

L'usinage ultrasonique : cas d'application au bois

Stéphane GAUTREAU ⁽¹⁾, Grégoire PEIGNE ⁽²⁾, Benoît FURET ⁽²⁾

⁽¹⁾ CNAM pays de la Loire / SYNERVIA
C/O Ecole Supérieure du Bois
Rue Christian Pauc
BP 10605
44306 NANTES

⁽²⁾ IRCCYN
UMR CNRS 6597
1 rue de la noë
BP 92101
44321 NANTES

AIP-Priméca Pays de la Loire
Benoit.Furet@univ-nantes.fr

Résumé :

Malgré l'accroissement de l'utilisation des matériaux plastiques dans la fabrication des produits de consommation courante, le bois progresse toujours. Aussi, il faut en permanence faire évoluer les techniques de travail du bois, et en particulier, l'usinage, devenu un enjeu majeur dans cette industrie transformatrice du bois. La qualité des surfaces usinées est complexe à maîtriser car fonctionnellement précise et déterminante pour les opérations de finition. Par exemple, l'apparition de produits aqueux à faible impact environnemental (teinte) nécessite de mieux maîtriser les risques de soulèvement de fibres, non acceptables en terme d'aspect et de toucher. Ainsi de nombreuses recherches sont actuellement menées pour un meilleur compromis Qualité/Productivité. Nos travaux proposent une nouvelle piste, l'usinage ultrasonore rotatif. Le présent article nous permet tout d'abord de rappeler des notions nécessaires sur les ultrasons et sur leurs exploitations. Ensuite, nous allons décrire les conditions, les essais et les résultats de nos travaux sur l'usinage ultrasonore appliqués au bois.

Abstract :

In spite of the increase of plastic materials for common product manufacturing, the use of wood is still in progress. Therefore, it is permanently necessary to improve the techniques of wood transformation, and especially, machining, that has become a major stake in this industry. The quality of the WOOD machined surfaces is difficult to perform because high specification levels are required for finishing operations. For example, the arising of new aqueous products with low environmental impact requires now to prevent the risks of rising of fibres, unacceptable in term of roughness criterions. Thus, many research works are currently carried out to perform the compromise quality and productivity. In this field, our work proposes a different way, rotary ultrasonic machining (RUM). First of all, this article presents the basic concepts on the ultrasounds and their applications. Secondly, it focuses on the conditions, the tests and the results of our experiments of ultrasonic machining for wood.

Mots-clefs :

Usinage du bois, usinage ultrasonore, RUM (Rotary Ultrasonic Machining)

1 Introduction

L'apparition des centres d'usinage à commande numérique a fortement participé à l'évolution des techniques de travail du bois. Les usinages sont aujourd'hui très présents dans les produits du bois (ameublement, génie civil, équipement du jardin,...) et sont devenus un enjeu majeur pour les industriels. Face à une concurrence mondiale, les enjeux des industriels du bois sont autant techniques qu'économiques.

Le bois peut être utilisé, soit à l'état massif, soit sous forme de produits dérivés : le contre-plaqué, le panneau de particules, le lamellé collé... L'utilisation de ces produits dérivés apporte

de nouvelles caractéristiques permettant de rationaliser les procédés de fabrication et donc de diminuer les coûts de production. Cependant, les matériaux étant complexes, hétérogènes et anisotropes, les usinages et surtout la qualité de ces usinages restent complexes à maîtriser.

Aujourd'hui, on cherche, avec l'apparition de nouveaux matériaux de coupe et des usinages à des vitesses toujours plus grandes (UGV), à optimiser les débits volumiques (ou surfaciques pour le détournage). Toutefois, cette productivité doit être menée dans le respect d'une certaine qualité. Les surfaces usinées ont une fonctionnalité précise, dimensionnelle pour un assemblage, esthétique (aspect visuel et toucher) pour une surface finie. Dans le premier cas, la qualité des surfaces aura un impact sur la consommation de colle et sur les performances de cet assemblage. Dans le second cas, la qualité des surfaces aura un impact sur les opérations d'application de produits aqueux. Ces produits, à faible impact environnemental, augmentent considérablement les risques de soulèvement de fibres, non acceptable en terme d'aspect et de toucher. Actuellement, on réalise plusieurs applications successives de ces produits, avec un ponçage entre chaque dépôt, pour atteindre la qualité désirée.

La multiplication de ces opérations de finitions, l'augmentation des encours et des temps de réalisation motivent les industriels à rechercher de nouvelles solutions répondant à des critères de productivité aujourd'hui indispensable à l'industrie de transformation du bois. Parmi les solutions, il est envisagé d'exploiter des méthodes d'usinage du bois qui permettent une meilleure maîtrise des caractéristiques des surfaces usinées évitant les opérations de ponçage avant l'application des produits de protection. Nous souhaitons donc proposer un nouvel axe de recherche avec l'usinage ultrasonore rotatif (appelé RUM). Ce procédé a été développé pour l'usinage de pièces de haute technicité en céramique ou verre. Ainsi, on souhaite appliquer au bois le mode d'enlèvement de matière, spécifique à ce procédé et issue de la combinaison des ultrasons et du mouvement de rotation ; le mouvement de coupe est donc une combinaison de cette translation alternative et de la rotation. Ces travaux sont menés dans un souci d'optimisation de la qualité des surfaces usinées et de productivité.

2 Ultrasons et le procédé RUM

Même si les ultrasons ont été découverts au XIX^{ème}, ils ont été exploités pour la première fois dans l'industrie il y a moins d'un siècle. Pourtant, aujourd'hui, les ultrasons ont une place majeure dans l'industrie, que ce soit pour des applications de métrologie, de soudage des plastiques, de grenailage, de nettoyage, d'émulsification, ... ou encore d'usinage. Avant de présenter nos travaux, il est intéressant de revenir sur les ultrasons et leurs exploitations.

2.1 Notions sur les ultrasons

Par définition, l'onde sonore est une onde de pression se propageant dans un milieu. Le mécanisme par lequel les oscillations sont transmises de proche en proche diffère suivant le milieu. Dans un solide, la propagation d'une onde sonore peut être représentée par une chaîne d'atomes liés par un ressort qui transmettent les oscillations de chaque atome à ses proches. La vitesse de déplacement des atomes dans leurs milieux respectifs est appelée célérité (notée c). Celle-ci est fonction du module élastique et de la masse volumique du matériau, $c=(E/\rho)^{1/2}$.

Les ondes sonores sont périodiques, fonction sinusoïdale, caractérisées par la fréquence (notée f) et l'amplitude (notée A). La fréquence permet de définir les domaines acoustiques en fonction du domaine audible par l'homme. Ainsi, les ultrasons s'étendent de 16 000 Hz à 10^{13} Hz. La fréquence la plus utilisée pour les moyens de production des domaines cités plus haut est 20 KHz. L'un des phénomènes les plus intéressants pour les applications industrielles est la résonance. C'est l'augmentation de l'amplitude d'une vibration lorsque la fréquence des vibrations imposées par une source sonore devient égale ou un diviseur entier de la période propre du système.

2.2 La production d'ultrasons

La première application industrielle est née d'une catastrophe maritime, le naufrage du Titanic. Un météorologue anglais propose alors d'utiliser les ultrasons pour détecter les icebergs. Le premier sonar fut développé quelques années plus tard par un français, Paul LANGEVIN, qui a eu l'idée d'utiliser le principe de piézoélectricité comme source acoustique.

L'effet piézoélectrique est la propriété qu'ont certains cristaux (non ferreux) à se polariser sous l'influence d'une contrainte mécanique. Les générateurs acoustiques, aussi appelés émetteurs acoustiques ou transducteurs, utilisent le principe inverse de la piézoélectricité, c'est-à-dire que les cristaux se déforment lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique. Les premières applications utilisaient le quartz, aujourd'hui les transducteurs sont essentiellement constitués d'un composite de céramique appelé PZT (Zircono Titanates de Plomb). Les PZT sont appréciés pour leurs excellentes propriétés piézoélectriques et leurs faibles impédances acoustiques.

Un ensemble acoustique (figure 1) est constitué d'un transducteur, d'un booster, d'une sonotrode et éventuellement d'un pré-booster. Le transducteur est constitué d'un empilage de PZT précontraints pour produire une énergie ultrasonore dans une direction donnée. Le booster et le pré-booster ont pour fonction d'amplifier l'onde produite par le transducteur. La sonotrode a deux fonctions, amplifier à nouveau l'onde ultrasonore et être la partie active du procédé, c'est-à-dire l'outil.

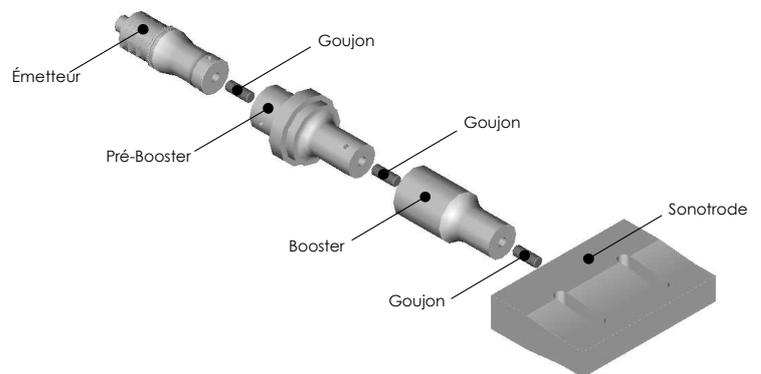


Fig. 1 ensemble acoustique

2.3 RUM : Rotary Ultrasonic Machining

L'usinage ultrasonore rotatif, né dans les années 60-70, combine deux procédés, l'usinage ultrasonore (enlèvement de matière par un flux abrasif) et le meulage.

Le principe de l'usinage ultrasonore rotatif (figure 2) consiste à mettre en rotation un outil et de le faire vibrer à une fréquence ultrasonore suivant son axe de rotation. Une force statique est exercée sur la pièce à usiner par l'outil, la vitesse d'avance est fonction de cette force statique. L'outil est constitué de grains abrasifs en diamant agglomérés sur un corps cylindrique creux. Un liquide de refroidissement traverse ce corps creux pour ressortir dans la zone d'usinage. Il assure l'évacuation des résidus, évite tout « blocage » de l'outil et refroidit l'outil. ORCUM et Treadwell 2003.

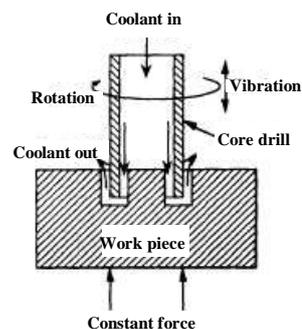


Fig. 2 principe RUM

La fréquence des ultrasons utilisés est en générale de 20 KHz. Ainsi, l'outil va changer 40 000 fois par seconde de direction. Le procédé RUM est essentiellement utilisé pour des applications de perçage dans la céramique ou des autres matériaux durs et fragiles. Son intérêt est double, effort de coupe faible et diminution de l'écrouissage des surfaces usinées. Par contre, le débit volumique généré est faible. Le mécanisme de coupe est la combinaison de deux modes d'enlèvement de matière, le martelage et l'abrasion, Pei et al. 1995.

3 Le procédé RUM appliqué au bois

Comme nous l'avons précisé dans l'introduction nous proposons de développer l'usinage ultrasonique dans le bois afin de minimiser les opérations de finition des surfaces obtenues. Notre choix s'est arrêté sur l'usinage ultrasonore rotatif, un procédé assez proche du ponçage. Celui-ci étant le meilleur des procédés de finition.

3.1 Le démarrage de nos travaux

Le caractère innovant de nos travaux est notre approche. Les travaux précédemment menés consistaient à optimiser le mode d'enlèvement de matière pour des applications de pièces céramiques hautement technique, ou à apporter une assistance ultrasonore aux procédés d'usinage classique. Pour notre cas, nous avons souhaité, tout d'abord, utiliser les ultrasons comme principale énergie mécanique. Pour cela, nous avons recherché un ensemble ultrasonore permettant d'atteindre de fortes amplitudes (230 μm) avec une mise en résonance permanente de l'outil. Ensuite, nous avons souhaité élargir les capacités du procédé (parachèvement, matériaux), et cela devient possible grâce à notre niveau d'amplitude élevé et notre maîtrise des ultrasons. Nous avons ainsi réalisé un partenariat avec la société SONIMAT pour la fourniture du matériel. Leur générateur électrique haute tension (1000 W) a la particularité et l'avantage de recherche en permanence la fréquence de résonance. Celle-ci peut être modifiée de quelques hertz avec une évolution, même faible, de la température de l'ensemble acoustique. Cela aurait alors une conséquence directe sur l'amplitude et sur la puissance consommée, une différence de 5 Hz va doubler la puissance consommée.

A terme, il est prévu de disposer d'une tête d'usinage ultrasonore équipée d'un refroidissement par air en centre outil et atteignant des vitesses de rotation de plusieurs milliers de tours par minute. Cependant, dans la phase de prospection, nous avons réduit ce cahier des charges pour diminuer les coûts. Actuellement, le premier prototype est bridé à 500 tr/min.

Les objectifs de nos travaux sont triples : mettre en évidence la capacité des ultrasons à développer une énergie mécanique suffisante pour enlever de la matière, identifier les paramètres d'usinage assurant la meilleure productivité du procédé et enfin, vérifier que ce mode d'enlèvement de matière améliore la qualité des surfaces usinées nécessaire à l'application d'un produit de finition (produits aqueux).

3.2 Le choix d'un outil

Pour l'outil, nous avons choisi un outil meule de diamètre 10 mm et de granulométrie D602 (grains de diamant naturel d'une taille de 500 à 600 μm). Le sertissage des grains de diamant est réalisé par électrodéposition d'un alliage de nickel, Furet et al. 2005. Cette technique permet de réaliser un sertissage plus élastique que le brasage ou le frittage. Le comportement de ce sertissage est une première inconnue pour notre procédé. En effet, la zone diamantée devra subir et résister à des déformations de quelques microns, 40 000 fois par seconde.

La hauteur de sertissage des grains est un paramètre important pour définir un niveau d'encrassement de l'outil et donc l'avance. Mais le paramètre le plus important est la granulométrie. Il s'agit de faire un compromis. Soit on favorise un espacement minimum entre les grains avec une forte granulométrie pour minimiser le risque d'encrassement. Soit on favorise le nombre de grains, important pour une faible granulométrie, en contact avec la surface usinée. Dans ce cas là, on optimise le mécanisme d'enlèvement de matière en mettant un maximum de parties actives de l'outil en contact avec les fibres à couper. D'autre part, la granulométrie aura un impact direct sur l'état de surface. Notre choix d'une granulométrie de D602 tient compte de tous ces éléments. Pour la suite, il sera intéressant d'essayer plusieurs granulométries.

3.3 Le prototype

A partir de l'ensemble acoustique, nous avons réalisé un prototype (figure 3) monté sur une machine numérique. L'ensemble acoustique est monté sur équerre, elle-même fixée sur le bâti de la broche/machine. Le mouvement de rotation est réalisé par la récupération du mouvement de rotation de la broche/machine avec une transmission par courroie. Le prototype peut tourner à une vitesse maximale de 500 tr/mn, peut vibrer à une fréquence de 20 KHz pour une amplitude maximale de 230 μm . Les mouvements d'avances sont générés par la machine numérique. La transmission de la puissance électrique est réalisée par un collecteur électrique à contacts graphite.



Fig. 3 prototype usinage ultrasonore rotatif

Une fois notre prototype réalisé et validé, nous avons pu définir des premiers essais. Pour commencer, les seuls résultats qui seront observés sont les efforts de coupe et la qualité de l'usinage. Pour l'observation des efforts de coupe, les éprouvettes sont montées sur une platine de mesure d'efforts. On relève les efforts F_x , F_y et F_z . Concernant la qualité des surfaces usinées, il est aujourd'hui difficile de caractériser des critères de qualité. En attendant cela, on comparera visuellement les états de surface et notamment l'apparition de détérioration thermique du bois en surface. Plus tard, après avoir bien défini les différents paramètres, il sera possible de réaliser une opération de finition (dépose d'un produit aqueux) afin d'observer le comportement des fibres.

Nous avons choisi de réaliser nos premiers essais avec des éprouvettes en hêtre. Nos essais se sont déroulés en deux étapes. Tout d'abord, nous avons usiné des éprouvettes de différentes épaisseurs, avec des ultrasons en testant plusieurs avances. Ensuite, nous avons recherché, à niveau d'efforts équivalent, la vitesse de rotation nécessaire pour usiner sans ultrasons. Nous nous sommes arrêtés à une vitesse de 10 000 tr/mn sans atteindre un niveau d'effort équivalent, notre outil n'étant pas adapté aux grandes vitesses de rotation.

On a ainsi observé que les efforts de coupe étaient plus de deux fois supérieures pour un usinage à 10 000 tr/mn sans ultrasons qu'un usinage à 500 tr/mn avec une vibration ultrasonore (voir figure 4). La puissance consommée par le générateur électrique était de 225 W pour une avance de 40 mm/mn et 465 W pour une avance de 100 mm/mn.

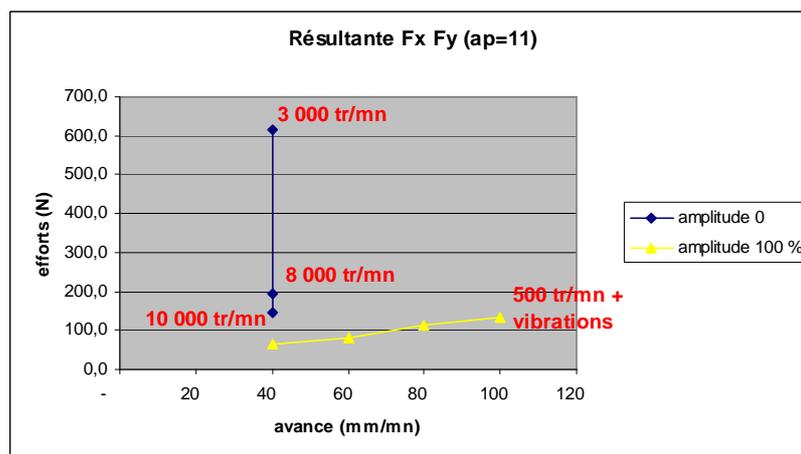


Fig. 4 mesure efforts avec et sans ultrasons

L'observation des surfaces usinées (figure 5b) met en évidence un brulage important du bois pour l'usinage à 10 000 tr/mn sans ultrasons alors qu'il est conforme avec les ultrasons et une rotation de 500tr/mn.

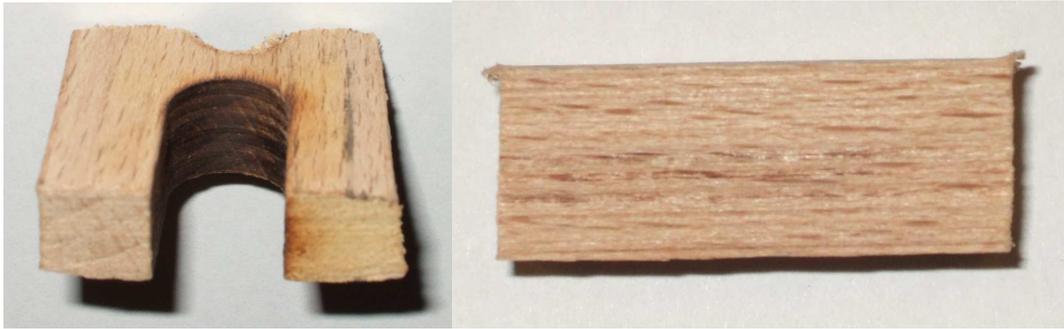


Fig. 5a usinage à 10 000 tr/mn

Fig. 5b surface usiné avec ultrasons

4 Conclusions et perspectives

Ces premiers essais nous ont permis de valider des points importants quand à l'exploitation de la technique de l'usinage ultrasonique dans le bois.

Il nous a fallu tout d'abord relever plusieurs défis techniques pour mettre en œuvre notre prototype :

- Définir et qualifier un collecteur électrique haute tension avec un niveau de bruit suffisamment faible pour que le générateur puisse piloter correctement le convertisseur d'ultrasons.
- Définir le diamantage de l'outil afin d'assurer la bonne tenue des grains de diamant et du liant pour une amplitude 5 à 10 fois plus élevées que les procédés RUM connus.
- Valider le comportement à la flexion de l'ensemble acoustique soumis à des efforts tangentiels en bout de sonotrode. Cet ensemble étant fixé principalement au point nodal du booster par une liaison encastrement de quelques millimètres seulement.
- Vérifier et assurer une amplitude maximale continue durant l'usinage, grâce notamment au matériel de SONIMAT.

Ensuite, nous avons capitalisé des informations sur les caractéristiques de l'usinage ultrasonore rotatif appliqué au bois :

- Pour une productivité équivalente, le niveau des efforts de coupe sont moindre en usinage ultrasonore. Cependant, il reste à démontrer si ces efforts résultent d'énergies spécifiques de coupe plus faibles en RUM ou bien juste de vitesses de coupe différentes. Pour cela, il faudrait tester à des vitesses de coupes en classiques comparables au RUM et faire un bilan de puissance.
- Le procédé permet une bonne évacuation de la matière coupée avec une faible vitesse de rotation.
- Le procédé réduit la détérioration thermique en surface.

Fort de ces résultats, nous pouvons désormais définir les futures étapes de nos travaux :

- Pour l'instant, les avances sont très faibles. Pour une meilleure productivité, il sera nécessaire d'augmenter ces vitesses d'avances. Dans ce cas, nous devons définir un nouveau procédé plus robuste.
- Il sera aussi intéressant d'étudier différents type d'outils, différents diamètres, différents granulométries, différents matériaux, ...
- Afin de réaliser un comparatif avec l'usinage conventionnel et d'augmenter la productivité, il sera indispensable d'augmenter la vitesse de rotation. Pour cela, il sera peut-être nécessaire de développer un collecteur électrique haute tension spécifique.
- Lors des essais nous avons mis en évidence qu'une différence d'amplitude de 115 μm à 230 μm pouvait avoir une influence très modérée sur les efforts de coupe. Cela reste à

vérifier, mais plusieurs interrogations se posent. Est-ce que c'est l'amplitude, la vitesse moyenne, les accélérations ou le nombre d'accélération qui caractérisent le mode d'enlèvement de matière. Aussi, pour répondre à ces questions, nous pouvons réaliser une série d'expérimentations en modulant l'amplitude et en augmentant la fréquence (convertisseur d'ultrasons de 30 KHz et 40 KHz).

- Arrivé à ce stade, il sera indispensable de trouver les meilleurs compromis entre l'amplitude, la fréquence et la vitesse de rotation pour un procédé optimum.
- Dans l'objectif de qualité, nous devons vérifier le comportement des fibres (soulèvements) au cours d'opérations de finition (dépôt de produits aqueux).
- Enfin, il sera intéressant de rechercher d'autres applications potentielles. C'est pour cela que nous avons, depuis peu, expérimenté notre procédé sur des matériaux composites à fibres de carbone.

Remerciements

A Eric VIOLEAU, DG de SONIMAT, pour ses conseils éclairés.

A Philippe MORET, Responsable UGV de SYNERVIA, pour son soutien aux expérimentations.

Références

ORCUM Online Resource Center for Ultrasonic Machining, Kansas State University, site internet http://cheetah.imse.ksu.edu/~zpei/ultrasonic_machining/html/tutorial.htm

Treadwell, C., Hu Ping, Zhang, J. M., Jiao Yue, Pei, Z.J., Experimental investigation on coolant effects in rotary ultrasonic machining, June 2003.

Pei, Z. J., Ferreira, P. M., Kapoor, S. G. & Haselkorn, M., 1995, rotary ultrasonic machining for face milling of ceramics. Int. J. Mach. Tools manufact. Vol. 35. No 7 pp. 1033-1046.

Furet, B, Houssais, N, Ordrenneau, M, rapport de l'étude bibliographique sur l'utilisation du diamant pour le fraisage des composites carbone, 2005.