

Mise en place d'une manipulation de mesure de vibrations lors de l'usinage par détourage de composites UD GFRP

A. COLLAINÉ^a, M. AZOUZI^a, K. SRIHI^a, J.-M. FREYBURGER^a,
C. JORDAN^a, A. BEN KHALIFA^b, M. TOURLONIAS^a

a. Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles (LPMT), UHA, Mulhouse, France,

b. Laboratoire de Génie Mécanique (LGM), ENIM, Monastir, Tunisie

Contact : anne.collaine@uha.fr

Résumé :

Le choix des paramètres de coupe employés en détourage de composites a une influence importante sur la qualité des pièces (état de surface, dommages aux plaques) et la tenue des outils. Ces résultats sont, sans aucun doute, dépendants des efforts engendrés par l'usinage mais aussi des vibrations pouvant survenir. Dans cette communication nous proposons la mise en place d'une manipulation de mesure de vibrations lors du détourage de composites GFRP (renforts en UD de verre et matrice epoxy). Après avoir éprouvé les procédures de mise en œuvre en testant la reproductibilité de nos mesures, nous étudions l'impact de l'évolution de l'engagement, de l'avance par dent et de la vitesse de coupe sur les phénomènes vibratoires enregistrés.

Abstract :

For the trimming of composite materials cutting parameters choice have an important influence on the quality of the parts (surface state, damages) and the tool life. These results necessarily depend on the cutting forces and vibrations. The aim of this paper is to set up an experiment to monitor vibrations during trimming of GFRP composites (unidirectional glass fiber reinforcement and epoxy resin). The experimental process was tested to check the reproducibility of measurements. Three parameters were studied to show their influence on recorded vibrations phenomena: influence of radius engagement, feed per tooth rate and cutting speed.

Mots clefs : vibrations, usinage, GFRP, composites

1. Introduction

Alors que le marché des composites continue à croître, l'obtention des pièces finies nécessite encore des opérations de parachèvement dont la maîtrise est primordiale tant pour la qualité des produits que pour la productivité [1]. Ces opérations ont pour but l'obtention de géométries

spécifiques (poches, trous ...) ou d'une certaine qualité dimensionnelle, celles-ci étant non réalisables par le procédé de mise en œuvre. Parmi les procédés de parachèvement existants, le détournage par outil coupant est un procédé couramment employé, en particulier pour la finition des produits en composites GFRP [2]. La mise au point d'un procédé de parachèvement quel qu'il soit, est complexe du fait de l'hétérogénéité et de l'anisotropie des matériaux composites. Ainsi, il convient de définir un réglage optimal des paramètres à mettre en œuvre en fonction du matériau à usiner, de manière à garantir la qualité de surface souhaitée, l'absence de dommages tels que le délaminage mais aussi l'absence d'une usure prématurée des outils, celle-ci pouvant nuire à la qualité et à la productivité.

Qualité de surface et dommages causés aux composites sont largement dépendants de la constitution du composite, que ce soit en terme de type renforts (matériau, forme) ou d'orientation des plis [3], [4], [5], [6]. Il en est de même de l'influence des paramètres de coupe. Ainsi, l'effet de l'avance sur la qualité de surface obtenue est largement démontré et ce, quel que soit le procédé d'usinage utilisé [3], [4], [5], [7]. Dans une moindre mesure, la vitesse de coupe [3], [4], [8] et la profondeur de passe [5] peuvent également influencer la qualité de surface. Ces différents résultats sont étayés par des analyses sur les efforts engendrés par l'usinage. Ainsi, il est démontré que l'avance et dans une moindre mesure la vitesse de coupe et la profondeur de passe ont également une influence sur les efforts [7], [9], [10]. Enfin, quelques travaux s'intéressent à l'influence des paramètres sur les défauts des pièces et en particulier le délaminage [6] et [7].

En usinage de matériaux métalliques, il est largement démontré que les phénomènes vibratoires affectent directement la qualité des pièces et l'usure des outils [11]. En usinage de composites, les études sur les effets des vibrations sont peu nombreuses ; l'influence des paramètres de coupe sur les phénomènes vibratoires est un phénomène reconnu de même que leur effet négatif sur la santé des outils [2], [4]. Une étude détaillée en alésage de composites GFRP a montré que les vibrations de l'outil sont d'autant plus importantes que la profondeur de passe et la vitesse de coupe augmentent, ceci s'expliquant par l'augmentation des efforts de coupe. Cette même étude rapporte que les amplitudes des vibrations sont maximales pour une avance par tour moyenne et que les paramètres peuvent avoir un effet combiné et l'optimum n'étant pas le même suivant la constitution de la plaque [12].

Forts des résultats liant paramètres de coupe en fraisage de composites GFRP et qualité de surface mais aussi des constats faits en alésage de composites GFRP, nous nous proposons dans cet article de mettre en place une manipulation de mesure de vibrations lors du détournage de composites GFRP et d'étudier l'influence des seuls paramètres de coupe sur les vibrations.

Le premier paragraphe sera consacré à la description du dispositif expérimental (éprouvettes, manipulation d'usinage, méthode de mesure des vibrations). Dans le second paragraphe nous détaillerons quelques expériences menées visant à démontrer la reproductibilité de nos essais. Puis le dernier paragraphe sera consacré à la présentation de l'évolution des vibrations en fonction de l'engagement de l'outil, de l'avance par dent f_z et de la vitesse de coupe V_c .

2. Dispositif expérimental

2.1. Epreuves et manipulation d'usinage

L'usinage réalisé concerne le détournage d'éprouvettes composites GFRP. Le renfort est de l'UD de verre (fibres Vetrotex 136 tex de diamètre moyen 13 μm). La matrice est une résine thermodurcissable epoxy/amine. Les éprouvettes sont réalisées par enroulement filamentaire des fibres

sur un moule plan en rotation. A chaque couche enroulée, les fibres sont imprégnées. Après enroulement, le moule est placé sous presse. Nous obtenons ainsi deux plaques composites d'environ $240*240*3,3 \text{ mm}^3$ dans lesquelles nous découpons les éprouvettes à détourer ainsi que quelques échantillons permettant de caractériser précisément le matériau.

Les deux plaques dans lesquelles nous avons réalisé nos éprouvettes ont les caractéristiques suivantes : taux volumique de fibres : 56,1%, masse volumique : 2g/cm^3 .

Les éprouvettes utilisées pour les essais de détournage font environ $40*100*3,3 \text{ mm}^3$.

Le détournage est fait sur une fraiseuse Charly 2U de puissance à la broche 1,1 kW, de vitesse de rotation maximale $24000 \text{ tr.min}^{-1}$ et de vitesse d'avance maximale 6000 mm.min^{-1} .

L'outil utilisé est une fraise SECO de référence 840060R050Z4.0-DURA (Figure 1). C'est une fraise en carbure monobloc revêtu, de diamètre 6 mm et ayant 4 dents. Elle présente une géométrie particulière en double hélice qui permet d'éviter le délaminage.



Figure 1 : fraise utilisée pour l'usinage

La Figure 2 représente l'éprouvette en situation d'usinage. Elle est encastrée entre une bride et un support, la bride étant serrée sur le support par deux vis placées de part et d'autre de l'éprouvette. L'outil se déplace perpendiculairement au sens des fibres et parallèlement aux faces avant du système de bridage, la trajectoire d'usinage garantissant l'usinage en avalant. L'outil détoure toute la hauteur de l'éprouvette ($a_p = 3,3 \text{ mm}$) et a un dépassement constant ($dep = 1 \text{ mm}$) par rapport au bas de l'éprouvette. La surface finie est à une distance constante L_{paf} du bord de la bride. Les paramètres de coupe variables sont l'engagement radial a_e (mm), la vitesse de coupe V_c (m.min^{-1}) donnant la vitesse de rotation N (tr.min^{-1}), et l'avance par dent f_z (mm.tr^{-1}) donnant la vitesse d'avance V_f (mm.min^{-1}).

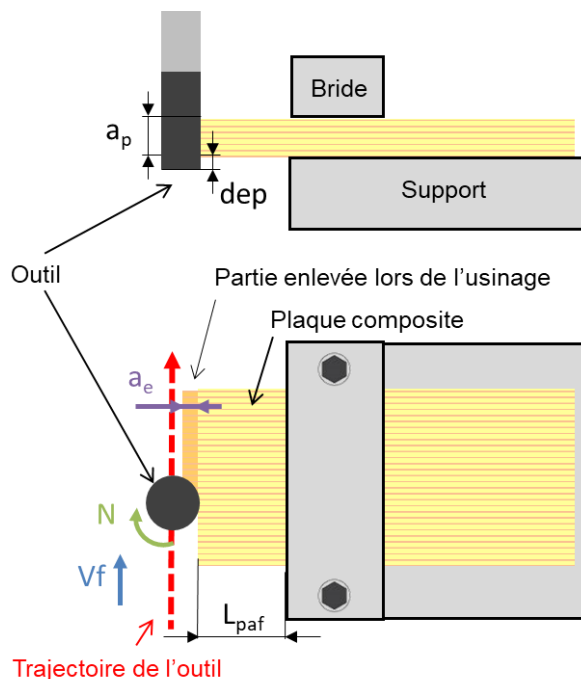


Figure 2 : principe de détournage des éprouvettes

2.2. Moyens et méthodes retenus pour la mesure des vibrations

La manipulation mise en place pour la mesure de vibrations est représentée sur la Figure 3. Nous avons choisi d'utiliser trois accéléromètres mono-axe. Ces accéléromètres sont reliés à un analyseur numérique Brüel et Kjaer. L'enregistrement se fait via le logiciel Pulse Labshop.

Le premier accéléromètre est placé sur le dessus de l'éprouvette à usiner (« Accéléro_plaque_dessus »), le deuxième est placé sur le côté de l'éprouvette, en avant de la trajectoire d'usinage (« Accéléro_plaque_devant »). Ces deux accéléromètres sont collés à l'aide de cire, de sorte à être facilement replacés à chaque essai. Le troisième accéléromètre est collé à la cyanolite au niveau de la broche (« Accéléro_broche »). Les accéléromètres placés sur l'éprouvette doivent permettre d'enregistrer les vibrations de celle-ci dans deux directions différentes. Les vibrations mesurées par l'accéléromètre placé sur la broche permettent d'évaluer la signature spectrale liée à la rotation de la broche (signal de référence lorsque l'outil n'est pas en contact avec la plaque) mais également de suivre l'évolution de ce signal lorsque l'usinage a lieu.

A noter que la masse de l'accéléromètre représente 12.6 % de la masse de l'éprouvette hors encastrement. Même si cette valeur excède les recommandations en analyse vibratoire (10 %), cette valeur est suffisamment faible pour que l'on puisse considérer que l'accéléromètre n'influe pas sur les vibrations. De plus, si l'erreur est présente, nos usinages seront réalisés dans des situations toujours identiques, permettant une analyse comparative et phénoménologique, même si certains biais peuvent apparaître d'un point de vue fréquences vibratoires observées et niveaux de vibrations.

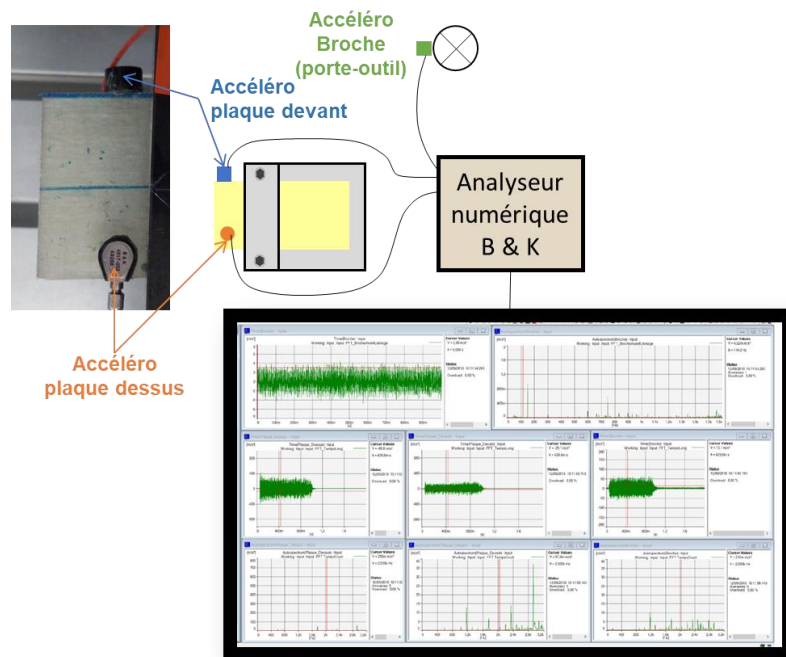


Figure 3 : manipulation de mesure de vibrations

Trois analyseurs utilisant une base de temps différente ont été définis pour enregistrer les signaux vibratoires. Les choix ont été faits pour prendre en compte les contraintes temporelles mais également par rapport à leur analyse fréquentielle.

Le premier intitulé « Avant_usinage » donne une indication des phénomènes observables lorsque la broche tourne à vide. Associé à l'enregistrement de « l'Accéléro_broche », il nous permet de vérifier la fréquence de rotation de la broche et d'avoir une image de référence.

Les deux autres analyseurs, définis pour être adaptés à l'ensemble des conditions d'usinage utilisées, ciblent la période d'usinage. Le premier, appelé « Global », couvre la totalité de cette période :

l'enregistrement démarre avant l'usinage et s'achève une fois que l'usinage est terminé. Le second, « Usinage_seul », est basé sur une acquisition temporelle faite uniquement en cours d'usinage.

En fonction de l'analyseur, les signaux sont enregistrés et traités de différentes manières. Ainsi, par le biais des signaux temporels et de leur transformation en Fonction de Réponse en Fréquence (FRF), il est notamment possible d'étudier les niveaux d'énergies, les amplitudes des pics fréquentiels ... et ce en fonction des besoins de l'étude.

3. Etude de reproductibilité

Le but de nos essais étant d'étudier l'influence des seuls paramètres de coupe sur les vibrations, il apparaît important de s'assurer de leur reproductibilité. Quelques essais préliminaires nous ont permis d'observer que les enregistrements peuvent notablement varier en fonction des éprouvettes (constitution et dimensions), de leur placement sur le système de bridage, de la procédure de serrage ainsi que du placement des accéléromètres (position et méthode de collage).

Pour s'affranchir au maximum de la variabilité due aux éprouvettes, nous les découpons dans une même plaque de base, d'épaisseur constante, en s'assurant d'avoir une largeur identique. Pour ce qui concerne la longueur, il suffit qu'elle soit suffisamment importante par rapport au système de bridage pour garantir sa non influence sur les résultats.

Le placement des éprouvettes, leur serrage ainsi que le placement des accéléromètres ont nécessité la mise en place de procédures spécifiques permettant de garantir la reproductibilité. Nous les décrivons ci-après et nous terminons l'étude de reproductibilité en présentant les résultats de 5 essais identiques.

3.1. Placement et serrage des éprouvettes

Nous plaçons l'éprouvette sur le système de bridage à l'aide d'une cale en L. Cette cale nous permet de garantir que la longueur en porte-à-faux L_{paf} est constante. Nous veillons également à placer l'éprouvette centrée sur le système de bridage grâce à un repère visuel. Enfin nous appliquons un serrage à la clé dynamométrique en procédant en 2 étapes (serrage à 1 Nm puis 3 Nm).

Pour tester la reproductibilité, nous réalisons 5 essais sur la même plaque, sans démontage de l'accéléromètre mais en démontant et remontant l'éprouvette entre chaque essai. Ces essais consistent à solliciter l'éprouvette grâce à un marteau d'impact. Pour l'occasion, l'éprouvette présente un L_{paf} permettant d'observer les premiers modes vibratoires. La Figure 4 montre la superposition des résultats des 5 essais, eux-mêmes étant la moyenne de 5 essais d'impact. Chaque tracé représente la fonction de réponse en fréquence de l'accéléromètre par rapport au marteau d'impact. On peut noter quelques pics à certaines fréquences qui sont dus à une excitation de la structure imparfaite par le marteau d'impact, mais les allures sont tout à fait similaires. Si le placement et le serrage des plaques ne sont pas valides (L_{paf} différent ou serrage non homogène sur tout l'encastrement), la fréquence du pic principal situé ici vers 1600Hz change, comme le montre le tracé de l'essai intitulé « Mauvais serrage ».

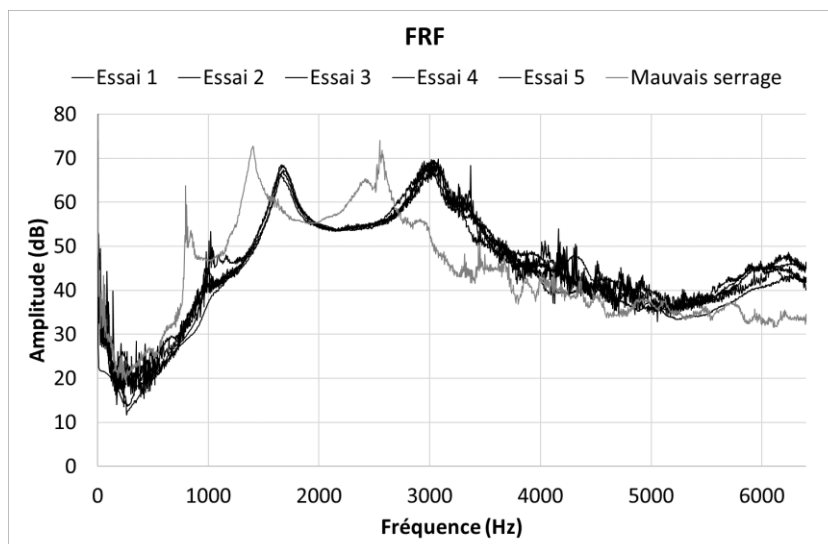


Figure 4 : reproductibilité en fonction du placement et du serrage de l'éprouvette

3.2. Placement et collage des accéléromètres sur la plaque

La reproductibilité du serrage ayant été validée, le positionnement et le collage de l'accéléromètre placé sur le dessus de la plaque a été testé. Des mesures ont été réalisées, dans les mêmes conditions que précédemment, sans démonter l'éprouvette. Pour chaque lot de 5 essais, l'accéléromètre a été décollé puis recollé. Le positionnement de ce dernier est réalisé grâce à un marquage ajouté sur la plaque. Les courbes, récapitulées en Figure 5 montrent que les résultats sont tout à fait analogues, validant ainsi la maîtrise de cet aspect de l'expérimentation. Si l'accéléromètre est mal placé ou mal collé, son influence sur la vibration de la plaque modifie la fréquence et l'amplitude du pic principal.

A noter que la position de l'accéléromètre a été choisie, par précaution, pour qu'il soit éloigné du passage de la fraise. Par ailleurs, l'étude vibratoire du système a permis de valider que la plaque ne présente pas de mode de vibration sur la plage.

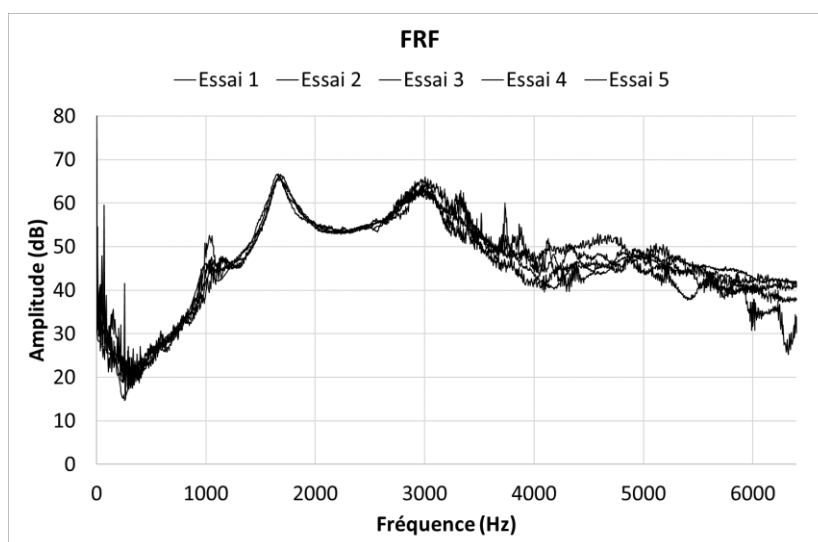
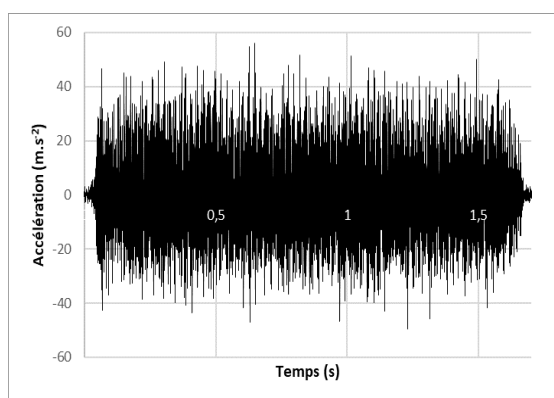


Figure 5 : reproductibilité en fonction du placement et du collage de l'accéléromètre du dessus de la plaque

3.3. Reproductibilité lors de l'usinage

Afin de valider nos procédures, nous avons procédé 5 fois au même essai de détourage. Nous avons choisi d'appliquer un engagement radial $a_e = 1$ mm et avons appliqué en conséquence les paramètres de coupe recommandés par le constructeur d'outils : $V_c = 150$ m/min (soit $N = 7958$ tr/min) et $f_z = 0,048$ mm/tr (soit $V_f = 1528$ mm/min). La valeur de L_{paf} a été fixée à 21,5 mm.

Pour chacun des 5 essais, l'allure et l'amplitude du signal temporel de l'«Accéléro_broche» sont très semblables. L'exemple de l'essai 1 est donné sur le graphique de la Figure 6. Pour chacun des essais, les valeurs RMS de la broche pendant l'usinage (entre 0,2 et 1,5 secondes) et de la broche tournant à vide ont été déterminées. Les résultats sont retranscrits dans le tableau ci-dessous (Figure 6). Pour la broche pendant l'usinage, les valeurs RMS sont du même ordre de grandeur. Les variations de valeurs observées sont dues au fait que ni les éprouvettes, ni leur placement et leur serrage ne sont parfaitement identiques. Pour autant, la variation observée n'est pas inquiétante.



	RMS broche pendant usinage (m.s ⁻²)	RMS broche tournant à vide (m.s ⁻²)
Essai 1	15,81	1,26
Essai 2	15,90	1,23
Essai 3	15,61	1,29
Essai 4	14,99	1,32
Essai 5	15,16	1,26
Moyenne	15,49	1,27
Ecart-type	0,359	0,029

Figure 6 : exemple de signal temporel de l'«Accéléro_broche» et valeurs RMS des 5 essais

Les signaux temporels de l'Accéléro_plaque_dessus des 5 essais sont donnés Figure 7.

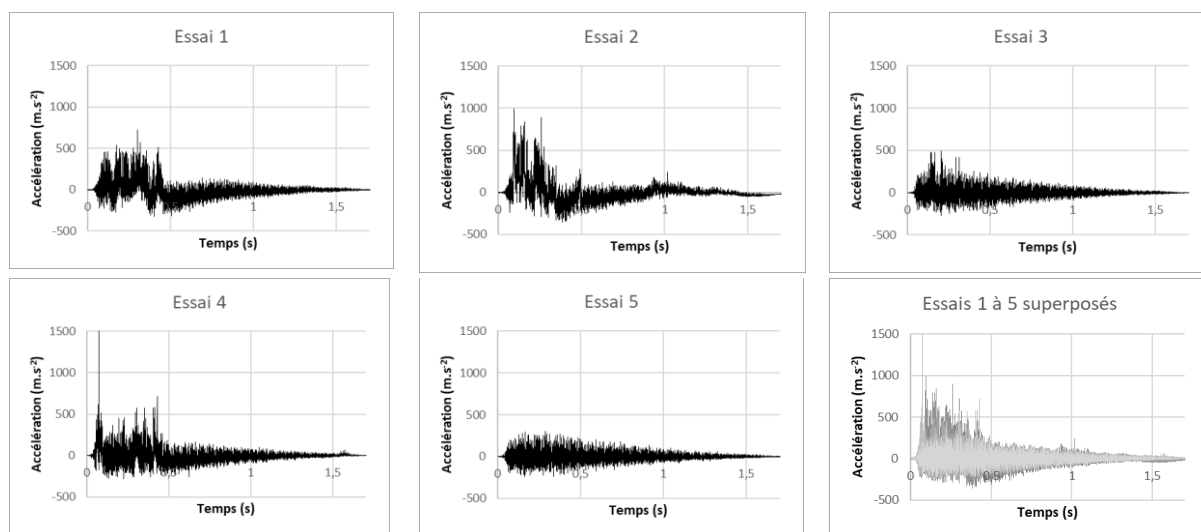


Figure 7 : signaux temporels de l'«Accéléro_plaque_dessus» des 5 essais

On peut observer que le début de signal varie notablement d'un essai à l'autre. Ces variations sont dues à l'entrée dans la matière qui peut fortement perturber les vibrations, l'accéléromètre saturant, sans que le phénomène soit reproductible (essais 1, 2 et 4). Par contre, dès lors que les vibrations dues à l'attaque de l'outil retrouvent un niveau acceptable pour l'accéléromètre, les enregistrements montrent une atténuation du signal assez semblable sur les 5 essais (voir courbes des 5 essais superposés ci-dessous).

Ces résultats montrent que nos essais sont reproductibles et prouvent le bien fondé des procédures mises en place.

4. Influence des paramètres de coupe sur les vibrations

Pour cette étude, parmi l'ensemble des paramètres liés au matériau ou à l'usinage, nous avons choisi de nous intéresser à uniquement 3 paramètres de coupe en les faisant varier individuellement. Il s'agit des paramètres les plus importants : l'engagement (a_e), l'avance par dent (f_z) et la vitesse de coupe (V_c). A chaque paramètre qui varie sont donc associés les 2 autres aux valeurs choisies au départ pour les essais de reproductibilité.

Selon le cas, 3 indicateurs liés aux phénomènes vibratoires sont étudiés :

- l'évolution de la vitesse de rotation réelle de la broche pendant l'usinage, déterminée à partir des spectres fréquentiels issus des mesures faites au niveau de la broche,
- la valeur RMS du signal acquis par l'accéléromètre « Accéléro_plaque_dessus » lorsque l'outil usine,
- la valeur RMS du signal acquis par l'accéléromètre « Accéléro_plaque_devant » lorsque l'outil usine.

Pour accroître la précision fréquentielle du calcul de l'évolution de la vitesse de rotation avec l'usinage, celle-ci est déterminée à partir d'harmoniques relevés sur les spectres fréquentiels pendant l'usinage (12^{ème} harmonique, noté $f_{\text{usinage harmonique 12}}$) et hors usinage (11^{ème} harmonique, noté $f_{\text{vide harmonique 11}}$). La variation de vitesse de rotation, Δ_{rotation} (en tr.min^{-1}), peut donc être obtenue de la manière suivante (équation 1) :

$$\Delta_{\text{rotation}} = 60 \left(\frac{f_{\text{usinage harmonique 12}}}{12} - \frac{f_{\text{vide harmonique 11}}}{11} \right)$$

Equation 1 : variation de la vitesse de rotation

4.1. Influence de l'engagement

A partir de l'engagement de base choisi, 1 mm, 4 autres valeurs d'engagement ont été testées : 0,3 mm, 0,5 mm, 0,75 mm et 1,25 mm.

Lorsque l'on s'intéresse à l'évolution de la vitesse de rotation, il est intéressant de noter une baisse de celle-ci lorsque l'engagement augmente (Figure 8). Peut-être due à une défaillance d'asservissement de la machine, cette diminution traduit l'augmentation de la puissance de coupe demandée. Cela s'explique simplement par l'augmentation du volume de matière usiné à tout instant lorsque l'engagement croît. Pour notre valeur d'engagement maximal, cette baisse atteint 2,68 % de la valeur à vide.

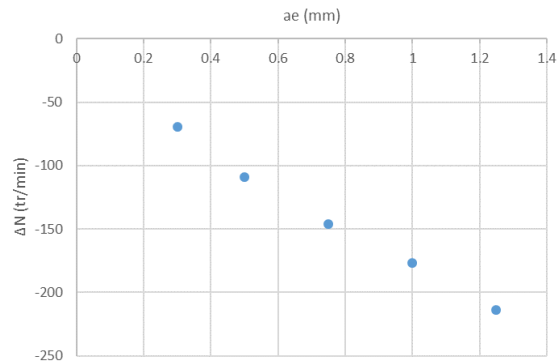


Figure 8 : évolution de la vitesse de rotation réelle en fonction de l'engagement

Si l'on s'intéresse aux vibrations mesurées au niveau de la plaque, il est pertinent de noter l'allure du signal temporel obtenu au niveau de l'accéléromètre situé à la surface de la plaque (cf. Figure 7). Après une phase d'augmentation du niveau vibratoire traduisant l'entrée de la fraise dans la matière et la distance entre la fraise et le point de mesure qui diminue, l'amplitude des oscillations ne fait que décroître jusqu'à la sortie de la plaque. Cette deuxième phase traduit l'éloignement entre la fraise et le point de mesure. De plus, les valeurs RMS obtenues augmentent lorsque l'engagement augmente, traduisant l'augmentation des vibrations liées à l'interaction entre l'outil (et ses dents) et la plaque.

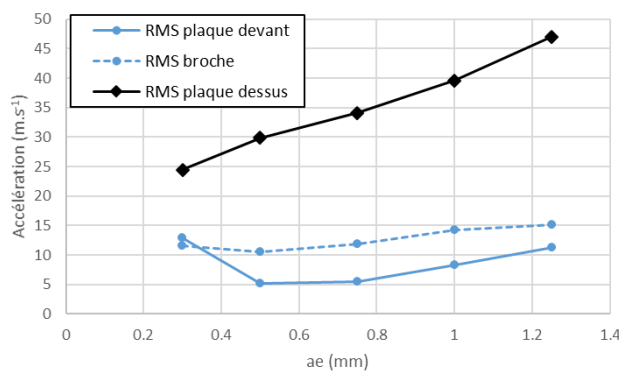


Figure 9 : valeurs RMS pendant l'usinage en fonction de l'engagement

Sur les valeurs RMS obtenues au niveau de l'accéléromètre placé sur la tranche de la plaque, l'évolution semble montrer un minimum vers 0,5 mm d'engagement (Figure 9). En Figure 10 sont représentés les signaux temporels pour 0,3 mm et 1 mm (l'allure pour les autres engagements est tout à fait analogue à celle observée à 1 mm). Pour tous les engagements testés, le début du signal est similaire, avec un signal stationnaire dont le niveau tend à augmenter avec l'engagement. De même, délimitée par les 2 traits en pointillés, la décroissance finale longue de 3 mm correspond au moment où la fraise commence à sortir de la matière jusqu'à ce que son axe soit situé aligné sur le bord de la plaque est visible sur tous les signaux enregistrés. En revanche, une forte augmentation est notée à 0,3 mm d'engagement dans la deuxième partie de l'enregistrement. Ce plus fort niveau vibratoire explique que la valeur RMS déterminée soit plus élevée. Cela semble indiquer qu'un engagement minimal doit être respecté. Il est à noter que l'évolution des valeurs RMS est similaire à celle relevée au niveau de la broche. Contrairement aux mesures réalisées sur la plaque, dans ces 2 situations, les vibrations sont mesurées dans une direction radiale à l'outil, dans le plan de la plaque. Sur la plaque, l'accéléromètre est orienté suivant l'axe de l'outil et les vibrations mesurées le sont dans la direction de son épaisseur. Cela peut expliquer un comportement vibratoire différent.

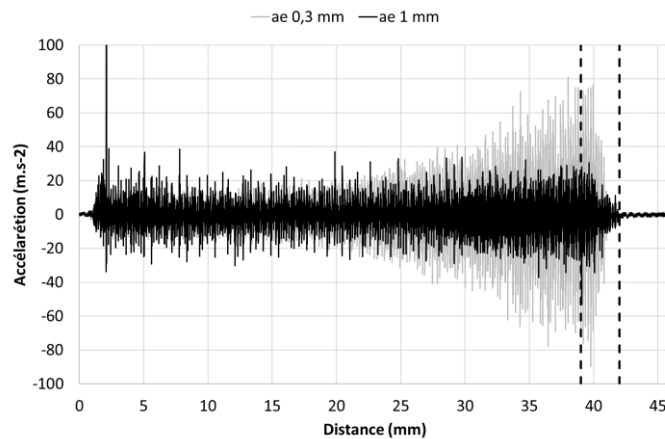


Figure 10 : signaux temporels de l' « Accélero_plaque_devant » pour ae 0,3 mm et 1 mm.

4.2. Influence de l'avance par dent

De la même manière que pour l'engagement, 4 autres conditions d'avance sont testées, de part et d'autre de notre valeur de référence ($0,048 \text{ mm.dent}^{-1}$), par des hausses ou baisse de 5 % et 10 %. Les valeurs utilisées sont donc : $0,043$, $0,0455$, $0,0505$ et $0,053 \text{ mm.dent}^{-1}$. Dans tous les cas, les signaux temporels enregistrés traduisent la variation de durée d'usinage liée à ces variations d'avance.

L'étude de la vitesse de rotation (Figure 11) de la broche montre que celle-ci est impactée par l'augmentation de l'avance par dent. De manière analogue à l'engagement, la puissance de coupe nécessaire croît avec l'avance, le volume matière usiné à tout instant étant augmenté. La baisse mesurée atteint 2,80% pour l'avance de $0,053 \text{ mm/dent}$.

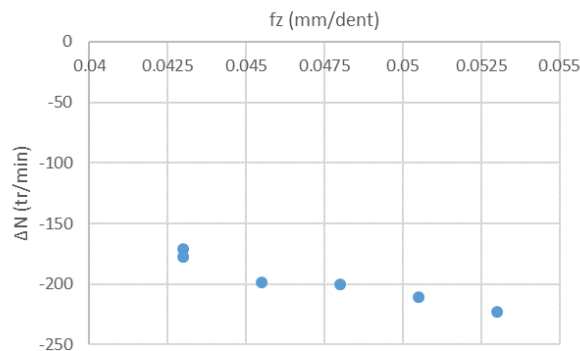


Figure 11 : évolution de la vitesse de rotation réelle en fonction de l'avance

En revanche l'analyse des signaux relevés au niveau de la plaque s'avère plus délicate. En effet, dans les conditions choisies (conditions d'usinage, placement des accéléromètres), les niveaux vibratoires observés saturent régulièrement les accéléromètres utilisés. Néanmoins, les valeurs RMS à vide, relevées au niveau de la broche, restent constantes montrant que la sollicitation de base liée à la vitesse de coupe reste similaire. Ces saturations de capteurs, présentes en augmentant comme en diminuant l'avance, tendent à montrer que la solution proposée par le constructeur d'outil est favorable d'un point de vue vibratoire.

4.3. Influence de la vitesse de coupe

Le dernier paramètre de coupe testé est la vitesse de coupe. Des valeurs augmentées et diminuées de 10 % et 20 % par rapport à la vitesse de coupe de référence sont étudiées. Les 5 valeurs testées sont 120, 135, 150, 165 et 180 m.min⁻¹.

Il est intéressant de noter que cette augmentation ne se traduit pas par une évolution significative de la valeur réelle de rotation de la broche (Figure 12). A tout instant les effets dynamiques diffèrent (la vitesse d'impact entre les dents et la plaque usinée est liée à cette vitesse de rotation) mais le volume de matière usiné par dent reste le même puisque l'engagement et l'avance par dent restent par ailleurs constants. Les effets dynamiques n'ont donc que peu d'influence sur la puissance de coupe nécessaire. La baisse observée est de l'ordre de 200 tr.min⁻¹, soit 2,5 % de la valeur à vide.

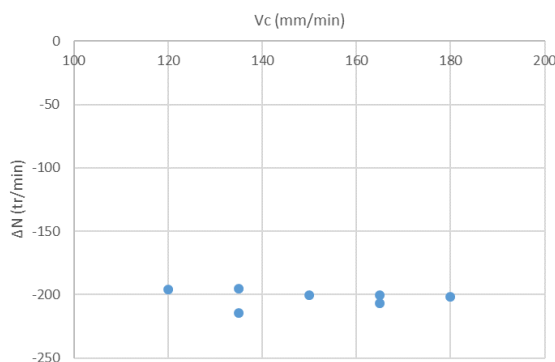


Figure 12 : évolution de la vitesse de rotation réelle en fonction de la vitesse de coupe

Les limites actuelles au niveau des mesures réalisées au niveau de la plaque ne nous ont pas permis de conclure sur les vibrations de la plaque à proprement parler. De plus, l'analyse des valeurs RMS mesurées à vide au niveau de la broche est plus difficile à exploiter car celles-ci changent d'une vitesse de rotation à l'autre.

5. Conclusion

Lors de cette étude, nous avons donc pu mettre en place une manipulation expérimentale visant à mesurer les vibrations présentes lorsque de l'usinage de matériaux composites. Tout d'abord, nous avons vérifié la reproductibilité des mesures. Cela nous a permis de valider d'un côté la mise en place des plaques composites testées mais aussi celle des accéléromètres utilisés.

Les premières analyses menées en faisant varier V_c , f_z et a_e ont permis de mettre en évidence que lors de l'usinage, la vitesse de rotation réelle est liée à l'engagement et à l'avance de l'outil. Elles nous ont également permis de visualiser l'effet de l'engagement sur les vibrations au niveau du composite usiné.

Pour aller plus loin dans l'étude, il faudrait cependant améliorer la position des accéléromètres sur la plaque, qui saturent dans un certain nombre de situations. Cependant, ce phénomène se produit moins lorsque nous sommes dans les conditions préconisées par le constructeur, semblant montrer que ses recommandations visent à réaliser l'usinage dans une situation vibratoire optimale.

Une fois ces verrous levés, l'objectif reste de lier ces mesures vibratoires aux états de surface obtenus, voire à l'usure de l'outil mais surtout d'analyser l'influence du renfort fibreux du composite sur le comportement vibratoire afin de pouvoir améliorer son usinage.

Références

- [1] « Composites Market by Application & Geography - Global Forecast 2022 | MarketsandMarkets ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/composite-market-200051282.html?gclid=EAIaIQobChMIzenU893I4QIVihDTCh1AfwSkEAAAYASAAEgI9OfD_BwE. [Consulté le: 11-avr-2019].
- [2] A. Gerasimenko, M. Ritou, V. Godreau, et B. Furet, « Monitoring of trimming operation for lightweight composite structure », *Procedia CIRP*, vol. 72, p. 1299- 1304, 2018.
- [3] « Comparison of surface roughness quality obtained by high speed CNC trimming and high speed robotic trimming for CFRP laminate - ScienceDirect ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584516301466>. [Consulté le: 18-févr-2019].
- [4] M. Altin Karataş et H. Gökkaya, « A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials », *Defence Technology*, vol. 14, n° 4, p. 318- 326, août 2018.
- [5] S. Sivasankaran, P. T. Harisagar, E. Saminathan, S. Siddharth, et P. Sasikumar, « Effect of process parameters in surface roughness during turning of GFRP pipes using PCD insert tool », *Procedia Engineering*, vol. 97, p. 64- 71, janv. 2014.
- [6] W. Hintze, D. Hartmann, et C. Schütte, « Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) – An experimental study », *Composites Science and Technology*, vol. 71, p. 1719- 1726, 24 2011.
- [7] J. P. Davim, P. Reis, et C. C. António, « A study on milling of glass fiber reinforced plastics manufactured by hand-lay up using statistical analysis (ANOVA) », *Composite Structures*, vol. 64, n° 3, p. 493- 500, juin 2004.
- [8] K. Palanikumar, « Application of Taguchi and response surface methodologies for surface roughness in machining glass fiber reinforced plastics by PCD tooling », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 36, n° 1- 2, p. 19- 27, févr. 2008.
- [9] N. Rajesh Mathivanan, B. S. Mahesh, et H. Anup Shetty, « An experimental investigation on the process parameters influencing machining forces during milling of carbon and glass fiber laminates », *Measurement*, vol. 91, p. 39- 45, 2016.
- [10] J. P. Davim et P. Reis, « Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 160, n° 2, p. 160- 167, mars 2005.
- [11] L. ARNAUD, « Vibrations d'usinage - Comment les identifier et les limiter », *Ref: TIP153WEB - « Travail des matériaux - Assemblage »*, 10-janv-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www-techniques-ingenieur-fr.scd-proxy.uha.fr/base-documentaire/42510210-mise-en-forme-des-materiaux-par-usinage/download/bm7030/vibrations-d-usinage.html>. [Consulté le: 11-avr-2019].
- [12] B. A. G. Yuvaraju et B. K. Nanda, « Prediction of vibration amplitude and surface roughness in boring operation by response surface methodology », *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, n° 2, Part 2, p. 6906- 6915, janv. 2018.