

Modélisation de la coupe orthogonale d'un composite hybride CFRP/Ti et analyse de l'interaction inter-matériaux à l'interface

L. BOUTRIH^a, L. Ben Ayed^b, M. Nouari^c

a. Laboratoire d'Étude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux (Site GIP-InSIC) (LEM3) Université de Lorraine, CNRS UMR7239, lhoucine.boutrih@univ-lorraine.fr

Résumé :

Les composites hybrides sont des matériaux issus d'un assemblage entre les composites standards et alliages métalliques, comme les CFRP et les alliages d'aluminium ou de titane. Ces matériaux sont adaptés pour de nombreuses applications grâce à leurs propriétés mécaniques élevées. Cependant, l'usinage des composites hybrides reste une tâche difficile en raison de leur mauvaise usinabilité liée aux problèmes d'usure de l'outil engendrée par le changement de la nature de matériau usiné, notamment à l'interface. Il est donc nécessaire de proposer un outil numérique capable de reproduire les phénomènes physiques, qui peuvent intervenir dans les différentes phases d'un composite hybride à savoir, la phase composite, la phase métallique et les interfaces (CFRP/CFRP ou CFRP/Ti).

Dans ce travail, trois modèles ont été couplés pour reproduire les phénomènes intervenant lors de l'opération de la coupe orthogonale des composites hybrides. Premièrement, un modèle basé sur une approche méso-mécanique a été considérée avec une loi élastoplastique couplé à l'endommagement est implémenté via la Subroutine (VUMAT) [1]. Deuxièmement, Le Titane a été modélisé avec un comportement thermo-élastoplastique, un critère d'endommagement de Johnson & Cook [2] est ensuite utilisé pour reproduire la rupture de la phase métallique. Finalement, l'interface CFRP/Ti est considérée comme un troisième constituant est modélisée avec les éléments cohésifs dont l'endommagement est contrôlé par des critères de traction-séparation.

Le modèle de coupe complet est développé afin d'analyser l'effet des paramètres de coupe sur les efforts d'usinage (force de coupe et force d'avance), et l'endommagement induit lors du procédé de la coupe orthogonale. En termes de résultats, la tendance des efforts d'usinage, les mécanismes de formation des copeaux dans les deux phases et l'endommagement induit dans l'interface, montrent une bonne concordance avec les observations expérimentales.

Mots clefs : Composites hybrides, Coupe orthogonale, méthode des éléments finis, éléments cohésifs, endommagement.

1 Introduction

Les composites hybrides et plus précisément les CFRP/Ti, sont largement utilisés dans l'industrie aéronautique. Cette extension de l'utilisation de structures hybrides, demande une bonne maîtrise du comportement mécanique lors des processus d'usinage de ces matériaux.

Ces processus sont de plus en plus demandés pour les opérations d'assemblage, où il est nécessaire d'effectuer des opérations de perçage dans les plaques hybrides. C'est pourquoi une bonne connaissance du comportement thermomécanique est imposée. D'autant plus que ces opérations d'enlèvement de matière provoquent plusieurs types de défauts, comme la décohésion à l'interface CFRP/Ti, le délaminage, l'arrachement de fibres et la fissuration de la matrice.

L'usinage des matériaux composites hybrides a suscité ces dernières années l'attention de nombreux auteurs. Plusieurs travaux expérimentaux ont été entrepris couvrant une variété de sujets, comprenant l'étude d'usure de l'outil [3], [4], [5], son influence sur l'état de surface et les efforts lors de l'usinage de composite hybride CFRP/Ti. D'autres travaux traitant les mêmes problématiques ont été réalisés dans le cadre de l'étude du composite CFRP/Al [6], [7] et [8].

Jinyang Xu et al. [9] ont présenté une étude expérimentale composée de trois parties : (i) l'opération de la coupe orthogonale (ii) la coupe combinée (iii) une opération de perçage d'un composite hybride CFRP/Ti. Les travaux menés par Xu et al. ont pour objectifs dans la configuration (i) et (ii) d'analyser les efforts d'usinages (forces de coupe et forces d'avances) en fonction de l'orientation des fibres, de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance (épaisseur de la coupe), étudier l'état de surface usinée et l'endommagement induit par l'outil. Dans cette étude, les auteurs ont constaté que l'orientation des fibres a un impact sur les efforts dans la phase CFRP. En revanche, l'orientation de fibre n'a quasiment pas d'effet sur les efforts générés dans la phase Ti. Cependant dans le cas des grandes vitesses de coupe, les efforts générés dans le CFRP/Ti diminuent. D'autre part, les efforts d'usinages augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur de la coupe dans les deux phases.

D'autres matériaux composites hybrides ont fait l'objet d'une étude expérimentale. K. Giasin et al. [4] ont étudié l'opération de perçage d'un composite hybride GFRP/Alu, autrement nommé GLARE (Glass fibre aluminium reinforced epoxy). L'objectif de cette étude, était d'analyser l'effet de la vitesse d'avance et de coupe sur les efforts d'usinages et la qualité des trous. Les résultats ont montré que, les forces d'avances et le couple augmentent avec l'augmentation de la vitesse de coupe, et diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe. La rugosité de la surface quant à elle, dépend fortement de la vitesse d'avance et la vitesse de coupe.

Malgré ces nombreuses études expérimentales, très peu de travaux de recherches de modélisation numérique de la coupe d'un composite hybride existent dans la littérature. En revanche, il en existe plusieurs qui traitent la modélisation des composites standards (CFRP ou GFRP) ou bien de phase métallique uniquement (Titane ou Aluminium). Cela en théorie est suffisant pour mener des travaux sur la simulation numérique de l'usinage des matériaux composites hybrides.

D.K Shin et al. [10] ont étudié le comportement d'une poutre Al/CFRP à section carré, la poutre et soumise à une flexion 3 points. Ils ont montré l'importance de la séquence d'empilement composite/Aluminium sur la réponse de la poutre. Le délaminage est aussi observé à certaines valeurs de chargement.

K. Giasin et al. [4] ont étudié l'opération de perçage d'une plaque composite hybride GFRP/Al. Les auteurs ont réalisé un modèle EF et leur modèle comprend quatre phases ; La phase de l'outil (foret supposé rigide). La phase d'aluminium a un comportement élastoplastique. Le critère Johnson-Cook et la chute de rigidité ont été utilisés. La phase du CFRP a été modélisée comme étant un matériau homogène équivalent avec un comportement anisotrope. Les critères d'endommagement de Hashin ont été implémentés via une Subroutine sous Abaqus/Explicit afin de prédire l'endommagement des

fibres, et le critère de Puck est utilisé pour prédire l'endommagement de la matrice en traction et compression.

Les auteurs ont pu mettre l'accent sur l'influence de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance sur l'endommagement induit par l'outil. Concernant les efforts d'usinage, les forces d'avance correspondent aux valeurs relevées expérimentalement. Cependant seule le couple généré par des grandes vitesses de coupe colle à l'expérimentale.

L'étude sur les composites hybrides ne peut pas s'effectuer sans souligner le rôle de l'interface inter-matériaux qui représente la source de divers phénomènes induits dans la coupe des multi-matériaux. Cette interface permet non seulement la liaison de constituant de composite hybride, mais aussi de transmettre les champs mécaniques et physique, d'où l'importance de trouver un modèle qui peut nous rapprocher au maximum à caractériser l'influence de l'interface CFRP/Ti.

Afin de construire l'outil numérique qui permet d'atteindre ces objectifs, plusieurs lois de comportement ont été implémenté dans le code commercial Abaqus/Explicit version 6.14.

2 Modèle numérique de la coupe orthogonale de composite hybride CFRP/Ti

2.1 Composite CFRP

La mise en place d'un modèle EF de la coupe orthogonale du composite hybride CFRP/Ti est primordiale afin d'investiguer les différents types d'endommagement induit.

Comme il a été reporté précédemment, le modèle comporte trois grandes phases ; la phase CFRP, la phase Titane et l'interface. La configuration choisie Fig. 1 est celle de la coupe orthogonale en 2D, La coupe orthogonale est la configuration la plus simple à mettre en œuvre. Non seulement elle a l'avantage de réduire le nombre des paramètres intervenant pendant l'usinage, mais aussi elle est le seul procédé de coupe réellement maîtrisé du point de vue de la simulation numérique et expérimentale.

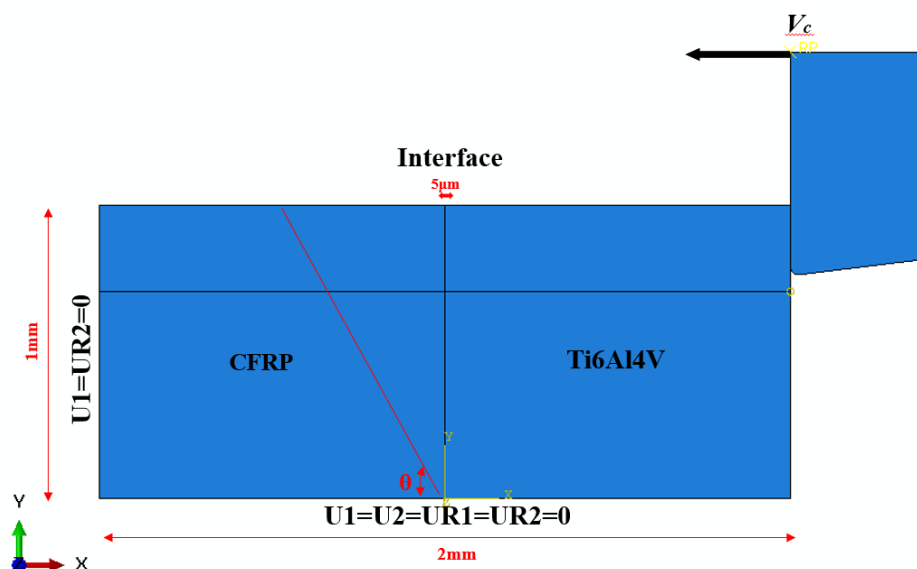


Figure 1: Géométrie et conditions aux limites du modèle de la coupe orthogonale 2D d'une plaque composite hybride CFRP/Ti

Comme montré dans Fig. 1 l'outil est considéré comme rigide. La configuration utilisée est détaillée dans le Tableau. 1 :

Tableau 1 : Conditions de coupe

Angle de coupe	Angle dépouille	Rayon d'arête de l'outil	Profondeur de coupe	Vitesse de coupe
0°	7°	15	2 mm	50 m/min

Les dimensions de la géométrie de la plaque et les conditions aux limites sont choisie afin d'optimiser le temps de calcul et d'avoir suffisamment de distance pour atteindre un régime stable de l'opération de la coupe.

Dans la phase CFRP, nous adoptons une approche méso-mécanique. Le matériau est considéré donc comme homogène équivalent,

Comme mentionné précédemment, dans les travaux de [9] le critère de la rupture utilisé est le critère de Hashin. L'emploi de ce critère donne simplement la valeur limite de l'endommagement et limite l'étude de l'évolution de dommage dans la structure. Pour cela, il est nécessaire de trouver un moyen de suivre l'état du matériau entre l'amorçage de l'endommagement et l'état rompu de la structure.

La théorie appliquée dans cette section a été développé par [11]. Il est l'un des premiers à employer la théorie de la mécanique de l'endommagement aux matériaux anisotrope. Basé sur les travaux de Katchanov 1958 et Rabontoc 1968, l'idée a été de poursuivre la progression de l'endommagement dans un solide en dégradant sa rigidité, cela a été réalisé via l'introduction d'un variable d'endommagement noté d qui prend une valeur entre 0 et 1 formulé comme suit :

$$\tilde{\sigma} = (1 - d)\sigma^0 \quad (\text{Eq.1})$$

Donnons pour cela naissance à la notion des contraintes effectives.

Les mécanismes de dégradation que nous considérerons pour le composite CFRP sont les suivants :

- d_{11}^c représente la rupture des fibres en compression (si $\sigma_{11} < 0$),
- d_{11}^t pour la rupture des fibres en traction (si $\sigma_{11} > 0$)
- d_{22} pour l'endommagement transverse
- d_{12} pour l'endommagement par cisaillement

Il est à noter que d_{22} n'intervient qu'en traction. En effet, la compression de l'interface fibre/matrice entraîne une fermeture des fissures. Hors l'endommagement est un processus irréversible. Ainsi, uniquement l'effet en traction représenté par la variable d_{22} est pris en compte.

Pour chacune des variables d'endommagement définies précédemment, on associe une loi d'évolution gouvernée par une force thermodynamiques définie comme suit :

$$\mathbf{Y} = \frac{\partial e_d(\boldsymbol{\sigma}, d)}{\partial d} \quad (\text{Eq.2})$$

Avec e_d est l'énergie de déformation comme rapporter dans les travaux de [11] pour un pli en 2D s'écrit :

$$e_d = \frac{1}{2} \left[\frac{\langle \sigma_{11} \rangle_+^2}{E_1^0 (1 - d_{11})} + \frac{\langle -\sigma_{11} \rangle_+^2}{E_1^0} - \frac{2\nu_{12}^0}{E_1^0} \sigma_{11} \sigma_{22} + \frac{\langle \sigma_{22} \rangle_+^2}{E_2^0 (1 - d_{22})} + \frac{\langle \sigma_{22} \rangle_-^2}{E_2^0} + \frac{\sigma_{12}^2}{G_{12}^0 (1 - d_{12})} \right] \quad (\text{Eq.3})$$

où le symbole $\langle \bullet \rangle_{\pm}$ désigne que \bullet prend la valeur 1 dans le cas d'un chargement positif ou 0 dans le cas d'un chargement négatif.

2.2 Le Titane Ti6Al4V

Le modèle thermo-viscoplastique de Johnson & Cook (cf. Eq.4) est utilisé dans pour cette phase. Cette dernière prend en considération l'effet de trois phénomènes clés, à savoir l'écrouissage, la viscosité et l'adoucissement thermique.

$$\sigma_y = \left(A + B \varepsilon^n \left(\frac{1}{\exp(\varepsilon^a)} \right) \right) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \times \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right) \quad (\text{Eq.4})$$

où A , B , C , m et n sont les paramètres de la loi, $\dot{\varepsilon}_0$ est la vitesse de la déformation plastique équivalente de référence, T_f et T_0 sont respectivement, la température de fusion et celle de référence. $\bar{\varepsilon}$ et $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ sont respectivement, la déformation viscoplastique équivalente et la vitesse de la déformation viscoplastique de référence.

Une loi d'endommagement de JC (cf. Eq.5) est utilisée afin de tenir compte de la chute de la contrainte après une certaine valeur de déformation plastique.

$$\bar{\varepsilon}_i = \left(D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{P}{\bar{\sigma}} \right) \right) \left(1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \times \left(1 - D_5 \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \right) \quad (\text{Eq.5})$$

Les valeurs correspondantes aux coefficients de comportement sont regroupées dans le Tableau. 2

Tableau. 2 Coefficients et paramètres d'endommagement du modèle thermo-viscoplastique de JC correspondants à l'alliage de titane Ti6Al4V [9]

Coefficient de JC	Valeur
A	1098
B	1092
n	0.93
C	0,014
m	1.1
Coefficient d'endommagement de JC	Valeur
D_1	-0,09
D_2	0,25
D_3	-0,5
D_4	0,014
D_5	3,87

2.3 L'interface CFRP/Ti

L'interface CFRP/Ti est modélisée quant à elle par une zone cohésive, cette dernière repose sur la mécanique de rupture et la capacité de couplé les différents modes de fissuration. Cela va nous permettre de prédire les phénomènes de délaminage inter-matériaux.

Une loi de cohésion bilinéaire à deux paramètres a été utilisée dans l'étude pour décrire le comportement de l'interface sous des chargements en mode I et en mode II. La loi de cohésion relie la traction au déplacement relatif entre les surfaces de cohésion CFRP et Ti. La figure 2 montre une loi

de séparation-traction adoptées en mode I et en mode II / III, elle se compose d'une phase élastique linéaire initiale, suivie d'une phase de ramollissement linéaire qui simule la décohésion de l'interface après le début de l'endommagement. La surface sous chaque courbe traction-séparation est égale à l'énergie critique correspondant. La fracture complète de l'interface se produit lorsque les tractions cohésives disparaissent à la fin de la phase de décohésion.

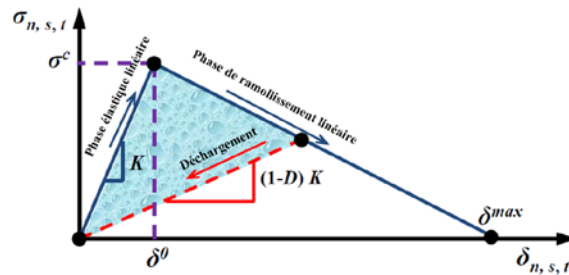


Figure 2: Loi de traction-séparation

Le déchargement survenant après l'apparition des dommages est supposé suivre un chemin linéaire directement vers l'origine. La rigidité normale initiale de l'interface est toutefois conservée, même en présence d'interfaces complètement dégradées, sous des charges compressives afin d'empêcher l'interpénétration des deux phases.

L'initiation de l'endommagement de l'interface est contrôlée par les égalités suivantes [12] :

$$\left(\frac{\sigma_n}{t_n^f}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{t_s^f}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{t_t^f}\right)^2 = 1$$

Où σ_n est la contrainte normale, σ_s et σ_t sont les contraintes de cisaillement dans les deux directions et t^f représente les valeurs critiques de contrainte.

La progression de l'endommagement est contrôlée par l'indicateur d'endommagement scalaire d , qui va de la valeur initiale de 0 pour l'interface non endommagée à la valeur de 1, qui indique la décohésion complète de l'interface et la séparation physique des surfaces de CFRP et de Titane. L'évolution de la variable d est contrôlée par l'énergie dissipée sous forme de travail de séparation au cours du processus de décohésion. La dépendance de l'énergie de fracture sur la mixité de modes est définie par le critère suivant [12] :

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right) + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right) + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIC}}\right) = 1$$

3 Résultats et Conclusion

Dans un premier temps, on a étudié une configuration parmi trois étudiées expérimentalement par [9] de la coupe orthogonale de composite hybride CFRP/Ti. Cette configuration consiste à usiner la phase de Titane suivi par la phase CFRP avec une orientation de fibres $\theta = 45^\circ$. Une taille unique des éléments de $5\mu\text{m}$ a été choisi pour les trois phases,

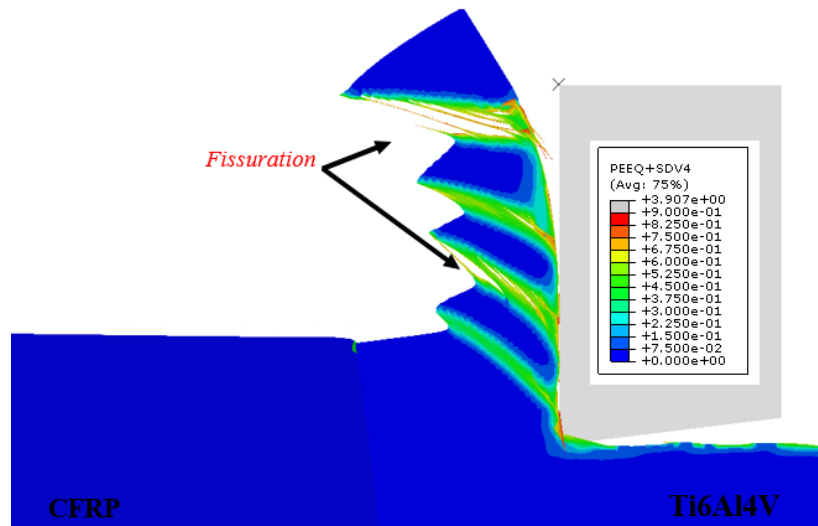


Figure 3: Mécanisme de formation de copeau dans la phase Ti lors de la coupe orthogonale

Les résultats numériques ont mis en évidence les mécanismes de formations de copeau (cf. Figure 3). Dans la phase Ti, la morphologie de copeau continu et segmenté indique que la déformation plastique est le mécanisme dominant dans la formation de copeau dans cette phase. Les résultats montrent que la formation des segments commence par l'apparition d'une bande de cisaillement adiabatique à la pointe l'outil qui se propage vers la surface libre du copeau. Des fissures se forment en partant de la surface libre du copeau, Cela corrèle bien avec les travaux expérimentaux de [13].

Au voisinage de l'interface, l'endommagement ductile dans la phase Ti et fragile dans la phase CFRP engendre des conditions extrêmement difficiles et des charges mécaniques importantes exercées sur l'interface, ces conditions engendrent des déformations sévères de l'interface et de causer l'apparition de délaminage. (cf. Figure 4).

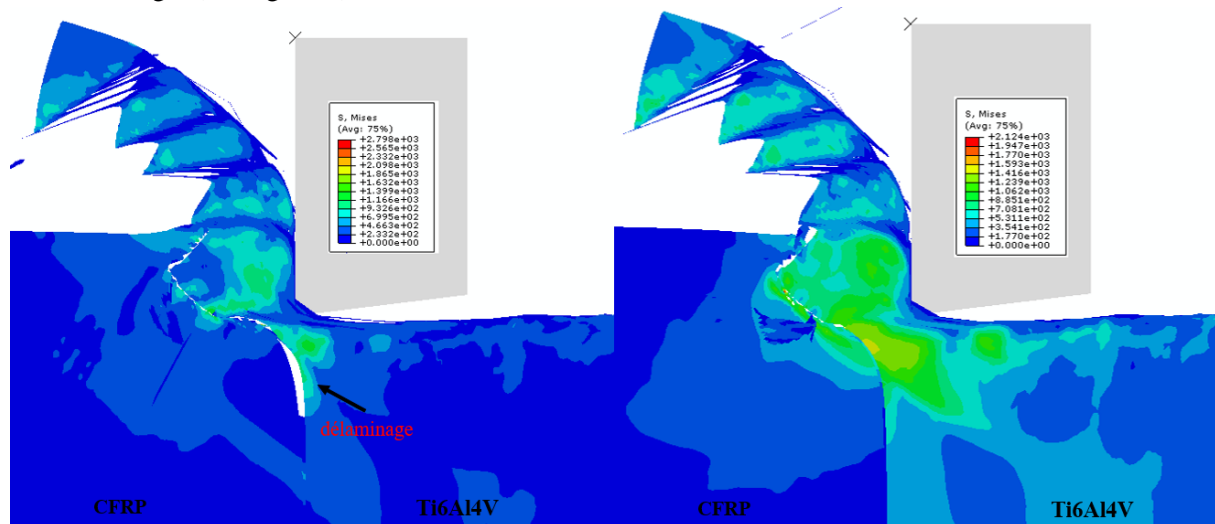


Figure 4: Apparition de délaminage lors du passage de l'outil au voisinage de l'interface CFRP/Ti

On peut aussi remarquer que l'écoulement du copeau formé dans la phase Ti devient beaucoup plus dense et peut donc facilement se plier dans la phase composite, ce qui conduira à l'évolution grave des dommages due aux effets de flexion et d'inclinaison. Lorsque l'outil rigide traverse complètement la région d'interface, le copeau de Ti adhère à la surface de l'outil et remplace le bord de l'outil et enfonce l'interface de composite non coupée et provoque des dommages extrêmement graves.

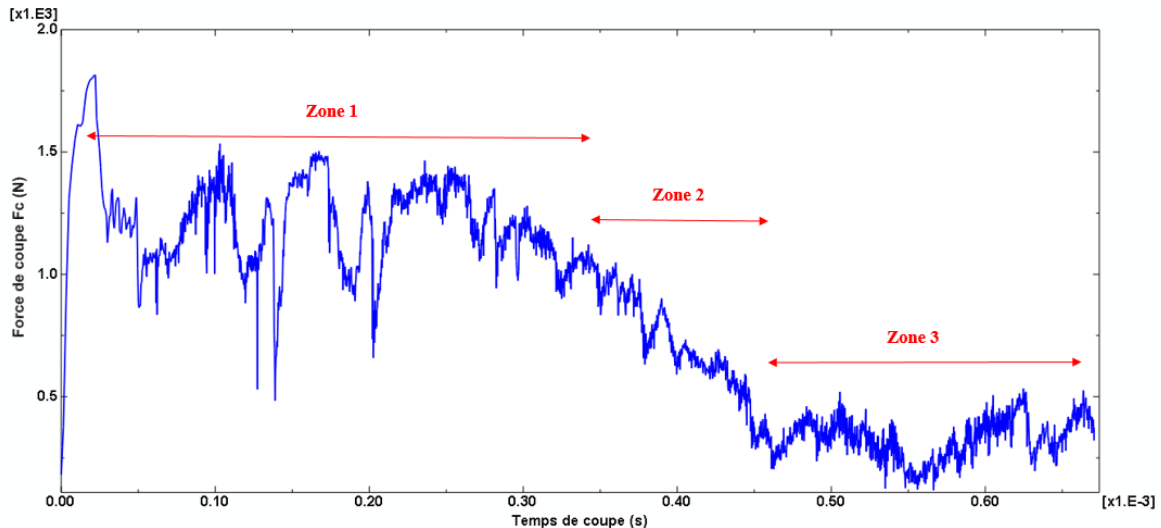


Figure 5: Evolution temporelle de la force de coupe F_c lors de la coupe orthogonale de composite hybride CFRP/Ti

Afin de valider notre modélisation numérique, une comparaison entre les efforts de coupe simulés et ceux mesurés expérimentalement [9] a été effectuée. Les forces de coupe prédites par l'approche numérique ont été enregistrées pendant l'opération de coupe. La figure 5 indique le signal relevé lors de la simulation numérique de l'opération de coupe orthogonale de CFRP/Ti.

Le signal généré lors de la coupe dans la phase Ti est généralement beaucoup plus élevé (Zone 1) que celui généré en phase composite CFRP (Zone 3), cette différence peut être expliquée par aux mécanismes attribués au mode spécifique de formation de copeaux du système. La nature continue et segmentée de copeau dans la phase Ti attribue à l'adhérence forte de copeau à la surface de l'outil, tandis que la nature poudreuse des copeaux dans la phase composite CFRP limite cette adhésion à la surface de l'outil. De plus, on observe une diminution progressive de la force de coupe F_c lorsque le bord de l'outil coupe à travers la zone d'interface (Zone 2).

A travers cette étude, la mise en place du modèle numérique couplant trois lois de comportement différentes pour les phases de composites hybride CFRP/Ti a permis d'étudier la coupe orthogonale 2D suivant la séquence Ti→CFRP. Cela a dévoilé les mécanismes et les phénomènes physiques qui dominent l'usinage de CFRP/Ti.

- L'analyse du phénomène de formation des copeaux a révélé l'existence de deux mécanismes de séparation de copeau : Rupture fragile et déformation plastique,
- Deux natures de copeau ont été identifiées : une nature poudreuse dégagée par le composite CFRP et une nature "continue" générée par le Ti,
- Les principaux endommagements de surface CFRP/Ti apparaissent dans la phase CFRP (arrachement des fibres, pertes de résine et formation de cavités en surface)

Le changement de la nature de coupe entre la phase Ti et CFRP nécessite une caractérisation mécanique lors du passage de l'outil au niveau de l'interface, le but est de réduire le délaminage apparu pendant le coupe.

Références

- [1] Zenia, S., L. Ben Ayed, M. Nouari, et A. Delamézière. 2015. « Numerical prediction of the chip formation process and induced damage during the machining of carbon/epoxy composites ». *International Journal of Mechanical Sciences* 90 (janvier): 89-101.
- [2] G. R. Johnson and W. H. Cook. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains. Strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics* 1985; 21 (1): 31-48
- [3] A. Poutord, F. Rossi, G. Poulachon, R. M'Saoubi and G. Abrivard. Local approach of wear in drilling Ti6Al4V/CFRP for stack modelling. *Procedia CIRP* 2013; 8: 316-321.
- [4] K. H. Park, P. Kwon and D. Kim. Wear characteristic on BAM coated carbide tool in drilling of composite/titanium stack. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 2012;13 (7): 1073-1076.
- [5] E. Brinksmeier and R. Janssen. Drilling of multi-layer composite materials consisting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), titanium and aluminum alloys. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 2002; 51 (1): 87-90.
- [6] Tyczynski P., Lemanczyk J., Ostrowski R.: Drilling of CFRP, GFRP, glare type composites. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 86(4), 312–322 (2014)
- [7] Mohamed G.F., Soutis C., Hodzic A.: Blast resistance and damage modelling of fibre metal laminates to blast loads. *Appl. Compos. Mater.* 19(3–4), 619–636 (2012)
- [8] Khaled Giasin, Sabino Ayyar-Soberanis, Toby French, Vaibhav Padnis, 3D finite Element Modelling of cutting forces in drilling fibre Metal laminates and experimental hole quality analysis, *Appl Compos mater*, 2016
- [9] Jinyang Xu, Mohamed El Mansori. Cutting modeling of hybrid CFRP/Ti composite with induced damage analysis. *Materials* 2016; 9 (1): 1-22
- [10] Shin DK, Kim HC, Lee JJ (2014) Numerical analysis of the damage behavior of an aluminum/CFRP hybrid beam under three-point bending. *Compos B Eng* 56:397–407
- [11] Ladevèze, Pierre. 1983. Sur une théorie de l'endommagement anisotrope. *Laboratoire de Mécanique et Technologie*.
- [12] ABAQUS Documentation for version 6.14-5 Dassault Systèmes Simulia, 2014.
- [13] A. Gente, H.-W. Hoffmeister, C.J. Evans, Chip formation in machining Ti6Al4V at extremely high cutting speeds, *CIRP Ann.-Manuf. Technol.* 50 (2001) 49–52.
- [14] Jinyang Xu, Mohamed El Mansori. Experimental study on drilling mechanisms and strategies of hybrid CFRP/Ti stacks. *Composite Structures* 2016; page 1-22, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.07.025.