

# DEPOTS DE FILMS DE ZrBN PAR PULVERISATION TRIODE

## IV.2.1. Introduction

Les propriétés exceptionnelles du c-BN font de ce matériau un très bon candidat pour des applications industrielles. Mais le verrou technologique à lever pour que son application soit possible réside dans sa mauvaise adhérence. Plusieurs études menées ces dernières années révèlent qu'au-delà de 200 nm d'épaisseur, les films produits se délaminent prématurément après dépôt. Nous pensons que la solution à cette faible adhérence peut être trouvée dans le système Zr-B-N qui nous permettrait de nous affranchir de la sous-couche de h-BN qui, à notre sens, représente l'handicap de la multicouche que l'on appelle communément film de c-BN. Une récente étude [78] a montré qu'un film mince de c-BN est défini comme la succession d'une couche amorphe de BN (a-BN) à l'interface film/substrat, suivie par une couche texturée de h-BN (turbostratique) puis d'une couche épaisse de c-BN et enfin une couche fine de h-BN.

Il a été démontré par ailleurs, que cette sous-couche de h-BN présente un pic de contraintes très élevé égale à -15 GPa [87]. La conversion de cette couche en c-BN entraîne la relaxation des contraintes internes et la densification de la couche.

Ainsi, en incorporant Zr dans les films de BN, nous voulons transformer la morphologie en cascade des films en une couche majoritairement c-BN qui aurait eu comme site de nucléation des cristallites de BN turbostratiques dispersées (figure.IV.2.1) évitant ainsi la formation d'une couche continue de h-BN responsable de la délamination du film.

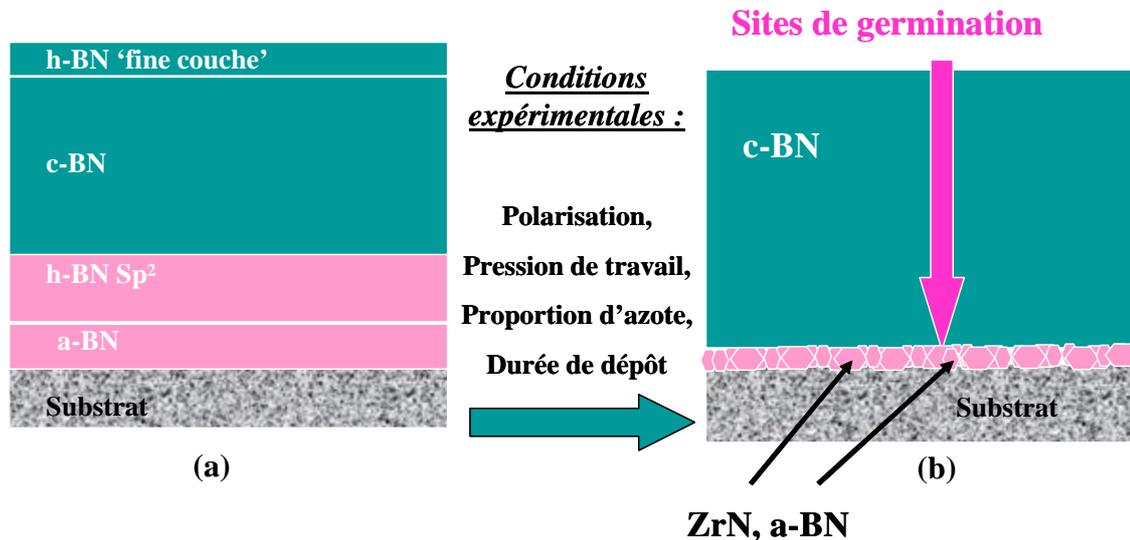


Figure.IV.2.1 : (a) Texture d'un film de c-BN [78], (b) But de notre étude

Le but initial de notre étude était donc de vérifier la faisabilité de notre hypothèse à savoir : est-il possible d'obtenir des films de c-BN à partir d'une cible frittée de ZrB<sub>2</sub> pulvérisée dans une atmosphère d'azote ? Si tel est le cas, vérifier si nous avons effectivement une couche de BN turbostratique discontinue.

### IV.2.2. Élaboration des films de ZrBN

Le bâti de pulvérisation triode R.F utilisé pour l'élaboration des films de ZrBN a été présenté dans le paragraphe II.1.1.2. La pulvérisation de la cible  $ZrB_2$  a été effectuée dans une décharge plasma constituée d'un mélange d'argon et d'azote à différentes proportions. Tous les films ont été élaborés après que le vide résiduel de la chambre de dépôt ait atteint  $5 \times 10^{-5}$  Pa.

### IV.2.3. Structure des films

Sans idée préconçue sur les conditions de dépôts qui permettent l'obtention d'un taux maximal de la phase cubique de c-BN, nous avons réalisé les premiers films de ZrBN à 5, 7 et 9  $\mu$ bar de pression de travail en faisant varier les proportions d'azote dans le plasma ainsi que la tension d'auto-polarisation du porte-substrats.

Sur la figure IV.2.2 sont résumés les spectres FTIR des films ZrBN élaborés.

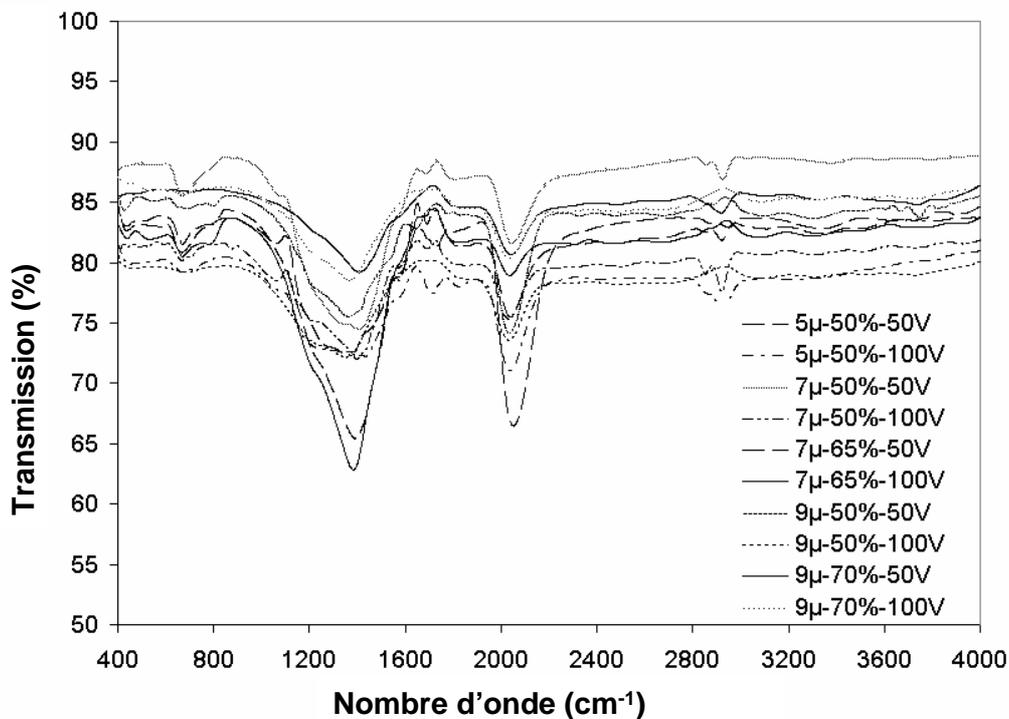


Figure.IV.2.2 : Spectres FTIR des films de ZrBN élaborés à des pressions de travail de 5, 7 et 9  $\mu$ bar

La phase hexagonale de h- BN est caractérisée par deux modes actifs infrarouges :  $E_{1u}$  et  $A_{2u}$  [79].

- le mode actif infrarouge  $E_{1u}$  est caractéristique de vibrations d'élongation inter-planaires de liaisons B-N-B et n'est excité qu'avec une polarisation E orthogonale à l'axe c.
- le mode actif infrarouge  $A_{2u}$  est caractéristique de vibrations de flexion inter-planaires de liaison B-N-B et n'est excité qu'avec une polarisation E parallèle à l'axe c.

Les nombres d'onde d'absorption des modes actifs IR de h- BN sont reportées dans le tableau IV.2.1

Modes	A <sub>2u</sub>	A <sub>2u</sub>	E <sub>1u</sub>	E <sub>1u</sub>
Nombres d'onde	828 cm <sup>-1</sup>	783 cm <sup>-1</sup>	1610 cm <sup>-1</sup>	1367 cm <sup>-1</sup>

Tableau IV.2.1 : Fréquences des modes d'absorption de h-BN

La phase c-BN montre une unique bande d'absorption autour de 1065 cm<sup>-1</sup>.

Des premiers dépôts réalisés, nous constatons que le pic relatif à la phase c-BN est visible dans le cas de films réalisés à faibles pressions de travail et proportions d'azote dans la décharge plasma. L'apparition du pic c-BN parallèlement à la diminution de l'amplitude du pic relatif à h-BN a été également observée quand la tension d'auto-polarisation augmente. Nous avons donc mené une deuxième campagne de dépôts à 3 et 4μbar, 25% d'azote dans le plasma tout en faisant augmenter graduellement la tension d'auto-polarisation de -50 à -175V.

De la figure IV.2.3, nous observons que pour les films élaborés à 3μbar, la quantité de la phase h-BN diminue lorsque l'on augmente la tension d'auto-polarisation. Des observations similaires ont été faites pour les couches réalisées à 4μbar. À -175V, nous notons la présence d'un pic fin relatif à la phase c-BN contre la quasi-disparition du pic h-BN.

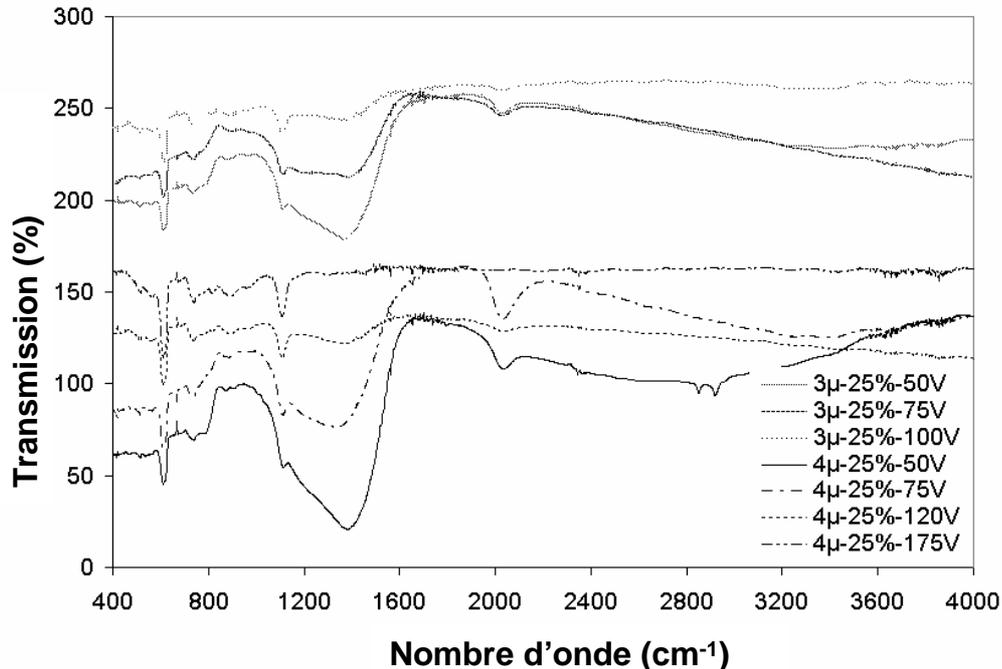


Figure IV.2.3 : Spectres FTIR des films de ZrBN élaborés à des pressions de travail de 3 et 4μbar

#### IV.2.4. Vitesse de dépôt et contraintes internes

En ce qui concerne les vitesses de dépôts des films, à partir de la figure IV.2.4 nous observons que l'augmentation de la tension d'auto-polarisation jusqu'à -120V induit une augmentation de l'épaisseur des couches (vitesse de dépôts). À partir de ce seuil (-120V), la vitesse de dépôt chute sans doute à cause de la repulvérisation de la couche déposée.

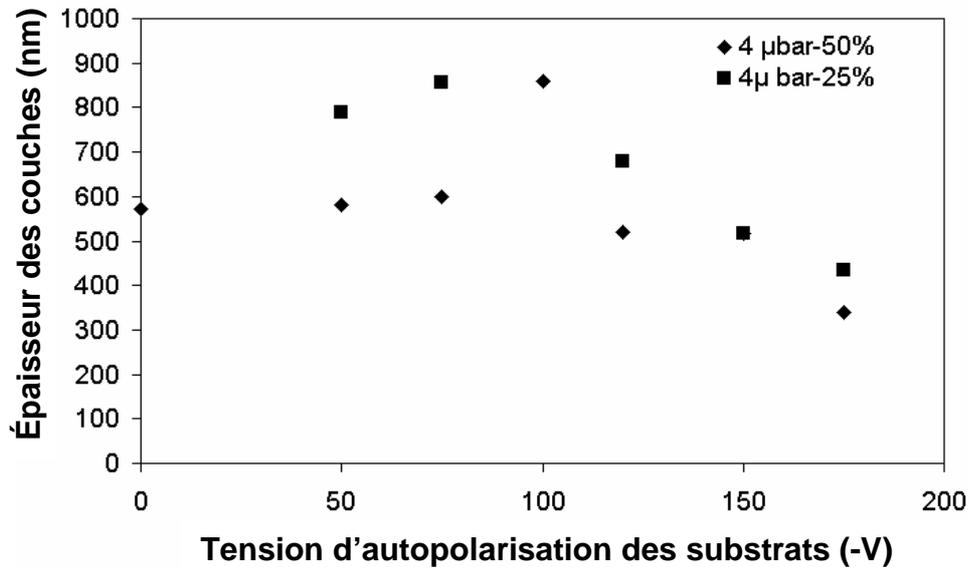


Figure IV.2.4 : Évolution de l'épaisseur des couches de ZrBN en fonction de la tension d'auto-polarisation

La figure IV.2.5 montre l'influence de l'augmentation des proportions d'azote dans le plasma ainsi que la tension d'auto-polarisation sur les vitesses de dépôts des couches obtenues à 4µbar. Ainsi, l'augmentation de ces deux paramètres conduit à la diminution de l'épaisseur des couches.

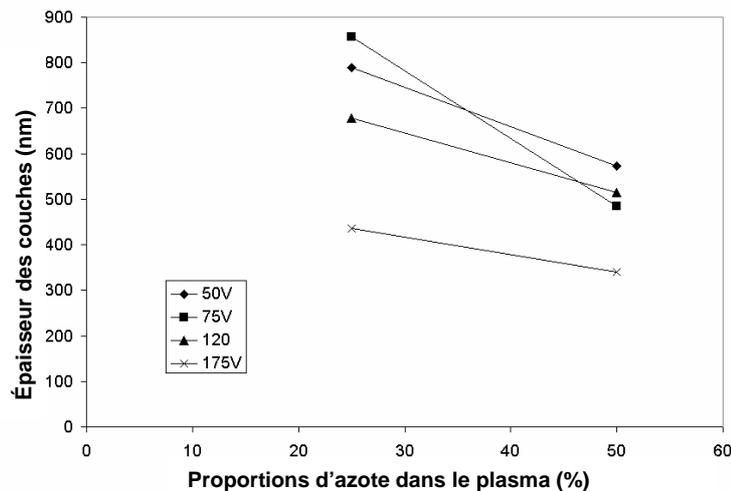


Figure IV.2.5 : Evolution de l'épaisseur des couches en fonction des proportions d'azote dans le plasma

Normalement, l'augmentation de la tension d'auto-polarisation conduit à développer d'importantes contraintes internes dans les films à cause du bombardement ionique qui

accompagne la germination puis la croissance des films. Cependant à partir de la figure IV.2.5, nous notons que les films ayant des épaisseurs comprises entre 400-600nm déposés à 25% d'azote dans le plasma et 4µbar de pression de travail présentent de relatives faibles contraintes (0,2 à 0,45 GPa). Dans le cas des couches élaborées à 50% de N<sub>2</sub>, le même comportement a été observé.

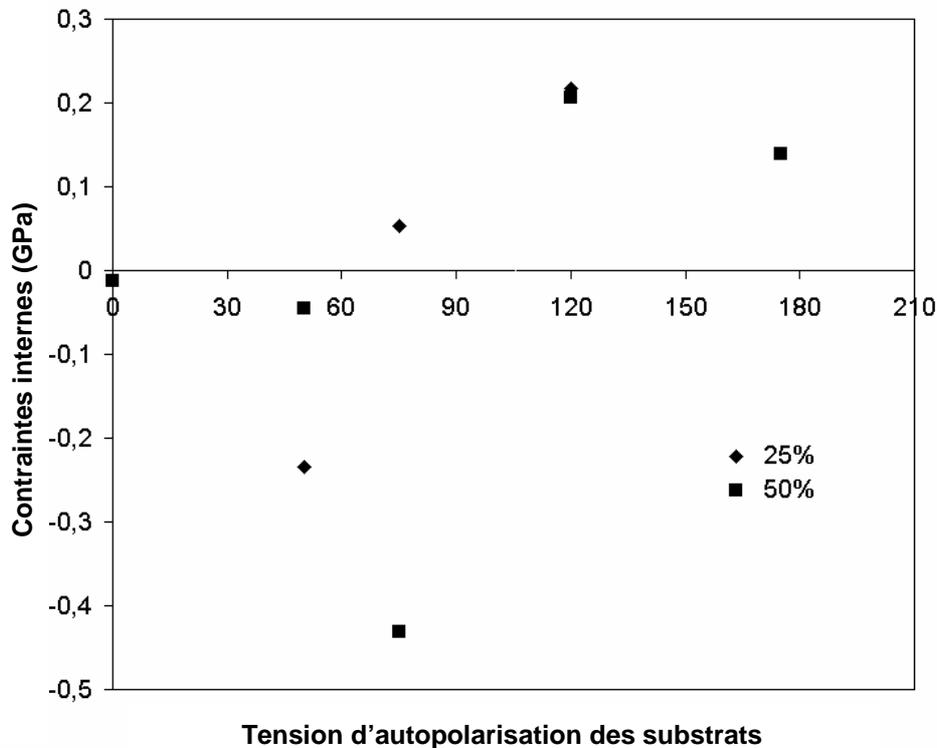


Figure IV.2.5 : Contraintes internes des films de ZrBN en fonction des proportions d'azote dans le plasma et de la tension d'auto-polarisation des substrats.

## IV.2.5. Conclusion

En conclusion, on peut dire que la spectroscopie infrarouge a permis de détecter la présence d'hybridations  $sp^2$  et  $sp^3$  de BN dans un film de ZrBN. Le taux de c-BN augmente avec la tension de polarisation mais les contraintes dans les films restent relativement faibles. Cette étude a donc permis d'obtenir des films contenant de forts taux de c-BN avec des contraintes relativement faibles. Néanmoins, les analyses des films par EDS et XPS montrent que leur concentration en oxygène dépasse largement 20 % (figure IV.2.6). Ces taux élevés d'oxygène sont susceptibles non seulement d'expliquer la relaxation de la contrainte dans les films mais aussi le fait qu'ils soient amorphes et que ZrN ne soit pas cristallisé (aucun pic observé en DRX). Par contre, ils rendent les films non uniformes et non adhérents au substrat ce qui n'a pas permis de faire les analyses MET-HR envisagées initialement pour observer l'interface. Dans l'impossibilité de faire diminuer ce taux d'oxygène, car nous n'avons eu ni le temps ni le matériel nécessaires pour déceler la fuite au sein de notre bâti de dépôt, nous avons été dans l'obligation de reporter cette étude.

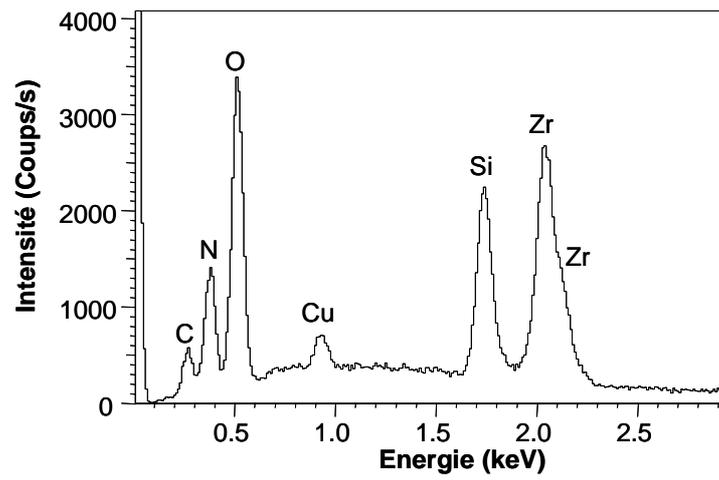


Figure IV.2.6 : Spectre EDS d'un film de ZrBN contenant un fort taux d'oxygène

## IV.3. MICRODEROULAGE DE HETRE AVEC OUTILS PRE-RODES PAR SABLAGE

---

### Introduction

Les essais de microdéroulage réalisés à l'ENSAM de Cluny dans le cadre de projets de fin d'études, DEA ou thèse ont soulevé un grand nombre de questions. Parmi celles-ci : est-ce que pré-roder l'arête de coupe des outils ne conduirait pas à augmenter sa capacité à résister aux chocs ?. Mais aussi, ce prétraitement de l'arête ne pourrait-il pas augmenter l'adhérence des revêtements durs, sachant que ce genre de traitement éliminerait les bavures (affûtage des outils), évitant par là même le morfilage des outils.

Afin de répondre à ces questions, nous avons réalisé des essais de microdéroulage de hêtre avec des outils pré-rodés par sablage. Nous avons tout d'abord réalisé une première campagne de test avec une méthode manuelle de sablage. Au vu de la non reproductibilité de cette méthode de traitement, nous avons par la suite réalisé une seconde campagne avec une méthode automatisée de sablage.

### IV.3.1. Première campagne

#### IV.3.1.1. Le sablage

La sableuse (VAPOR BLAST- ELVE HEC 221) employée pour réaliser les traitements de pré-rodage est montrée sur la figure.IV.3.1. Dans le but de comparer l'effet de la durée de sablage sur le comportement mécanique des couteaux, trois temps d'exposition ont été utilisés : 2, 5 et 10s.

Le principe du traitement est montré sur la figure.IV.3.1. L'opérateur maintient manuellement la pièce et pulvérise la surface à traiter avec un mélange composé de grains de sable et d'eau sous haute pression grâce à un pistolet appelé 'dard'. Dans notre cas, le dard a été maintenu à une distance de 100 mm de l'arête de coupe perpendiculairement à celle-ci décrivant un mouvement d'aller-retour. Le mélange utilisé était composé de grains de corindon ( $15\ \mu\text{m}$  de diamètre) et d'eau sous une pression de sortie de 4 bars. L'opération se faisant manuellement. Il est à noter que le bâti utilisé ne permet pas de traiter des pièces excédant 500 mm de longueur.



Figure.IV.3.1 : Sableuse VAPOR BLAST- ELVE HEC 221



Figure.IV.3.2 : Principe du sablage

---

Un autre type de sablage est également très fréquemment employé : le sablage humide. Il est utilisé pour les opérations telles que l'amélioration d'aspect, le nettoyage, le décapage, la préparation de substrats avant revêtements, l'ébavurage, la précontrainte, la décontamination, ...

Les surfaces traitées en voie humide présentent un état de propreté physico-chimique presque parfait. Ce procédé est particulièrement adapté aux traitements de pièces mécaniques fragiles et précises comme dans notre cas. Les principaux avantages de ce procédé sont :

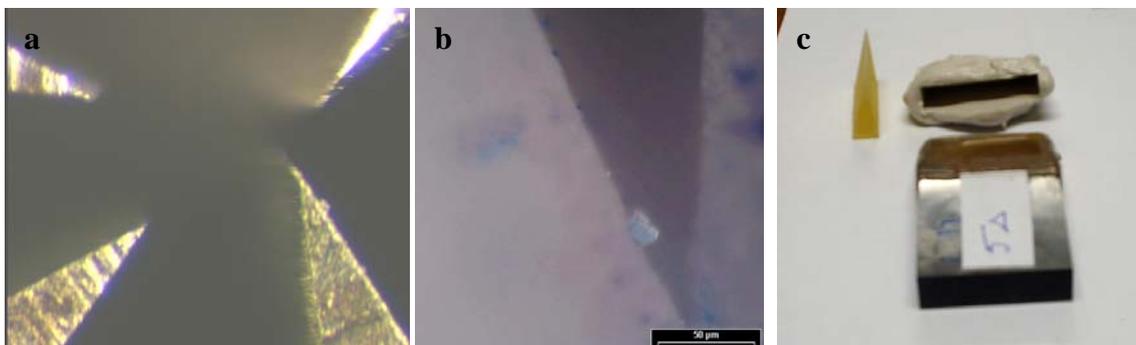
- absence de poussière
- possibilité d'utiliser des abrasifs fins et très fins, y compris les quartz et silices proscrits en voie sèche
- fragmentation réduite grâce au film d'eau, risques d'inclusions limités, l'eau jouant un rôle d'amortisseur.

#### IV.3.1.2. Quantification de l'arrondi d'arête après sablage

Nous avons essayé de quantifier l'arrondi d'arête des outils, dans un premier temps par des observations au MEB mais le gabarit des outils ne permet pas leur placement dans la chambre d'analyse. Dans un deuxième temps, nous avons effectué des observations au microscope optique avec un fort grossissement comme montré sur la figure.IV.3.3.a. À partir de cette figure, il est clair que la quantification de la géométrie de l'arête ne peut être faite par cette seule méthode. De plus, lors du sablage, les extrémités de l'arête de coupe ont été érodées et l'arête de coupe s'est affaissée d'au moins 1 mm par rapport à son centre.

Nous avons donc testé une troisième méthode de quantification de l'arrondi de l'arête consistant à observer l'empreinte faite par celle-ci dans un moule en silicone (figure.IV.3.3.b). Encore une fois, la mesure n'a pu être quantifiable. La résolution et le grossissement maximal de l'image prise n'ont pas pu permettre la mesure.

Une dernière méthode a été testée. Elle a consisté à observer la tranche d'une résine dure obtenue à partir du moulage en silicone de l'arête de coupe. L'arête en résine ainsi obtenue présentait un méplat dû au retrait de la résine lors du refroidissement, d'où une géométrie approximative de l'arête (figure.IV.3.3.c).



*Figure.IV.3.3 : (a) Arête de coupe observée au MO, (b) Empreinte du couteau en silicone, (c) Couteau, moule et contre-moule en résine dure.*

### IV.3.1.3. Mesure des efforts de coupe

Pour la mesure des efforts de coupe  $\vec{X}_C$  et  $\vec{Y}_C$ , nous avons utilisé un système PULSE (7537A B&K). C'est un multianalyseur de signaux acoustiques ou vibratoires (FFT, bandes d'octaves, analyse modale, zoom,...) en temps réel à 5 canaux capable, de garantir une fréquence utile de 25,6 kHz (la fréquence d'échantillonnage maximale étant 65536 Hz) tout en assurant une précision excellente de mesure ( $\pm 0,05$ db d'incertitude sur l'amplitude dans le cas les plus défavorables).

Un exemple de mesure est donné sur la figure.IV.3.4. Hormis le fait qu'un tel dispositif permet la récolte des efforts de coupe, il permet également de retracer le déroulement de l'usinage.

En effet, sur le signal de l'effort  $\vec{Y}_C$  on remarque l'émergence de deux zones : la première (zone 1) correspond aux premiers instants du déroulage (refus de coupe), s'ensuit alors l'amorçage du déroulage. Sur la zone 2 on remarque un pic convexe d'effort qui correspond à la présence d'une fissure au sein de la rondelle usinée qui favorise la plongée de l'outil dans le bois. Ceci se traduisant par une nette chute de l'effort de coupe  $FX_C$ . Ce pic est retrouvé à chaque révolution de la rondelle.

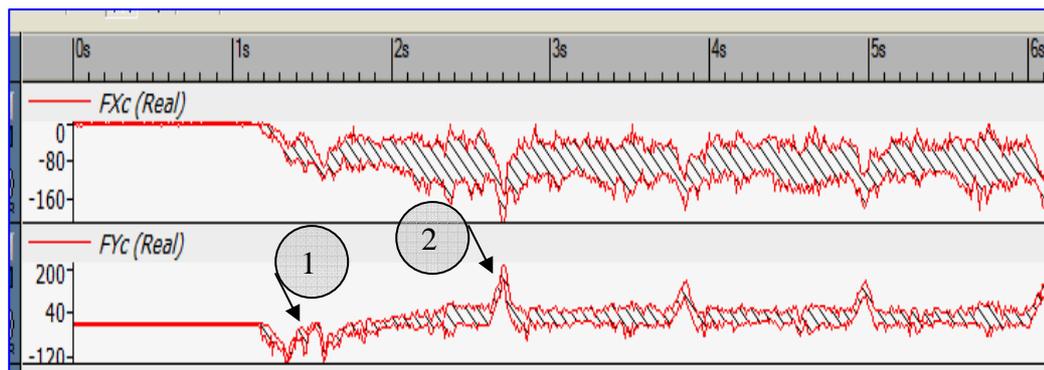


Figure.IV.3.4 : Signaux des efforts  $\vec{X}_C$  et  $\vec{Y}_C$  sur le PULSE

La mesure des efforts a été réalisée pendant 15s ce qui correspond aux 10 premiers tours de déroulage.

### IV.3.1.4. Microdéroulage de hêtre

#### IV.3.1.4.1. Efforts de coupe

Pour réaliser les essais, nous avons utilisé des rondelles de hêtre provenant de différents billons. Les rondelles ont été maintenues dans l'eau à température ambiante.

La campagne d'essais a consisté à dérouler les rondelles sur 50 m avec différentes épaisseurs de copeaux comprises entre 0.5 et 3 mm afin de constater l'effet du sablage sur le copeau produit. L'angle de dépouille des outils a été maintenu constant et égal à  $1^\circ$ , la vitesse linéaire de déroulage était de 1 m/s.

La figure.IV.3.5 montre l'évolution de la composante  $\vec{Y}_C$  des efforts de coupe, représentant le refus (signe -) ou l'aptitude (signe +) à la coupe, par rapport à l'augmentation de l'épaisseur des copeaux usinés.

À faibles épaisseurs de copeau (0.5mm), l'outil témoin ainsi que ceux sablés durant 2 s et 10 s ont un comportement similaire et ont des valeurs d'efforts comprises entre 0 et 10 N. Aux épaisseurs de placages plus importantes, le comportement des outils sablés suit toujours une même courbe. L'allure de cette courbe décrite par l'outil témoin montre un léger détachement des autres courbes et tend vers des valeurs d'efforts plus importantes ce qui était quelque peu prévisible au vu de son acuité d'arête.

Bien qu'ayant un arrondi théorique d'arête compris entre celui de l'outil sablé pendant 2 s et celui sablé durant 10 s, l'outil sablé pendant 5 s montre un comportement complètement différent des précédents. En effet, la courbe que décrit cet outil est éloignée de toutes les autres courbes, alors que sur la base des traitements subis, elle devrait être entre les courbes des outils traités pendant 2 et 10 s.

De plus, aux faibles épaisseurs de copeaux, cet outil présente déjà un refus de coupe ( $Y_c < 0$ ), comportement qui était plutôt attendu dans le cas de l'outil sablé pendant 10 s.

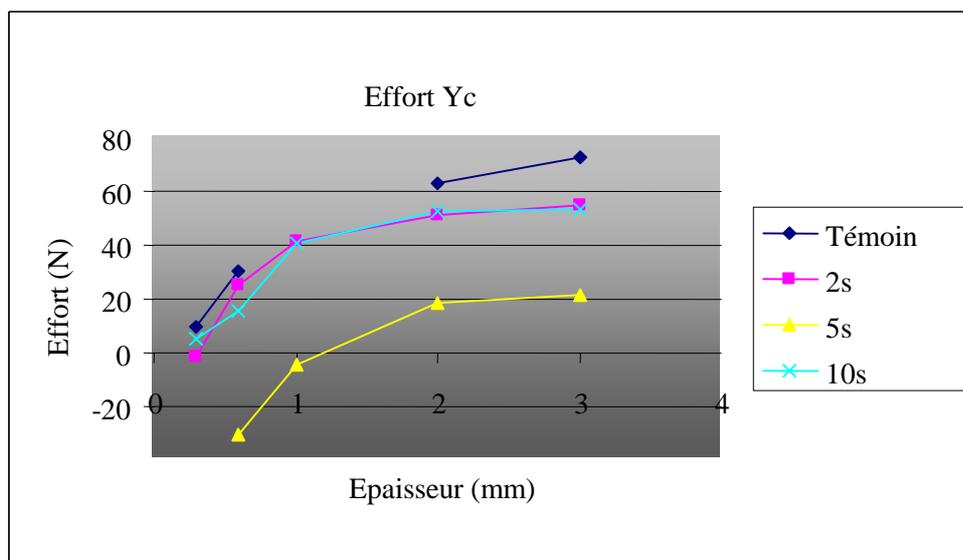


Figure.IV.3.5 : Évolution de  $Y_c$  en fonction de l'épaisseur de placage.

Sur la figure.IV.3.6 est reportée la mesure des efforts  $\vec{X}_C$  en fonction de l'épaisseur de copeau. Aux faibles épaisseurs, il apparaît que le rodage n'a que très peu d'influence sur l'effort  $\vec{X}_C$ , à l'exception de l'outil sablé pendant 5 s. Par contre, aux épaisseurs plus importantes, l'ordre est respecté. Néanmoins, nous retenons que l'outil non rodé présente une valeur d'effort proche de celle de l'outil rodé pendant 10 s, preuve que l'effort  $\vec{X}_C$  dépend plus de la section du copeau qu'il ne dépend de l'arrondi de l'arête. Ainsi, nous notons que le sablage n'agit que très peu sur l'effort  $\vec{X}_C$ .

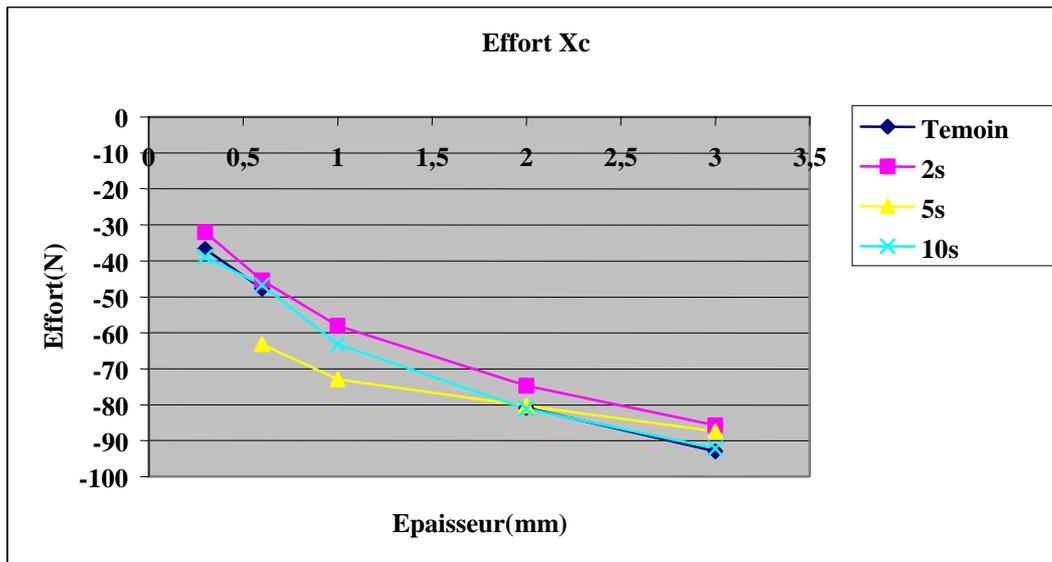


Figure.IV.3.6 : Évolution de  $X_c$  en fonction de l'épaisseur de placage

Les micrographies des placages produits sont présentées sur la figure.IV.3.7.



Figure.IV.3.7 : Placages produits en fonction de l'épaisseur du copeau et du type de traitement

Les placages de 1 et 2 mm d'épaisseur montrent un aspect similaire quelle que soit la durée du sablage. La modification de l'acuité d'arête des outils ne semble donc pas induire un changement sur la qualité des copeaux aux faibles épaisseurs. Or à 3mm d'épaisseur, les placages se fissurent. Ces défauts sont plus marqués sur les placages produits par les copeaux traités pendant 5 et 10 s. Cette fissuration n'est pas due aux traitements de rodage mais à l'épaisseur importante du copeau.

#### IV.3.1.4.2. Tests de chocs

Nous avons effectué des tests de microdéroutage sur des rondelles de hêtre en simulant des chocs couramment rencontrés en industrie du déroulage. Pour ce faire, nous avons utilisé une rondelle dentée en hêtre afin de créer une discontinuité de coupe telle que la montre la figure.IV.3.8.a. Les premiers tests ont été réalisés avec le couteau sablé pendant 2 s et ceci en partant du principe que si ce couteau résiste bien aux chocs en comparaison avec l'outil témoin, l'outil traité pendant 10 s ne pourra être qu'aussi résistant, grâce à un arrondi d'arête plus important. C'est pour cette raison que nous n'avons testé que l'outil sablé pendant 2s.

Après les premières observations au microscope optique, il s'est avéré que cette méthode de simulation n'est pas efficace. En effet, nous n'avons pas constaté d'endommagement de l'arête de coupe ni pour le témoin ni pour l'outil traité pendant 2s.

Ceci nous a conduit à tester une autre méthode. Nous avons inséré dans une rondelle de hêtre un tourillon (également de hêtre) sur une profondeur de 20 mm en partant de la circonférence vers le centre de celle-ci. Le sens des fibres du tourillon est perpendiculaire à ceux de la rondelle augmentant ainsi la dureté locale de contact (figure.IV.3.8.b) et simulant l'orientation des fibres d'un nœud.

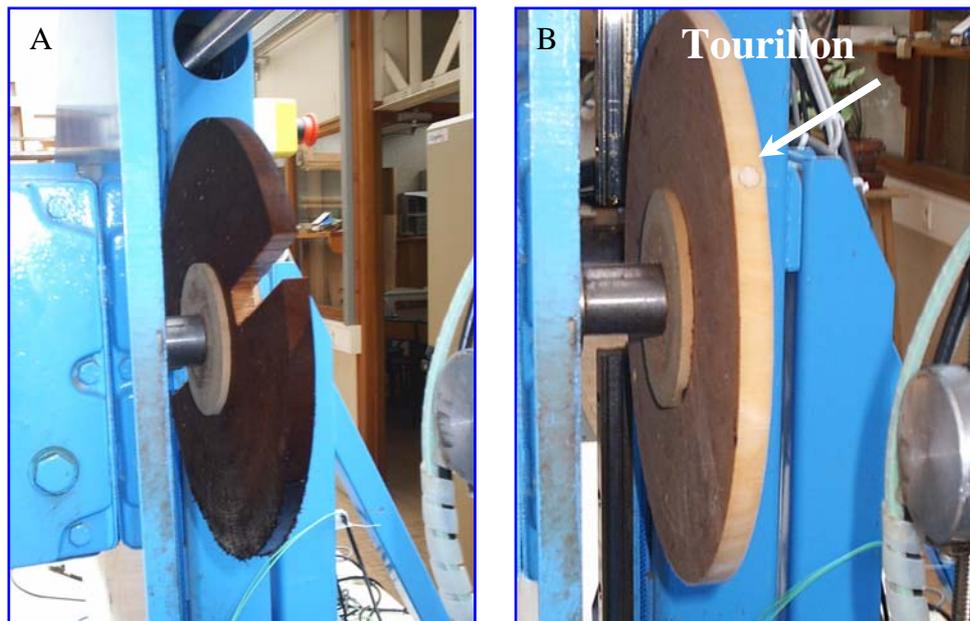


Figure.IV.3.8 : Tests de chocs avec : (a)une rondelle dentée, (b) des tourillons

Nous avons effectué des essais sur 50 m de déroulage sous les mêmes conditions que pour la mesure des efforts. L'épaisseur du copeau produit a été fixé (1 mm).

Les micrographies des arêtes de coupe relatives aux deux couteaux (témoin et 2 s) sont présentées sur la figure.IV.3.9. Il est clair que le rodage par sablage même pendant une durée faible (2s) a augmenté la résistance de l'arête de coupe. Sur la figure.IV.3.9, nous constatons un recul d'arête marqué par l'écrasement du métal de l'outil dans le cas du témoin. L'arête de l'outil sablé pendant 2s présente un aspect régulier (figure.IV.3.9.b).

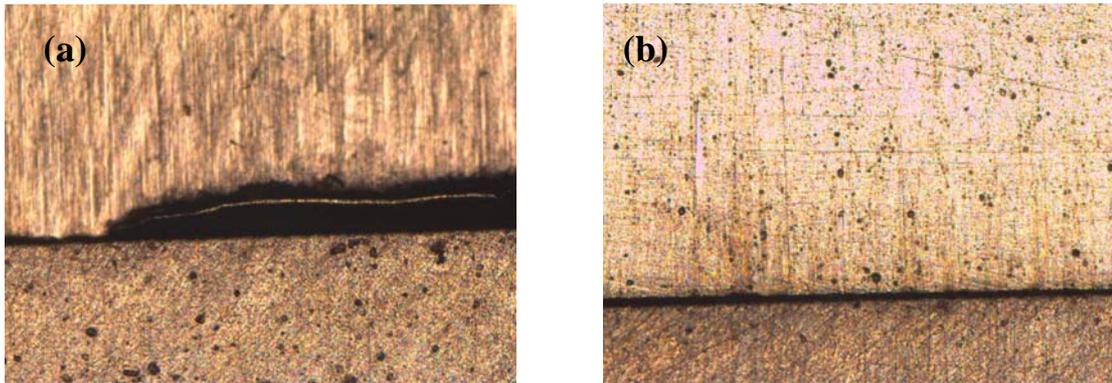


Figure.IV.3.9 : Essais avec tourillon : (a) Outil témoin, (b) Outil sablé pendant 2 s

#### IV.3.1.4.3. Essais d'usure

Suite à ces résultats, nous avons étudié l'effet du pré-rodage de l'arête sur sa résistance à l'usure par abrasion. Pour ce faire, nous avons déroulé des rondelles de hêtre sur une distance de 2600 m dans les mêmes conditions que précédemment. Nous avons testé uniquement l'outil sablé durant 10s, l'outil sablé durant 2s ayant été précédemment endommagé par les tests de chocs. L'outil traité présente une meilleure résistance à l'usure que l'outil classique (Figure.IV.3.10). Ceci était prévisible dès le départ car le rodage de l'outil 10s n'est qu'un état avancé de l'usure que subit l'outil témoin. Ainsi, l'usure de l'outil rodé est moins rapide que celle de l'outil témoin. Mais ces deux courbes semblent diverger, ce qui laisse penser que le recul de l'arête de coupe de l'outil sablé sera moins important que celui de l'outil témoin quand ce dernier arrive à sa fin de vie. Pour des contraintes d'expérimentation, nous avons dû stopper les essais.

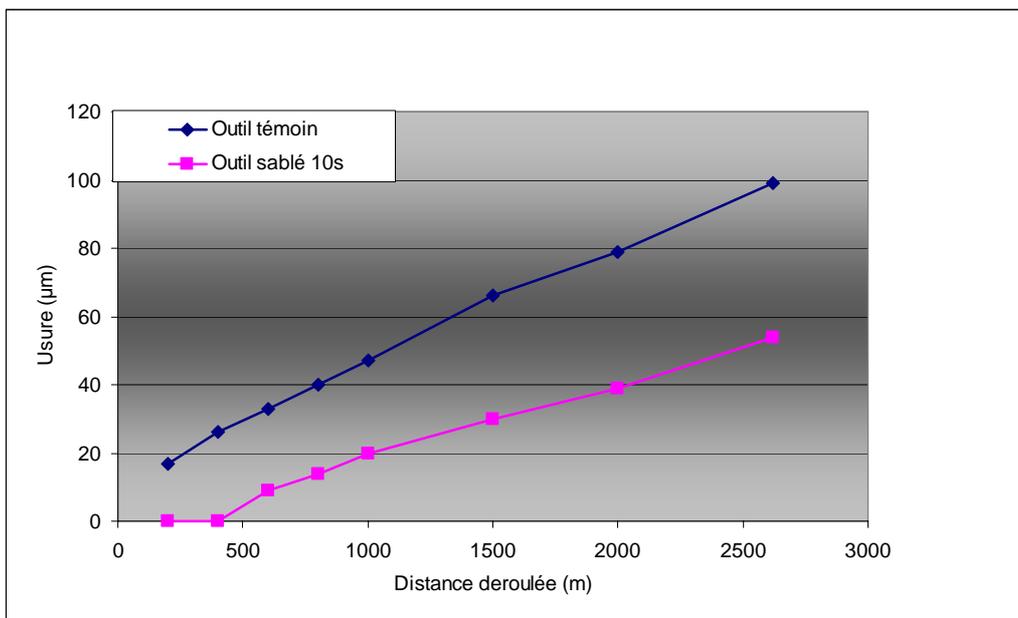


Figure.IV.3.10 : Microdéroulage de l'outil sablé pendant 10 s et de l'outil témoin

En ce qui concerne la mesure de l'effort de coupe  $\bar{Y}_C$  (figure.IV.3.11), l'outil rodé présente des valeurs d'effort sensiblement inférieures à celles de l'outil non rodé

indiquant un refus de coupe légèrement plus important. Par contre, après 2000m de déroulage, il semblerait que la tendance à couper serait plutôt attribuée à l'outil rodé comme en témoigne la valeur négative de l'effort  $\bar{Y}_C$  de cet outil. Pour s'assurer d'un tel résultat, l'usinage d'une plus grande distance aurait été nécessaire.

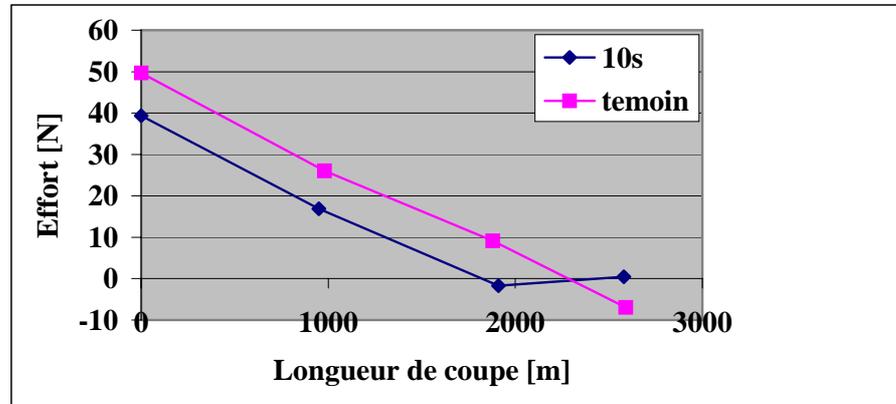


Figure.IV.3.11: Effort de coupe  $Y_c$  en fonction de la longueur de déroulage.

#### IV.3.1.5. Conclusion de la première campagne

Des tests de microdéroutage de hêtre, des mesures d'efforts de coupe et des observations micrographiques ont été réalisées sur des outils dont la géométrie de l'arête de coupe a été modifiée par sablage pendant différentes durées. La mesure des efforts a révélé que la composante  $\bar{X}_C$  de l'effort globale de coupe dépend de l'épaisseur du copeau tandis que la composante  $\bar{Y}_C$  est en relation avec l'état initial de l'arête de coupe. Un sablage pendant 10s conduit à une élévation de cette composante et à la tendance au refus de coupe.

Nous avons vu également que le simple fait de pré-roder l'outil pendant 2s permet de renforcer la résistance mécanique de l'arête de coupe et par la même sa résistance aux ébréchures.

Par ailleurs, nous pensons que le comportement inattendu de l'outil pré-rodé pendant 5s est induit par le procédé en lui-même. En effet, les outils ont été sablés manuellement provoquant un affaissement de leurs extrémités. Les résultats de ces essais doivent donc être interprétés avec prudence.

Aussi, nous avons décidé de mener une nouvelle campagne de tests avec des outils pré-rodés mais cette fois avec une méthode automatisée ; une méthode ainsi non conditionner par la façon de procéder de l'opérateur. Deux temps de sablage ont été appliqués aux outils pour constater l'effet de deux rayons différents d'arrondi d'arête.

Par la suite nous avons revêtu les couteaux pré-rodés avec une couche de CrAIN optimale sur leurs deux faces (face d'attaque et de dépouille) et nous les avons testés en microdéroutage de hêtre. Nous avons gardé la même démarche expérimentale que pour la première campagne à savoir : la mesure d'efforts de coupe et de reculs d'arête.

Les résultats de cette nouvelle campagne sont présentés dans le chapitre suivant.

## IV.3.2. Deuxième campagne

### IV.3.2.1. Sablage automatisé

Cette nouvelle méthode de sablage consiste à pulvériser perpendiculairement l'arête de coupe de l'outil avec un dard dont le mouvement de décente/montée est piloté par un programme informatique.

L'outil est placé sur un porte-échantillons se trouvant sur la base de la chambre de sablage. Le porte-échantillons est animé par un double mouvement rotatif : l'un faisant décrire à l'outil un mouvement de rotation autour de l'axe A et l'autre autour d'un axe passant par le centre de l'enceinte (axe B, figure.IV.3.12). Ce déplacement relatif du dard par rapport à la pièce à traiter ainsi que les mouvements de rotation de cette dernière sont appliqués dans le but d'obtenir un sablage homogène sur toute la largeur de l'arête.

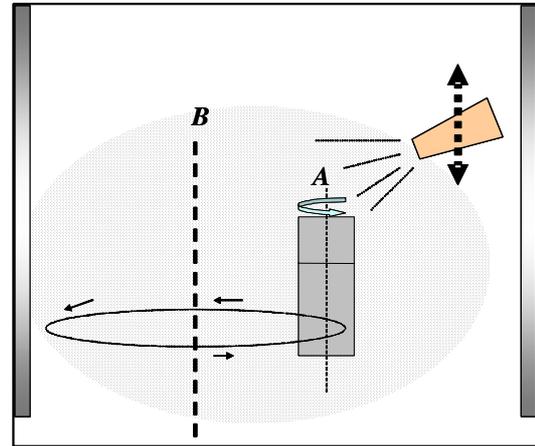


Figure.IV.3.12 : Principe du sablage automatisé

Un cycle de pulvérisation est défini par la décente du dard vers l'outil puis sa remontée. Deux durées de traitement ont été ainsi appliquées à 4 outils. Nous avons retenu deux couteaux pour chaque traitement (tableau.IV.3.1).

Nombre de couteaux	Durée du traitement
2	Un cycle (1 aller-retour)
2	Deux cycles (2 allers-retours)

Tableau.IV.3.1 : Nombre et durée des traitements des couteaux de microdéroulage

Une observation de l'aspect de l'arête de l'outil sablé pendant deux cycles a été réalisée au MEB (figure.IV.3.13). Elle révèle que cette dernière n'a pas une forme parfaitement ronde, ce à quoi on s'attendait. Sur certaine partie de l'arête elle présente plus un méplat qu'une forme arrondie. L'arête présente également des ondulations de très faible amplitude sur toute sa largeur. Par ailleurs, sur sa surface, on n'observe pas la présence de bavure d'affûtage. Nous avons donc confirmé que la méthode utilisée a modifié la géométrie de l'arête.

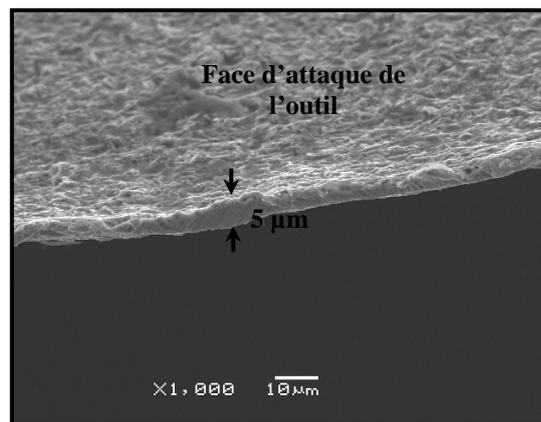


Figure.IV.3.13 : arête de coupe de l'outil rodé pendant deux cycles

En ce qui concerne la quantification de la largeur de l'arête, son arrondi est sensiblement égal à 5µm.

### IV.3.2.2. Dépôt de CrAlN

Un couteau de microdéroutage sablé pendant deux durées différentes a été retenu et revêtu d'une couche de CrAlN (1,5 $\mu$ m) par pulvérisation magnétron R.F dans les conditions optimales définies dans le chapitre § IV.1.2.6 (tableau.IV.3.2) et ceci afin de voir l'apport de l'ébavurage et la modification de l'arrondi d'arête de coupe sur la tenue en usinage des outils.

T <sub>ap</sub> (-V)	Pt ( $\mu$ bar)	P <sub>p</sub> (%)	t (min)	t <sub>pp</sub> (min)
-900	4	25	90	5

Tableau.IV.3.2 : Conditions de dépôts de CrAlN

Des observations au MEB ont été réalisées sur l'arête de coupe de l'outil sablé pendant deux cycles puis revêtu de CrAlN (figure.IV.3.14). La couche ainsi déposée est homogène sur toute la longueur de l'arête. La micrographie de la figure.IV.3.14.a montre que le revêtement couvre l'arête de coupe et ceci a été observé sur toute sa longueur (30 mm). Par ailleurs on note que la couche montre une apparente rugosité de surface observée sur la face de dépouille (figure.IV.3.14.b). La mesure des coefficients de frottement réalisée par pion-disque sur un même revêtement déposé sur un substrat acier de même nuance '90CMV8' et ayant le même état de surface initial que l'outil a donné une valeur de  $\mu=0,3$  ; valeur plus faible que celle de l'acier non revêtu ( $\mu=0,6$ ), ce qui ne devrait pas induire des efforts de coupe plus importants.

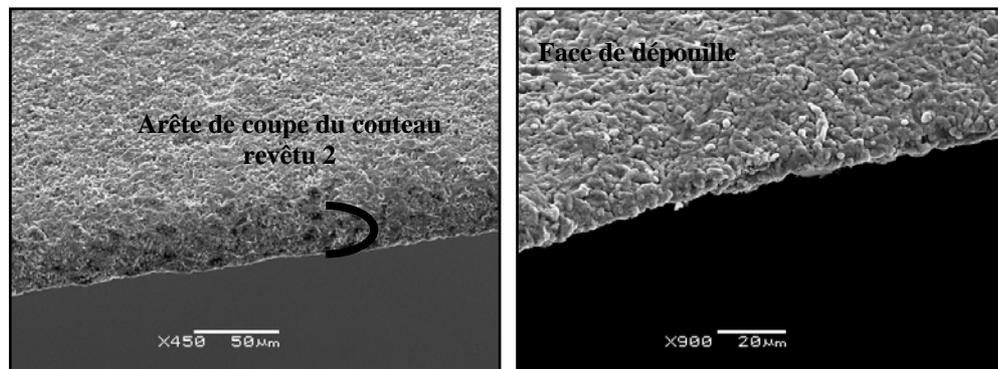


Figure.IV.3.14 : Micrographie des couteaux de microdéroutage revêtus de CrAlN

### IV.3.2.3. Microdéroutage de hêtre

#### IV.3.2.3.1. Mesure des efforts de coupe

Comme nous l'avons vu précédemment, la composante  $\bar{Y}_C$  de l'effort de coupe global  $\bar{F}_C$  est fortement influencée par l'état initial de l'arête de coupe de l'outil (arrondi d'arête) et de l'angle de dépouille (surtout les angles négatifs de dépouilles) alors que la composante  $\bar{X}_C$  est influencée par la section de placage produit (épaisseur de copeau).

Ainsi, pour ces raisons nous nous sommes intéressés particulièrement à l'analyse des efforts de coupe  $\bar{Y}_c$  des différents outils testés. La mesure a été effectuée pendant les premiers tours de déroulage et sur une longueur totale de coupe de 3000m.

Dans le tableau.IV.3.3 sont résumées les appellations des outils selon le traitement de sablage ou/et le revêtement appliqués.

Appellation	Durée du sablage (nombre de cycles)	Couche de CrAIN
Témoin	0	Non
Rodé 1	1	Non
Rodé 2	2	Non
Revêtu 1	1	Oui
Revêtu 2	2	Oui

Tableau.IV.3.3 : appellation des outils testés

À 250 m de déroulage (figure.IV.3.15), l'outil témoin (non traité) possède une aptitude de coupe plus importante que les autres outils. Ce comportement était quelque peu attendu au vu de l'acuité de son arête (faible arrondi d'arête comparé à ceux obtenus après sablage ou/et revêtement). Après revêtement, l'arrondi d'arête des outils revêtus 1 et 2 devient plus important que celui avant dépôt, ce qui explique la plus importante aptitude à la coupe de l'outil rodé 2 par rapport aux outils revêtus 1 et 2.

Là où les mesures des efforts ne concorderaient pas avec les attentes initiales, c'est dans le cas de l'outil rodé 1. En effet et en théorie, cet outil devrait avoir une plongée d'outil plus importante que celle du rodé 2 à cause d'un arrondi d'arête plus faible, ce qui n'est pas le cas. Ceci étant, si l'on regarde le comportement des deux outils 150m plus tôt, la logique est préservée. Au vu de ce résultat, nous pensons que cette valeur a peut-être été faussée par les conditions d'expérimentation.

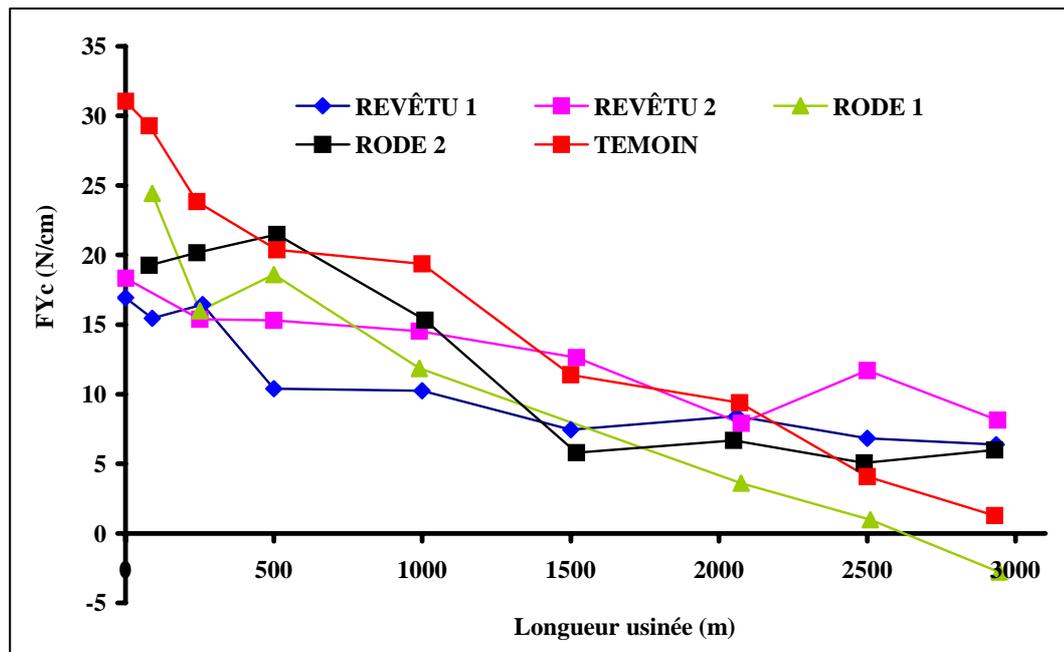


Figure.IV.3.15 : Évolution de l'effort  $Y_c$  des outils en fonction de la longueur de déroulage

En fin de déroulage, les deux outils : témoin et rodé 1 tendent à un refus de coupe (efforts négatifs) alors que les outils revêtus et rodé 2 semblent stables (efforts positifs). Encore une fois, le comportement de ces deux outils ayant un faible rayon d'arête comparés aux autres contredit nos attentes. La différence des valeurs mesurées n'est cependant pas importante et le début ou/et la fin du déroulage n'est pas représentative du comportement des outils sur l'ensemble du test.

L'observation des coefficients de régression linéaire des courbes de tendance montre clairement que l'aptitude au refus de coupe sur l'ensemble du test est en relation avec l'arrondi de l'arête des outils (figure.IV.3.16). En effet, les pentes des droites de l'évolution des efforts  $\bar{Y}_c$  mesurées pour les outils témoin, rodé 1 et rodé 2 augmentent avec la diminution du rayon de l'arête. Les outils revêtus 1 et 2 montrent également un comportement similaire.

On peut donc supposer que les mécanismes qui gouvernent l'usure de l'arête d'un outil rodé, qui est assimilé en théorie à une usure de celle-ci, soient différents de ceux qui gèreraient l'usure d'un outil brut d'affûtage avec un angle de bec vif. Ces courbes indiquent alors que le fait d'augmenter initialement le rayon d'arête des outils leur confère une aptitude à usiner plus longtemps.

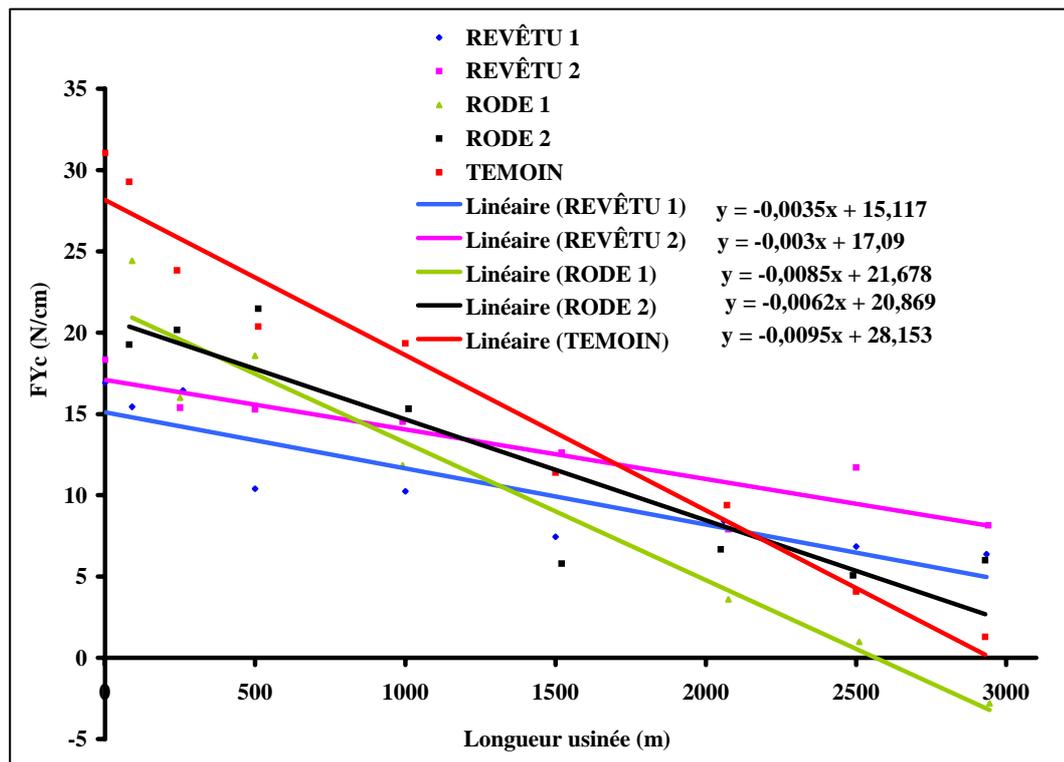


Figure.IV.3.16 : Droites de tendance et coefficient de régression linéaire

Un autre constat émane également de ces droites de tendances. Revêtir les outils après leur rodage leur procure une stabilité et un pouvoir de coupe plus importants.

En effet, les deux outils revêtus 1 et 2 possèdent des coefficients de régression linéaire plus faibles en comparaison avec ceux obtenus pour les outils non revêtus (tableau.IV.3.4).

D'après les calculs théoriques du tableau.IV.3.4, les deux outils revêtus 1 et 2 devraient permettre respectivement d'usiner une distance de 4320 et 5697 m avant que le mode ne bascule en régime de refus de coupe.

Appellation	Coefficient de régression linéaire	Longueur 'théorique' pour le changement du mode de coupe (m)
Témoin	-0,0095	2964
Rodé 1	-0,0085	2551
Rodé 2	-0,0062	3366
Revêtu 1	-0,0035	4320
Revêtu 2	-0,0030	5697

Tableau.IV.3.4 : Coefficients de régression linéaire

#### IV.3.2.3.2. Mesure de l'usure

Parallèlement à la mesure des efforts, nous avons également réalisé des mesures de recul d'arête des outils en fonction de la longueur totale usinée.

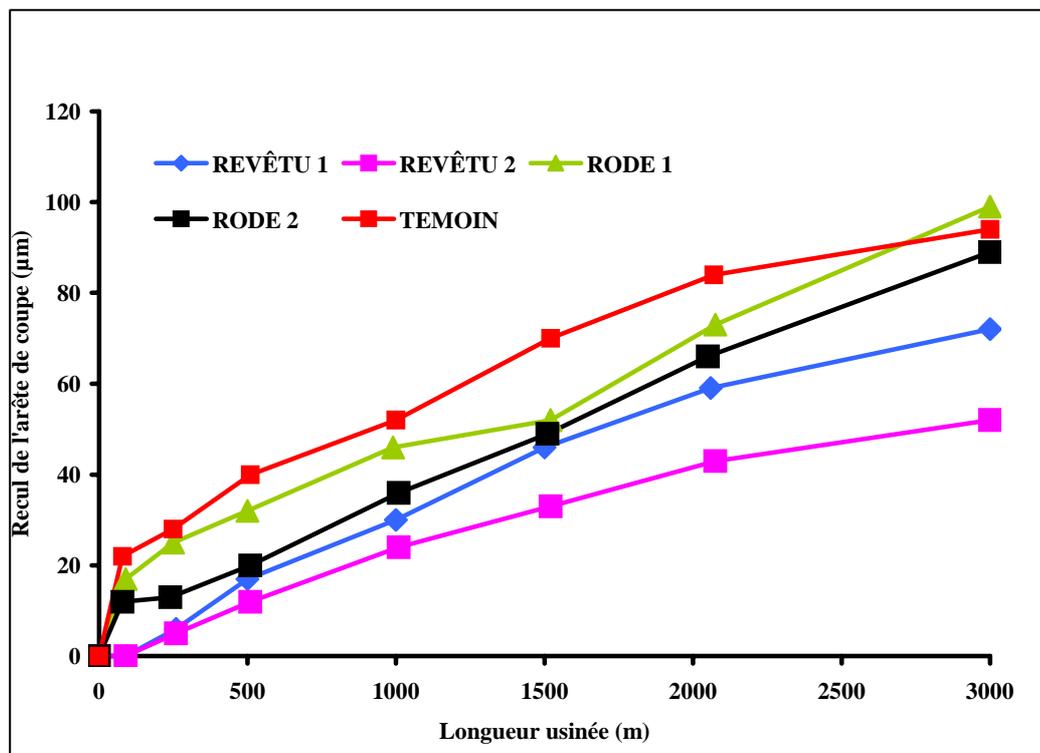


Figure.IV.3.17 : Recul d'arête des outils en fonction de la longueur de déroulage

Les tendances dégagées lors de la mesure des efforts se confirment (figure.IV.3.17). L'outil témoin possède les valeurs de recul d'arête les plus importantes, légèrement supérieures à celles mesurées pour l'outil rodé 1. Après 2800m de déroulage, ces deux courbes se rejoignent et à 3000m la valeur d'usure de l'outil rodé 1 est sensiblement supérieure à celle de l'outil témoin. L'outil rodé 2 en fin de déroulage présente des valeurs d'usures proche de celles des outils témoin et rodé 1.

Par ailleurs, les valeurs du recul d'arête en fin de procédé des outils revêtu 1 et 2 sont les plus faibles.

En fin de déroulage, la valeur du recul de l'arête de coupe de l'outil témoin est de 94  $\mu\text{m}$  alors que celle de l'outil rodé 1 est de 70  $\mu\text{m}$  et que celle de l'outil rodé 2 est de 52  $\mu\text{m}$ .

Ce qui est également important à retenir, est que le rayon d'arrondi d'arête influe sur le comportement en coupe des outils revêtus. L'outil revêtu 2 possédant un arrondi d'arête plus important que celui de l'outil revêtu 1 présente une résistance à l'usure par abrasion supérieure.

Hormis le fait que CrAlN possède un faible coefficient de frottement, est-ce que le rodage de l'arête de coupe n'a pas amélioré l'adhérence du film conduisant à une moindre délamination du revêtement ?. Pour répondre à cette question nous avons réalisé des observations au MEB (figure.IV.3.18). Sur la face de dépouille de l'outil, CrAlN montre que très peu de recul par rapport à l'arête de coupe (15 $\mu\text{m}$ ) et ceci sur la totalité de la longueur de l'outil. Ce constat a aussi été fait sur la face d'attaque.



Figure.IV.3.18 : Arête de coupe de l'outil revêtu 2 après 3000 m de déroulage

L'ancrage de la couche a conduit à faciliter la glisse du copeau sur les deux faces de l'outil permettant ainsi une meilleure résistance à l'usure.

#### IV.3.2.4. Conclusion de la deuxième campagne

À l'inverse de la première partie de cette étude où l'on a utilisé une méthode de sablage manuelle, pour réaliser cette seconde campagne de tests nous avons employé une sableuse automatisée. Elle nous a permis de mieux tester l'effet de différentes durées de sablages préalables d'outils puis revêtus sur leur comportement en usinage du bois.

Des observations au MEB ont été réalisées sur les outils sablés. Elles révélèrent que l'arête présente de faibles ondulations après sablage. Cette modification des reliefs est peut-être due à la fragilité relative de l'arête. L'arête des outils sablés puis revêtus, montre un aspect régulier sur toute sa longueur.

La mesure des efforts  $\bar{Y}_C$  relatifs à la forme initiale de l'arête a permis de dégager des tendances en ce qui concerne l'effet de la modification de la géométrie. Il s'est avéré que plus l'arrondi d'arête est important, plus les outils sont aptes à couper. Aussi, appliquer une couche CrAlN sur les deux faces améliore la tenue en coupe des outils et diminue les efforts de coupe.

Nous avons aussi effectué des mesures de reculs d'arête avec les 4 outils modifiés. Les résultats sont en parfaite adéquation avec ceux obtenus à l'issue des mesures d'efforts. De plus, en observant l'arête de coupe des outils sablés puis revêtus, l'amélioration de l'ancrage de CrAlN sur l'arête s'est confirmé.