



### **Science Arts & Métiers (SAM)**

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>  
Handle ID: [.http://hdl.handle.net/10985/24584](http://hdl.handle.net/10985/24584)

#### **To cite this version :**

Khouloud LTAIF, Mehdi CHERIF, Pierre-Andre REY - Analyse fréquentielle de l'usinage des composites - In: Conférence Manufacturing'21, France, 2022-10-13 - Conférence Manufacturing - 2022

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [scienceouverte@ensam.eu](mailto:scienceouverte@ensam.eu)





## Analyse fréquentielle de l'usinage des composites

**Khouloud ABOU EL TAIF, Mehdi CHERIF, Pierre-André REY**

*Institut de mécanique et d'ingénierie de Bordeaux UMR CNRS 5295*

*Mail : [khouloud.abou-ltaif@etu.chimieparistech.psl.eu](mailto:khouloud.abou-ltaif@etu.chimieparistech.psl.eu)*

*[mehdi.cherif@ensam.eu](mailto:mehdi.cherif@ensam.eu)*

*[Pierre-andre.rey@ensam.eu](mailto:Pierre-andre.rey@ensam.eu)*

**Résumé :** le perçage des assemblages hybrides composite-métal reste un enjeu important dans le domaine aéronautique compte tenu de son impact sur la tenue en service des assemblages structuraux. En service, les alésages réalisés sont fortement sollicités sous chargement cycle en matage. Les contraintes géométriques, dimensionnelles et d'état de surface imposées par les Bureaux d'Etude sont donc très exigeantes et nécessitent un process de fabrication extrêmement bien maîtrisé sur l'ensemble des alésages réalisés. La détection automatique des matériaux lors d'une opération de perçage reste un point clef pour la mise en place des stratégies de smart-drilling intégrant de l'usinage auto-adaptatif. Dans le cadre de cette étude, une analyse dans le domaine temporel et fréquentiel des signaux d'efforts de coupe dans différentes configurations de perçage d'empilage hybride composite-métal est proposée. Dans un premier temps, une analyse via une représentation polaire des signaux d'efforts temporels permet de mettre en évidence l'effet des phénomènes d'usure sur l'évolution des signatures temporelles. Dans un second temps, une analyse fréquentielle des phénomènes vibratoires induits par les différents modes de coupe des fibres selon la stratification utilisée, permet de distinguer de manière plus fiable que dans le domaine temporel, les matériaux composites des matériaux métalliques. La méthode d'analyse fréquentielle proposée est appliquée sur différentes configurations (composite-métal, composite-composite avec différentes stratifications) afin de démontrer sa robustesse.

**Mots clés :** perçage, composite, monitoring.

## 1 Introduction

Le perçage des matériaux composites reste un enjeu important dans le secteur aéronautique compte tenu de la quantité et de la qualité attendue des différents perçages qui varient dans des plages importantes de diamètre (typiquement de  $\text{Ø}3$  à  $\text{Ø}25.4$  mm). Les contraintes de qualité sur les alésages réalisés obligent à mettre des exigences extrêmement serrées sur la qualité des outils coupants (tolérance dimensionnelle de  $\pm 5\mu\text{m}$ ). Ces contraintes limitent fortement la durée d'utilisation des outils (classiquement une durée de vie inférieure à 50 perçages pour des configurations CFPR/TA6V). Ces précautions ont des répercussions importantes les coûts de production. Dans le contexte de réduction des coûts via une optimisation de l'utilisation des outils coupants, il est nécessaire de mettre en place des stratégies de smart-drilling via l'intégration de fonctions de monitoring sur les moyens de production. Le développement de méthodologies fiables pour la détection des matériaux afin d'optimiser les conditions de coupe pour chacun d'eux est donc indispensable. En effet, dans le cadre du perçage des empilages hybrides A17175/T800M21/TA6V, les conditions de coupe optimisées ( $V_c$  et  $V_f$ ) pour chacun des matériaux sont très différentes les unes des autres et obligent donc à faire un compromis pour le choix des conditions coupes si les perçages sont réalisés à iso-condition. La nécessité de pouvoir détecter un certain nombre d'aléas (usure, écaillage, bris d'outil, bourrage copeau, défaut d'aspiration ou de lubrification, etc.) est également un enjeu important pour rendre les stratégies de smart-drilling performantes et robustes en environnement de production. Lors de l'usinage des matériaux composites, la nature hétérogène du matériau (fibre et résine) et le type de stratification utilisée (quasi-isotrope ou fortement anisotrope) engendrent des phénomènes de coupe spécifiques largement documentés dans la littérature [Bonnet, 2015], [Xu,2022], [Jallageas, 2013], [Zadafiya, 2021]. En effet selon l'orientation relative des directions des fibres vis-à-vis du vecteur vitesse de coupe au niveau des arêtes de l'outil (Figure 1), les niveaux d'efforts de coupe évoluent de manière significative [Bonnet, 2015]. Les différents modes de coupe entraînent également des dégradations d'état de surface en lien avec la stratification comme illustré sur les Figure 1 et Figure 2. Des observations au MEB permettent de visualiser les différents types de faciès de rupture des plis de composite en fonction des orientations de coupe (Figure 1). Ce phénomène génère également des rugosités variables selon la zone considérée. Ces défauts peuvent avoir un impact important sur la tenue en fatigue dans le cas des sollicitations de matage cycle [Van Des Sypt, 2017], [Gohorianu, 2008], [Chen, 1997] [Landon, 2013]. Les variations importantes d'efforts constatées engendrent également des phénomènes vibratoires qui peuvent être mesurés via différents types de capteurs (platine dynamométrique, accéléromètre, capteur acoustique, etc.) afin d'assurer du monitoring du process de perçage [Jantunen 2002], [Duo, 2021].

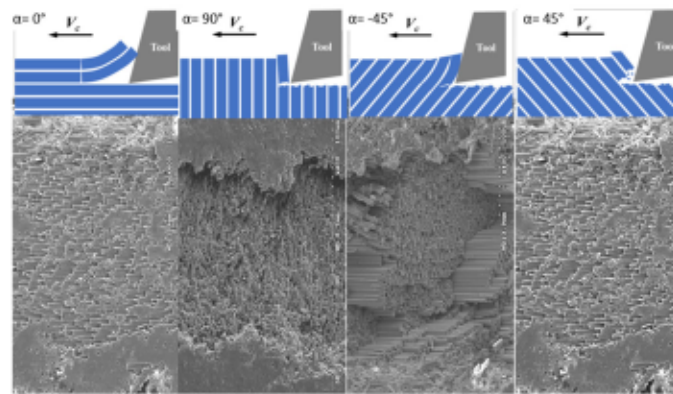


Figure 1: Différents états de surface obtenus en fonction des modes de coupe

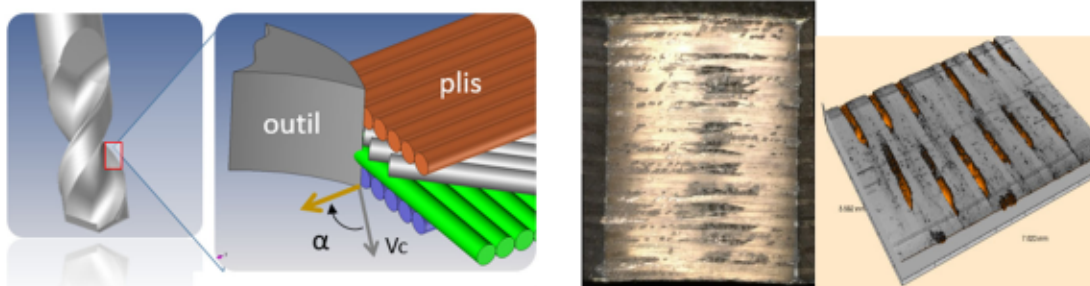


Figure 2: Orientation des fibres vis-à-vis de la vitesse de coupe et état de surface

Dans le cadre de l'étude réalisée, une analyse des efforts de coupe axiaux dans le domaine temporel et fréquentiel est présentée pour différentes configurations. Le perçage de trois matériaux composites avec des stratifications spécifiquement construites pour l'étude permet de mettre en évidence l'évolution du contenu fréquentiel du signal d'effort axial en lien avec les différents modes de coupe. Ces modes génèrent des niveaux de vibrations importants que l'on ne retrouve jamais dans les matériaux métalliques aux caractéristiques mécaniques généralement isotropes. Dans un premier temps, une analyse via une représentation dans le domaine polaire des signaux temporels permet de mettre en évidence certaines spécificités de l'effort axial dans les matériaux composites. Dans un second temps, l'analyse des FFT (Fast Fourier Transform) et des spectrogrammes associés permet de mettre en évidence l'intérêt de l'approche fréquentielle pour la distinction entre les matériaux métalliques et composite.

## 2 Expérimentation

Pour cette étude, Les essais sont réalisés sur un centre à commande numérique 5 axes HURCO VM42UHSI. Les efforts de coupe sont mesurés à l'aide d'un capteur dynamométrique rotatif Kistler à 4 composantes ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_z$ ). Pour l'ensemble des travaux présentés, la fréquence d'échantillonnage utilisée pour l'acquisition est fixée à 20Khz.



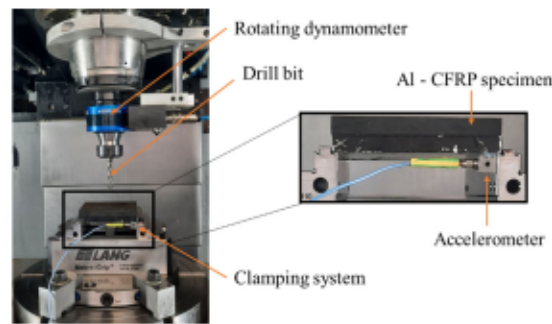


Figure 3: Dispositif expérimental

L'objectif est de mettre en évidence les spécificités des signatures vibratoires selon le matériau usiné en s'appuyant sur des données d'efforts axiaux issues du capteur d'effort rotatif. Dans le cas des composites, l'effet de la stratification sur les niveaux d'efforts est également investigué.

### 3 Etude dans le domaine temporel

#### 3.1 Signature type dans le cadre d'un perçage Al7175/ T800M21

Dans le cadre du perçage d'un empilage T800M21/Al7175 à conditions de coupe constantes, les signaux d'effort axial  $F_z$  obtenus sont généralement de la forme présentée sur la figure 4. L'essai présenté est réalisé avec un outil Kenametal B052A06350 CPG de diamètre  $\varnothing 6.35\text{mm}$  avec un angle de pointe de  $120^\circ$  avec une vitesse de coupe  $V_c = 60\text{ m/min}$  et une avance  $f = 0.04\text{mm/tr}$ . Il est possible d'identifier les différentes phases lors de la pénétration de l'outil: la phase 1 correspondant à la pénétration de la pointe outil avec une montée progressive de l'effort  $F_z$ , la phase 2 à l'usinage en pleine matière dans l'Al7175, la phase 3 à la transition entre les deux matériaux, la phase 4 à l'usinage pleine matière dans le matériau composite et enfin la débouchure 5.

On constate un niveau  $F_z$  moyen sensiblement supérieur dans la partie Al7175 que dans la partie composite. A iso-condition de coupe, ce comportement permet donc à partir du signal temporel de faire la distinction entre les deux matériaux par simple seuillage du niveau d'effort. Ce seuil dépend cependant du diamètre de l'outil, de la vitesse d'avance et du niveau d'usure de l'outil. Sa mise en œuvre dans le cadre d'une stratégie de smart-drilling nécessite donc une phase coûteuse d'étalonnage pour la définition des seuils à considérer.

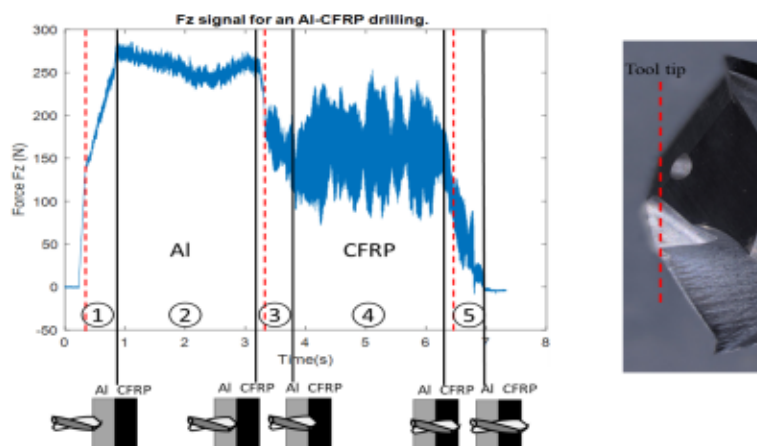


Figure 4: Evolution de l'effort axial  $F_z$  pour un perçage Al7175/ T800M21

Si l'on s'intéresse à la représentation polaire  $R = Fz(\beta_{\text{arête}})$  des efforts de coupe axiaux  $Fz$ , il est également possible d'identifier une différence significative de comportement entre les deux matériaux. Le niveau d'usure peut également être évalué en surveillant les surfaces limitées par les différents profils avec celles pour l'outil à l'état neuf. Sur la Figure 6 on identifie donc deux informations : le type de matériaux et le niveau d'usure de l'outil de coupe. Dans le cadre des matériaux métalliques isotropes, les efforts  $Fz$  étant quasi-constants lorsque l'outil est en pleine matière, la représentation de l'effort  $Fz$  dans le plan polaire  $R = Fz(\beta_{\text{arête}})$  en fonction de l'angle de rotation des arêtes de coupe  $\beta_{\text{arête}}$  donne un cercle. Son rayon, fonction de l'amplitude de  $Fz$ , augmente avec le niveau d'usure de l'outil. Concernant les matériaux composites qui présentent des anisotropies en lien avec la stratification utilisée, les niveaux d'efforts  $Fz$  varient selon l'orientation relative des arêtes de coupe vis-à-vis de l'orientation des fibres. On obtient alors des profils déformés comme présentés sur la

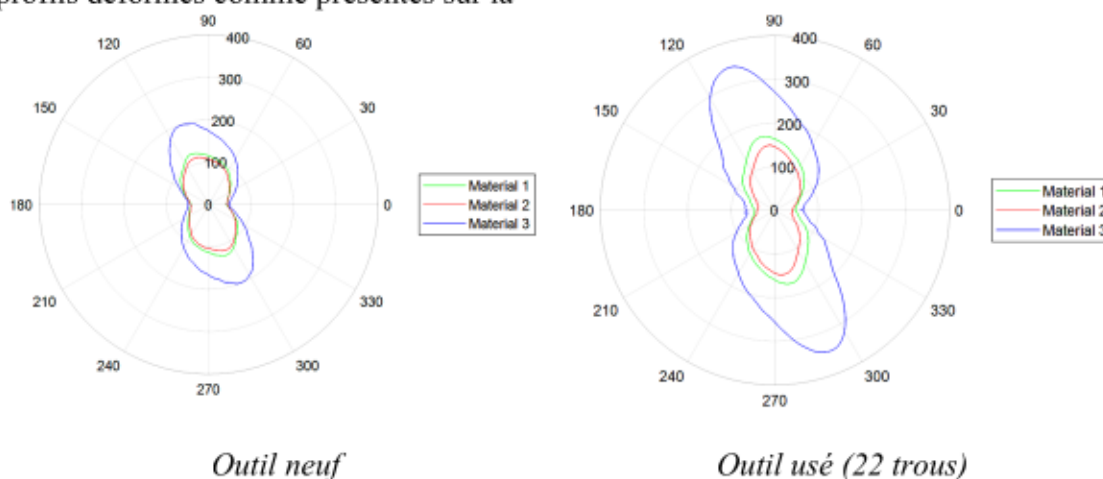


Figure 7. La déformation du profil va dépendre du niveau d'anisotropie du matériau en lien avec sa stratification (Figure 8). La

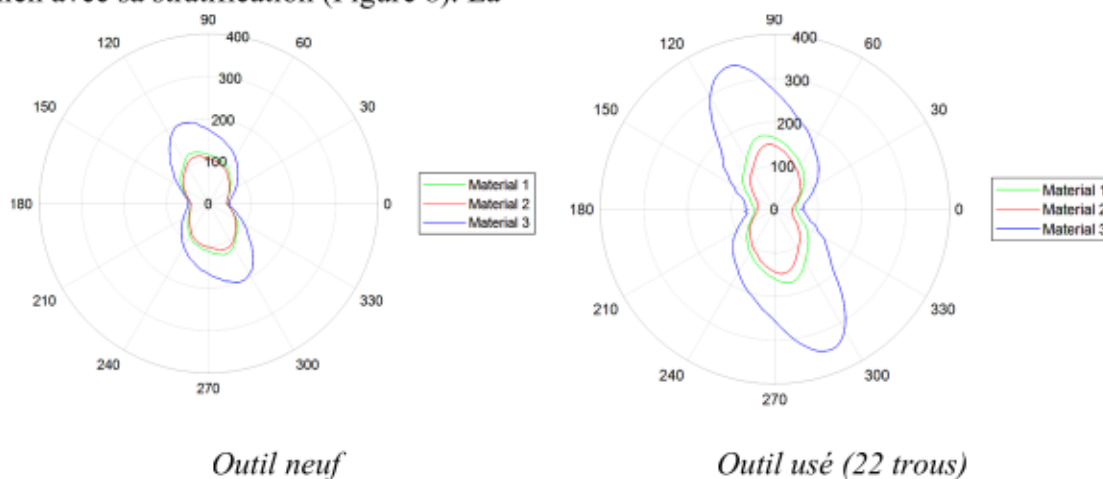


Figure 7b représente les signaux obtenus lors du perçage d'éprouvettes en composites avec différentes stratifications (tableau 1). Pour mener l'étude, des éprouvettes spécifiques composées de trois matériaux composites distincts en terme de composition et de stratification ont été réalisées (Figure 5). Les éprouvettes élémentaires sont collées à l'aide de résine époxy afin d'assurer un assemblage des trois matériaux composites. L'effet de la stratification sur les signatures temporelles et fréquentielles de l'effort axial

est ainsi investigué. Pour chaque configuration testée, 2 perçages ont été réalisés afin d'assurer la répétabilité des mesures sans entraîner une usure significative de l'outil. Les éprouvettes ont été percées jusqu'à leur plan médian selon les deux sens 1 et 2 (Figure 5c) pour tester les différentes configurations. Les essais sont réalisés avec un outil Kenametal B052A06350 CPG de diamètre  $\varnothing 6.35\text{mm}$  avec un angle de pointe de  $120^\circ$  avec  $V_c = 60\text{m/min}$  et  $f = 0.04\text{mm/tr}$ .

Tableau 1 : Matériaux composites testés

Matériaux	composition	Stratification	Epaisseur
Matériaux 1	CFRP T800M21	Bi-directionnel [[0/90] <sub>6</sub> /0/90 <sub>3</sub> /0 <sub>3</sub> /90 <sub>29</sub> /[0,90] <sub>6</sub> ]	6 mm
Matériaux 2	CFRP T800M21	Uni-directionnel	12 mm
Matériaux 3	CFRP T800M21	Uni-directionnel	9 mm

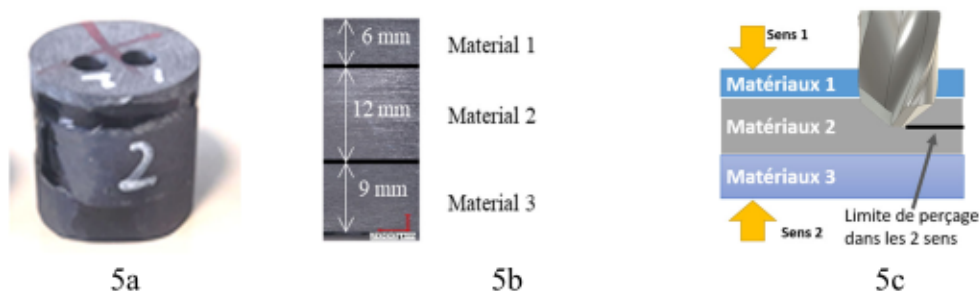


Figure 5: Définition des éprouvettes et des configurations de perçage utilisées

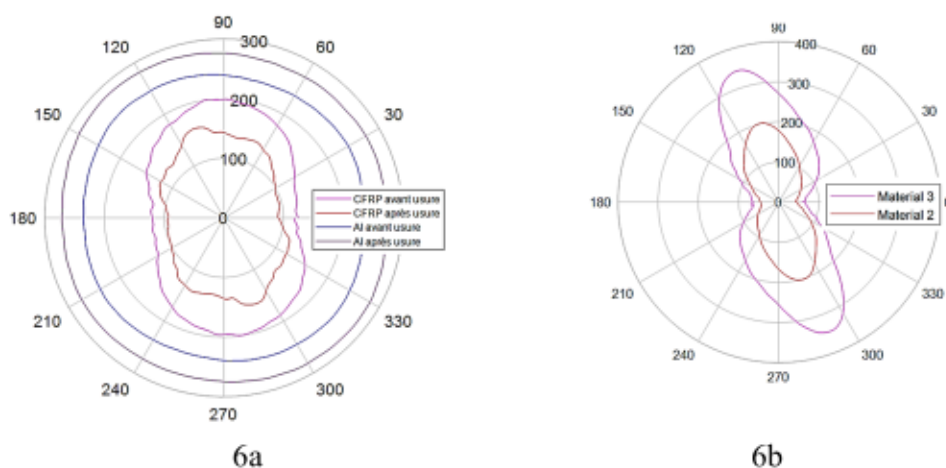


Figure 6: Représentation des efforts axiaux dans le plan polaire  $R = Fz(\beta_{arete})$

Les résultats présentés sur la

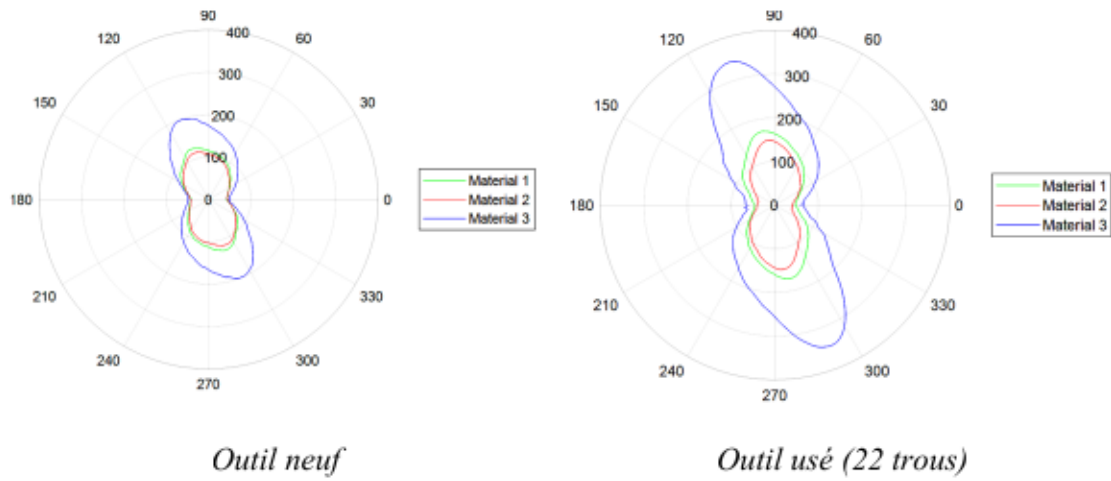


Figure 7 montrent que les niveaux d'efforts peuvent variés sensiblement selon le matériau composite et le procédé d'élaboration. En effet les matériaux 1 et 2 ont été réalisés en étude sous bache à vide alors que le matériau 3 a été obtenu par cuisson sous presse à plateau chauffant qui assure un compactage important et donc un taux de fibre plus élevé entraînant des caractéristiques supérieures au procédé avec bache à vide seule.

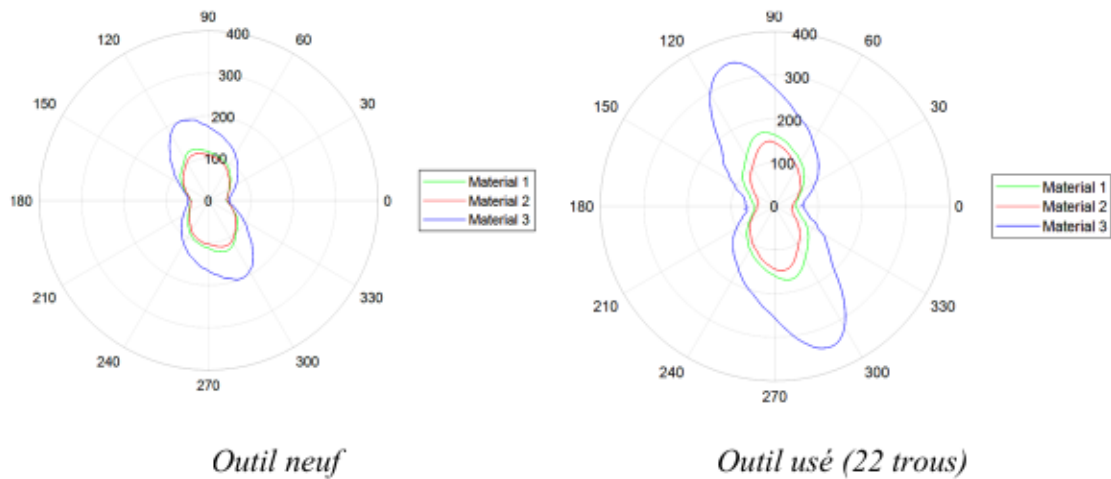


Figure 7: Signature des efforts axiaux pour les 3 matériaux testés

Al7175

CFRP Quasi-isotrope



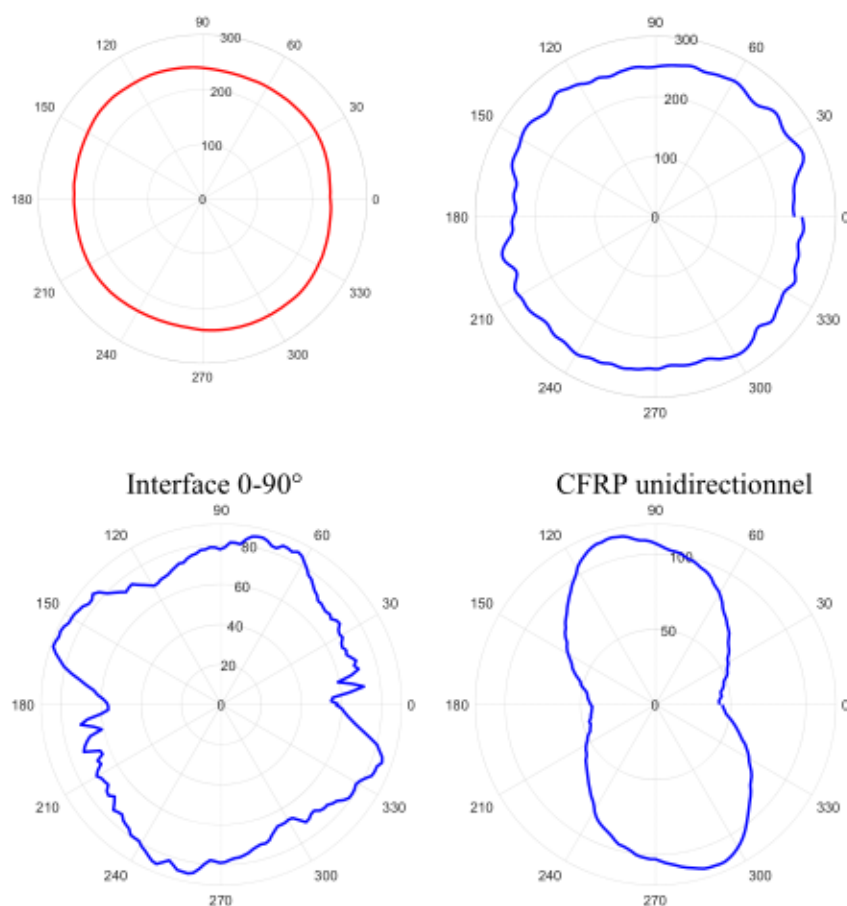


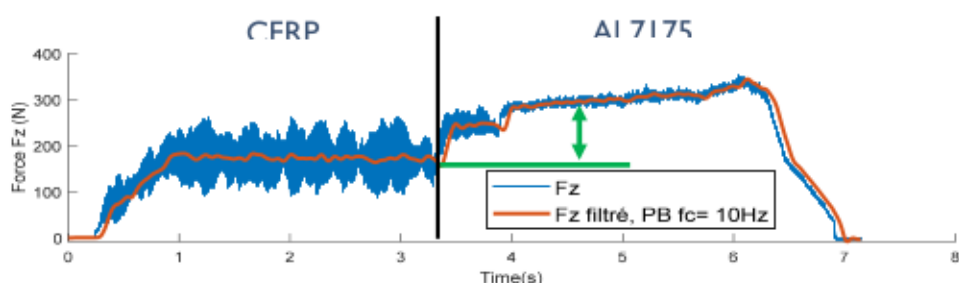
Figure 8 Influence de l'anisotropie sur les profils d'efforts

### 3.1.1 Configurations avec risque de défaut de détection

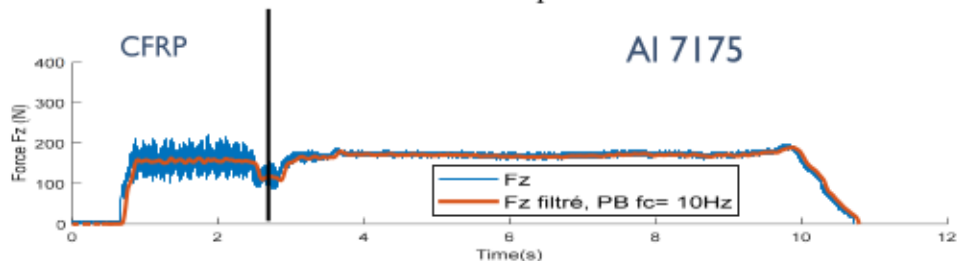
Pour illustrer les limitations du critère de seuil d'effort, des perçages avec un foret KLENK Ø8mm avec des conditions de coupe distinctes pour chacun des différents matériaux (Tableau 1) ont été réalisés. En particulier, la vitesse d'avance dans le matériau Al7175 a été diminuée afin d'atteindre un niveau d'effort axial similaire à celui dans le composite T800M21. La vitesse de coupe est gardée constante pour ne pas changer les fréquences de passage des arêtes de coupe. On constate sur la Figure 9 que les niveaux d'efforts dans les deux matériaux sont très similaires dans le domaine temporel. L'analyse de l'effort axial par seuillage uniquement dans le domaine temporel n'est alors plus suffisante pour faire une distinction fiable des différents matériaux. La dissymétrie de la courbe  $R = Fz(\beta_{\text{arête}})$  correspondant au T800M21 (Figure 10) permet cependant d'envisager une détection du changement de matériaux plus performante via une analyse dans le domaine fréquentiel.

Tableau 1 : Conditions de coupe utilisées

Matériaux	Vc	Vf
CFRP T800M21	120 m/min	500 mm/min
Al7175	120 m/min	100 mm/min



Effort axial à iso-conditions de coupe dans les deux matériaux



Effort axial à conditions de coupe modulées selon le matériau

Figure 9: Effort axial selon les conditions de coupe

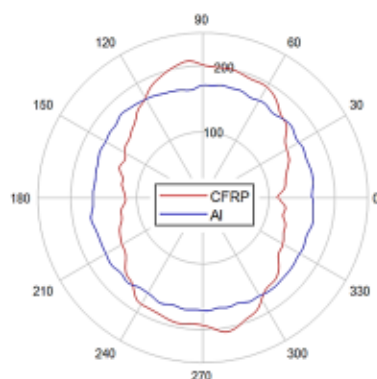


Figure 10: Représentation polaire de l'effort axial pour une avance spécifique à chaque matériau

#### 4 Etude dans le domaine fréquentiel

##### 4.1 Analyse des spectres fréquentiels obtenus par FFT (Fast Fourier Transform)

Les différents modes de coupe dans les matériaux composites génèrent des fluctuations significatives des efforts axiaux lors du perçage. Le contenu fréquentiel du signal  $F_z$  peut être analysé à l'aide d'une analyse par FFT du signal temporel (fenêtre Blackman avec une résolution fréquentielle de 2.44 Hz). En effet, le spectre fréquentiel de l'effort  $F_z$  dans le composite présente des spécificités qui permettent de le distinguer du matériau métallique en terme d'amplitude et d'atténuation des harmoniques. Dans le cadre du Al7175, on observe une raie principale correspondant à la fréquence de passage de dent de l'outil et une atténuation rapide des harmoniques correspondant à un signal périodique (Figure 11). Dans le cadre du matériau composite, l'atténuation des raies fréquentielles est beaucoup moins marquée sur les premières harmoniques dont les niveaux restent élevés.

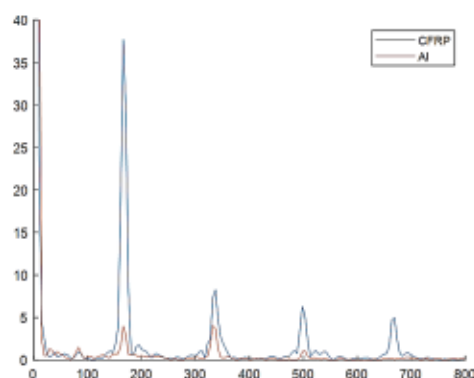


Figure 11: Spectre FFT de l'effort axial

#### 4.2 Analyse des spectrogrammes

La Figure 12 présente les spectrogrammes obtenus pour les différentes configurations (AL7175 seul, T800M21 seul, empilage T800M21/Al7175). Le spectrogramme pour l'AL7175 seul (Figure 12a) met en évidence une atténuation rapide des harmoniques. Le spectrogramme Figure 12b illustre le niveau de vibration élevé et sa faible atténuation au niveau des différents harmoniques dans le matériau composite. Lors du perçage des deux matériaux T800M21/Al7175, on constate sur le spectrogramme de la Figure 12c) un phénomène d'amortissement des vibrations autour de la fondamentale lors de l'usinage de la partie AL7175. Ce phénomène peut être lié à l'effet du guidage de la partie supérieure de l'outil dans la partie composite qui atténue les amplitudes correspondant aux faibles fréquences proches de la fréquence fondamentale. D'autre part, on retrouve le phénomène de maintien du niveau des harmoniques constatés sur la Figure 12c. Cela pourrait être lié au frottement sur les listels du foret qui génère une composante verticale impactée par les différentes stratifications présentes dans l'alésage composite. Des essais complémentaires vont être effectués pour valider cette hypothèse en utilisant un composite de faible épaisseur pour limiter les longueurs frottantes sur les listels.

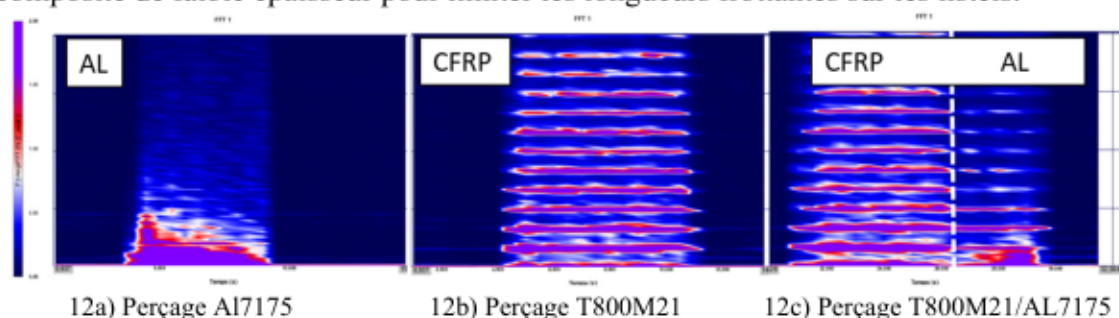


Figure 12: Spectrogrammes de l'effort de coupe axial  $F_z$  selon les différentes configurations

## 5 Conclusion

La mise en place de stratégies de smart-drilling est un enjeu important pour l'optimisation des opérations de perçage dans les assemblages hybrides composite/métallique. Les stratégies envisagées doivent permettre la détection fiable des matériaux usinés pour permettre l'adaptation des conditions de coupe en temps réel afin d'optimiser le processus de coupe dans chaque matériau et d'augmenter la durée de vie des outils coupants. Ces stratégies devront prendre en compte la nécessité de limiter au maximum les besoins d'apprentissage compte tenu du coût élevé du matériau et des outils coupants utilisés.

Dans le cadre de cette étude, une analyse dans les domaines temporels et fréquentiels des efforts de coupe axiaux est investiguée. Dans le domaine fréquentiel, l'étude des spectrogrammes des signaux d'efforts de coupe met en évidence les effets de mode de coupe des composites en fonction de l'orientation des arêtes de coupe vis-à-vis de l'axe d'alignement de la stratification des plis unidirectionnels. Cette approche permet de distinguer la nature du matériau usiné indépendamment des évolutions des niveaux d'efforts liés au phénomène d'usure ou à des modifications des niveaux de vitesse d'avance.

### Remerciements

Le comité d'organisation remercie l'ensemble des personnes portant de l'intérêt à la Conférence Manufacturing'21.

### Références

- C. Bonnet, G. Poulachon, J. Rech, Y. Girard, and J.P. Costes, "CFRP drilling: Fundamental study of local feed force and consequences on hole exit damage" *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 94, pp. 57–64, Jul. 2015.
- W.C. Chen, "Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 37, no. 8, pp. 1097–1108, Aug. 1997.
- P. Duo, T. Segreto, A. Caggiano, R. Basagoiti, R.Teti, and P.J. Arrazola, "Drilling process monitoring: a framework for data gathering and feature extraction techniques," *Procedia CIRP*, Vol. 99, pp. 189–195, 2021.
- N. Geier, J.P. Davim, and T. Szalay, "Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review," *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, Vol. 125, pp. 105–132, Oct. 2019.
- G. Gohorianu, "interaction entre les défauts d'usinage et la tenue en matage d'assemblages boulonnés en carbone/époxy", thèse de doctorat, Université de Toulouse III, 2008.
- J. Jallageas, "Optimisation du perçage de multi-matériaux sur unité de perçage automatique (UPA) ". Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2013.
- E. Jantunen, "A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 42, no. 9, pp. 997–1010, Jul. 2002.
- Y. Landon, M. Chérif, "Characterization of the surface quality of holes in CFRP laminate", *Adv. Mater. Res.*, vol 698, pp. 107-116, 2013.
- P. Van Der Sypt, M. Chérif, C. Bois, "Analysis of the fatigue behaviour of laminated composite holes subjected to pin-bearing loads", *International journal of Fatigue*, vol.103, pp.86-98, 2017.
- Y. Xu, "A critical review addressing drilling-induced damage of CFRP composites," *Compos. Struct.*, Vol. 294, pp. 115-124, Aug. 2022.
- K. Zadafiya, D. Bandhu, S. Kumari, S.Chatterjee, K. Abhisheka, "Recent trends in drilling of carbon fiber reinforced polymers (CFRPs): A state-of-the-art review" *Journal of Manufacturing Processes* Vol. 69, pp. 47-68, September 2021.