durcie par une nitruration de type U (la plus faible valeur de recul de l'arête de coupe).

Conclure sur le comportement d'outils modifiés uniquement à partir de tests d'usure réalisés par microdéroutage de MDF n'est pas suffisant. Pour cette raison nous avons réalisé des tests de microdéroutage de hêtre avec les traitements de surface optimaux retenus (ie: DLC2, CrN et nitruration type « U »).

III.3.4.2. Microdéroutage de hêtre

Sur la figure.III.28 est présenté le recul d'arête des outils en fonction de la longueur totale d'usinage. Nitrurer le substrat avant d'appliquer le dépôt, qu'il s'agisse de couches de CrN ou de DLC, permet de réduire le recul d'arête des couteaux de 47 μm en comparaison avec l'outil témoin. En effet, les deux outils traités duplex, en plus de leur comportement quasi similaire, présentent sensiblement la même valeur du recul d'arête après 3000 m de coupe (75 μm) alors que l'outil témoin possède une valeur d'usure de 122 μm . Nous notons également que la nitruration de la surface précédant le dépôt améliore légèrement le comportement des outils mais ce dernier reste proche de ceux simplement nitrurés. Nous gardons ainsi l'explication qui voudrait que si le revêtement se délamine, mettant à nu le substrat nitruré, l'outil gardera un

comportement semblable. Par ailleurs, l'explication à cette amélioration réside peut-être dans les différentes microstructures que présentent les deux surfaces (nitrurées ou non). Nous pensons que les sites de germination/croissance des surfaces nitrurées conduisent à une amélioration de la cohésion entre le film et son substrat. Ceci est valable pour les films de CrN et non pour ceux de DLC qui ont un comportement contraire. En effet, l'outil simplement revêtu de DLC montre un recul d'arête le plus faible (même par rapport à celui de l'outil préalablement nitruré). Après 2900 m de microdéroutage, cet outil possède un recul de l'arête de coupe égal à 38 μm (valeur d'usure atteinte par l'outil non modifié après seulement 415 m d'usinage). Si l'on traduit les valeurs enregistrées en terme de taux de réduction d'usure, nous constatons que l'on baisse le recul d'arête de 84 μm . Au vu de ces résultats, il semblerait que DLC2 adhère mieux au substrat lors de l'usinage de hêtre que lors de l'usinage de MDF. Ceci était quelque peu prévisible car usiner du hêtre (bois massif et humide) est fondamentalement différent de l'usinage de MDF. Sa coupe génère moins d'usure et moins d'efforts de coupe dans des conditions d'usinage similaires, l'eau extraite jouant le rôle de lubrifiant.

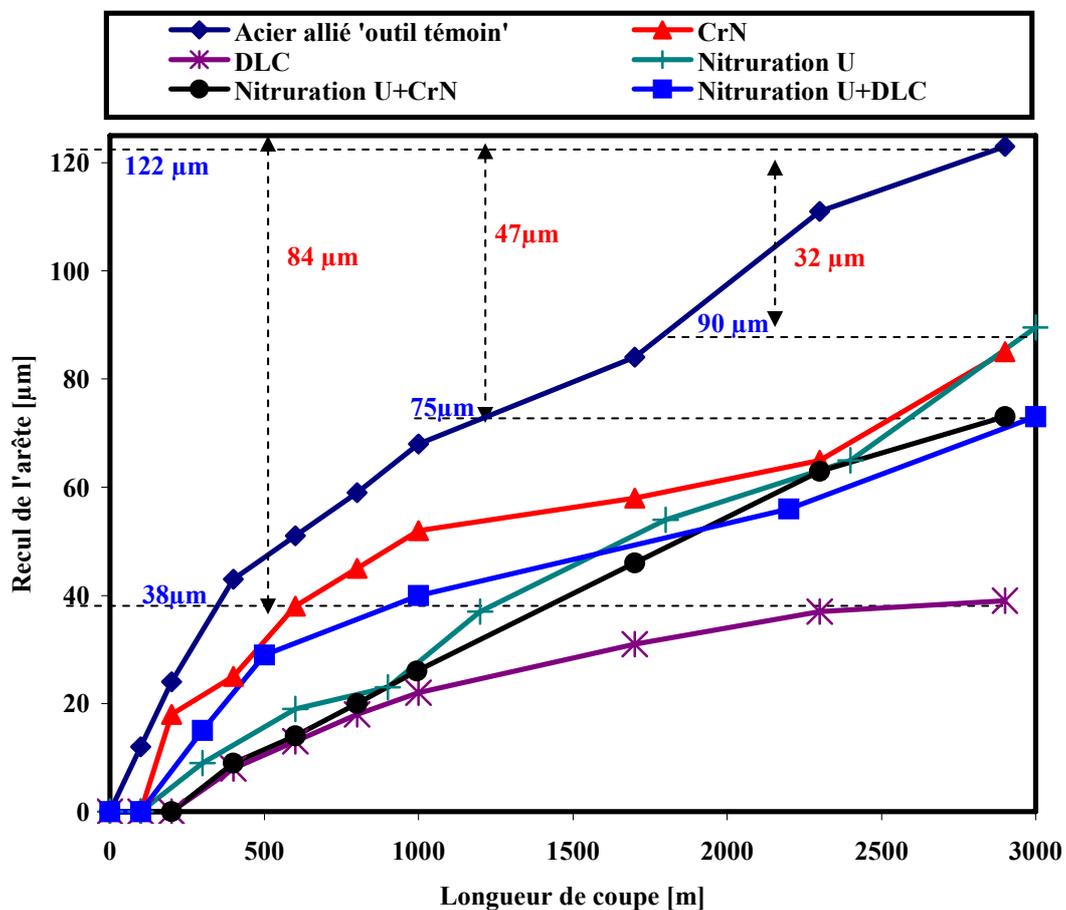


Figure.III.28 : Recul de l'arête des outils modifiés en fonction de la longueur de coupe en microdéroutage de hêtre

Conclusions

Nous avons réalisé des tests d'abrasion par microdéroutage d'une essence de bois déroulable en industrie afin d'approcher au mieux les conditions réelles de coupe. De cette campagne nous avons noté que le revêtement DLC2 a permis de diminuer le recul en comparaison avec un outil témoin. Le faible coefficient de frottement que possède ce matériau mais aussi sa haute dureté peuvent expliquer un tel comportement.

Nous notons également que les outils dont les surfaces ont été traitées duplex se comportent légèrement mieux que les outils simplement revêtus. Ces résultats sont en adéquation avec ceux obtenus à l'issue du travail de thèse de Nouveau [59].

III.3.5. Modifications industrielles des surfaces

Après avoir identifié les traitements de surface optimaux à appliquer sur les outils de coupe industriels (nituration type U, CrN en monocouche, DLC2 et des traitements duplex (nituration type U+CrN ou DLC2)), nous avons transmis à nos partenaires industriels les conditions expérimentales de dépôts à réaliser pour revêtir des échantillons d'acier dans un premier temps. En effet, nous avons alors effectué des caractérisations sur ces échantillons pour vérifier leurs propriétés physico-chimiques (par EDS, observations optiques, DRX).

Ces caractérisations ont été menées sur des couches de CrN déposées industriellement que l'on appellera CrN-GENTA en référence à GENTA-PLATIT, l'entreprise italienne de traitements de surfaces chargée des modifications des outils industriels. Par ailleurs, nous soulignons que ces caractérisations ont également été menées dans le but de comparer la nature et la composition de couches de CrN industriel avec les couches de CrN élaborées et optimisées en laboratoire lors du travail de thèse de Nouveau [59] et ceci afin d'expliquer le comportement des outils modifiés.

Des couches de CrN de 2 μm ont donc été réalisées par GENTA-PLATIT sur la surface de 4 échantillons d'acier par évaporation par arc : deux sur de l'acier allié 90CMV8, une sur un acier rapide HSS18 et une sur un acier fritté S390.

Dans le tableau.III.6 sont résumés les pourcentages atomiques (at.%) de la composition des films élaborés. La figure.III.29 représente le spectre EDS de l'échantillon en acier allié revêtu de CrN-GENTA.

Substrat/film	N (at %)	Cr (at %)	N/Cr
90CMV8/CrN1	41	59	0.7
90CMV8/CrN2	42	58	0.72
HSS/CrN	42	58	0.72
S390/CrN	39.5	60.5	0.65

Tableau.III.6 : Analyse quantitative de la composition des films de CrN obtenus par GENTA

Les couches présentent un ratio N/Cr compris entre 0,65 et 0,72. Elles sont donc sous-stœchiométriques en azote en comparaison avec celles de CrN cubique obtenues par pulvérisation magnétron en laboratoire (où le ratio N/Cr=1). Cependant, il est à noter que nous n'avons pas détecté d'oxygène dans les films analysés. Les observations micrographiques (figure.III.30) révèlent que la surface des films de CrN-GENTA présente sensiblement la même morphologie que la surface des films de CrN élaborés en laboratoire.

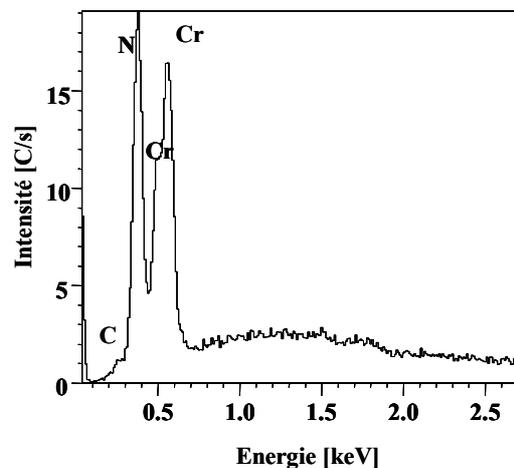


Figure.III.29 : Spectre EDS d'un film de CrN élaboré par GENTA sur acier allié

Il est tout de même à noter que la surface des films industriels est moins rugueuse et contient des amas solides clairsemés que l'analyse superficielle a identifiés comme des îlots de chrome pur.

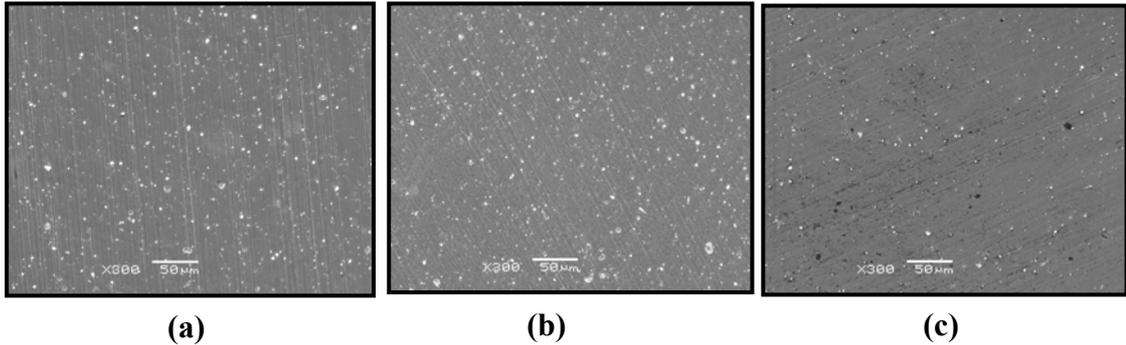


Figure.III.30 : Morphologie de surface des couches de CrN élaborées sur : (a) 90CMV8, (b) HSS18, (c) S390

Afin d'identifier la nature des phases cristallines que contiennent les couches de CrN élaborées industriellement ainsi que celles obtenues en laboratoire, nous les avons soumises à des analyses par DRX et nous avons comparé les diffractogrammes obtenus (figure.III.31).

Les films CrN-GENTA présentent des pics de diffraction qui correspondent à Cr_2N . En effet, nous notons la présence de Cr_2N d'orientation (111) et (110) alors que le diffractogramme de CrN-labo ne présente que les pics de la phase cubique CrN (111), (200), (220) et (311). Par ailleurs, le pic observé vers 43° sur le diffractogramme de CrN-GENTA peut provenir d'un mélange Cr_2N (110) et CrN (111). La largeur à mi-hauteur relativement élevée observée sur les diffractogrammes des couches CrN-GENTA indique que ces films peuvent être constitués d'un mélange des deux phases CrN et Cr_2N . Cette idée est confortée par la présence sur les diffractogrammes de ces couches d'un pic de faible amplitude à 51° correspondant à CrN (200). De plus, les couches obtenues sont sur-stœchiométriques en chrome (60% at.), cf.tableau.III.6, ce qui peut favoriser la formation de Cr_2N .

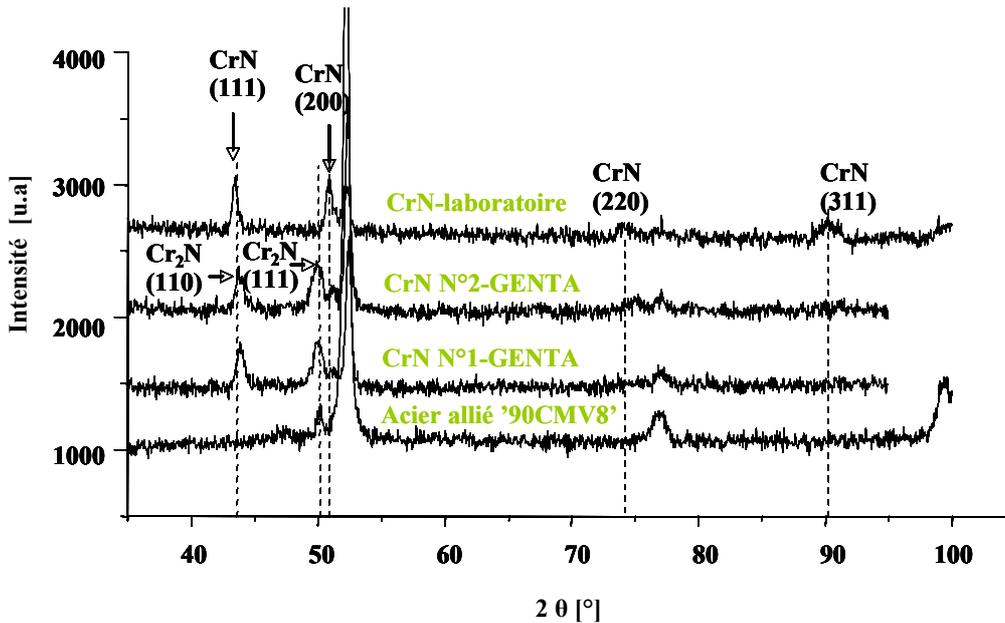


Figure.III.31 : Diffractogrammes des couches de CrN-GENTA et CrN-Labo sur acier allié '90CMV8'

Ce constat a été conforté lors de l'analyse par DRX effectuée sur les couches de CrN-GENTA élaborées sur acier rapide et acier fritté.

À partir des diffractogrammes portés sur les figures III.32 et III.33 nous pouvons voir que les films de CrN-GENTA présentent les pics d'orientations (110) et (111) de Cr_2N , mais également un pic de CrN d'orientation (200).

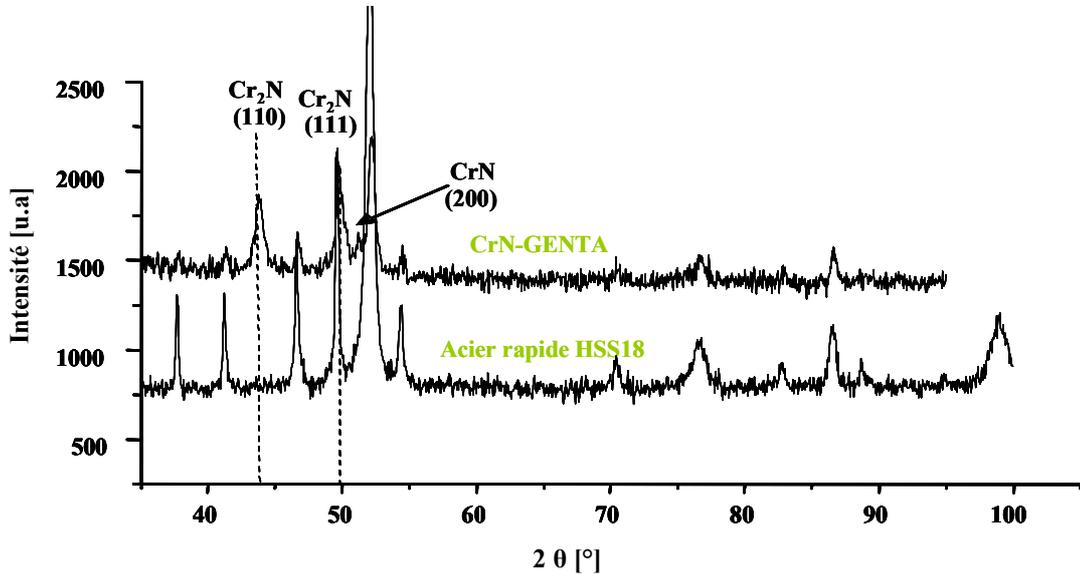


Figure.III.32 : Diffractogramme d'une couche de CrN-GENTA élaborée sur acier rapide

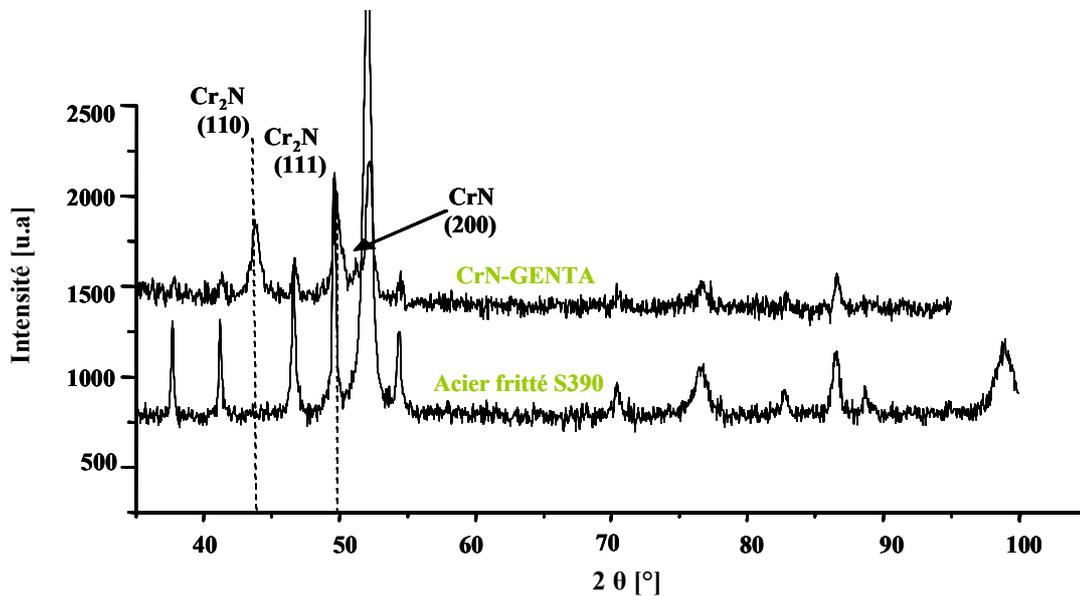


Figure.III.33 : Diffractogramme d'une couche de CrN-GENTA élaborée sur acier fritté

Même si la structure des films est différente, les couches de CrN élaborées industriellement sont bien cristallisées (pics fins) et composées d'un mélange de deux phases (CrN et Cr_2N). Explorer le comportement d'outils revêtus de ces couches en microdéroulage sera informatif.

III.3.5.1. Microdéroutage de MDF

En vue de comparer les couches de CrN-GENTA avec celles élaborées en laboratoire, nous avons réalisé des tests de microdéroutage de MDF puis de hêtre. Deux outils de microdéroutage revêtus de CrN-GENTA sur leurs deux faces ont été testés dans les mêmes conditions d'usine que lors des précédentes campagnes. Les reculs d'arête en fonction de la longueur de coupe sont portés sur la figure.III.34.

Les outils revêtus de CrN-GENTA montrent un comportement très similaire, ce qui prouve la reproductibilité et la fiabilité du procédé industriel de dépôt. De plus ces deux outils permettent de réduire l'usure de l'outil témoin de 98 μm .

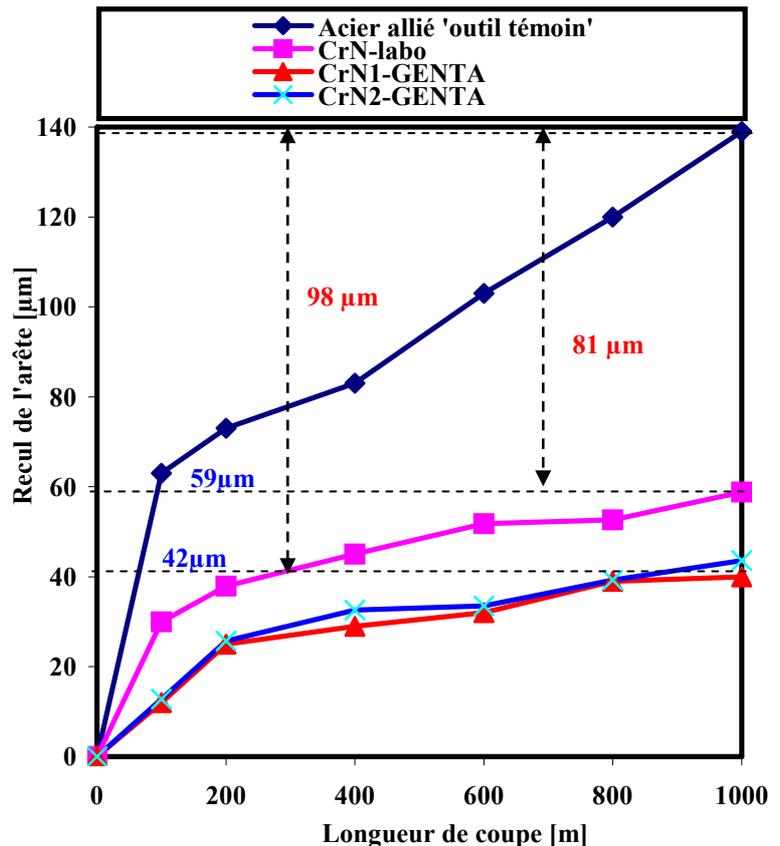


Figure.III.34 : Recul d'arête des outils revêtus de CrN en fonction de la longueur de coupe lors du microdéroutage de MDF

Les outils revêtus CrN-GENTA montrent une résistance au recul d'arête plus élevée que celle de l'outil revêtu de CrN-labo. Ainsi, ce nouveau matériau composé d'un mélange CrN+Cr₂N offre aux outils de microdéroutage un meilleur comportement en terme d'usure (sur 1000 m).

III.3.5.2. Microdéroutage de hêtre

La figure.III.35 résume les reculs d'arêtes des outils revêtus de CrN-GENTA et d'un outil revêtu CrN-labo en fonction de la longueur de microdéroutage et ceci en usinage de hêtre.

Les films industriels se comportent de façon semblable que lors de l'usinage de MDF. En effet, les deux outils traités par GENTA ont un comportement proche, donc toujours une bonne reproductibilité du procédé de dépôt et permettent de réduire l'usure de l'outil témoin de 72 μm . Ces outils se comportent toujours mieux que l'outil dont la surface a été revêtue de CrN-labo qui quant à lui a permis de diminuer le recul d'arête de l'outil témoin de 38 μm .

Ce comportement des films CrN-GENTA peut être expliqué d'une part par leur composition qui est un mélange de CrN et Cr₂N, la phase hexagonale étant plus dure que la phase cubique.

D'autre part, la surface initiale des films obtenus par GENTA était lisse et présentait une rugosité de surface faible. Ainsi, moins de frottement donc moins d'efforts lors de la coupe se produisaient entre l'outil et le bois lors de l'usinage.

Nous constatons donc que les outils revêtus industriellement résistent mieux à l'usure par abrasion que les outils revêtus en laboratoire. Une bonne cristallisation des couches et un excellent état de surface ont conduit à un bon comportement mécanique.

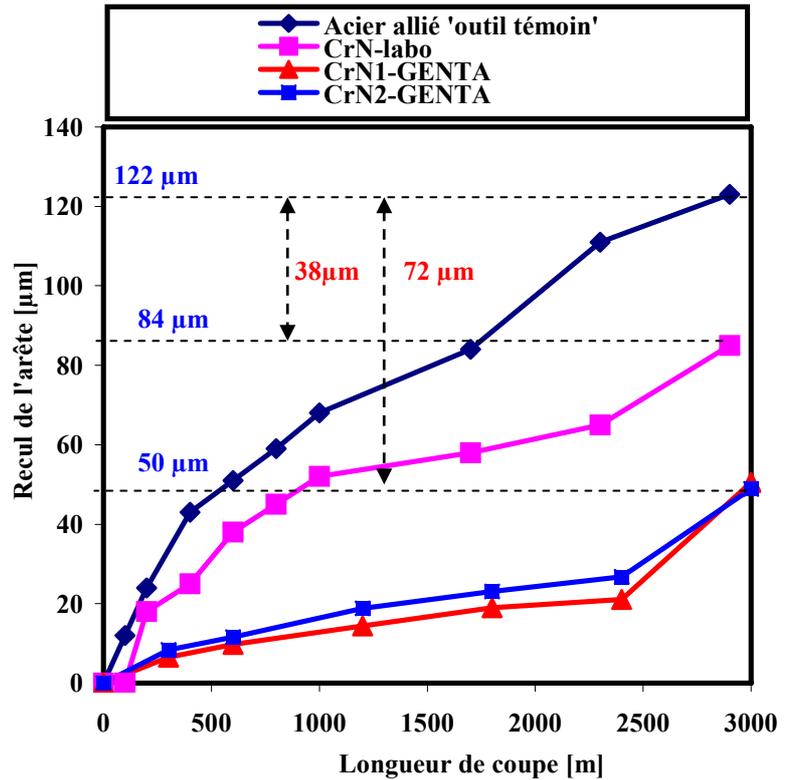


Figure.III.35 : Recul d'arête des outils revêtus de CrN en fonction de la longueur de coupe lors du microdéroutage de hêtre

Conclusions

Lors de cette partie de notre travail, nous avons caractérisé des dépôts de CrN réalisés industriellement. Nous les avons ensuite appliqués sur des outils de microdéroutage après avoir vérifié leurs propriétés mécaniques et physico-chimiques. Des tests d'usinage de MDF avec des outils revêtus de CrN-GENTA ont ainsi été menés et une comparaison avec des outils revêtus en laboratoire a été faite. Des résultats obtenus, il s'avère que les films produits industriellement permettent aux outils conventionnels d'améliorer de façon significative leur résistance à l'usure par abrasion. Un même constat a été fait lors de l'usinage de hêtre avec des outils revêtus de CrN industriellement. Dans les deux cas, les dépôts industriels ont été plus performants que les dépôts obtenus en laboratoire.

III.3.6. Tests avec outils traités sur leurs deux faces (avant réaffûtage)

III.3.6.1. Déroutage industriel de hêtre en laboratoire

Comme nous l'avons cité précédemment, nous avons à notre disposition au LaBoMaP de Cluny une dérouleuse industrielle instrumentée. L'utilisation d'un tel dispositif nous a permis d'obtenir une bonne référence quant au comportement en usinage des outils industriels de taille moyenne (Figure.III.36).



Figure.III.36 : Couteau de dérouleuse 'Sem-automation S500'

Pour effectuer cette campagne d'essais, nous avons employé six couteaux : deux couteaux conventionnels, deux couteaux traités CrN-duplex et deux couteaux revêtus de CrN industriellement. Ce doublement du nombre de couteaux a été réalisé pour assurer la répétitivité des tests. Il faut signaler que nous n'avons pas pu tester des couteaux revêtus de couches de DLC2, bien que ce revêtement ait montré qu'il avait les meilleures performances lors des tests par microdéroutage, car les dimensions des outils étaient trop grandes.

Sur la figure.III.37 est montré le déroulement type des essais de déroulage réalisés au laboratoire. L'opération débute par l'étuvage des billons de hêtre fournis par notre partenaire industriel (BDA), s'ensuivait alors la mise en place des billons sur la dérouleuse puis l'opération de déroulage proprement dite.

Sur la figure.III.38 sont montrées des micrographies optiques de l'enchaînement d'une mesure du recul d'arête des couteaux utilisés en fonction de la longueur totale de déroulage, grâce aux points de référence préalablement usinés. A partir de ces images nous pouvons suivre la diminution progressive de la cote prise entre le point de référence et l'arête de coupe des couteaux. Ainsi, grâce à cette méthode nous avons pu mesurer et quantifier l'usure des outils testés.

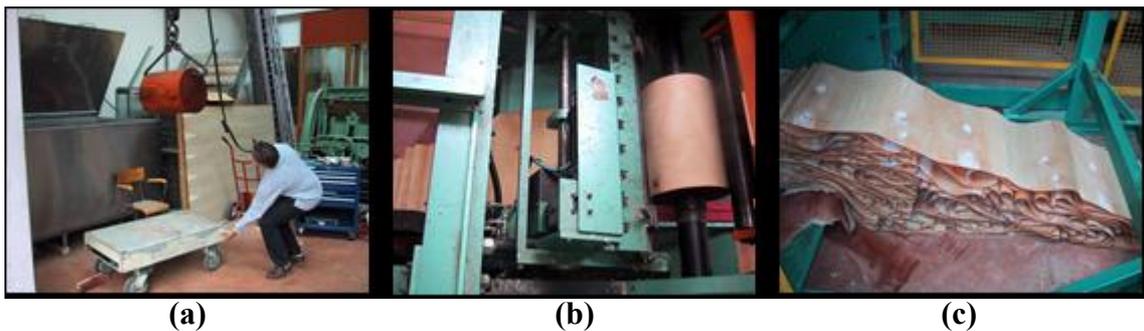


Figure.III.37 : Opération de déroulage : (a) sortie du billon de l'étuve avant sa mise en place sur la dérouleuse, (b) déroulage, (c) placages

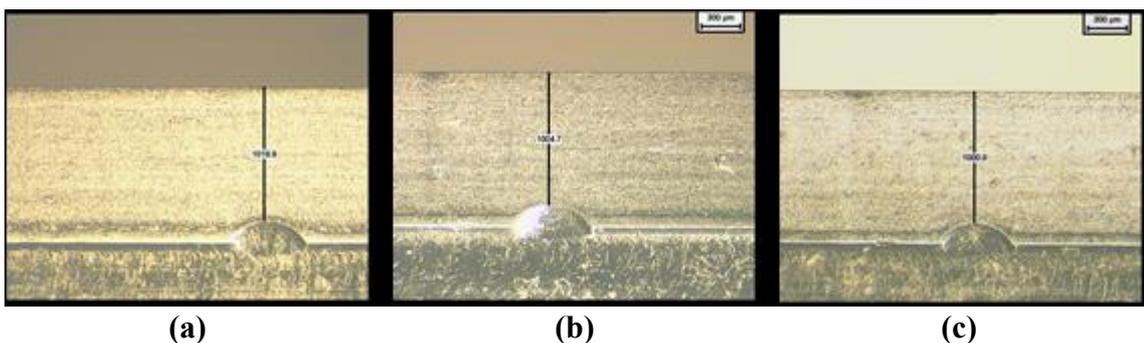


Figure.III.38 : Enchaînement d'une mesure du recul de l'arête des couteaux après : (a) 2900m, (b) 3900m, (c) 5060m de déroulage de hêtre

La figure.III.39 représente une comparaison des reculs d'arête des couteaux de déroulage testés. Pour réaliser cette campagne d'essais, un nombre important de billons de hêtre a été utilisé. Un volume très important de placages a ainsi été produit. Au début des essais, nous avons utilisé un couteau différent pour effectuer la mise au rond des billons et leur déroulage afin de ne pas détériorer trop vite l'arête de coupe. En effet, durant l'opération de mise au rond, l'outil est soumis à de nombreux chocs dus à la

forme irrégulière du bois brut mais aussi à la présence de corps étrangers (cailloux) à sa périphérie. Sachant en réalité qu'en industrie la mise au rond des billons qui précède la coupe proprement dite est réalisée avec le même outil, nous avons également reporté des courbes du recul d'arête avec et sans mise au rond des billons.

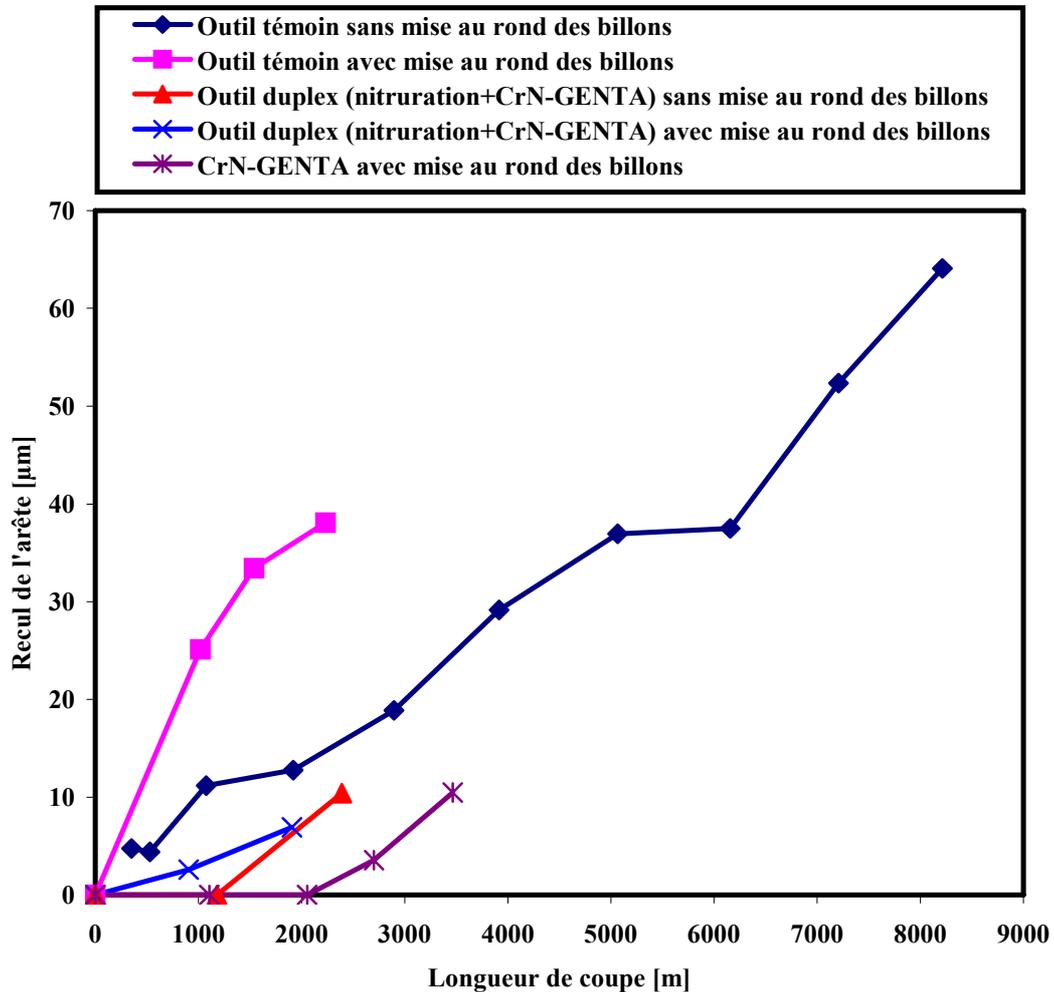


Figure.III.39 : Recul de l'arête d'outils modifiés en fonction de la longueur de déroulage

Ceci étant, nous avons pu constater l'effet de la mise au rond sur le comportement en usure des outils de déroulage. Nous observons que la mise au rond des billons avec le même couteau, dans le cas de l'outil conventionnel, conduit à augmenter le recul d'arête de façon significative. Nous pensons que ce n'est pas tant les chocs répétés qui précèdent l'obtention de la forme cylindrique parfaite du billon qui conduisent à cette usure mais plutôt à cause des résidus d'écorce d'arbre (contenant de la silice et autres matériaux très abrasifs) qui restent collés à la surface du billon après une opération d'écorçage non optimale. Nos suppositions ont été confirmées lors de l'observation de l'allure de la courbe de l'outil conventionnel sans mise au rond des billons.

En effet, après 2200 m de déroulage, le couteau qui a subi une mise au rond présente une valeur d'usure de 38 μm tandis que le deuxième couteau témoin présente une valeur d'usure de seulement 15 μm . Pour les couteaux traités CrN-duplex, le même phénomène a été observé. Le couteau de déroulage qui a montré la plus haute résistance à l'usure est celui dont la surface a été revêtue de CrN-GENTA et ayant subi la mise au rond des billons et leur déroulage. La mise au rond réalisée avec ce couteau ne semble pas avoir d'effet sur le recul de son arête. En effet, si l'on compare la valeur d'usure de cet outil

avec la valeur d'usure de l'outil conventionnel sans mise au rond après 3500 m de déroulage, nous obtenons 10 μm pour le premier et 25 μm pour le second. Par ailleurs si l'on compare les valeurs d'usure entre l'outil conventionnel et l'outil revêtu CrN, tous deux avec mise au rond des billons après 2200 m de déroulage, nous obtenons 38 μm pour le premier et 3 μm pour le second, donc une usure beaucoup moins importante. Les bonnes performances que montre le revêtement dur CrN peuvent être expliquées par son faible coefficient de frottement (tableau.III.7) mesuré à l'aide de la méthode du pion-disque.

Substrat	Coefficient de frottement μ
Acier allié 'témoin'	0,76
CrN-GENTA1 sur acier allié	0,39
CrN-GENTA2 sur acier allié	0,45

Tableau.III.7 : Coefficients de frottement des aciers alliés revêtus ou non

A partir de ce tableau, il est évident que les substrats revêtus de couches de CrN présentent un faible coefficient de frottement (compris entre 0,4 et 0,46). Ce coefficient est divisé par deux en comparaison avec les coefficients mesurés sur les substrats en acier allié non revêtus. Ceci permet une meilleure évacuation du copeau sur la face d'attaque des outils conduisant à de plus faibles efforts de coupe durant le processus de déroulage et ainsi, permettant les bonnes performances des couteaux revêtus. Par ailleurs, une autre donnée non négligeable s'impose à nous lors de tests de cette nature. Toute l'attention de l'opérateur de déroulage est portée sur la qualité de surface du placage produit. Si une cassure apparaît sur l'arête de coupe, cela se traduit immédiatement par l'apparition de stries sur le placage. Ainsi, nous avons observé l'aspect de l'arête de coupe des couteaux utilisés ainsi que l'état de surface des placages produits.

Sur la figure III.40 sont montrés les types d'endommagements des arêtes de coupe des outils lors de l'usinage de nœuds. Nous remarquons que l'outil traité CrN-duplex présente un endommagement de type fragile. Des cassures vives et franches apparaissent sur l'arête de coupe du couteau. Cet effet est beaucoup plus marqué sur le couteau qui a subi la mise au rond des billons (figure.III.40.a). L'augmentation de la dureté superficielle de l'arête de coupe a conduit à sa fragilisation. Par ailleurs, le couteau témoin montre quant à lui un endommagement de type ductile (figure.III.40.b) résultant de l'écrasement et de la torsion de l'arête de coupe de l'outil. Cette constatation confirme la précédente (fragilisation de l'arête de coupe par nitruration).

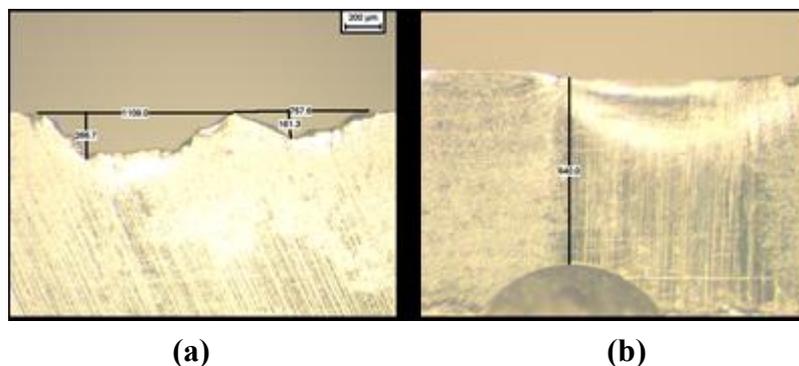


Figure.7.40 : Types d'endommagement de l'arête de coupe : (a) fragile pour le couteau traité CrN-duplex, (b) ductile pour l'outil conventionnel

L'observation de la surface des placages produits a été effectuée pour apprécier l'incidence des cassures sur la surface des placages (figure.III.41). Les placages produits par le couteau traité duplex présentent le plus grand nombre de stries et ceux-ci apparaissent prématurément après les premiers cent mètres de déroulage (400 m). Le traitement duplex améliore la résistance à l'usure des outils mais en contre partie augmente trop la fragilité des arêtes de coupe et détériore par là même la qualité des produits finis. Les placages produits par le couteau conventionnel présentent sensiblement le même nombre de stries mais après 1000 m de déroulage. Par contre, ceux produits par le couteau revêtu de CrN montrent peu de stries de placage après 2600 m de déroulage.

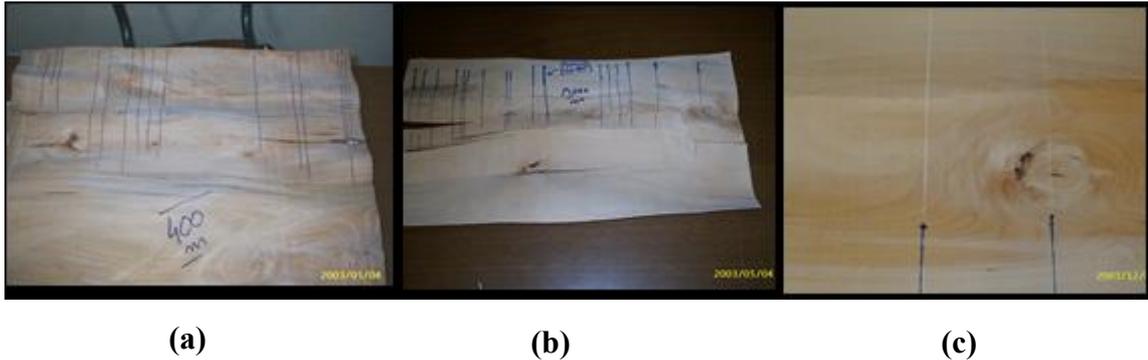


Figure.III.41 : Stries sur placages produits par : (a) l'outil traité duplex après 400 m de déroulage, (b) l'outil témoin après 1000 m de déroulage, (c) l'outil CrN après 2600 m de déroulage

III.3.6.2. Déroulage industriel

Les tests avec les lames revêtues sur les deux faces n'ont pas pu avoir lieu car ces outils ont montré un refus de coupe immédiat à l'instant où l'on a voulu débiter l'usinage. Après mesure de l'angle de bec des outils, il s'est avéré que ce refus de coupe était dû à un angle de bec trop élevé. En effet la mesure a donné une valeur proche de 23° . Dans un souci de préserver les conditions de coupe de cette entreprise, nous n'avons pas voulu modifier l'angle de dépouille de la lame. Ainsi nous avons procédé immédiatement à l'affûtage des deux lames et nous avons réalisé les essais avec des lames revêtues uniquement sur la face d'attaque.

III.3.6.3. Fraisage de douglas

Pour réaliser les tests de production de plaquettes en scierie, nous avons employé plusieurs outils traités différemment : 9 couteaux de référence, 9 couteaux nitrurés, 9 couteaux revêtus CrN et 9 couteaux revêtus DLC. Nous n'avons pas testé d'outils traités duplex car nous avons constaté lors des tests de microdéroulage de MDF que le comportement des outils nitrurés et traités duplex était similaire.

Pour réaliser des tests comparatifs en s'affranchissant de la forte hétérogénéité des bois, nous avons positionné sur le rayon interne de la tête Canter, deux outils traités différemment et un outil témoin non traité afin que ces derniers usinent le même lot de bois (figure.III.42).



Figure.III.42 : Tête Canter avec ses différents rayons : 1, 2 et 3

Mode de remplacement des outils

L'entreprise où nous avons réalisé nos essais procède en temps normal au remplacement des outils toutes les deux semaines, jugeant que cette période correspond à la fin de service des outils et qu'un réaffûtage s'impose. Cependant, chaque semaine, les opérateurs intervertissent les positions des outils en changeant ceux du rayon interne avec ceux du rayon externe de la tête Canter pour prolonger la durée de service des outils. Ces changements/remplacements sont effectués en temps masqué (entre 12h00 et 13h30). Après réaffûtage, les outils sont à nouveau positionnés sur la tête des Canter pour une nouvelle période de production.

Relevés des reculs d'arête des outils

Afin de ne pas gêner la production de l'entreprise, nous avons positionné les outils testés pendant les temps morts et nous avons relevé les valeurs des reculs d'arête après chaque semaine de service. Par ailleurs, nous avons poussé la durée de l'emploi des outils modifiés au-delà de deux semaines afin de constater si les traitements utilisés améliorent ou non leur résistance à l'usure.

Conformité des produits et sciages

La première approche que nous avons adoptée a été de constater si la nouvelle dureté de surface des outils avait une influence sur la qualité des plaquettes produites et sur l'état de surface des pièces de bois équarries (forme de la grume après passage de la tête de fraisage). Ainsi, après les premières heures d'usinage, nous avons prélevé une quantité de plaquettes (figure.III.43.a) que nous avons comparées à celles produites par un jeu de couteaux non modifié. Nous avons ainsi constaté, avec les opérateurs, que les plaquettes produites étaient tout à fait conformes aux exigences de production et que le taux de fines (plaquettes non conformes) n'était pas plus important. Les mêmes constatations ont été retenues quant à l'état de surface des équarries (figure.III.43.b).

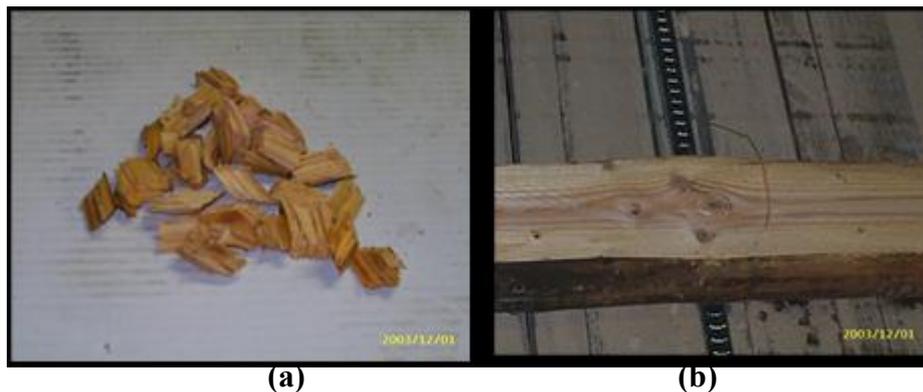


Figure.III.43 : (a) Plaquettes en bois produites avec les outils modifiés, (b) Surface d'une pièce équarrie

Comportement des outils modifiés

Pour quantifier le comportement en service des outils, nous avons adopté deux approches : l'une basée sur la quantification de l'usure des outils par la mesure du recul des arêtes de coupe et l'autre sur la présence d'ébréchures. La mesure du recul d'arête

avec la méthode au comparateur a été utilisée sur site comme première estimation de l'usure des outils. Étant donné que la méthode de mesure avec les points de référence décrite antérieurement est plus fiable, nous l'avons utilisée comme deuxième estimation. Sur la figure.III.44 sont portés les relevés des reculs d'arête des couteaux enregistrés après chaque semaine d'emploi. Après la première semaine d'utilisation nous remarquons que les relevés effectués sur les outils nitrurés et revêtus CrN sont proches de l'ordre de l'erreur de mesure. Ces deux outils présentent des reculs d'arête respectivement de 95 et 99 μm , valeurs plus faibles de 50 μm par rapport à la valeur obtenue par l'outil de référence (151 μm). Ainsi, après une semaine d'utilisation nous avons déjà noté une amélioration de la résistance à l'usure des outils grâce aux traitements de surface. Par ailleurs, nous avons noté que les outils revêtus de couches de DLC n'améliorent pas la résistance au recul d'arête et ont un comportement similaire à celui des outils de référence. Pour cette raison, nous n'avons pas prolongé les essais avec les couteaux revêtus de couches de DLC sur les deux faces. Par contre, ils seront repris pour les essais après réaffûtage, cf § III.5.7.3.

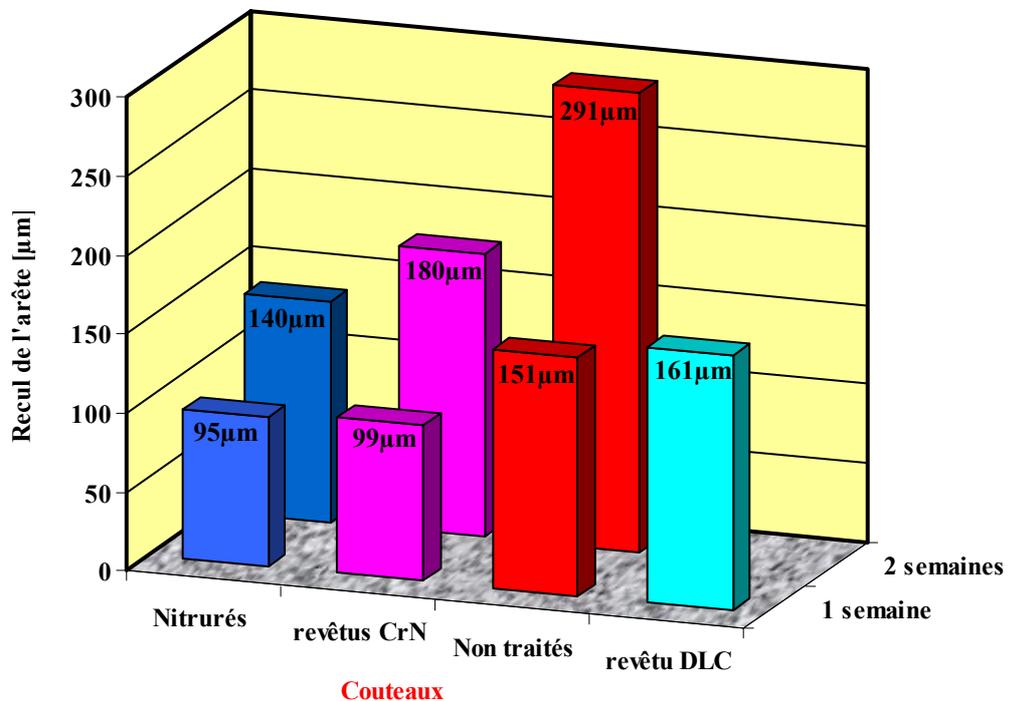


Figure.III.44 : Reculs d'arête des outils utilisés en scierie traités ou non

L'observation micrographique effectuée sur la face de dépouille de ces couteaux révèle que leur comportement est dû au délaminage presque total du revêtement sur l'arête de coupe mettant cette dernière à nu (figure.III.45). Pour cette raison ce traitement a été écarté de la série des tests au bout d'une semaine d'utilisation. Après deux semaines d'utilisation, les outils nitrurés présentent une nette amélioration de la résistance à l'usure. En effet, la valeur de leur recul d'arête moyenne est de 140 μm , soit 40 μm plus faible que la valeur obtenue par les outils revêtus de CrN et 151 μm plus faible que celle des outils de référence.

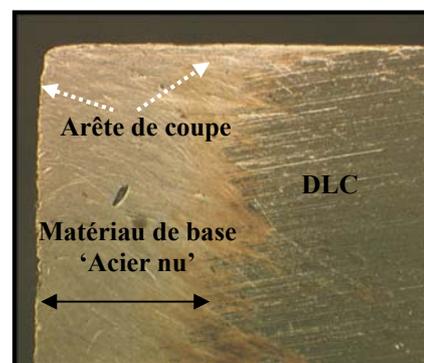


Figure.III.45 : Délamination précoce du revêtement DLC observée sur la face de dépouille de couteau du canter

En ce qui concerne la résistance aux ébréchures des arêtes de coupe, après observations micrographiques (figure.III.46), nous remarquons que les couteaux revêtus de CrN montrent une résistance relativement meilleure que celle des autres couteaux modifiés. L'arête de coupe montre un aspect régulier. Encore une fois, nous pensons que ce revêtement améliore la glisse du bois et des plaquettes sur les deux faces des couteaux, de part sa bonne adhérence sur substrats et son faible coefficient de frottement.

Par ailleurs, en déroulage, nous avons constaté que le fait de nitrurer l'outil fragilisait l'arête de coupe de ce dernier. Dans le cas de ces tests, l'angle de bec des outils de Canters, plus important que celui des outils de dérouleuse, diminue cette fragilisation et donc l'aptitude de l'arête à être ébréchée. Ainsi, le comportement des couteaux nitrurés est meilleur lors de ce procédé d'usinage.

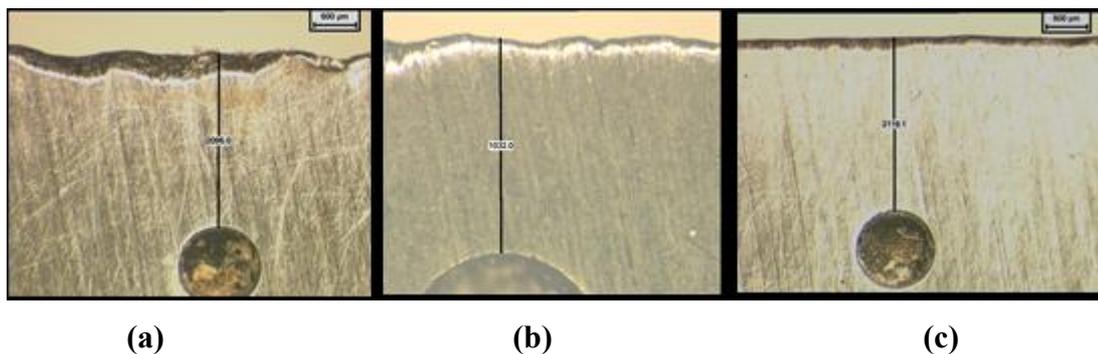


Figure.III.46 : Arête de coupe d'un outil : (a) de référence, (b) nitruré, (c) revêtu CrN après 15 jours d'utilisation

III.3.7. Tests avec outils réaffûtés

L'enjeu de pouvoir appliquer les modifications de surface aux outils de l'industrie du bois, est d'être capable de conserver les améliorations apportées après réaffûtage en entreprise. Sachant qu'en déroulage, les entreprises prolongent la durée de vie des couteaux en procédant à un réaffûtage quotidien, il est donc évident que si les outils traités ne peuvent garder les mêmes caractéristiques de protection contre l'usure et contre les ébréchures après affûtage, il n'y a pas d'intérêt à utiliser des couteaux modifiés par traitements.

III.3.7.1. Déroulage industriel de hêtre en laboratoire

Afin de voir l'effet du réaffûtage sur le comportement des couteaux de dérouleuses, nous avons effectué le réaffûtage seulement sur la face biseautée (face de dépouille), comme il est pratiqué en industrie (figure.III.47), ce qui a pour avantage dans notre cas de pouvoir préserver le revêtement sur la face d'attaque. Cette opération a été réalisée avec l'équipement de l'entreprise partenaire.

Nous avons affûté les couteaux traités sur les deux faces et utilisés lors de la campagne précédente de tests. L'affûteuse employée est une machine industrielle employant une meule cylindrique 'boisseau' et travaillant sous arrosage (figure.III.48).

Nous avons adopté deux méthodes d'affûtage :

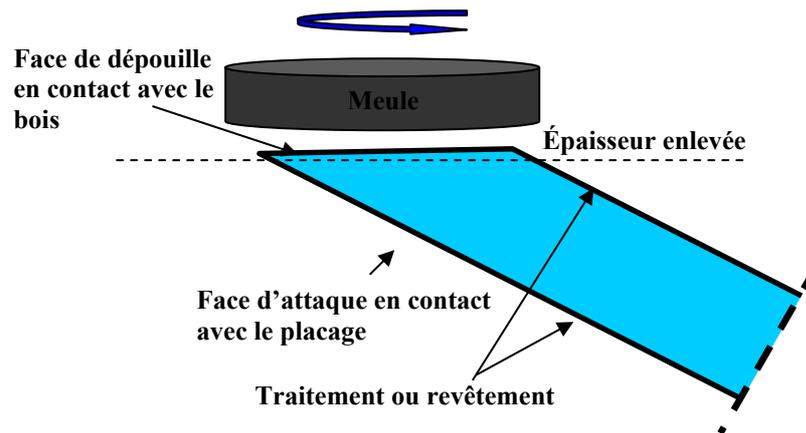


Figure.III.47 : Affûtage de la face biseautée 'face de dépouille'
(Cas des couteaux de déroulage)

La première identique à celle pratiquée par l'entreprise (mode 1) qui consiste à enlever $1/10^{\text{ème}}$ mm d'épaisseur sur la face biseautée de la lame (dans le cas d'ébréchures légères), s'ensuit une opération de finition (morfilage) réalisée manuellement d'abord avec une pierre puis parachevée par le passage d'un morceau de bois, pour enlever les bavures de l'arête résultant de l'affûtage.



Figure.III.48 : Affûteuse industrielle utilisée

La deuxième méthode (mode 2), qui correspond au mode 1 complété par le passage d'un chariot portatif d'affûtage (figure.III.49).

Cet appareil est constitué de plusieurs pierres et équipé de roulettes de guidage. Il est utilisé par l'entreprise partenaire de déroulage pour réaffûter le couteau directement sur la machine en cours de production (à l'apparition de petites ébréchures). Dans le mode 2, nous nous sommes servi de cet appareil pour créer un microbiseau sur l'arête de coupe (figure.III.50 a et b) et étudier son influence sur le comportement de l'outil.

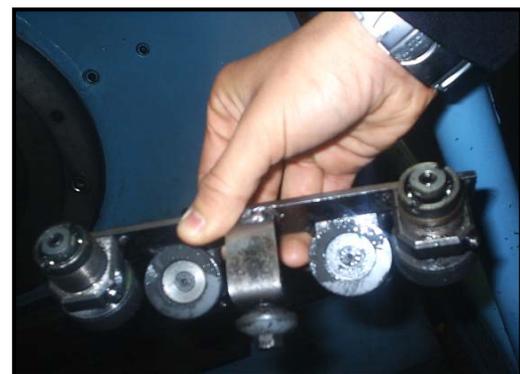


Figure.III.49 : Chariot portatif d'affûtage

En effet, la géométrie particulière de ce dispositif (l'angle formé par les pierres est supérieur à l'angle de bec du couteau) fait que non seulement il permet l'élimination d'ébréchures de petites tailles mais également de créer une cassure d'angle sur la face de dépouille des couteaux (figure.III.50.c).

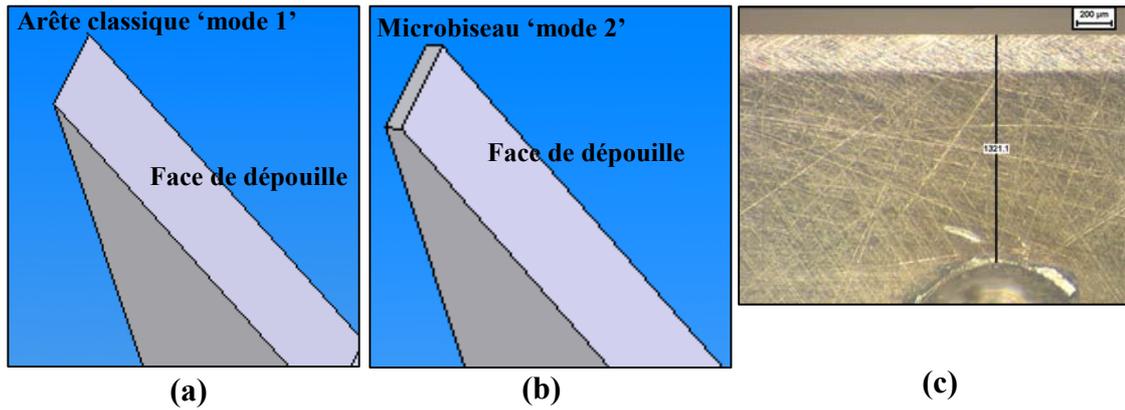


Figure.III.50 : (a) Arête de coupe classique, (b) microbiseau sur la face de dépouille, (c) microbiseau créé par le chariot portatif sur la face de dépouille des couteaux

Sur la figure.III.51 sont reportés les relevés des reculs d'arête des outils testés en fonction de la longueur totale de déroulage et affûtés classiquement (selon le mode 1). Nous observons que tous les outils ont un comportement similaire à celui du couteau témoin. Les traitements semblent ne plus protéger l'arête de coupe des couteaux après affûtage. Cependant, il est important de signaler que ce test a été stoppé prématurément. En effet, au vu du comportement des outils durant la phase de rodage, il aurait été intéressant de dérouler plus longtemps afin d'observer l'évolution de ces courbes d'usure. Mais à cause de contraintes d'expérimentation, nous n'avons pas pu poursuivre ce test.

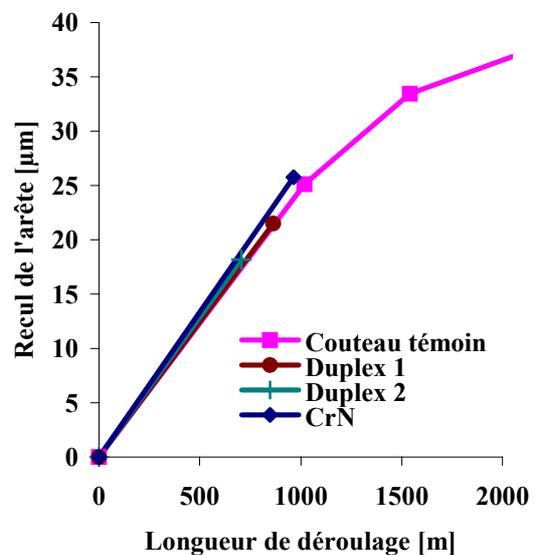


Figure.III.51 : Recul d'arête des outils réaffûtés selon le mode 1

La comparaison entre les couteaux revêtus de couches de CrN mais réaffûtés selon les deux modes est portée sur la figure.III.52. Nous observons que le couteau qui subit la création d'un microbiseau (réaffûtage selon le mode 2) présente un recul d'arête plus faible que celui du couteau classiquement réaffûté. Au regard des résultats portés sur la figure.III.51, nous pensons que ce n'est pas tant le revêtement qui a diminué le recul d'arête de cet outil mais l'augmentation de l'angle de bec du couteau par la création du microbiseau, retardant par là même la vitesse d'usure. Cette nouvelle géométrie peut donc être considérée comme un pré-rodage du couteau. Nous confirmons ainsi que la phase de rodage des couteaux conditionne leur tenue en usure.

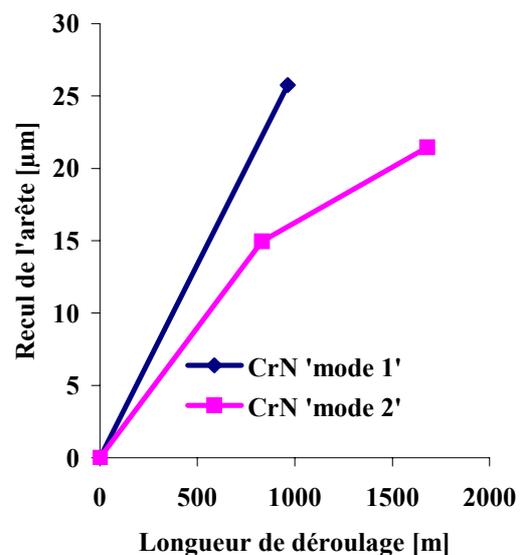


Figure.III.52 : Recul d'arête des outils réaffûtés selon le mode 1 et 2

Des observations micrographiques ont été effectuées sur les placages produits afin de vérifier leur qualité. L'outil avec microbiseau a permis d'obtenir moins de stries de placage. Sa résistance aux ébréchures est meilleure que celle des autres couteaux testés. Lorsque les couteaux sont réaffûtés sans création de microbiseau, l'arête est fragile. Son comportement est similaire à celui du couteau témoin. Dans ce cas, la modification de surface ne joue pas son rôle protecteur. Au vu de ces résultats, nous retenons que c'est la modification géométrique de l'arête de coupe après affûtage qui prime et l'emporte sur les modifications physico-chimiques. Une attention plus particulière sera portée sur l'étude de l'effet de la géométrie de l'arête de coupe des outils dans le chapitre IV.

III.3.7.2. Déroulage industriel

Au vu des résultats obtenus à l'issue des essais de déroulage sur appareillage industriel réalisés à l'ENSAM de Cluny, nous avons testé deux lames de dérouleuse revêtues de CrN industriellement. Les tests se sont déroulés chez un dérouleur industriel français, BDA, selon ses conditions de coupe.

Avec l'accord de l'entreprise, les essais se sont déroulés sur une semaine. Durant celle-ci, de nombreux problèmes ont survenus et ont conduit aux changements des lames. En effet, les bois usinés durant cette semaine contenaient anormalement beaucoup de corps étrangers telles que des balles (figure.III.53.a) ce qui a provoqué la cassure immédiate de l'arête de coupe (figure.III.53.b) et nécessité le remplacement du couteau.



Figure.III.53 : (a) Balle incrustée dans le bois, (b) Cassure de l'arête de coupe

Apport du revêtement

Durant la semaine d'essai, nous avons défini trois situations auxquelles l'opérateur peut être confronté :

- 1- Lorsque des petites ébréchures apparaissent sur l'arête de coupe des outils, que l'on appelle 'dents', l'opérateur est obligé de stopper la production pour intervenir sur la lame avec le passage du chariot d'affûtage. Généralement deux à trois passages suffisent pour éliminer les ébréchures qui sont à la base du déclassement des placages. Ce cas est le plus fréquemment rencontré.
- 2- Lorsque des ébréchures de taille moyenne apparaissent, dans ce cas l'opérateur change de méthode d'intervention. Dans un premier temps il essaie de redresser l'arête de coupe avec une clé ou un marteau puis insiste avec le passage délicat d'une pierre ponce. Généralement, cette méthode fonctionne très peu car elle crée

un relief sur l'arête de coupe et donc une surépaisseur localisée sur le placage produit.

- 3- Lorsque la lame rencontre des corps étrangers autre que le bois, l'opérateur est obligé de la changer. Cette opération nécessite généralement l'intervention d'un autre opérateur pour la mise en place de la nouvelle lame sur la machine. De plus, le temps nécessaire pour remplacer une lame, sa mise en place et son réglage est de l'ordre de 10 minutes.

L'application de traitements de surface au déroulage a donc pour but non pas de protéger la nouvelle arête de coupe des cassures mais d'augmenter la résistance de la lame contre les petites ébréchures nécessitant des arrêts fréquents de la dérouleuse (qui peuvent représenter dans le cas de la production de placages de premier choix jusqu'à 50% du temps de production).

Aussi afin de quantifier l'apport de la couche de CrN nous avons comptabilisé le nombre de fois que l'opérateur est intervenu sur la lame revêtue pour éliminer les ébréchures et le temps nécessaire à chaque intervention. Pour la même distance de déroulage et sous les mêmes conditions, nous avons procédé de la même manière pour une lame de référence afin d'effectuer la comparaison.

Dans le tableau.III.8 sont résumés le nombre et la durée d'intervention pour chaque couteau testé. Ces données ont été obtenues après 7000 m de déroulage (une journée de déroulage).

Couteaux	Durée totale	Nombre total d'interventions
Témoin	20'5''	16
Revêtu CrN	14'55''	9

Tableau.III.8 : Nombre et durée des interventions sur les couteaux de référence et revêtus CrN

De ce tableau nous constatons que l'application de CrN sur la face d'attaque des lames permet de diminuer le nombre d'interventions de l'opérateur. En effet, usiner avec la lame non revêtue a nécessité 16 interventions contre 9 pour la lame revêtue CrN après 7000 m de coupe. La durée totale nécessaire aux interventions était de 20 min et 5 s pour la lame non revêtue tandis qu'elle n'était que de 14 min et 55 s pour la lame revêtue.

Il faut noter que cette durée d'intervention dépend de la réactivité de l'opérateur. Par ailleurs, selon l'opérateur chargé du déroulage, la coupe avec l'outil revêtu provoque moins de nuisances sonores que celle avec l'outil de référence. Il est tout de même à signaler que ces données ne proviennent que d'un seul essai. Pour s'assurer des résultats nous avons confié aux opérateurs de l'entreprise des fiches de suivi de tests. Les résultats sont assez mitigés et dépendent de la nature des bois déroulés, des corps qu'ils contiennent, etc.

Ceci étant, l'affûteur de cette entreprise nous a signalé depuis, que les réaffûtages in situ des lames revêtues est problématique à cause de la différence de dureté entre les deux faces et que l'obtention d'une arête de coupe vive et régulière est difficile. Par contre, il nous a confirmé une meilleure résistance de ce couteau aux ébréchures.

Analyse superficielle des placages

Dans le déroulage, l'arête de coupe de la lame n'est pas en contact avec le bois. En effet, une fente se crée en amont de l'arête de coupe, produite par l'angle de bec de la lame. Cette zone est petite (une centaine de microns) et se situe au voisinage de l'arête de coupe. Ainsi le placage produit lors de la coupe glisse sur la face d'attaque et le billon frotte sur la face de dépouille. C'est précisément dans cette zone que pourrait intervenir l'effet des modifications de la surface des outils sur la qualité de surface des placages.

Lors du stockage dans l'eau des échantillons de placages prélevés en attente de leurs analyses, une modification de couleur s'est créée. En effet, lors du prélèvement des placages à analyser, la couleur de ces derniers était blanche. Après stockage, nous avons remarqué qu'une face s'est assombrie. Dans notre cas, les deux faces des placages déroulés ne sont pas de même nature. L'une frotte sur la face de dépouille non revêtue et l'autre sur la face d'attaque revêtue. C'est peut être là que réside l'explication de cet assombrissement d'une face des placages. Nous avons analysé les deux faces des placages séparément.

Pour les caractériser, deux grandeurs ont été mesurées : l'ondulation sW_a et la rugosité sR_a .

A- Ondulations de surface des placages sW_a

La figure III.54 représente l'évolution de sW_a de la surface des placages produits par les couteaux de référence et revêtus CrN, en fonction de la longueur de déroulage. On remarque que la tendance est à la diminution de sW_a au fur et à mesure que le couteau s'use et ceci quelle que soit la face du placage analysée. Durant les tout premiers mètres de déroulage, l'arête de coupe de l'outil est sensible aux vibrations. Les oscillations de l'arête, très vives, lors du régime transitoire de coupe induisent des ondulations (défauts du deuxième ordre) de surface. La phase de pré-rodage de l'outil étant atteinte après 2000 m, l'amplitude des ondulations de surface baisse. Cette diminution est remarquée quel que soit le couteau utilisé.

Par ailleurs, les ondulations superficielles des placages produits par l'outil revêtu et analysés sur la face sombre ne cessent de diminuer jusqu'à 7500 m de déroulage.

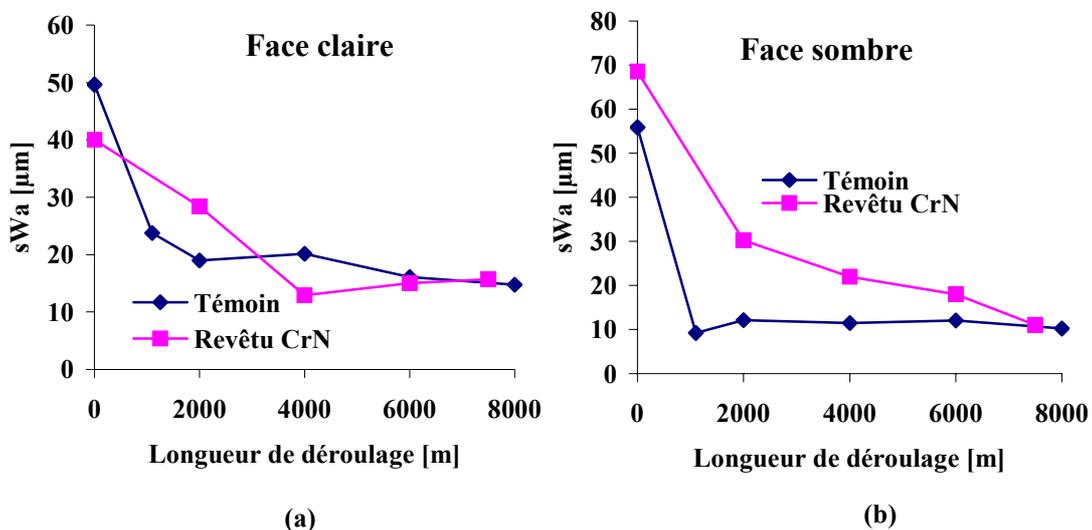


Figure III.54 : Amplitude d'ondulation des placages : (a) face claire, (b) face sombre

B- Rugosité de surface des placages sRa

La figure.III.55 représente les courbes d'évolution de sRa produites par les lames de référence et revêtues analysées sur leurs faces claires et sombres.

Les placages prélevés en début d'usinage avec l'outil de référence présentent une rugosité de surface plus importante que celle mesurée sur les placages produits par l'outil revêtu et ceci quelle que soit la face analysée. Après rodage du couteau témoin, la tendance est à l'augmentation de la rugosité de surface des placages.

En ce qui concerne les valeurs enregistrées pour l'outil revêtu, elles sont toutes inférieures aux valeurs enregistrées pour l'outil de référence. Les valeurs sont stables et comprises entre $7,4 \mu\text{m}$ (valeur la plus faible pour les placages sombres) et $9 \mu\text{m}$ (valeur la plus importante pour les placages clairs). Le revêtement facilite ainsi la glisse du copeau sur le dos de l'outil.

Selon les valeurs de sRa en début de procédé ($13,4 \mu\text{m}$) et en fin de procédé ($15 \mu\text{m}$) nous pensons que la face claire des placages est celle qui est en contact avec la face de dépouille du couteau (face non revêtue). De plus, la valeur de sRa en fin de déroulage dans le cas des placages sombres ne dépasse pas $11 \mu\text{m}$, ce qui conforte nos suppositions. En fin de déroulage, si l'on compare les valeurs de sRa enregistrées, ($7 \mu\text{m}$ pour la face sombre et $7,61 \mu\text{m}$ pour la face claire), nous pensons encore une fois que la face claire est celle qui frotte contre les billons et est donc en contact avec la face de dépouille tandis que la face sombre est celle qui est en contact avec le revêtement.

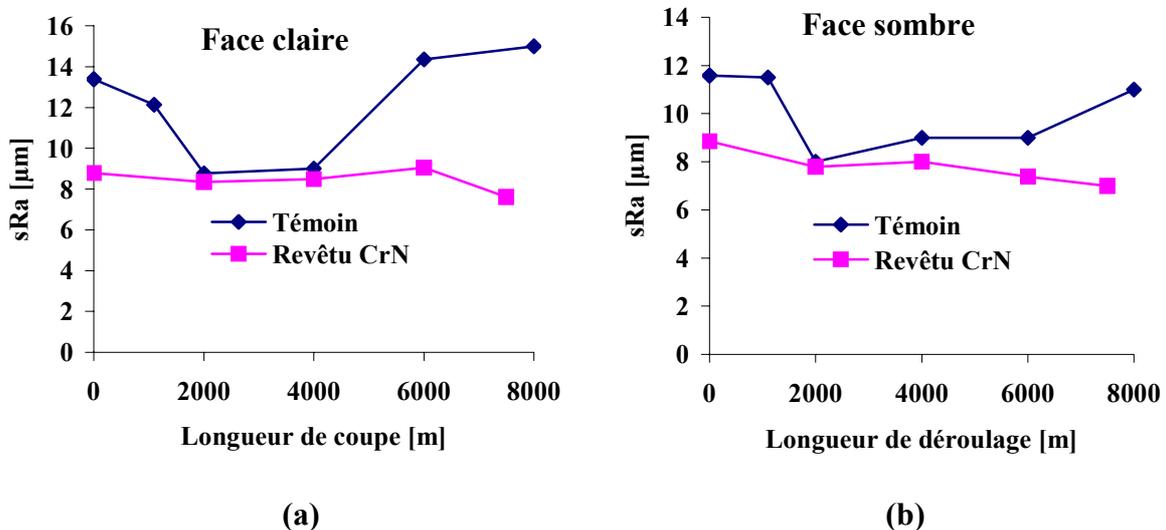


Figure.III.55 : Amplitude de rugosité de surface : (a) face claire, (b) face sombre