



**HAL**  
open science

# CHOIX DE CONDITIONS DE COUPE EN USINAGE DES COMPOSITES PAR ANALYSE VIBRATOIRE

Hicham Chibane, Roger Serra, Antoine Morandea, René Leroy

► **To cite this version:**

Hicham Chibane, Roger Serra, Antoine Morandea, René Leroy. CHOIX DE CONDITIONS DE COUPE EN USINAGE DES COMPOSITES PAR ANALYSE VIBRATOIRE. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.135. hal-00598113

**HAL Id: hal-00598113**

**<https://hal.science/hal-00598113v1>**

Submitted on 4 Jun 2011

**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.

# CHOIX DE CONDITIONS DE COUPE EN USINAGE DES COMPOSITES PAR ANALYSE VIBRATOIRE

## *SELECTION OF MACHINING CONDITIONS FOR AERONAUTIC COMPOSITE BY VIBRATORY ANALYSIS*

**Hicham Chibane<sup>1</sup>, Roger Serra<sup>2</sup>, Antoine Morandea<sup>3</sup>, René Leroy<sup>3</sup>**

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

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

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

E-mail : [hicham.chibane@univ-tours.fr](mailto:hicham.chibane@univ-tours.fr), [roger.serra@univ-tours.fr](mailto:roger.serra@univ-tours.fr), [antoine.morandea@safety-cuttingtools.com](mailto:antoine.morandea@safety-cuttingtools.com), [rene.leroy@univ-tours.fr](mailto:rene.leroy@univ-tours.fr)

### 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 défini pour les paramètres de coupe (vitesse de coupe  $V_c$ , profondeur de passe  $ap$  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 forte 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  $ap$  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, Défaut d'usinage, Vibrations, Surface de réponse.

**Keywords:** Composite, machining defects, Vibrations, Response surface.

## 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 le modèle quadratique avec interactions :

$$Y = a_0 + \sum_i a_i X_i + \sum_{ij} b_{ij} X_i X_j + \sum_j c_j X_j^2 \quad (\text{Eq. 1})$$

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

## 3. Partie expérimentale

### 3.1. Moyens d'essais

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 (Fig. 1). L'opération est le surfacage en avalant avec une fraise de diamètre 80 mm équipée d'une seule plaquette à insert PCD (Fig. 2).



Fig. 1. Montage d'usinage et positionnement des accéléromètres

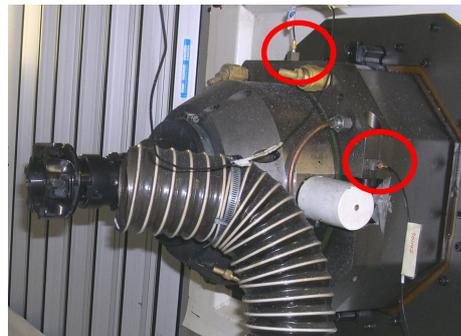


Fig. 2. Broche PCI Météor 10 instrumentée

### 3.2. Plan d'expériences

Un plan d'expériences composite centré à 20 essais (Fig. 3) a été choisi pour étudier l'influence des trois paramètres de coupe retenus (vitesse de coupe, profondeur de passe et avance par dent). 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 enregistrées selon trois directions ( $x, y, z$ ).

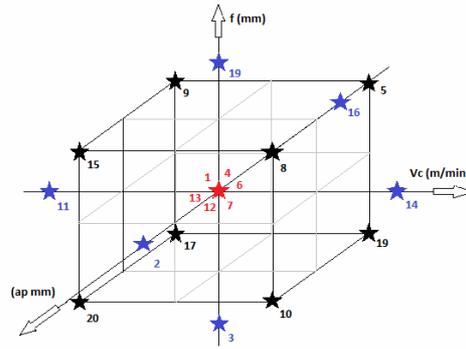


Fig. 3. Plan composite centré

Le plan d’expérience est constitué 20 essais dont 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 l’intervalle [Min ; Max] découpé en 5 niveaux :  $-\delta, -1, 0, 1, +\delta$  qui sont calculés selon les expressions données dans le Tab. 1, où :  $\delta = \sqrt[4]{N}$  et  $N$  est nombre d’essais du Plan Fractionnaire. Ici  $N=8$ , donc :  $\delta = \sqrt[4]{8} = 1.68$ .

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

Tab. 1. Variation des paramètres de coupe et des facteurs codifiés

### 3.3. Mesure des vibrations

La chaîne d’acquisition des vibrations est composée de :

- 2 accéléromètres triaxiaux, l’un est monté sur le matériau composite à usiner et l’autre est monté sur la platine de mesure des efforts de coupe (Fig. 1).
- 2 accéléromètres mono-axe montés sur la broche comme indiqué sur la figure Fig. 2.
- Un Multi-analyseur (3560 de Brüel et Kjøer) relié à un ordinateur pour l’enregistrement des données temporelles à l’aide du logiciel Pulse Labshop.

Par soucis de clarté, seules les vibrations issues de l’accéléromètre triaxial monté sur la pièce sont exploitées du fait de la proximité avec la zone de coupe.

L’accélération  $Arms$  est calculée selon la relation suivante :

$$Arms = \sqrt{Ax_{rms}^2 + Ay_{rms}^2 + Az_{rms}^2} \tag{Eq. 2}$$

### 3.4. Calcul de la productivité :

La productivité est représentée par le débit copeaux  $Q$ , et calculée par la relation suivante :

$$Q = \sqrt{\frac{ap \times f \times Vc \times Ae \times Z}{\pi \times d}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Où  $Ae$  est l'engagement de l'outil de coupe dans la matière ( $Ae = 40$  mm),  $Z$  est le nombre de dents de la fraise ( $Z = 1$ ) et  $d$  est le diamètre de la fraise ( $d = 80$  mm). La colonne  $Q$  de Tab. 2 montre les valeurs du débit copeaux calculées pour chaque essai.

Essai N°	$Vc$	$f$	$ap$	$Q$	$Ax_{rms}$	$Ay_{rms}$	$Az_{rms}$	$Arms$	Défauts observés
1	1500	0,2	1,5	71,65	67,11	72,60	83,72	129,56	
2	1500	0,2	2,34	111,78	121,24	133,07	147,58	232,78	délaminage
3	1500	0,032	1,5	11,46	26,41	34,86	35,21	56,14	
4	1500	0,2	1,5	71,65	76,95	71,78	95,69	142,24	
5	2000	0,3	1	95,54	60,88	65,72	85,83	124,07	
6	1500	0,2	1,5	71,65	67,15	66,00	87,44	128,50	
7	1500	0,2	1,5	71,65	90,43	77,10	110,79	162,47	
8	2000	0,3	2	191,08	150,59	126,45	198,69	279,54	Usure+ délaminage
9	1000	0,3	1	47,77	68,93	60,30	84,83	124,84	
10	2000	0,1	2	63,69	72,01	62,44	76,23	122,05	
11	659,10	0,2	1,5	31,48	72,91	68,11	80,36	128,11	
12	1500	0,2	1,5	71,65	74,28	63,67	82,49	127,97	
13	1500	0,2	1,5	71,65	87,95	71,65	98,85	150,47	
14	2340,89	0,2	1,5	111,82	92,17	75,27	103,80	157,91	
15	1000	0,3	2	95,54	121,72	100,11	145,90	214,77	Usure+échauffement
16	1500	0,2	0,66	31,52	40,26	44,72	50,44	78,51	
17	1000	0,1	1	15,92	25,86	26,46	29,54	47,34	
18	2000	0,1	1	31,84	41,78	33,00	37,88	65,34	
19	1500	0,368	1,5	131,84	122,55	146,92	146,83	241,17	délaminage
20	1000	0,1	2	31,84	66,41	61,47	59,37	108,23	

Tab. 2. Tableau récapitulatif des essais et des grandeurs mesurées et calculées

## 4. Résultats et discussion

### 4.1. Analyse du modèle empirique

Le modèle choisi prend en compte les effets linéaires, d'interactions et quadratiques.

Les coefficients de régression de ce modèle permettent d'exprimer la relation de la vibration de la pièce en fonction des trois paramètres étudiés :

$$Arms = 62,185 - 0,018 \times Vc - 80,999 \times f - 49,112 \times ap + 5,368 \times f^2 + 10,124 \times ap^2 + 46,255 \times ap \times f + 0,080 \times Vc \times f + 0,031 \times Vc \times ap + 319,541 \times f \times ap \quad (\text{Eq. 4})$$

Le coefficient de détermination du modèle vaut 0,962, ce qui signifie que 96,2 % des variations des vibrations sont expliqués par le modèle et que 3,8 % restent par conséquent inexpliqué. Plus ce coefficient est proche de 1, meilleur est le modèle.

Cette valeur du coefficient de détermination indiquant que les mesures de vibrations obtenues sont modélisées de façon très satisfaisante par le modèle obtenu.

Afin de tester la signification du modèle, l'analyse de variance a été réalisée et résumé dans le tableau Tab. 3. Le test du F de Fisher est appliquée montre que la probabilité associée au F est inférieur à 0.001 (Prob>F), cela signifie que l'on prend un risque de 0.1 %, en concluant que la variable explicative apporte une quantité d'information significative au modèle.

La part de la variance de la variable dépendante expliquée par le modèle est ainsi 33,06 fois plus importante que la part de la variance de la variable dépendante qui reste inexpliquée.

D'autre part, il est à noter que pour ce modèle, seule les effets des interactions sont significatives car Prob>F est inférieur à 0,05, soit 5%.

Source	DDL	SCE	SS	F	Prob > F
Régression	9	69792,1	7754,67	33,06	<0,001
Linéaire	3	66988,1	48,59	0,21	0,889
Carré	3	161,6	53,85	0,23	0,874
Intéraction	3	2642,4	880,80	3,76	0,048
Erreur_résiduelle	5	1005,6			
Total	19	72137,6			

Tab. 3. Analyse de la variance

Source	Valeur	Ecart-type	F	P-Value
Constante	62,185	87,813	0,708	0,495
Vc	-0,018	0,063	-0,279	0,786
f	-80,999	283,937	-0,285	0,781
ap	-49,112	62,807	-0,782	0,452
Vc×Vc	-0,000	0,000	-0,480	0,642
f×f	5,368	404,092	0,013	0,990
ap×ap	10,124	16,164	0,626	0,545
Vc×f	0,080	0,108	0,743	0,475
Vc×ap	0,031	0,022	1,417	0,187
f×ap	319,541	108,294	2,951	0,015

Tab. 4. Paramètres du modèles

Le tableau Tab. 4 montre que parmi toutes les combinaisons, seule l'interaction  $f \times ap$  est significative. En effet dans ce cas, la P-Value est égale à 0,015 ce qui est bien inférieur à 0,05. Cela signifie qu'il y a 1,5 chances sur 100 pour que la vraie valeur du coefficient de l'intéraction  $f \times ap$  soit nulle.

#### 4.2. 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:

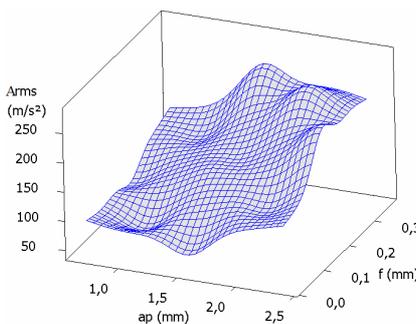


Fig. 4. Surface de réponse (ap, f)

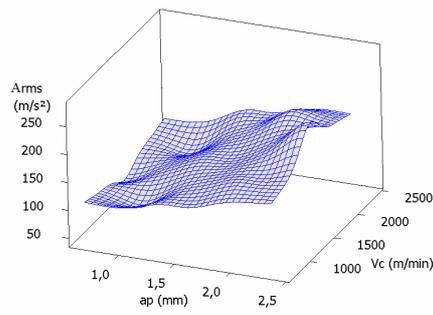


Fig. 5. Surface de réponse (ap, Vc)

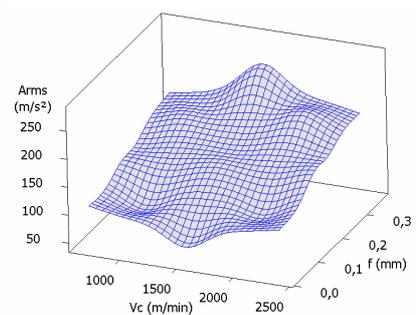


Fig. 6. Surface de réponse (Vc, f)

- La Fig. 4 montre l'effet de l'interaction  $ap \times f$  sur les vibrations *Arms*, plus la profondeur de passe augmente pour une avance donnée, plus les vibrations sont élevées.
- La Fig. 5 montre l'effet de la profondeur de passe  $ap$  et la vitesse de coupe  $V_c$  sur la réponse, l'influence la profondeur de passe  $ap$  est plus importante que celui de la vitesse de coupe.
- La Fig. 6 montre l'effet de la profondeur de l'avance  $f$  et la vitesse de coupe  $V_c$  sur la réponse, l'influence l'avance  $f$  est plus importante que celui de la vitesse de coupe  $V_c$ .

## 5. Analyse des défauts d'usinage des composites

Un des modes de défaillance les plus dangereux dans un composite stratifié est le délaminage (Fig. 7 et 8). 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 l'amorçage et la croissance du délaminage. D'autres défauts comme l'usure brute de l'outil de coupe (Fig. 09) et l'échauffement de la matrice composite (Fig. 10) peuvent apparaître au cours de l'usinage des composites. Tab. 2, récapitule l'ensemble des défauts constatés au cours des essais.

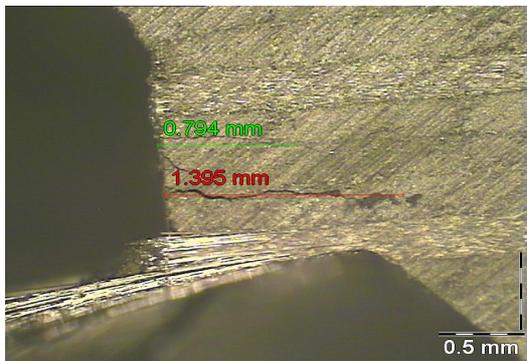


Fig. 7. Délaminage essai 2.

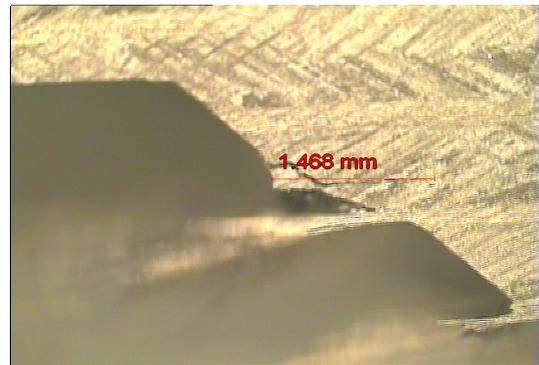


Fig. 8. Délaminage essai 19.

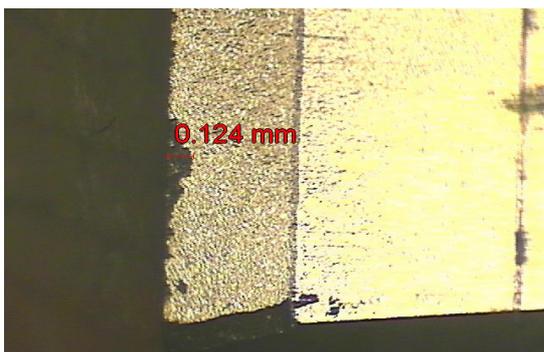


Fig. 9. Usure de l'outil essai 8.

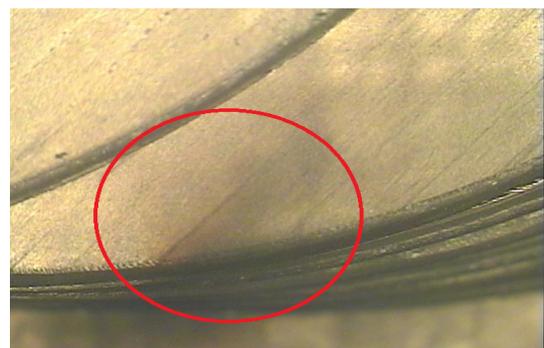


Fig. 10. Echauffement du composite essai 15.

La Fig. 11 montre la corrélation entre la vibration *Arms* de la pièce et les défauts constatés. À partir d'un seuil de vibrations les défauts étudiés se manifestent, la valeur du seuil de vibration approximative est choisie égale à 175 m/s<sup>2</sup>, cette valeur est choisie de telle sorte qu'elle soit la plus proche possible des valeurs de vibrations pour les quelles y a pas de présence de défauts.

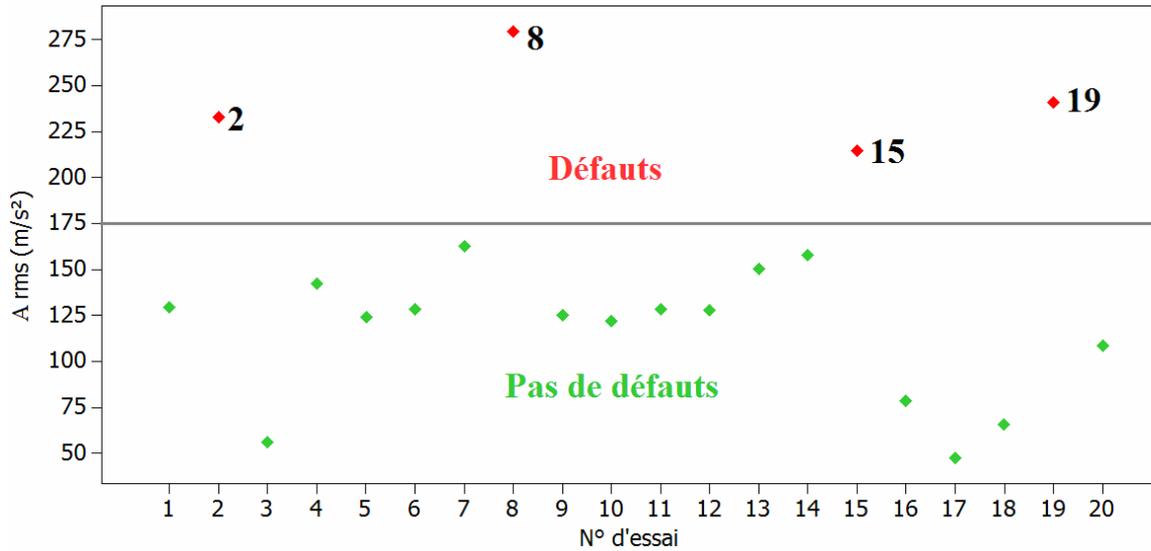


Fig. 11. Seuil de vibration et défauts d'usage.

Les Fig. 12, 13, 14 représente les plages de choix des conditions de coupe pour deux paramètres avec une valeur de maintien pour le troisième paramètre.

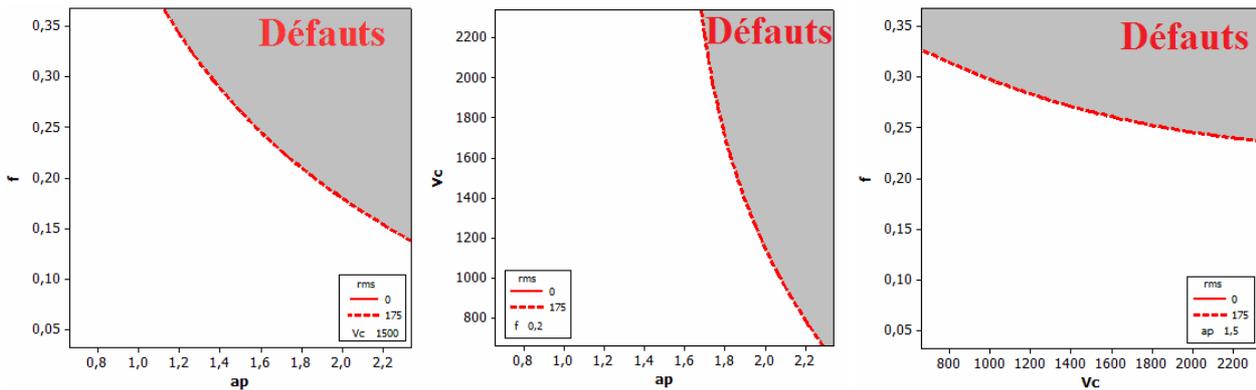


Fig. 12, 13, 14. Choix des paramètres.

- Pour une valeur de maintien  $V_c = 1500$  m/min (Fig. 12) 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. 13), 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. 14), 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. Intégration de la productivité dans le choix de paramètres :

Le but de cette partie est d'intégrer la productivité dans le choix des paramètres de coupe. La productivité est représentée par le débit copeaux  $Q$ .

Les deux objectifs envisagés sont :

- Augmenter le débit copeaux  $Q$ , pour augmenter la productivité.
- Limiter le seuil de vibration  $Arms$  à  $175 \text{ m/s}^2$  pour éviter les défauts étudiés.

Deux configurations ont été représentées :

1. La première configuration permet de choisir les conditions de coupe avec un débit copeaux supérieur à  $50 \text{ cm}^3/\text{min}$ , sur les Fig. 15, 16, 17 le domaine en blanc représente la plage de choix de paramètres qui respect la non apparition de défauts étudiés et une productivité  $Q > 50 \text{ cm}^3/\text{min}$ .

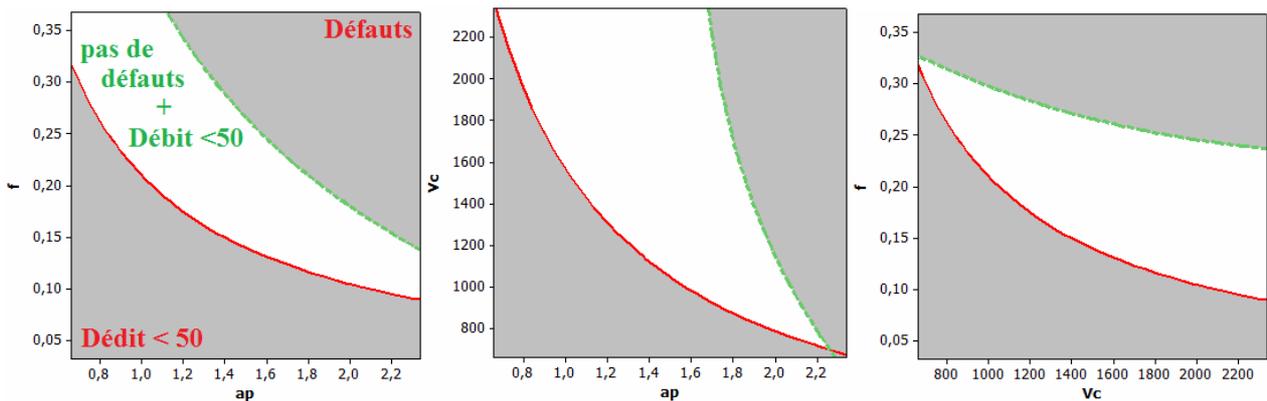


Fig. 15, 16, 17. Choix des paramètres avec  $Q < 50 \text{ cm}^3/\text{min}$ .

- Pour une valeur de maintienne de  $V_c = 1500 \text{ m/min}$  (Fig. 15), on peut choisir l'avance  $f$  varie entre 0,1 et 0,35 mm, et si on prend la valeur de l'avance  $f = 0,2 \text{ mm}$  (par exemple), on peut déduire que la valeur de la profondeur de passe  $ap$  doit être comprise entre 1,1 et 1,9 mm.
  - Pour une valeur de maintienne de  $f = 0,2 \text{ mm}$  (Fig. 16), on peut choisir la vitesse de coupe  $V_c$  varie entre 650 et 2200 m/min, et si on prend la valeur de la vitesse de coupe  $V_c = 2000 \text{ m/min}$  (par exemple), on peut déduire que la valeur de la profondeur de passe  $ap$  doit être comprise entre 0,8 et 1,8 mm.
  - Pour une valeur de maintienne de  $ap = 1,5 \text{ mm}$  (Fig. 17), on peut choisir l'avance  $f$  varie entre 0,1 et 0,33 mm, et si on prend la valeur de l'avance  $f = 0,2 \text{ mm}$  (par exemple), on peut déduire que la valeur de la vitesse de coupe doit être supérieur à 1000 m/min.
2. La seconde configuration Fig. 18, 19, 20 permet de choisir les conditions de coupe avec un débit copeaux supérieur à  $90 \text{ cm}^3/\text{min}$ .

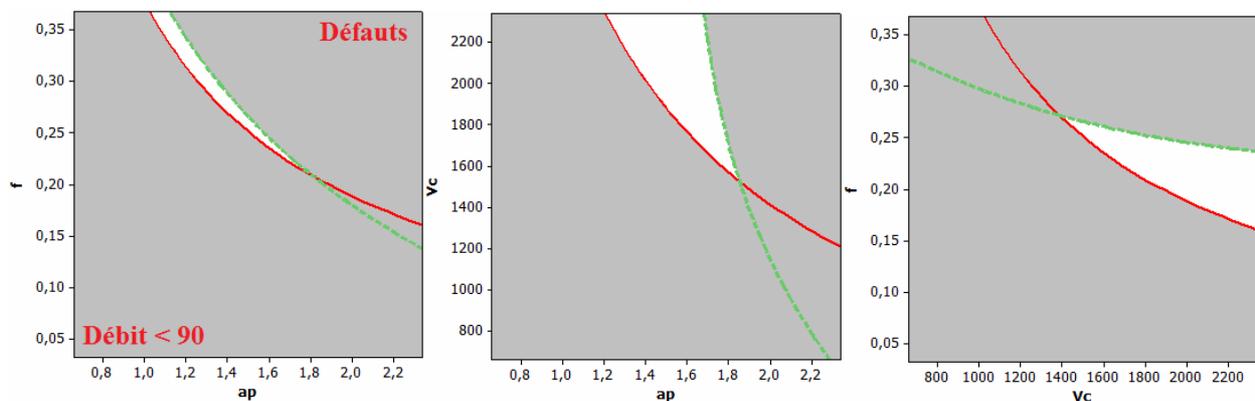


Fig. 18, 19, 20. Choix des paramètres avec  $Q < 90 \text{ cm}^3/\text{min}$ .

- Pour une valeur de maintenance  $V_c = 1500$  m/min (Fig. 18), la profondeur de passe doit être choisie entre 1,05 et 1,8 mm, et en fonction de la valeur de  $ap$  choisie on obtient la valeur de  $f$  qui sera comprise entre 0,2 et 0,35 mm.
- Pour une valeur de maintenance  $f = 0,2$  mm (Fig. 19), la profondeur de passe doit être choisie entre 1,2 et 1,85 mm, et en fonction de la valeur de  $ap$  choisie on obtient la valeur de  $V_c$  qui sera supérieur à 1550 m/min.
- Pour une valeur de maintenance  $ap = 1,5$  mm (Fig. 20), l'avance  $f$  doit être choisie entre 0,16 et 0,24 mm, et en fonction de la valeur de  $f$  choisie on obtient la valeur de  $V_c$  qui sera supérieur à 1400 m/min.

## 7. 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 permet de choisir les conditions de coupe les mieux adaptées pour éviter les défauts d'usinage de ce matériau et augmenté la productivité. 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 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. La méthode utilisée dans cette étude est une combinaison entre plusieurs objectives recherchées en usinage des composites comme la qualité des pièces usinées, la durée de vie des outils de coupe et la productivité.

## References:

- [1] T. Chung chen, C. Weng chou, « Prediction of the location of delamination in the drilling of composite laminates ». *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 70, pp.185-198, 1997.
- [2] J. P Davim, P. Reis, « Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments ». *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 160, pp. 160-167, 2005.
- [3] L. M P Durao, D. Goncalves, R. Tavares, V. H de Albuquerque, A. A Vieira, A. T Marques, « Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates ». *Composite Structures*, Vol. 92, pp. 1545-1550, 2010.
- [4] J.Y. Sheikh-Ahmad, « Machining of polymer composites, ed. Springer 2009.
- [5] A. Koplev, A. Lystrup, « The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP ». *composites 14*, pp. 371-376, 1983.
- [6] M. Ramulu, « Machining and surface integrity of fibre reinforced plastic composites ». *Sadhana*, Vol. 22, pp 449-472, 1997.
- [7] SAFETY, Turning Catalog Valenite Safety, TURN-CAT, 2007.