

---

# CONCLUSIONS

Le travail réalisé se situe dans une démarche visant à produire les dentures présentes dans les boîtes de vitesse dans des conditions de productivité nettement supérieures, et dans des conditions écologiques soucieuses de l'abandon des huiles de coupe.

Après avoir resitué le taillage à la fraise-mère au sein d'une gamme de fabrication d'une roue dentée, ainsi que parmi les autres procédés de génération ébauche des dentures, une description technologique de l'état de l'art de ce procédé a été réalisée. Les paramètres susceptibles d'évoluer ont notamment été mis en évidence en lien avec l'objectif de productivité recherchée, tout en conservant les exigences de qualité géométrique souhaitée. Il est ainsi apparu que seul un saut technologique dans la conception et la fabrication des outils fraises-mères pouvait permettre de faire croître les vitesses de coupe de façon importante tout en supprimant la lubrification à l'huile entière.

L'accroissement des sollicitations thermiques, mécaniques et chimiques, lié aux nouvelles conditions de coupe visées, nécessite de faire évoluer ces nouvelles fraises-mères à plusieurs niveaux :

- ◆ Une nouvelle génération de revêtements (revêtement standard actuel : TiN déposé par PVD)
- ◆ Une nouvelle génération de substrats (substrat standard actuel : acier rapide coulé M35)

Le portrait robot du revêtement idéal pour le taillage à la fraise-mère à grande vitesse de coupe et à sec peut comporter différentes exigences :

- ◆ limiter l'adhésion de la matière usinée sur l'outil
- ◆ limiter les effets de l'abrasion
- ◆ ne pas s'oxyder à haute température
- ◆ limiter la diffusion entre le substrat et la matière usinée
- ◆ ne pas se fissurer (résistance à la fatigue)
- ◆ protéger thermiquement le substrat

Le mémoire a fait le point sur les principales méthodes de caractérisation utilisées par les laboratoires développant les revêtements. Il a ainsi été montré que ces méthodes ne sollicitent pas les revêtements avec des vitesses relatives de frottement, des niveaux de pression et de température aptes à révéler leurs comportements en service. Ceux-ci sont en fait utilisables pour

distinguer les revêtements non adaptés (peu adhérents par exemple). Seules des opérations d'usinage elles-mêmes peuvent atteindre l'ensemble des caractéristiques nécessaires et permettre une évaluation des performances des revêtements étudiés.

Afin de comprendre les mécanismes d'action des revêtements, 6 voies d'investigation parallèles ont été suivies :

- ♦ Une modélisation analytique de la transmission de la chaleur à travers un outil revêtu ;
- ♦ Une quantification des actions mécaniques en tournage ;
- ♦ Une estimation des flux de chaleur transmis aux outils durant l'usinage ;
- ♦ Une quantification des températures d'interface outil/copeau/pièce ;
- ♦ Une analyse des zones de contact outil/copeau/pièce ;
- ♦ Une analyse des modes de formation des copeaux.

De l'ensemble de ces analyses, il est ainsi apparu que les revêtements étudiés [TiN, (Ti,Al)N, (Ti,Al)N+MoS<sub>2</sub>] ont une action importante sur la coupe. Leur action peut se situer à deux niveaux : une action tribologique et une action thermique.

Concernant l'effet tribologique, il a été montré que les revêtements étudiés permettent de réduire les efforts de coupe et le coefficient d'écoulement des copeaux à la surface des outils. Ils entraînent également une réduction des phénomènes d'adhésion et de la surface de contact outil/copeau ; permettant ainsi une réduction des phénomènes de cisaillement de la matière usinée à l'interface. Ces tendances sont plus marquées aux basses vitesses de coupe et tendent à s'amoindrir à hautes vitesses.

Parmi les revêtements étudiés, le MoS<sub>2</sub> s'est particulièrement distingué grâce à ses propriétés lubrifiantes, notamment aux basses vitesses de coupe.

Concernant l'effet thermique des revêtements, il a été montré que ceux-ci n'ont aucun effet d'isolation thermique du substrat lors des opérations à coupe continue (tournage), alors qu'ils ont un rôle très significatif dans les processus de coupe discontinue. Il apparaît ainsi que, dans le cadre d'opérations de taillage à la fraise-mère, le substrat d'un outil sera d'autant plus isolé que le revêtement a une faible conductivité et une faible diffusivité thermique.

De plus, il a été montré que le revêtement TiN permettait la réduction la plus importante de la quantité de chaleur générée dans la zone de contact outil/copeau. Le revêtement MoS<sub>2</sub> permet quant à lui une réduction très notable du flux de chaleur généré lorsqu'il est associé au (Ti,Al)N, grâce à ses bonnes propriétés lubrifiantes.

L'étude de l'influence tribologique et thermique des revêtements ayant été réalisée en coupe continue, il serait intéressant de compléter ces analyses lors d'opérations à coupe discontinue, et

---

cela afin de faire la part des choses entre les écarts de flux de chaleur générés durant la coupe et les écarts de la fonction de transfert thermique vers le substrat.

Une analyse bibliographique des pratiques des nouveaux revêtements PVD dans des opérations d'usinage à coupe discontinue dans de l'acier a montré que les revêtements (Ti,Al)N, MoS<sub>2</sub> et Ti(C,N) ont des aptitudes intéressantes pour ces applications présentant des modes et des niveaux de sollicitations proches de ceux du taillage à la fraise-mère.

Le revêtement (Ti,Al)N se distingue par sa grande dureté à chaud, sa bonne tenue à la fatigue, sa faible vitesse d'oxydation, sa faible conductivité thermique, ainsi que sa faible vitesse de diffusion dans l'acier.

Le MoS<sub>2</sub> est un revêtement, qui présente des propriétés lubrifiantes intéressantes, ce qui le dispose à compenser l'absence d'huile entière lors des opérations de taillage à sec. Par contre, sa faible température d'oxydation rend cependant incertain la réalité de ses performances à l'interface outil-copeau aux hautes vitesses de coupe.

En ce qui concerne le Ti(C,N), sa grande dureté à basse température et sa bonne aptitude au frottement font de lui un candidat intéressant pour les opérations à basse température (fraisage à basse vitesse de coupe et sous émulsion). Son intérêt en fraisage à grande vitesse et à sec reste suspendu à sa capacité à maintenir ses performances à haute température, et cela d'autant plus qu'il présente une faible température d'oxydation.

Une campagne d'essais de fraisage à grande vitesse de coupe et à sec a permis de confirmer la très bonne tenue du revêtement (Ti,Al)N, comparativement au revêtement TiN. Le MoS<sub>2</sub> a montré une aptitude à retarder l'apparition de l'usure lorsqu'il est associé au (Ti,Al)N, formant ainsi un revêtement bi-fonctionnel : dur et auto-lubrifiant. Le Ti(C,N) n'a pas présenté de résultats intéressants.

Par contre, le passage à de fortes vitesses de coupe entraîne une modification importante des modes d'usure des outils, puisqu'on passe d'un mode d'usure en dépouille dominant à un mode d'usure en cratère.

Il a également été montré que les aciers rapides obtenus par métallurgie conventionnelle n'étaient pas aptes à supporter le revêtement à ce niveau de température ; ceux-ci présentant une chute dramatique de leurs caractéristiques mécaniques. Les opérations de coupe discontinue à grande vitesse de coupe et à sec doivent privilégier l'emploi d'aciers rapides frittés fortement alliés afin de soutenir les revêtements à de plus hautes températures durant l'usinage.

Une campagne d'essais de taillage à grande vitesse de coupe ( $\sim 160$  m/min) a été entreprise sur un site de production de boîtes de vitesse du groupe PSA Peugeot-Citroën. Cette campagne a permis de confirmer que ce type d'opérations conduit à une usure dominante en cratère. Il a également été validé l'intérêt de l'association d'un revêtement (Ti,Al)N avec une couche auto-lubrifiante de MoS<sub>2</sub> afin d'obtenir un gain de performance de 250 % comparativement à un revêtement conventionnel TiN et un gain de 70 % par rapport à un revêtement (Ti,Al)N employé seul.

Parallèlement aux performances intéressantes de ces nouvelles solutions techniques, l'augmentation des cadences de production oblige ces nouvelles fraises-mères à avoir une importante fiabilité et reproductibilité. Cette exigence impose de maîtriser rigoureusement toutes les étapes de fabrication et de reconditionnement des outils (*Remarque : La maîtrise s'entend comme la capacité à atteindre un niveau donné de spécifications, ainsi que la capacité à maintenir ces spécifications d'un bout à l'autre de la vie d'un outil.*).

Il a ainsi été montré la nécessité de prendre en considération les conditions d'affûtage en lien avec l'intégrité des surfaces actives des outils (topographie de surface, microstructure, contraintes résiduelles), ainsi que les conditions de nettoyage des outils avant revêtements et les conditions de déplaquage des revêtements usagés en lien avec les dégradations chimiques des substrats porteurs.

En plus de ces considérations, il a été montré la nécessité de mettre en œuvre des opérations de tribofinition sur les arêtes de coupe des fraises-mères afin de les rendre plus robustes et plus fiables en fonctionnement. Les arrondis d'arête générés par des techniques de microsablage ou d'extrusion de pâte abrasive doivent pendant subir des étapes d'optimisation de leurs paramètres de réglage afin de trouver le meilleur compromis entre les microgéométries réalisées et les conditions de coupe utilisées (et notamment l'épaisseur locale des sections coupées).

---

## PERSPECTIVES

Les investigations réalisées ont donc permis de jeter les bases d'une nouvelle génération de fraises-mères, permettant à la fois d'augmenter et de fiabiliser les cadences de production des dentures sur une même machine, mais aussi de supprimer l'emploi de l'huile entière, ce qui contribue à la préservation de l'environnement et à l'amélioration des conditions de travail dans les ateliers. De plus, il a été montré que cette nouvelle génération de fraise-mère avec ces conditions de coupe associées permettent une réduction d'au moins 25% du prix de revient de cette opération.

D'autres voies de progrès semblent aujourd'hui intéressantes à approfondir afin d'accroître encore davantage la productivité et la fiabilité des opérations de taillage. Il s'agit notamment des nouveaux substrats en carbure, des nouveaux revêtements à structure superlattice, composites ou à gradient de composition, mais aussi des nouvelles méthodes de tribofinition des arêtes de coupe (rodage).

L'expertise acquise depuis 1998 dans le domaine du taillage à la fraise-mère permet aujourd'hui d'occuper une place importante dans les développements de cette technologie, que ce soit au niveau français ou international. Les nombreux contrats industriels qui découlent de ce travail montrent le besoin important de recherche et développement dans cette technologie complexe et mal connue, notamment pour tous les acteurs amonts (fabricant d'outils, de revêtements, de substrats, de matière première, etc.) qui n'ont ni les moyens matériels, ni l'expertise nécessaires pour mener à bien ces recherches.