
Prédiction des efforts responsables du délaminage lors du perçage des structures composites fibres longues

Redouane Zitoune et Francis Collombet

*Laboratoire de Génie Mécanique de Toulouse, équipe PRO²COM
IUT Paul Sabatier, Dépt. GMP
133 C Avenue de Rangueil, BP 67701, 31077 Toulouse Cedex 04.*

redouane.zitoune@iut-tlse3.fr, francis.collombet@iut-tlse3.fr

RÉSUMÉ. Dans cet article, on propose une analyse numérique par E. F. dans un cadre quasi statique des efforts de poussée responsables du défaut en sortie du trou lors du perçage de plaques composites fibres longues. La particularité de ce modèle numérique, comparé aux modèles analytiques existants dans la littérature, est qu'il prend en considération la géométrie de la pointe de l'outil ainsi que les effets des efforts tranchants dans le stratifié. La validation de ce modèle numérique est réalisée grâce à des essais de poinçonnement à faible vitesse sur deux types de semi produits en carbone/époxy fibres longues fabriqués par Hexcel Composites. Les résultats numériques présentent une bonne corrélation avec les valeurs obtenues expérimentalement. De plus, une comparaison entre les efforts de poussée numériques et ceux fournis par les modèles analytiques de la littérature est discutée.

ABSTRACT. In this paper, we propose a numerical F. E. analysis within a quasi static framework of the thrust forces responsible for the defect at exit of the hole during the drilling phase of long fibres composite structures. This numerical model - compared with the analytical models existing in the literature - takes into account the tool point geometry as well as the shear force effects in the laminate. The validation of the numerical model is carried out thanks to tests of punching at low speed on two types of semi products in carbon / epoxy long fibre manufactured by the Hexcel Composites company. The numerical results present a good correlation with the experimental values. Moreover, a comparison between the numerical thrust forces and those provided by the analytical models of the literature are discussed.

MOTS-CLÉS : perçage, composites, simulation numérique, délaminage, mécanique de la rupture

KEY WORDS: drilling, composites, numerical modelling, delamination, Fracture Mechanics.

1. Introduction

Le perçage par enlèvement de matière est une opération courante pour réaliser des assemblages boulonnés ou rivetés dans le domaine aéronautique. Cet usinage fait apparaître, dans les structures composites fibres longues, des dommages de nature différente qui nuisent à la durée de vie des assemblages. Les défauts induits par l'opération de perçage sont classés suivant trois zones d'apparition : à l'entrée du trou - par la décohésion du pli supérieur du stratifié, sur la paroi du trou - par l'arrachement de fibres et la dégradation de la résine et en sortie du trou - par la décohésion du dernier pli. La qualité d'un trou est fortement influencée par les conditions d'usinage (Ramulu *et al.*, 2001) et (Piquet *et al.*, 2003) et la nature du matériau outil. Elle l'est aussi par la nature du matériau à usiner ainsi que la séquence d'empilement et plus particulièrement, par l'angle θ compris entre la direction de la vitesse de coupe et l'orientation des fibres (Zitoune *et al.*, 2005). Pendant le perçage, on évite l'apparition du défaut en entrée du trou, si le stratifié à usiner est appuyé sur la face d'attaque de la pièce. Les défauts qui se localisent sur la paroi du trou et en sortie du trou sont des défauts majeurs. Plusieurs travaux (Tsao *et al.*, 2004) montrent que le défaut en sortie du trou est fortement influencé par la valeur de l'effort de poussée F_z résultant de l'avance de l'outil dans la matière. Cet effort dépend du choix de la géométrie de la pointe de foret ainsi que de la valeur de la vitesse d'avance de l'outil dans la matière. L'estimation de l'effort de poussée a fait l'objet de plusieurs travaux, comme ceux de (Lachaud *et al.*, 2001). Dans ce modèle, l'influence de la géométrie de la pointe de l'outil - ainsi que celle de l'effort tranchant dans le stratifié - ne sont pas prises en compte.

Dans le cadre de ce travail, on propose un modèle numérique permettant de calculer l'effort de poussée F_z en prenant en considération respectivement, la géométrie de la pointe de l'outil (et donc la part du chargement repris par l'âme et par les arêtes principales du foret) et l'énergie de déformation due aux efforts tranchants. Dans un premier volet, on propose une description succincte du modèle analytique de (Lachaud *et al.*, 2001). Dans un deuxième volet, un modèle numérique pour le calcul des efforts de poussée est exposé. Une comparaison entre les efforts de poussée, obtenus numériquement et ceux fournis par les modèles analytiques de la littérature, est présentée. La validation de ce modèle numérique est réalisée sur deux types de matériaux en carbone époxy fibres longues fournis par la société Hexcel Composites et utilisés (T700-M21) dans la fabrication de panneaux pour l'A380.

2. Modèle analytique de la littérature

Dans cette partie, on propose une brève description d'un modèle de la littérature (Lachaud *et al.*, 2001) pour le calcul analytique de l'effort critique de perçage provoquant le délaminage entre plis en sortie de trou, dans le cas des stratifiés minces fibres longues en carbone époxy (cf. Figure 1). Durant l'avancement du foret dans la matière, les plis non coupés sous l'outil sont entraînés vers le bas par l'effort de poussée et subissent une déformation élastique. Si la contrainte résultante en front de fissure (délaminage) dépasse une valeur critique, alors la fissure se propage. A cet instant, l'effort appliqué correspond à l'effort de poussée critique. On note que

le comportement global du stratifié est supposé orthotrope linéaire. Le contact outil/plaque est modélisé par un chargement uniformément réparti (p). Le bilan énergétique est appliqué sur la structure dans le domaine linéaire élastique. A partir des travaux de (Ho-Cheng et al., 1990), l'auteur établit une relation pour prédire l'effort de poussée critique en fonction respectivement, du taux de restitution d'énergie critique en mode I (G_{Ic}) et des propriétés mécaniques élastiques de la plaque orthotrope. On rappelle que :

$$F_z = 8.\pi \left(\frac{G_{Ic}.D}{\frac{1}{3} - \frac{D'}{8.D}} \right)^{1/2} \quad [1]$$

avec :

$$- G_{Ic} \text{ le taux de restitution d'énergie critique en mode I,} \\ - D = \frac{1}{8}(3D_{11} + 2D_{12} + 4D_{66} + 3D_{22}), \quad [2]$$

$$- D' = \frac{D_{11} + D_{22}}{2} + \frac{D_{12} + D_{66}}{3}, \quad [3]$$

et D_{ij} les coefficients de la matrice de rigidité de flexion de la "plaque" située sous la zone délaminée (cf. Figure 1).

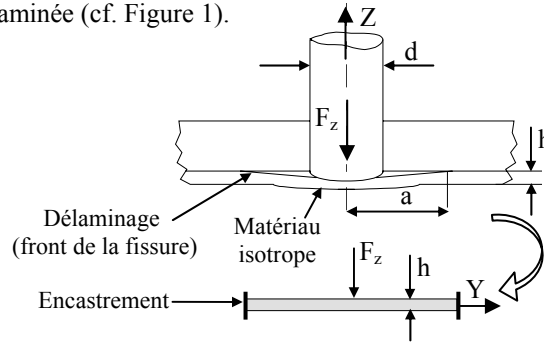


Figure 1. Modélisation du délaminage en sortie de trou d'après (Ho-Cheng et al.)

3. Modélisation numérique

Le modèle numérique proposé présente l'avantage de prendre en considération les nouveaux aspects précités. Le premier aspect est la prise en compte des déformations dues aux efforts tranchants grâce à l'utilisation d'un élément fini adapté, disponible dans la bibliothèque du code E.F. Samcef (élément fini de type 11). Le second aspect correspond à l'influence de la conicité du foret dans la matière. Il permet de représenter d'une part, la présence d'une fissure au niveau de l'âme du foret et d'autre part, l'influence de la répartition du chargement sur l'âme et sur les arêtes de coupe principales. L'effort de poussée résultant F_z peut se décomposer en deux composantes F_{z1} et F_{z2} (cf. Figure 2), avec F_{z1} la part de l'effort de poussée induit par le contact des deux arêtes principales du foret avec le stratifié et F_{z2} la part de l'effort de poussée correspondant au contact de l'âme du foret avec le stratifié. On a, suivant la direction Z, l'égalité $F_z = 2 F_{z1} + F_{z2}$ (cf. Figure 2). La

partie de la structure usinée est modélisée comme un volume de géométrie circulaire de rayon extérieur R_e et rayon intérieur R_t (avec R_t le rayon nominal du trou percé, cf. Figure 3). La figure 3 est une schématisation du système vu en coupe dans un plan noté (YZ). R_a et e représentent respectivement, le rayon de l'âme et l'épaisseur des plis non usinés qui se situent sous l'âme du foret.

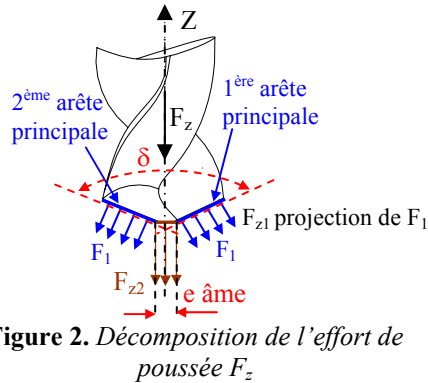


Figure 2. Décomposition de l'effort de poussée F_z

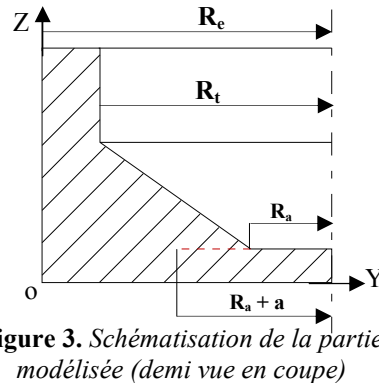


Figure 3. Schématisation de la partie modélisée (demi vue en coupe)

3.1. Maillage et conditions aux limites

La figure 4 représente le modèle éléments finis correspondant au perçage d'un stratifié quasi isotrope en carbone époxy. Dans cette modélisation, l'élément utilisé est de type isoparamétrique volumique de degré 2. Le calcul est réalisé dans un cadre statique linéaire avec l'hypothèse de volume composite. Les conditions aux limites imposées correspondent à un encastrement sur le tour du trou (de rayon R_e). Une partie du chargement est imposée suivant la direction (0Z) et appliquée sur les noeuds de la surface générée par l'âme lors de sa rotation. L'autre partie de l'effort est appliquée sur la périphérie conique du foret (cf. Figure 4.).

Le principe de détermination de l'effort critique de poussée F_z - en fonction du nombre de plis sous le foret - est basé sur le calcul des taux de restitution d'énergie en mode I et II, pour une fissure localisée au niveau du diamètre de l'âme. On note que le front de cette fissure est circulaire et de rayon $(R_a + a)$. La valeur critique de l'effort de poussée F_z est atteinte si le critère énergétique classique suivant est

$$\text{vérifié : } \left(\frac{G_I}{G_{II}} \right)^\alpha + \left(\frac{G_I}{G_{II}} \right)^\alpha = 1 \text{ avec } \alpha = 1,6.$$

Le choix de la répartition de la part de l'effort de chargement transitant par l'âme et de celle reprise par les arêtes principales est inspiré des travaux de (Piquet *et al.*, 2003). Dans cette étude, une quantification expérimentale de la partition du chargement est réalisée. On note que - pour des faibles vitesses d'avance du foret dans la matière - la part de l'effort de poussée F_{z2} générée par l'âme du foret est comprise entre 40 % et 50 % de l'effort de poussée total F_z .

La validation de ce modèle numérique est effectuée grâce à des essais de poinçonnement quasi statique. Ces derniers sont réalisés sur une machine de traction type Instron (cf. Figure 5). Les différentes éprouvettes étudiées sont fabriquées à

partir de deux nappes unidirectionnelles fournies par la société Hexcel Composites et référencées de façon abrégée respectivement, T2H-EH25 et T700-M21.

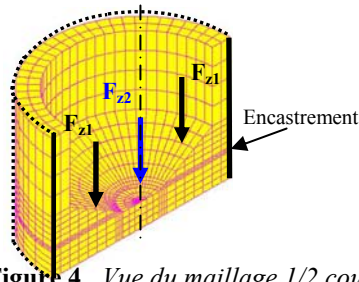


Figure 4. *Vue du maillage 1/2 coupe et conditions aux limites*

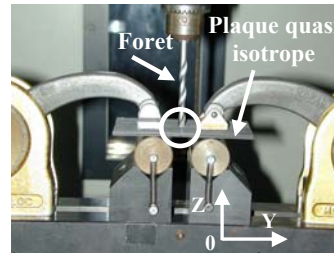


Figure 5. *Montage expérimental des essais de poinçonnement*

La séquence d'empilement est quasi-isotrope. Des trous borgnes de diamètre 4.8 mm sont usinés avec des nombres différents de plis sous le foret (cf. Figure 5). L'effort axial est appliqué à l'aide d'un foret hélicoïdal (de diamètre 4.8 mm) qui se déplace en translation dans le trou borgne.

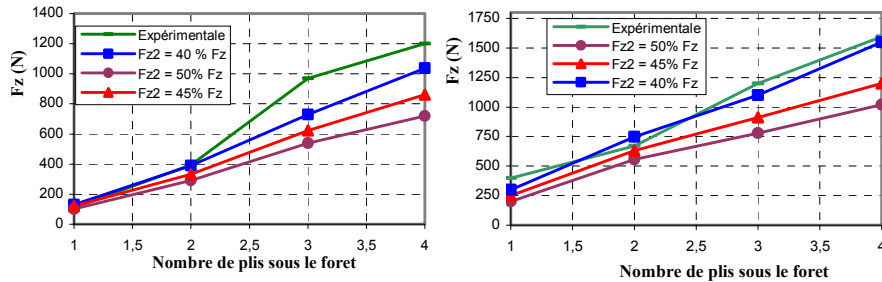
Comme préalable à l'analyse de la corrélation calcul/essai, l'étude de l'influence du maillage sur le calcul des taux de restitution d'énergie a été abordée. Les résultats de cette étude nous conduisent à utiliser - pour la suite - respectivement, un nombre total d'éléments volumiques de 3480, un rayon d'encastrement R_e de 2.9 mm et une préfissure de dimension de 0.3 mm.

3.2. Résultats et interprétation

La figure 6-a représente une comparaison expérience/calcul numérique des efforts de poussée F_z (pour une plaque en carbone/époxy fabriquée en T2H-EH25, d'épaisseur 4 mm avec une séquence d'empilement quasi-isotrope notée $[90/+45/0/-45]_{2s}$). Si le chargement repris par l'âme du foret représente 50 % du chargement total, nous constatons que l'écart relatif entre les résultats - fournis par le modèle numérique - et ceux - donnés par l'expérience - est de l'ordre de 50 %. Cet écart important est vérifié dès que le nombre de plis sous le foret est supérieur à 2. Dans le cas où le chargement repris par l'âme représente 40 % du chargement total, les résultats du modèle numérique corroborent les mesures expérimentales. Dans ce cas de chargement - quel que soit le nombre de plis sous le foret - l'écart relatif reste inférieur à 11 %. Cependant pour le matériau T700-M21 (et dans le cas où la part de chargement repris par l'âme est de 40 %), la figure 6-b montre une bonne corrélation calcul/essai si le nombre de plis est supérieur à 1. De plus, on note que les efforts de poussée critique calculés pour le matériau T700-M21 sont plus importants que ceux calculés pour le matériau T2H-EH25 (et cela pour tous nombres de plis sous le foret).

Une corrélation entre le modèle numérique/expérience/modèle analytique (qui n'est pas présentée ici) est discutée. Pour ce calcul numérique, la répartition du chargement retenue correspond à une reprise de 40 % de l'effort de poussée par l'âme de foret et le reste par les arêtes principales du foret. Le modèle analytique

surestime les efforts critiques responsables du délaminage et ceci quel que soit le matériau étudié.



(a) T2H-EH25

(b) T700-M21

Figure 6. Comparaison "expérience/modèle numérique" des efforts de délaminage en sortie de trou avec une stratification de $[90^\circ/+45^\circ/0^\circ/-45^\circ]_{2S}$, une vitesse d'avance de l'outil de 1 mm/mn et un diamètre d'outil de 4.8 mm

4. Conclusion

Pour l'analyse des conditions du perçage de structures composites fibres longues, nous avons proposé un modèle numérique permettant de restituer les efforts de poussée critique responsables de la formation du défaut en sortie du trou, pour un nombre de plis différents sous le foret. On a noté une bonne corrélation entre les efforts calculés par le modèle numérique proposé et ceux obtenus expérimentalement (essais de poinçonnement quasi statique). Pour restituer les conditions de l'expérience, les résultats obtenus - en comparaison avec les modèles analytiques de la littérature - montrent qu'il est nécessaire de prendre en compte l'influence de l'effort tranchant ainsi que celle de la géométrie de la pointe de l'outil.

5. Bibliographie

- Ho-Cheng H., Dharan C., Delamination during drilling in composite laminates, *Transaction of ASME 112*, pp. 236-239, 1990.
- Piquet R., Lachaud F., Dubourd P., Optimisation des conditions de contact outil/plaque dans le cadre de perçage de stratifiés minces en carbone/epoxy, *JNC 13*, pp. 171-180, 2003.
- Ramulu M., Branson T. and Kim D., A study on the drilling of composite and titanium stacks, *Composite Structures*, Vol. 54, pp. 67-77, 2001.
- Tsao C. C., Ho-Cheng H., Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite materials, *Int. J. Mach. Tools Manufac.*, in Press 2004.
- Zitoun R., Collombet F., Piquet R., Lachaud F., Pasquet P., Experiment-calculation comparison of the cutting conditions representative of the long fibre composite drilling phase, *Composites Science and Technology*, Vol. 65, pp. 455- 466, 2005.
- Lachaud F., Piquet R., Collombet F., Surcin L., Drilling of composite structures, *Composite Structures*, Vol. 52, pp. 511-516, 2001.

Remerciements : Les auteurs remercient la société Hexcel Composites pour la fourniture des matériaux pré-impregnés de type T2H-EH25 et T700-M21.