



**HAL**  
open science

## Corrélation entre les vibrations et les défauts générés lors de l'usinage d'un matériau composite carbone/époxy T800S/M21

Hicham Chibane, Roger Serra, Antoine Morandea, René Leroy

### ► To cite this version:

Hicham Chibane, Roger Serra, Antoine Morandea, René Leroy. Corrélation entre les vibrations et les défauts générés lors de l'usinage d'un matériau composite carbone/époxy T800S/M21. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03422724

**HAL Id: hal-03422724**

**<https://hal.science/hal-03422724>**

Submitted on 9 Nov 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Corrélation entre les vibrations et les défauts générés lors de l'usinage d'un matériau composite carbone/époxy T800S/M21

H. CHIBANE<sup>a</sup>, R. SERRA<sup>b</sup>, A. MORANDEAU<sup>c</sup>, R. LEROY<sup>c</sup>

a. Université François Rabelais, Laboratoire de Mécanique et Rhéologie, E.A. 2640  
B.P. 3410, 41034 Blois Cedex, France)

b. ENI Val de Loire, Université François Rabelais, Laboratoire de Mécanique et Rhéologie, E.A. 2640, B.P.  
3410, 41034 Blois Cedex, France

c. Université François Rabelais, Polytech'Tours, Laboratoire de Mécanique et Rhéologie, E.A. 2640  
7 Avenue Marcel Dassault, 37200 Tours, France

## Résumé :

L'objectif de cette étude est de caractériser les conditions de coupe au cours de l'usinage d'un matériau composite multicouches permettant d'éviter l'apparition des défauts (délaminage, échauffement de la résine et usure de l'outil de coupe) par analyse vibratoire, un plan d'expériences composite centré de 20 essais a été étudié pour les paramètres de coupe (vitesse de coupe ( $V_c$ ), profondeur de passe ( $a_p$ ) et avance par tour ( $f$ )), les niveaux de vibrations (dans les trois directions à savoir  $x$ ,  $y$  et  $z$ ) ont été mesurés pour chaque essai. Les méthodes de régression linéaire (MRL) et de surface de réponses (RSM) ont permis de déterminer des modèles mathématiques utilisant les données expérimentales. Les résultats montrent une corrélation entre le niveau vibratoire relevé et l'apparition des défauts cités.

## Abstract :

The objective of the current study is to characterize the cutting conditions of a multilayer composite materials in order to avoid the defects (delamination, burned resin and cutting edge chipping) using vibration analysis. In the experimental evaluation, a central composite design with 20 combinations were studied using parameters (cutting speed ( $V_c$ ), depth of cut ( $a_p$ ) and feed per revolution ( $f$ )), and the vibration levels (in the three directions i.e.  $x$ ,  $y$  and  $z$ ) were measured for each case. Methods such as Multiple Linear Regression (MLR) and Response Surface Methodology (RSM) were used to create mathematical models using the experimental data, The results shows a correlation between the vibration level and the appearance of the defects mentioned.

**Mots clefs :** Composite, Usinage, Délaminage, Vibrations, Surface de réponse, Optimisation, Plans d'expériences.

## 1 Introduction

L'utilisation à grande échelle des matériaux composites constitue une priorité dans le domaine aéronautique. Ce matériau bien que robuste et léger est usiné difficilement du fait de la génération au cours de l'usinage des défauts tels que : le délaminage des couches composites, de l'échauffement de la matrice composite ou encore de l'écaillage dans certain cas. Le choix des conditions d'usinage ainsi que des outils, évitant l'apparition de ces défauts, joue un rôle déterminant dans sa tenue mécanique et sa durée de vie [1-4]. Le mécanisme de coupe des composites à renforts fibreux a été largement étudié dans les études de Koplev et al [5], et Ramulu et al [6]. Ces deux auteurs mettent en évidence que l'orientation des plis par rapport à l'arête de coupe a une grande influence sur la génération de défauts dans le composite. L'objectif de cette étude est de caractériser quelles sont les conditions de coupe qui permettent d'éviter les défauts mentionnés à partir de l'analyse vibratoire de l'usinage.

## 2 Méthodologie de Surface de réponse :

Le principe est de modéliser la surface de réponse expérimentale. De nombreuses références sur le sujet existent : [4], [5]. Parmi les nombreux types de plans permettant de construire des surfaces de réponses, nous utiliserons un plan composite centré. Les trois paramètres indépendants  $ap$ ,  $f$ , et  $Vc$  ont été établis en accord avec les recommandations fournies par le constructeur d'outils de coupe SAFETY [7], selon un plan d'expériences composite centré (TAB. 1). Celui-ci permet d'évaluer non seulement les effets linéaires mais aussi d'éventuels effets quadratiques ainsi que les effets d'interaction entre les différentes variables opératoires, le modèle utilisé est :

$$- \text{Modèle quadratique avec interactions : } Y = a_0 + \sum_i a_i X_i + \sum_{ij} b_{ij} X_i X_j + \sum_j c_j X_j^2 \quad (1)$$

$a_0$ ,  $a_i$ ,  $b_{ij}$ ,  $c_j$  sont les coefficients de régression des modèles et  $X_i$ ,  $X_j$  les variables explicatives du modèle.

## 3 Partie expérimentale

Les essais ont été réalisés sur un centre d'usinage grand vitesse PCI Météor 10 au sein du Centre d'Etudes et de Recherches sur les Outils Coupants (CEROC) en collaboration avec le Laboratoire de Mécanique et de Rhéologie (LMR) de l'université de Tours et l'entreprise (SAFETY) fabriquant d'outils coupants à plaquettes. Le matériau utilisé est un matériau composite carbone/époxy T800S/M21. L'opération est le surfaçage en avalant avec une fraise de diamètre 80 équipée d'une seule plaquette à insert PCD (FIG. 1).

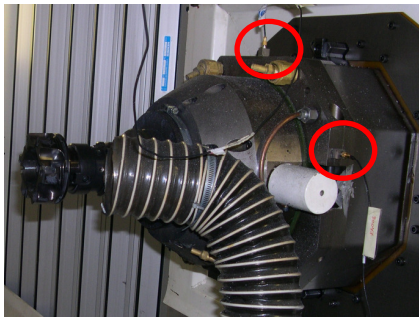


FIG. 1 – Broche PCI Météor 10 instrumentée

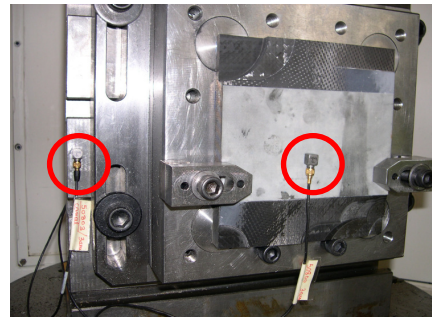


FIG. 2 – Montage d'usinage et positionnement des accéléromètres

Un plan d'expériences composite centré à 20 essais (FIG. 3) a été choisi pour étudier l'influence des 3 paramètres de coupe :

- Vitesse de coupe ( $Vc$ )
- Profondeur de passe ( $ap$ )
- Avance par dent ( $f$ )

Les méthodes de régression linéaire et de surface de réponses ont permis de déterminer les différents modèles mathématiques exprimant la relation entre les paramètres de coupe et les vibrations moyennes enregistrées selon 3 directions ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ).

Le plan d'expérience est constitué de 8 essais correspondant au plan orthogonal, 6 essais pour les points axiaux et 6 essais au point central (0, 0, 0) pour vérifier la répétitivité.

Le domaine de variation des facteurs codifiés est ramené à  $[\delta; -\delta]$ . Ainsi les paramètres variant dans l'intervalle  $[\text{Min}; \text{Max}]$  découpé en 5 niveaux  $-\delta$ ,  $-1$ ,  $0$ ,  $1$ ,  $+\delta$  sont calculés selon TAB. 1, avec :

$$\delta = \sqrt[4]{N} \text{ et } N \text{ est nombre d'essais du Plan Fractionnaire } \delta = \sqrt[4]{8} = 1,68.$$

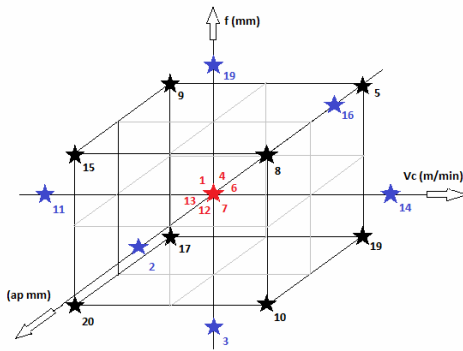


FIG. 3 – Plan composite centré

Niveaux	Variables réelles	Vc (m/mi)	f (mm)	ap (mm)
$-\delta$ (-1,68)	Min	659	0,032	0,66
Valeur min (-1)	$\frac{Min+Max}{2} - \frac{1}{\delta} \left( \frac{Max-Min+Max}{2} \right)$	1000	0,1	1
Valeur moyenne (0)	$\frac{Min+Max}{2}$	1500	0,2	1,5
Valeur max (+1)	$\frac{Min+Max}{2} + \frac{1}{\delta} \left( \frac{Max-Min+Max}{2} \right)$	2000	0,3	2
$+\delta$ (+1,68)	Max	2349	0,368	2,34

TAB. 1– Paramètres de coupe

#### 4 Mesure de vibrations :

La chaîne d'acquisition des vibrations :

- 2 accéléromètres triaxial montés sur le composite à usiner (FIG. 2) et 2 accéléromètres mono-axe montés sur la broche (FIG. 1).
- Un Multi analyseur du type 3560 de Brüel et Kjær.

Les données sont traitées avec le logiciel Pulse Labshop11, c'est un logiciel de traitement du signal offrant plusieurs outils d'analyses.

Essai N°	Vc	f	ap	Ax_max	Ay_max	Az_max	Ax_moy	Ay_moy	Az_moy	Défauts observés
1	1500	0,2	1,5	643,91	787,68	875,93	31,515	31,851	37,246	
2	1500	0,2	2,34	1231,7	1523,9	1955,8	54,379	54,513	63,361	délaminage
3	1500	0,032	1,5	313,38	382,42	516,62	11,33	13,495	14,136	
4	1500	0,2	1,5	819,61	798,02	958,88	33,302	30,259	39,927	
5	2000	0,3	1	763,2	775,9	890,41	27,615	29,019	38,119	
6	1500	0,2	1,5	847,69	943,68	1139,8	28,311	27,858	36,888	
7	1500	0,2	1,5	857,88	776,62	1115,5	37,978	33,249	47,048	
8	2000	0,3	2	1872,8	1223,7	1934,7	63,108	56,478	85,545	Usure+ délaminage
9	1000	0,3	1	957,04	892	1211,9	25,053	23,55	32,247	
10	2000	0,1	2	711,76	600,67	781,44	32,557	30,666	36,435	
11	659,10	0,2	1,5	910,32	795,61	1333,9	25,679	24,96	28,911	
12	1500	0,2	1,5	967,48	654,28	1018,5	30,022	28,245	34,305	
13	1500	0,2	1,5	879,51	703,55	1154,7	38,1	32,449	42,409	
14	2340,89	0,2	1,5	855,4	940,07	1328	40,999	34,995	45,089	
15	1000	0,3	2	1334,3	1120,8	1661,5	59,528	52,105	72,698	Usure+echauffement
16	1500	0,2	0,66	457,27	428,09	550,25	17,823	20,094	21,6	
17	1000	0,1	1	293,75	319,21	393,66	10,249	10,876	11,777	
18	2000	0,1	1	393,16	274,74	364,95	19,478	16,295	19,009	
19	1500	0,368	1,5	1093,5	1890,5	1362,4	54,571	66,838	64,387	délaminage
20	1000	0,1	2	695,1	704,75	744,62	26,138	25,027	23,726	

TAB. 2 – Variables entrées/Sorties

Les accélérations sont plus importantes dans la direction (Z), d'où le choix de Az moyenne (Az\_moy) pour la suite de notre analyse.

## 5 Résultats et discussion

### 5.1 Analyse du modèle empirique

Les coefficients de régression du modèle permettent d'aboutir à l'équation donnant la vibration de la pièce en fonction des trois paramètres étudiés :

$$Az_{\text{moy}} = 10,233 - 24,127 \times ap - 49,904 \times f + 0,011 \times Vc + 4,331 \times ap^2 - 5,532 \times f^2 + 146,255 \times ap \times f + 0,006 \times ap \times Vc - 0,003 \times f \times Vc \quad (2)$$

Ce modèle prend en compte les effets linéaires, interactions et quadratiques.

Les coefficients ont été déterminés en utilisant le test de Fisher et la probabilité P-Value (TAB. 3). La variable est d'autant plus significative que la valeur de F est élevée et la valeur de p est faible ( $p < 0,05$ ). Il est clair que les effets les plus significatifs correspondent aux termes d'interaction ( $ap \times f$ ). Notons aussi que le coefficient de détermination du modèle proposé est de 0,963, indiquant que les mesures de vibration obtenues expliquent de façon satisfaisante le modèle.

Source	Valeur	Ecart-type	F	P-Value
Constante	10,233	21,357	0,479	0,642
<i>ap</i>	-24,127	15,2632	-1,581	0,145
<i>f</i>	-49,904	69,0321	-0,723	0,486
<i>Vc</i>	0,011	0,0153	0,732	0,481
<i>ap</i> × <i>ap</i>	4,331	3,9255	1,103	0,296
<i>f</i> × <i>f</i>	-5,532	98,1372	-0,056	0,956
<i>Vc</i> × <i>Vc</i>	0	0	-0,871	0,404
<i>ap</i> × <i>f</i>	146,255	26,3433	5,552	0
<i>ap</i> × <i>Vc</i>	0,006	0,0053	1,182	0,265
<i>f</i> × <i>Vc</i>	-0,003	0,0263	-0,116	0,91

TAB. 3 – Paramètres du modèle

Source	DDL	SCE	SS	F	Prob > F
Régression	9	6983,77	775,974	55,91	0
Linéaire	3	6505,93	21,289	1,53	0,266
Carré	3	30,46	10,154	0,73	0,556
Interaction	3	447,38	149,126	10,74	0,002
Erreur_résiduelle	10	138,79	13,879		
Total	19	7122,56			

TAB. 4 – Analyse de la variance

L'analyse de la variance est donnée (TAB. 4). La probabilité associée au F est inférieure à 0,002 (Prob>F) pour le modèle avec interaction, cela signifie que cette partie du modèle est la plus influente sur la régression, ce qui est confirmé par le test P-Value (l'interaction  $ap \times f$ ).

### 5.2 Analyse des surfaces de réponses

La relation entre les différentes variables opératoires et la réponse étudiée est illustrée dans les représentations tridimensionnelles des surfaces de réponses:

- FIG. 4, l'effet de la profondeur de passe  $ap$  et l'avance  $f$  sur la réponse, la figure montre que l'avance a une influence plus importante sur les accélérations pour des profondeurs de passe plus importantes, d'où l'importance de l'interaction  $ap \times f$ .
- FIG. 5, l'effet de la profondeur de passe  $ap$  et la vitesse de coupe  $Vc$  sur la réponse. La figure montre que l'influence la profondeur de passe  $ap$  est plus importante que celui de la vitesse de coupe.

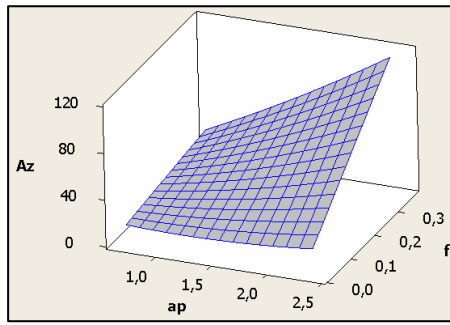


FIG. 4 – Surface de réponse (ap, f)

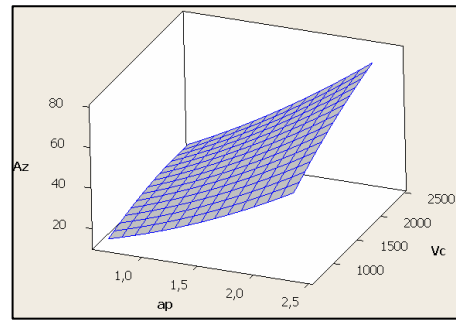


FIG. 5 – Surface de réponse (ap, Vc)

### 5.3 Analyse des défauts d’usinage des composites :

Un des modes de défaillance les plus dangereux dans un composite stratifié est le délaminage (FIG. 6 et 7). La perte de rigidité peut réduire la durée de vie d’une structure composite d’une manière significative. Pour utiliser la pleine capacité des composites, il est nécessaire d’analyser le déclenchement et la croissance du délaminage. D’autres défauts comme l’échauffement de la matrice composite et l’usure brute de l’outil peuvent apparaître au cours de l’usinage des composites, TAB. 1, récapitule l’ensemble des défauts constatés au cours des essais.

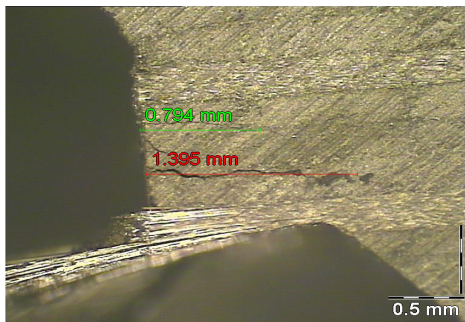


FIG. 6 – Délaminage essai 2

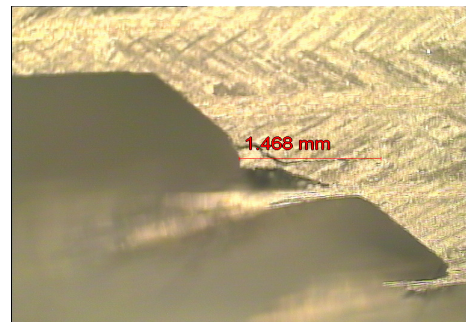


FIG. 7 – Délaminage essai 19

FIG. 8, montre la corrélation entre la vibration  $Az_{moy}$  de la pièces et les défauts constatés, à partir d’un seuil de vibration les défauts étudiés se manifestent, la valeur du seuil de vibration est approximative à  $Az_{moy}$  égale à 50 m/s<sup>2</sup>. La prochaine étape est de rechercher les conditions de coupe qui donnent une vibration  $Az_{moy}$  inférieure à ce seuil.

Pour un meilleur choix de conditions de coupe (conditions qui évitent l’apparition de défauts étudiés), nous avons donc limité la vibration  $Az_{moy}$  à 50 m/s<sup>2</sup>.

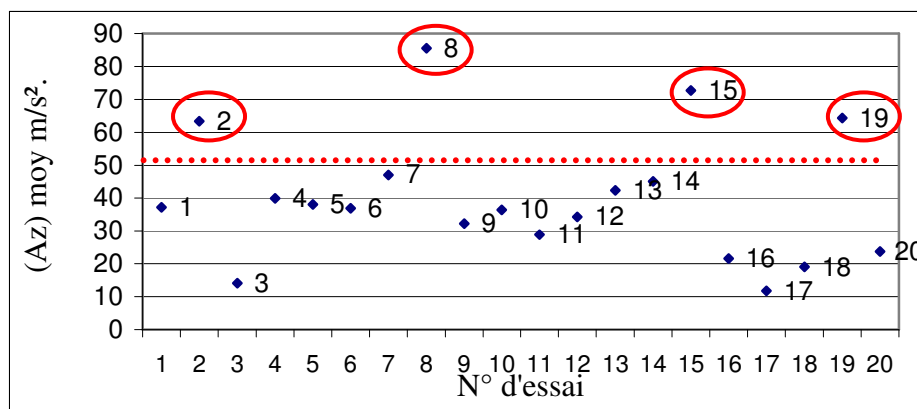


FIG. 8– Seuil de vibration et défauts d’usinage

Les FIG. 9, 10 et 11, permettent de choisir les conditions de coupe qui évitent l’apparition des défauts étudiés.

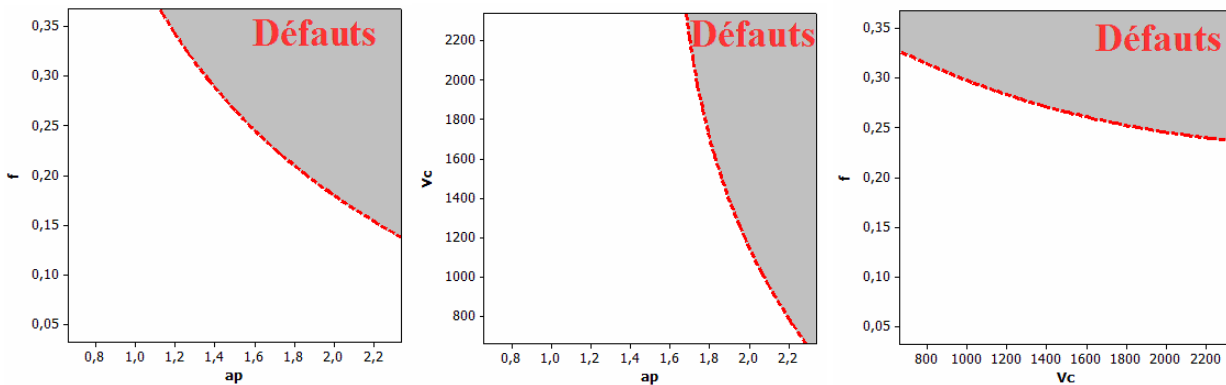


Fig. 09, 10, 11. Choix des paramètres.

- Pour une valeur de maintien  $V_c = 1500$  m/min (FIG. 09) en fonction de la profondeur de passe  $ap$  choisie on obtient la valeur de l'avance  $f$ , par exemple pour une valeur de  $ap = 2$  mm, la valeur de l'avance  $f$  doit être inférieur à 0,17 mm.
- Pour une valeur de maintien  $f = 0,2$  mm (FIG. 10), en fonction de la vitesse de coupe choisie on obtient la valeur de  $ap$ , par exemple pour une vitesse de coupe  $V_c = 1500$  m/min, la profondeur de passe  $ap$  doit être inférieur à 1,8 mm.
- Pour une valeur de maintien  $ap = 1,5$  mm (FIG. 11), en fonction de la vitesse de coupe choisie on obtient la valeur de  $f$ , par exemple pour une vitesse de coupe  $V_c = 1500$  m/min, l'avance  $f$  doit être inférieur à 0,27 mm.

## 6 Conclusion:

L'objectif de ce travail était de montrer la corrélation entre les vibrations et les défauts générés lors de l'usinage d'un matériau composite carbone/époxy T800S/M21. Le modèle déterminé par le plan expérimental est satisfaisant, il permis de choisir les conditions de coupe les mieux adaptées pour éviter les défauts d'usinage de ce matériau. Les résultats ont permis d'établir d'une part, qu'au-delà d'un seuil de vibrations, les défauts de surface et l'augmentation de l'usure de l'outil de coupe apparaissaient (FIG. 8) et d'autre part, que l'interaction ( $f \times ap$ ) est le facteur le plus significatif du modèle pour lequel il est possible de prévenir l'apparition des défauts cités. L'analyse de la variance a permis de qualifier le modèle retenu.

## References:

- [1] Chung chen T., Weng chou C., Prediction of the location of delamination in the drilling of composite laminates, Journal of Materials Processing Technology, 70, 185-198, 1997.
- [2] P Davim J., Reis P., Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments, Journal of Materials Processing Technology, 160, 160-167, 2005.
- [3] M P Durao L., Goncalves D., Tavares R., H de Albuquerque V., A Vieira A., T Marques A., Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates, Composite Structures, 92, 1545-1550, 2010.
- [4] Sheikh-Ahmad J.Y., Machining of polymer composites, ed. Springer 2009.
- [5] Koplev A., Lystrup A., The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP, composites 14, 371-376, 1983.
- [6] Ramulu M., Machining and surface integrity of fiber reinforced plastic composites, Proceedings of the International Conference on Advances in Mechanical Engineering, 87-121, 1995.
- [7] SAFETY, Turning Catalog Valenite Safety, TURN-CAT, 2007.