

Chapitre 4

Coupe des fibres de carbone

Le perçage des matériaux composites est une opération complexe à maîtriser. Une étude macroscopique est mise en place pour identifier les effets de la vitesse de coupe, de l'avance, de l'angle de pointe du foret, de l'acuité d'arête et des revêtements. Les essais réalisés dans l'étude sont menés avec des géométries d'outils proches des exigences d'une gamme titane, afin de garder en objectif le développement d'un outil bi-compétence pour le perçage des empilages Titane-Carbone. Une analyse à l'échelle méso est ensuite menée pour définir avec précision les zones de localisation des principaux défauts. Les phénomènes de refus de coupe en entrée, de dégradation de l'état de surface en pleine matière et le délaminage en sortie du trou sont ainsi observés. Une analyse des modes de coupe est menée pour voir s'il existe une corrélation entre les défauts et les modes d'enlèvement de matière. Une méthode originale est proposée pour reconstruire le chargement local sur l'arête, en fonction de la position de la fibre par rapport à l'outil. Ainsi il est possible de comparer les niveaux des efforts locaux avec les défauts précédemment observés.

1. Constations préliminaires

Les mesures des efforts Fz et du couple Mz obtenues lors du perçage d'un composite multidirectionnel, illustrées sur la Figure 150, présentent une allure générale surprenante au premier abord, pour un usineur issu de la coupe des métaux.

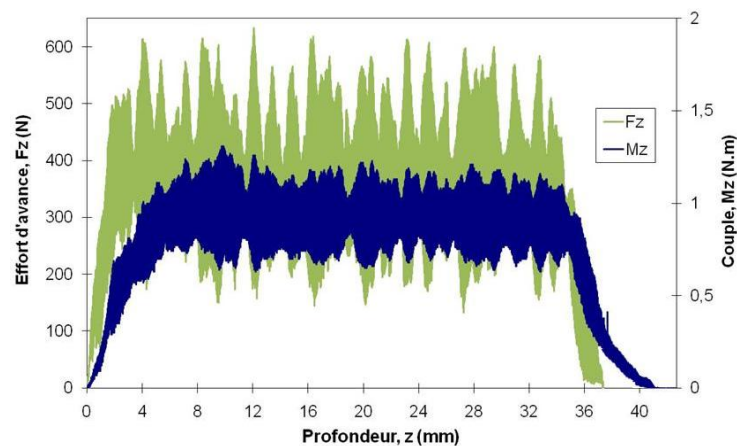


Figure 150 – Relevé de l'effort Fz et du couple Mz , lors du perçage d'un composite multidirectionnel

Les signaux sont très bruités en comparaison de ceux obtenus dans un matériau homogène. L'amplitude de l'effort d'avance est supérieure à 500 N, pour un effort moyen de seulement 400 N. En ce qui concerne le couple, l'amplitude est estimée à 0,5 N.m, pour un couple moyen de 0,9 N.m. Les composites sont des matériaux fortement hétérogènes. Les propriétés des fibres de carbone et de la matrice sont très différentes. De plus, la résistance au cisaillement des fibres dépend de la direction de sollicitation. De nombreux auteurs ne prennent pas en compte ces variations jugées parasites ; or ce « bruit » est une grande richesse d'informations qui sera exploité dans la suite de l'étude. Une filtration des signaux, présentée sur la Figure 151 avec un filtre passe bas de 10 Hz, met en évidence les « portances » de ces signaux, qui seront appelées « 1^{er} ordre » dans la suite du mémoire.

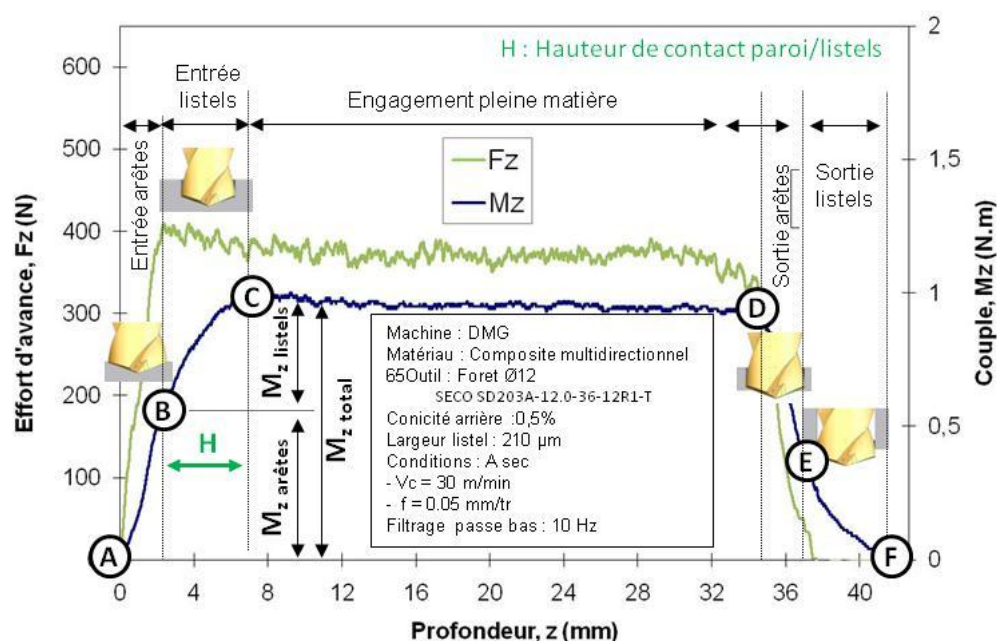


Figure 151 – Filtration passe bas à 10 Hz de l'effort F_z et du couple M_z , lors du perçage d'un composite multidirectionnel

Les comportements des signaux d'ordre 1 sont similaires à ceux mis en évidence lors du perçage des alliages de Titane. En effet, une forte contribution des listels est observée sur le couple M_z entre les points B et C. Le rapport entre le couple sur les listels $M_{z \text{ listels}}$ et le couple total est donné par la relation (73) :

$$\psi = \frac{M_{z \text{ Listels}}}{M_{z \text{ Total}}} \quad (73)$$

ψ : Contribution des listels (%)

$M_{z \text{ listels}}$: Couple consommée par le guidage du foret (N.m)

$M_{z \text{ Total}}$: Couple total (N.m)

Le contact paroi/listels représente 45% de la puissance globale pour les conditions d'essais de la Figure 151. A titre de comparaison, la contribution du titane estimée avec la même référence de foret SECO SD203A-12.0-36-12R1-T et une vitesse de coupe identique $V_c = 30 \text{ m/min}$ (sec), mais une avance plus faible $f = 0,05 \text{ mm/tr}$, s'élève à 12%. Celle d'un acier C45 ne dépasse pas 1%. Les composites, comme les alliages de

titane sont sujets à un retour de la matière vers le centre du trou. Néanmoins les mécanismes de ces mouvements de matières sont différents. Il a été montré dans le chapitre 3 que le retour élastique (mécanique) du titane est combiné à un phénomène de retraits thermiques de la matière sous contrainte. Dans le cas des composites, les travaux de [Guegan], [Ghidossi] et [Piquet] ont montré que le fléchissement des fibres, positionnées à 90° par rapport à l'arête, entraîne un retour élastique important sur les listels. La Figure 152 illustre ce phénomène de retour des fibres, observé également au cours de cette étude.

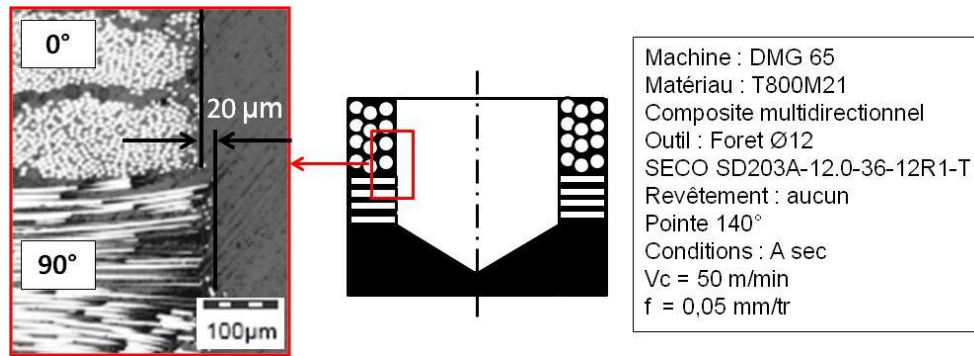


Figure 152 – Illustration du phénomène de fléchissement et de retour élastique des fibres

L'échauffement de la paroi par le frottement répété des listels peut dégrader l'intégrité de la résine. A titre indicatif, le nombre de passages de listels n , vu par une même portion de paroi, pour les conditions d'essais présentée sur la Figure 151, est estimé à près de 130 passages, à l'aide de la relation (74).

$$n = \frac{z \cdot H}{f} \quad (74)$$

- n : Nombre de passages de listels
- H : Hauteur de contact paroi/listel (mm)
- z : Nombre de dents
- f : Avance (mm/tr)

2. Etude expérimentales des défauts de coupe

2.1 Etude de sensibilité dans un composite multidirectionnel

Différents paramètres de coupe et de géométries d'outils sont étudiés. Deux critères sont utilisés pour quantifier leurs performances : La qualité en sortie des trous, évaluée suivant les critères illustrés sur la Figure 153, et l'évolution de l'usure de l'outil, quantifiée par la mesure de l'effort F_z et du couple M_z .

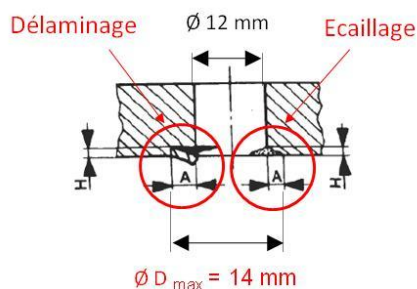


Figure 153 – Critères qualité exigés en sortie de trou par le constructeur

L'étude est menée avec des géométries d'outils proches des exigences d'une gamme titane, afin de garder en objectif le développement d'un outil bi-compétence pour le perçage des empilages Titane-Carbone. La configuration de référence choisie, illustrée sur la Figure 154, est la suivante :

- Foret hélicoïdal : Ø 12 mm, deux arêtes de coupe, angle de pointe 140°, substrat 6% de Cobalt et revêtement diamant CVD
- Plaque de composite T800M21 multidirectionnelle : plis drapés de 250 µm d'épaisseur, arrangement équilibré (alternance régulière de plis à -45°, 0°, 45° et 90°), épaisseur totale de la pièce 30 mm, pli de verre en entrée et en sortie, taux de renfort 60%

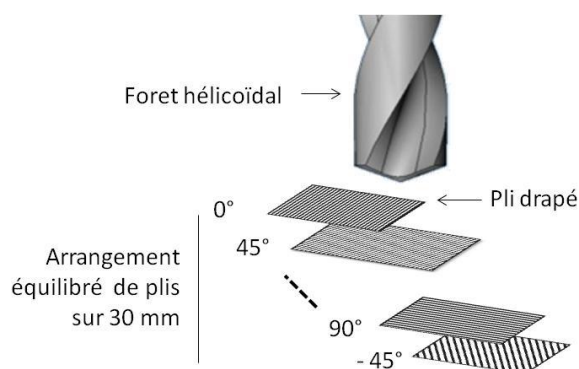


Figure 154 - Schéma de principe du perçage d'arrangements multidirectionnel de plis drapés

2.1.1 Paramètres de coupe

2.1.1.1 Vitesse de coupe

Les effets de la vitesse en sortie du trou sont présentés sur la Figure 155, pour cinq vitesses testées dans le domaine de coupe de ces matériaux : 10, 50, 100, 150 et 200 m/min.

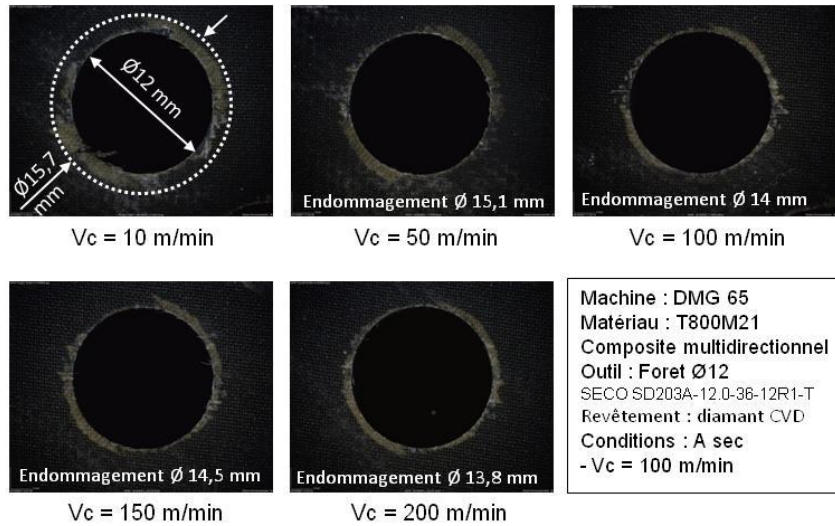


Figure 155 – Effet de la vitesse sur la qualité en sortie du trou, à sec pour $f = 0,05 \text{ mm/tr}$

Le délaminage des fibres en sortie dépend de la vitesse de coupe. Il est maximal à $V_c = 10 \text{ m/min}$, avec un endommagement compris dans un cercle de diamètre 15,7 mm. Cette valeur est supérieure à la limite de qualité, fixée par le constructeur à $\text{OD}_{\text{max}} 14 \text{ mm}$ pour un trou de $\text{Ø} 12 \text{ mm}$. L'augmentation de la vitesse, permet de réduire l'étendue de l'écaillage et de satisfaire les exigences de qualité dès $V_c = 100 \text{ m/min}$. Au-delà de cette vitesse, le phénomène d'écaillage est stable et maîtrisé. D'un point de vue thermique, aucun endommagement de la résine n'est constaté aux plus hautes vitesses de coupe, soit 200 m/min .

2.1.1.2 Avance

Les effets de l'avance en sortie du trou sont présentés sur la Figure 156, pour six avances : $0,025$; $0,05$; $0,75$; $0,1$; $0,125$; $0,15 \text{ mm/tr}$.

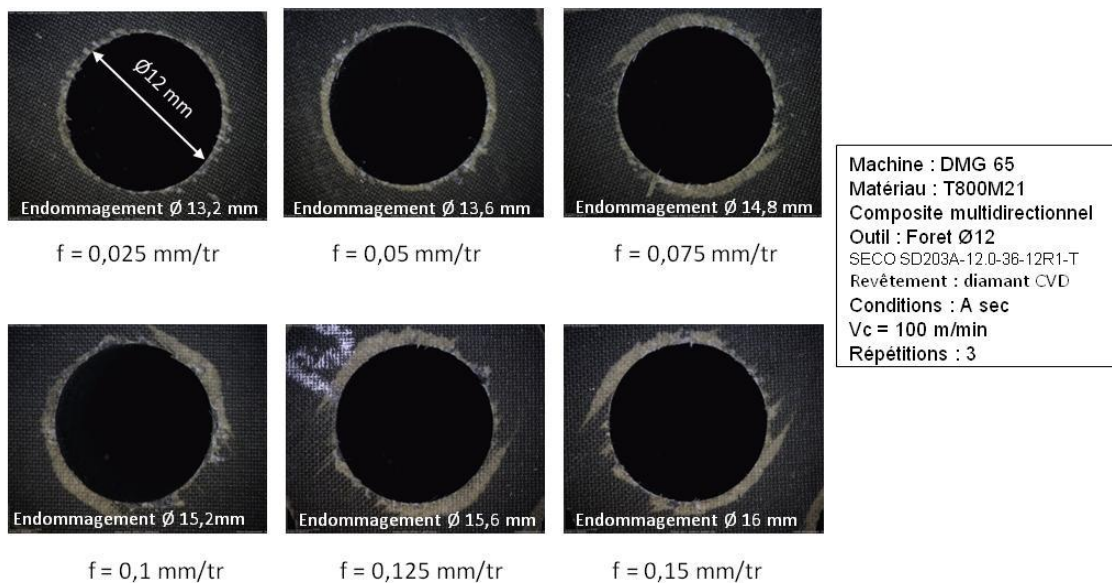


Figure 156 – Effet de la vitesse sur la qualité en sortie de trou, à sec pour $V_c = 100 \text{ m/min}$

Le délaminage des fibres en sortie augmente fortement avec l'avance. En dessous de $f = 0,05$ mm/tr, l'endommagement est régulier sur le pourtour du trou. Au-delà, $f = 0,05$ mm/tr, l'écaillage est plus prononcé et dépasse le critère qualité dans certains secteurs angulaires. Cette observation sera analysée plus précisément par la suite.

2.1.2 Paramètres outil

2.1.2.1 Effet de l'angle de pointe

Les effets de l'angle de pointe $2\kappa_r$ sur la qualité en sortie sont présentés sur la Figure 157, après dix trous percés. Les trois angles de pointe testés sont : 90° , 110° et 140°

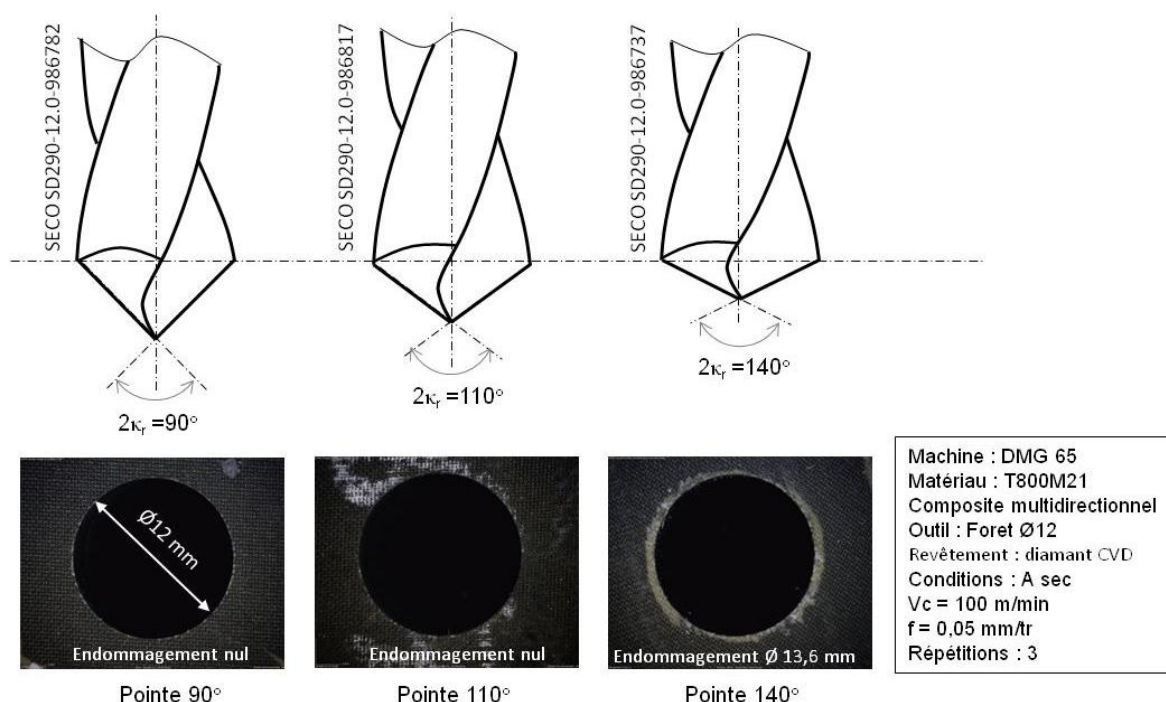


Figure 157 – Effet de l'angle de pointe sur la qualité en sortie de trou

Aucun délaminage en sortie n'est constaté pour les angles de pointe $2\kappa_r$ de 90° et 110° . Un faible endommagement apparaît pour l'angle 140° , mais reste néanmoins dans les critères de qualité. L'angle de pointe joue un rôle très important dans la décohésion des derniers plis. Il est généralement conseillé de choisir un angle $2\kappa_r$ compris entre 60° et 90° pour le perçage composite seul. L'étude montre ici qu'il est possible d'augmenter cet angle pour se rapprocher de valeurs vraisemblablement plus adaptées au perçage des empilages titane-carbone, soit entre 110° et 140° .

2.1.2.2 Effet de l'acuité d'arête – revêtement

L'acuité d'arête initiale est obtenue par brossage, comme le montre la Figure 158. Un rayon de honing compris entre 10 et 20 μm est réalisé sur l'ensemble de l'arête. Deux revêtements différents sont testés : Diamant CVD et TiN.

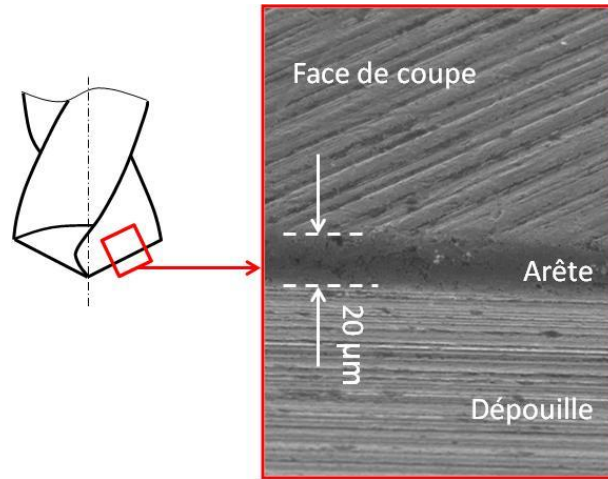


Figure 158 - Préparation d'arête (reconstruction 3D d'images MEB)

L'effort d'avance F_z et le couple M_z sont mesurés pour suivre l'évolution de l'usure en fonction du nombre de trous percés. L'effort F_z est un indicateur couramment utilisé pour suivre l'usure en dépouille. Le couple M_z permet de suivre l'évolution de l'acuité de l'arête de coupe. Les résultats sont présentés sur la Figure 159.

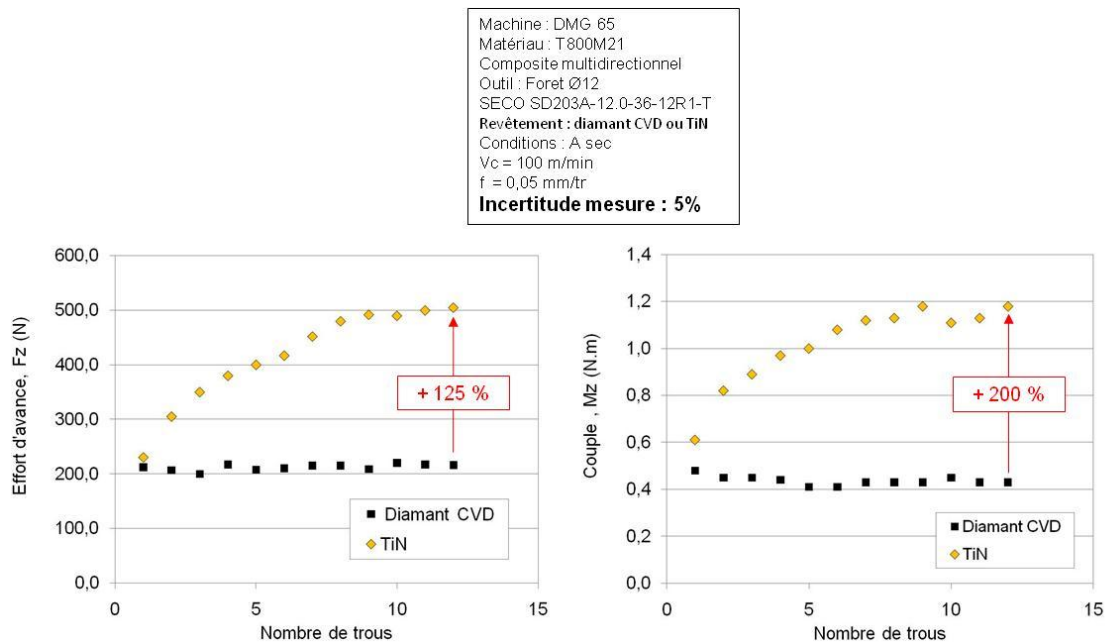


Figure 159 - Evolution de l'effort d'avance et du couple au fil des trous pour différents revêtements

Une différence significative de comportement est observée entre les deux revêtements. L'arête protégée par le revêtement diamant CVD assure un niveau d'effort et de couple constant avec le nombre de trous percés. Le revêtement TiN, quant à lui, ne peut empêcher une usure prématurée de l'arête. L'effort de coupe augmente de près de 125%, entre le premier et le deuxième trou, tandis que la contribution supplémentaire sur le couple s'élève à 200%. La géométrie de l'arête revêtue TiN, avant et après usinage, est représentée sur la Figure 160.

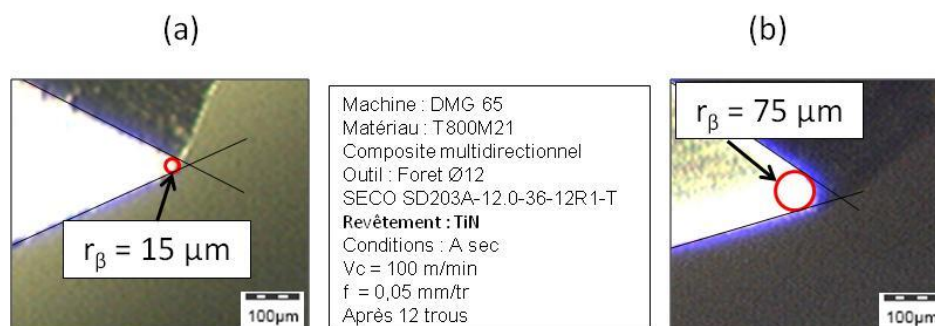


Figure 160 - Evolution de la géométrie d'arête entre (a) l'état initial et (b) le 12^{ème} trou

L'arête s'use très rapidement au contact des fibres de carbone. La dureté de la fibre est supérieure à celle du revêtement TiN ([HK005 2614 (25.61 GPa) - [Nabani 2001]], du substrat WC carbure de tungstène (HK_{1,0} 1576 (15,45 GPa) - [Nabani 2001]). L'abrasion tend à augmenter le rayon d'arête r_β qui passe de 15 μm à près de 75 μm . L'acuité d'arête est comparée à l'épaisseur de coupe à la dent t , illustrée sur la Figure 161, et calculée à l'aide de la relation (75).

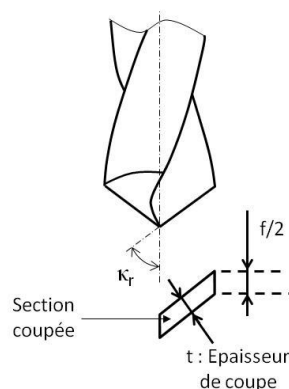


Figure 161 – Epaisseur de coupe en perçage

$$t = \frac{f}{z} \sin(\kappa_r) \quad (75)$$

t : Epaisseur de coupe (mm)

f : Avance (mm/tr)

z : Nombre de dents

κ_r : Angle de direction d'arête de l'outil ($^\circ$)

L'épaisseur de coupe t est estimée à 24 μm , pour les conditions d'essais de la Figure 160. Cette valeur est supérieure au rayon d'arête initial $r_\beta = 15 \mu\text{m}$, puis devient largement inférieur à l'acuité $r_\beta = 75 \mu\text{m}$ après 12 trous. Les conséquences sur le diamètre d'endommagement en sortie de trou sont présentées sur la Figure 162.

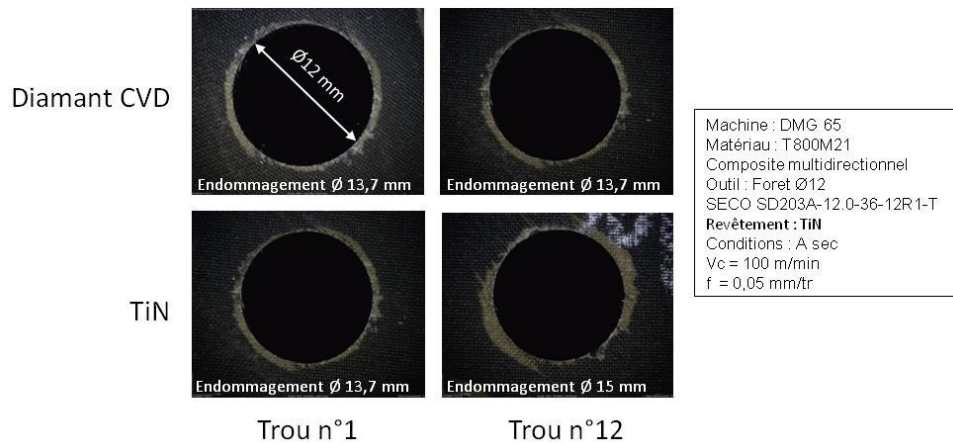


Figure 162 - Effet de l'usure de l'arête sur la qualité en sortie du trou

Les sorties de trou obtenues avec le revêtement diamant CVD présentent une bonne répétabilité. Un léger écaillage est toujours présent mais ne dépasse pas les tolérances de qualité exigée. Le revêtement parvient à maintenir l'acuité d'arête et à assurer ainsi un bon niveau de coupe dans le temps. Le revêtement TiN quant à lui, ne permet pas de limiter le développement du délaminage. L'endommagement augmente avec le nombre de trous et dépasse rapidement les critères qualité.

2.2 Localisation précise des défauts de coupe des fibres à l'aide d'un composite unidirectionnel

Les constatations expérimentales précédentes ont mis en évidence des phénomènes de délaminage en sortie de trou, sous un point de vue macroscopique. Dès lors que le pourtour du trou est observé à une échelle locale, des zones de fort délaminage peuvent être distinguées. La Figure 163 illustre ce phénomène rencontré dans les composites multidirectionnels et unidirectionnels.

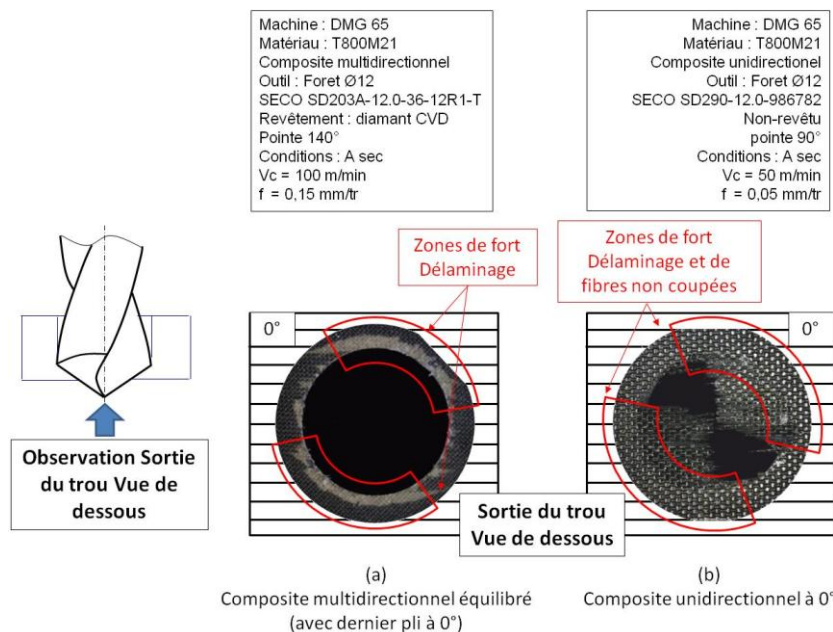


Figure 163 – Zones de délaminage en sortie du trou dans un composite (a) multidirectionnel, (b) unidirectionnel.

Le positionnement des zones de fort endommagement sur le dernier pli en sortie, orienté à 0° , est similaire entre les deux composites. Le composite multidirectionnel présente uniquement des défauts de délaminage. Le composite unidirectionnel, génère également des soulèvements de fibre du dernier pli, et n'assure pas une coupe franche des fibres. Un grand nombre de fibres échappent à la coupe au moment où l'arête débouche du trou. L'unidirectionnel est la configuration la plus défavorable du point de vue industriel, mais très intéressante à étudier du point de vue scientifique car elle amplifie les défauts de coupe dans les zones dites «à risque ». L'étude menée sur la localisation et la compréhension des défauts, se place donc dans le cas d'un composite unidirectionnel, avec un foret volontairement non-revêtu pour amplifier d'avantage les défauts :

- Foret hélicoïdal SECO SD290-12.0-986782 : \varnothing 12 mm, deux arêtes de coupe, pointe 90° , substrat 10% de Cobalt, sans revêtement
- Plaque de composite T800M21 : plis drapés de $250 \mu\text{m}$ d'épaisseur, orientation unidirectionnelle des fibres, épaisseur totale de la pièce 30 mm, pli de verre en entrée et en sortie
- Condition de coupe de référence : $V_c = 50 \text{ m/min}$, $f = 0.05 \text{ mm/tr}$, à sec

2.2.1 Entrée de trou

Les défauts de coupe des fibres en entrée de trous sont illustrés sur la Figure 164, après cinq trous.

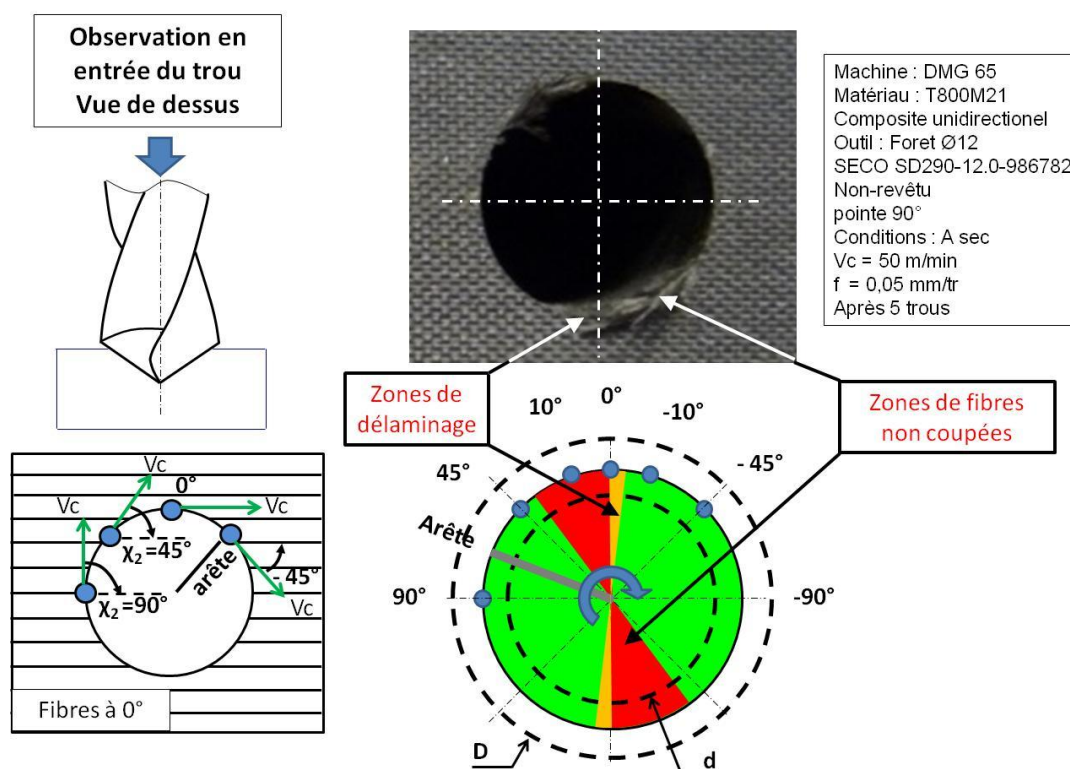


Figure 164 - Défaut en entrée de trou – Vue de dessus

Les défauts en entrée apparaissent dans des zones préférentielles, en fonction de la position angulaire de l'arête par rapport à la direction des fibres. Ces configurations de

coupe sont rencontrées à deux reprises sur une rotation d'outil, de part la symétrie de l'orientation des fibres de la pièce. Dans les « zones rouges », entre 40° et 0° , les fibres du premier pli sont soulevées et chassées vers l'extérieur. Le cisaillement de la fibre en bord de trou n'est que partiel. En repositionnant à la main les fibres non coupées dans leur position d'origine, un diamètre d dit d' « apparition du premier défaut » peut être défini. Son diamètre est compris entre 4 et 6 mm, pour un diamètre de trou \varnothing 12 mm. Le défaut est donc initié et entretenu par le passage des arêtes. Les fibres n'étant plus maintenues, elles sont très difficiles à cisailer. Dans les « zones oranges », aux environs de 0° , les fibres sont écaillées, jusqu'à un diamètre noté D . Ce défaut est critique car il affecte la surface finie de la pièce. Enfin, dans les « zones vertes », une coupe franche des fibres est constatée.

2.2.2 Pleine matière

Des défauts sont également générés lorsque l'arête est complètement engagée dans le trou. L'état de surface de la paroi est le principal défaut constaté. Un critère de rugosité classique ne peut pas être utilisé pour évaluer l'état de surface d'un matériau composite. Des critères visuels et de toucher sont plus appropriés dans le cas des matériaux fibreux. Comme le montre la Figure 165, l'état de surface de la paroi du trou n'est pas homogène.

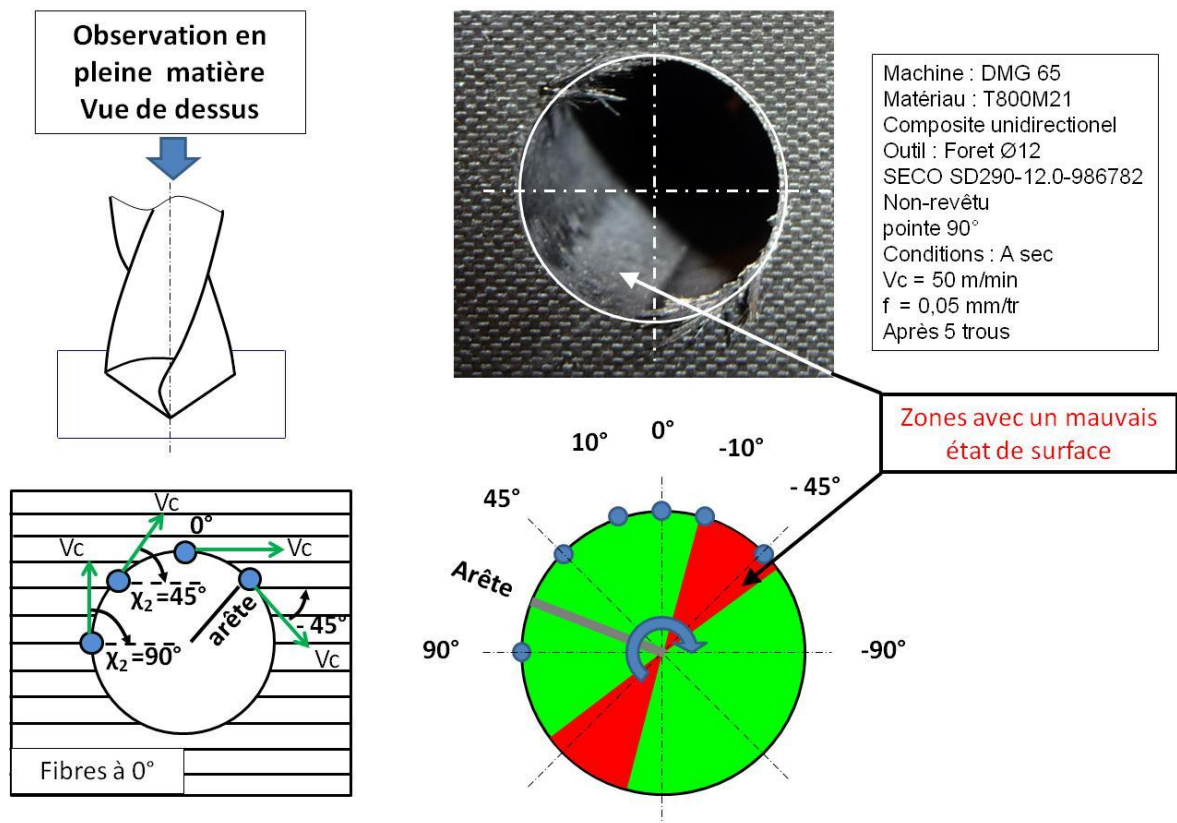


Figure 165 - Défaut en pleine matière – Vue de dessus

L'état de surface dépend fortement de l'orientation des fibres à couper. Une zone rugueuse de couleur grise apparaît entre les orientations -10° et -50° et contraste avec le reste de la paroi de couleur noire à l'aspect luisant. Ces observations sont en accord avec

Konig [Konig 89], qui constate un arrachement des fibres aux environs de l'orientation -30°.

2.2.3 En sortie de trou

Les défauts de coupe des fibres en sortie du trou, vu par le dessous de la pièce, sont illustrés sur la Figure 166.

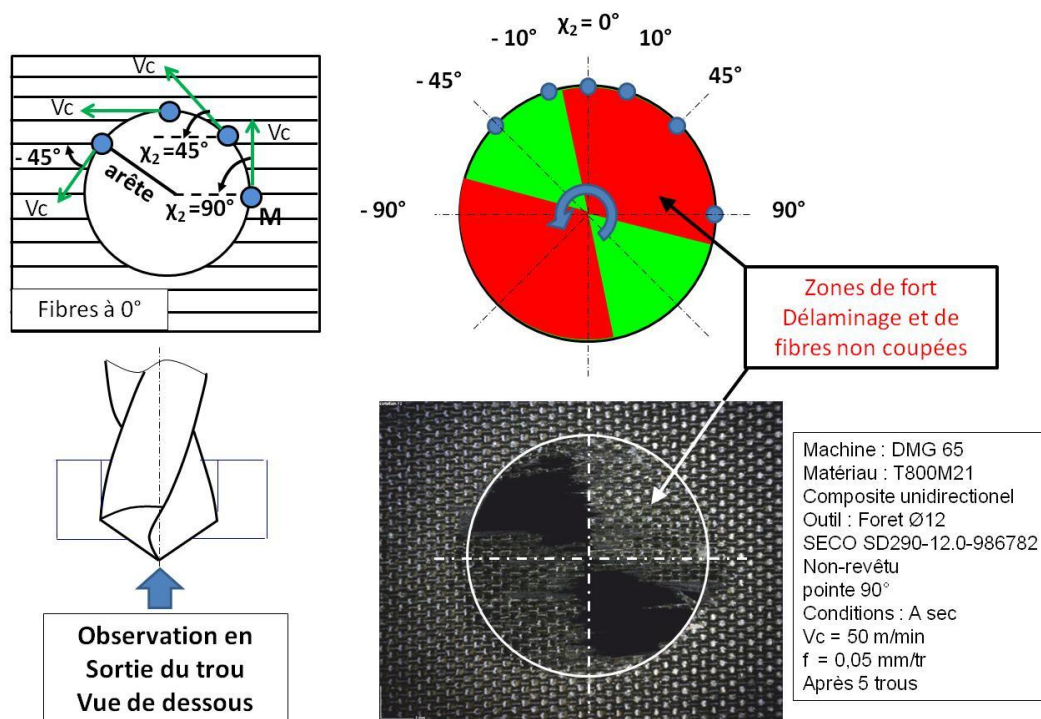


Figure 166 - Défaut en sortie du trou – Vue de dessous

Ils apparaissent dans des zones préférentielles, en fonction de la position angulaire de l'arête par rapport aux fibres. Sur une large zone, les fibres du dernier pli sont repoussées et refusent la coupe. Cela entraîne un écaillage des pourtours du trou sur un diamètre d'endommagement noté D. Une zone de coupe franche est observée pour la plage angulaire comprise entre -10° et -80°.

2.2.4 Synthèse

Les observations expérimentales ont permis de délimiter des zones de fort endommagement en entrée du trou, en pleine matière et en sortie du trou, répertoriées sur la Figure 167. Il est intéressant de constater que ces zones sont différentes suivant les trois cas observés. Premièrement, les zones de défauts identifiées en entrée et en sortie ne correspondent pas à celles observées en pleine matière. Quand bien même les défauts en entrée et en sortie du trou sont dans des secteurs communs, l'étendue des zones d'endommagement est différente.

Aux vues de ces constatations expérimentales, une analyse locale de la coupe des fibres semble un axe de travail intéressant, qui sera développé dans les paragraphes suivant.

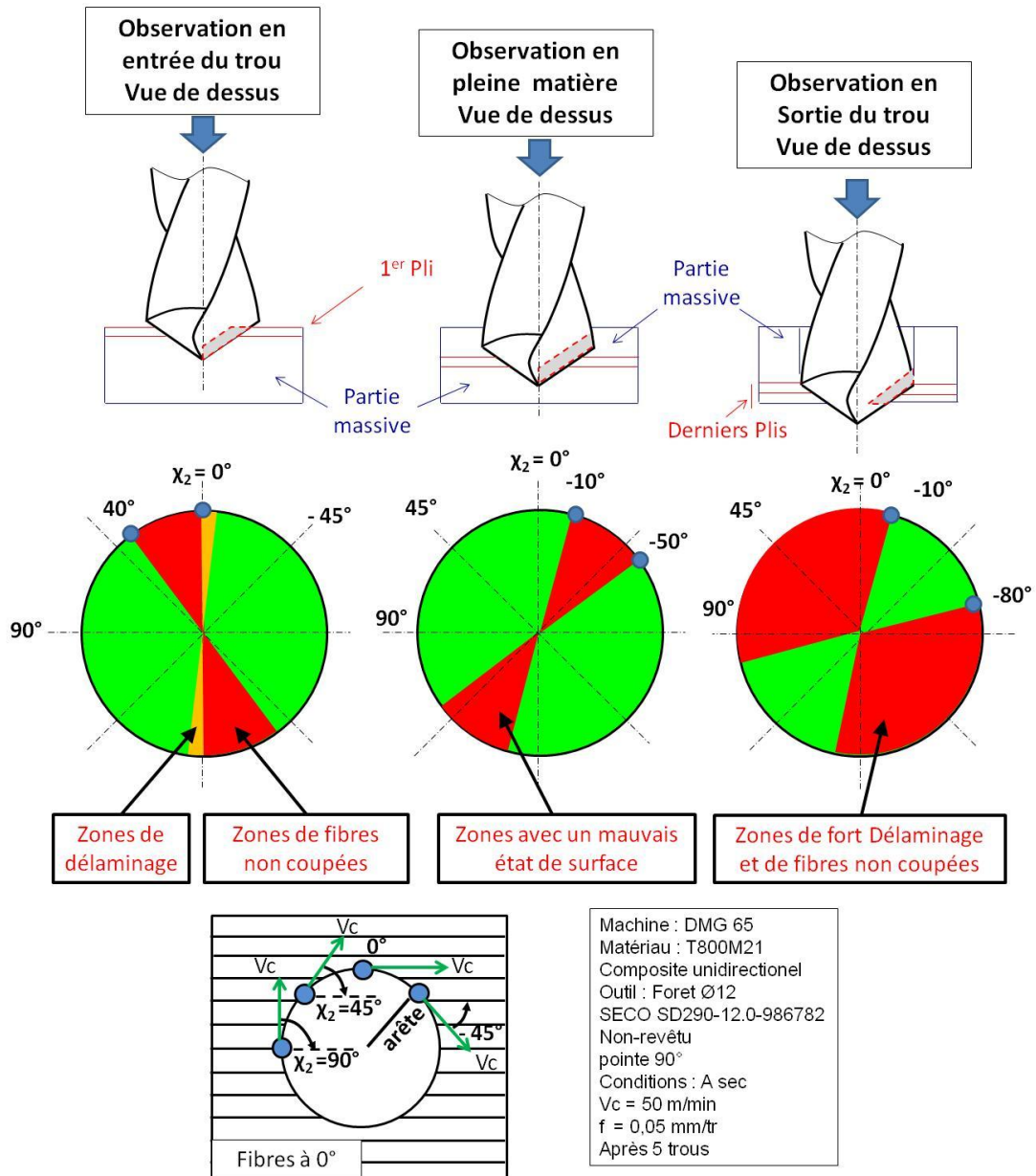


Figure 167 - Synthèse de la localisation des zones de défauts, en vue de dessus.

3. Analyse des modes de coupe des fibres

La coupe des composites met en jeu des mécanismes de coupe très différents de ceux observés dans la coupe des matériaux métalliques homogènes et isotropes. L'étude s'intéresse au comportement lors du perçage de plis orientés suivant une seule direction. Cette configuration permet d'appréhender plus facilement les phénomènes physiques. Un paramétrage de l'orientation de la fibre dans la zone de coupe est mis en place, suivant la notation de McKenzie [Mcke_60] pour identifier les modes de coupe (orientations de coupe) rencontrés en perçage. Un rappel de l'état des connaissances sur les mécanismes de séparation de la matière est proposé. Une corrélation entre les modes de coupe et les défauts observés dans l'étude expérimentale précédente est proposée.

3.1 Modes de coupe rencontrés en perçage

Le perçage est une opération de coupe rotative durant laquelle l'arête change en permanence de position par rapport à la fibre et à la direction supposée de coupe.

3.1.1 Convention choisie pour le paramétrage de l'orientation de la fibre

La notation de McKenzie [Mcke_60], couramment utilisée pour définir les différents modes de coupe dans les matériaux fibreux, utilise deux angles χ_1 et χ_2 pour positionner la fibre par rapport à la direction de coupe et par rapport à la direction de l'arête. Les définitions initiales manquent de précisions quant aux signes de ces angles. Suivant les conventions choisies par les auteurs, des contradictions peuvent apparaître.

En l'absence de norme, la convention suivante est proposée pour la suite du mémoire :

- χ_1 : Angle aigu, formé entre l'arête de coupe et la fibre
- χ_2 : Angle aigu, formé entre la direction supposée de coupe et la fibre, orienté positif vers le côté de l'enlèvement de matière

3.1.2 Identification des angles χ_1 et χ_2 en perçage

Deux angles doivent être identifiés pour définir complètement le mode de coupe rencontré à chaque nouvelle position angulaire de l'outil. L'angle χ_2 est facilement identifiable puisque la direction supposée de coupe (ou V_c) et les fibres sont contenues dans le plan Pr . Il est par contre plus difficile de définir χ_1 , à cause de la présence d'un angle d'orientation d'arête κ_r non nul. Comme le montre la Figure 168, la direction de l'arête et les fibres sont contenues dans un plan connu dans seulement deux modes.

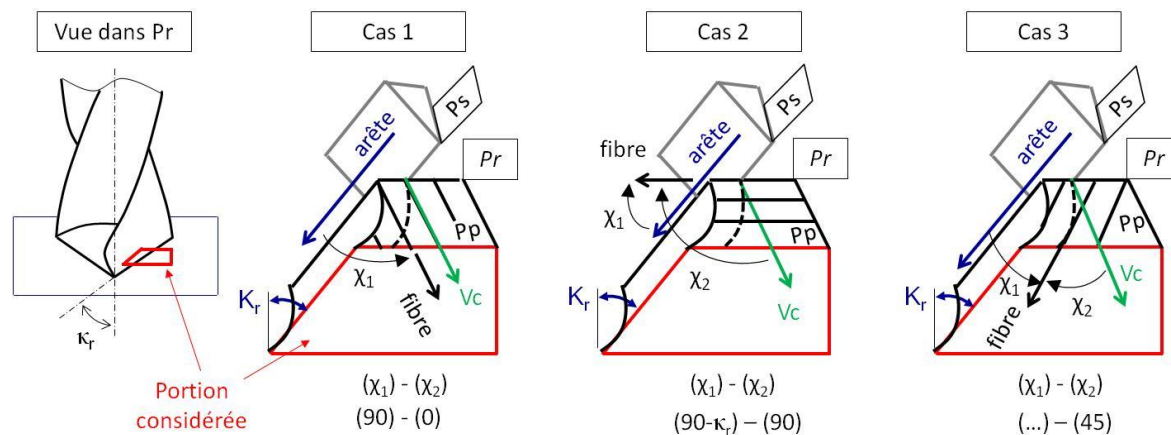


Figure 168 – Exemple de modes de coupe rencontrés en perçage

Dans le cas 1, l'angle χ_1 peut être mesuré dans le plan Ps ; c'est le mode de coupe 90-0. Dans le cas 2, le plan de mesure est Pp ; d'où le mode de coupe $(90 - \kappa_r) - 90$. Pour les autres modes, l'identification de l'angle χ_1 ne peut se faire autrement que par un paramétrage complet de la fibre dans la zone de coupe pour ensuite calculer le produit scalaire entre la direction de l'arête et la fibre.

3.1.2.1 Paramétrage de la zone de coupe

Le calcul de l'angle χ_1 nécessite un paramétrage complet de la zone de coupe, illustré sur la Figure 169.

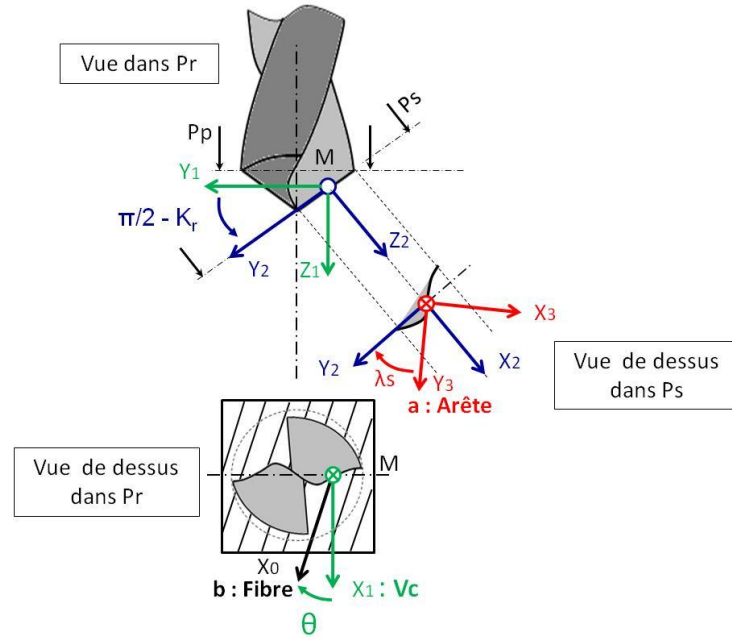


Figure 169 – Paramétrage complet de l'opération de perçage

Les vecteurs vitesse, fibre et arête sont respectivement notés V_c , b et a . Trois angles sont utilisés pour le paramétrage :

- θ : angle d'orientation des fibres, mesuré dans P_p entre la vitesse de coupe et la fibre
- κ_r : angle de direction d'arête, mesuré dans P_r entre P_s et P_f
- λ_s : angle d'inclinaison d'arête, mesuré dans P_s entre l'arête et P_r

Quatre repères sont mis en place :

- R_0 : lié à la fibre f , suivant X_0
- R_1 : lié à la vitesse de coupe V_c , suivant X_1
- R_2 : lié au vecteur arête, projeté dans P_r
- R_3 : lié à l'arête coupe a , suivant Y_3

Les changements de repère sont illustrés sur la Figure 170 :

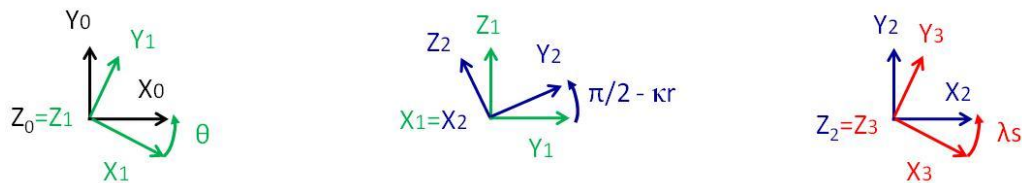


Figure 170 – Définition des repères

Les matrices de passage associées, notée respectivement $[R_1/R_0]$, $[R_2/R_1]$ et $[R_3/R_2]$ sont respectivement définies par les relations (26), (77) et (78).

$$[R_1/R_0] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (76)$$

$$[R_2/R_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left(\frac{\pi}{2} - \kappa_r\right) & \sin\left(\frac{\pi}{2} - \kappa_r\right) \\ 0 & -\sin\left(\frac{\pi}{2} - \kappa_r\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2} - \kappa_r\right) \end{bmatrix} \quad (77)$$

$$[R_3/R_2] = \begin{bmatrix} \cos(\lambda_s) & -\sin(\lambda_s) & 0 \\ \sin(\lambda_s) & \cos(\lambda_s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (78)$$

La matrice complète de changement de repère est définie par la relation (79).

$$[R_3/R_0] = [R_3/R_2][R_2/R_1][R_1/R_0] =$$

$$\left[\begin{array}{ccc} \cos(\theta).\cos(\lambda_s) - \sin(\theta).\cos\left(\frac{\pi}{2} - \kappa_r\right).\sin(\lambda_s) & -\sin(\theta).\cos(\lambda_s) - \cos(\theta).\cos\left(\frac{\pi}{2} - \kappa_r\right).\sin(\lambda_s) & 0 \\ \cos(\theta).\sin(\lambda_s) + \sin(\theta).\cos\left(\frac{\pi}{2} - \kappa_r\right).\cos(\lambda_s) & -\sin(\theta).\sin(\lambda_s) - \cos(\theta).\cos\left(\frac{\pi}{2} - \kappa_r\right).\cos(\lambda_s) & \sin\left(\frac{\pi}{2} - \kappa_r\right).\cos(\lambda_s) \\ -\sin(\theta).\sin\left(\frac{\pi}{2} - \kappa_r\right) & -\cos(\theta).\sin\left(\frac{\pi}{2} - \kappa_r\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2} - \kappa_r\right) \end{array} \right]_{R_3/R_0} \quad (79)$$

3.1.2.2 Calcul de χ_1

L'angle χ_1 est calculé par produit scalaire, exprimé par la relation (80).

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = \|\vec{a}\| \cdot \|\vec{b}\| \cdot \cos(\chi_1) = \cos(\chi_1) \quad (80)$$

$$\text{Avec : } (\vec{b})_{R_3} = [R_3/R_0] \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_{R_0} = \begin{bmatrix} \cos(\theta).\cos(\lambda_s) - \sin(\theta).\cos\left(\frac{\pi}{2} - \kappa_r\right).\sin(\lambda_s) \\ \cos(\theta).\sin(\lambda_s) + \sin(\theta).\cos\left(\frac{\pi}{2} - \kappa_r\right).\cos(\lambda_s) \\ -\sin(\theta).\sin\left(\frac{\pi}{2} - \kappa_r\right) \end{bmatrix} \quad (81)$$

Ce qui donne :

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cdot \cos(\lambda_s) - \sin(\theta) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \kappa_r\right) \cdot \sin(\lambda_s) \\ \cos(\theta) \cdot \sin(\lambda_s) + \sin(\theta) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \kappa_r\right) \cdot \cos(\lambda_s) \\ -\sin(\theta) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \kappa_r\right) \end{bmatrix} \quad (82)$$

$$= \cos(\theta) \cdot \sin(\lambda_s) + \sin(\theta) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \kappa_r\right) \cdot \cos(\lambda_s) = \cos(\chi_1)$$

D'où :

$$\chi_1 = \cos^{-1}\left(\cos(\theta) \cdot \sin(\lambda_s) + \sin(\theta) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \kappa_r\right) \cdot \cos(\lambda_s)\right)$$

3.1.2.3 Synthèse

L'évolution de l'angle χ_1 en fonction de l'angle χ_2 est présentée sur la Figure 171.

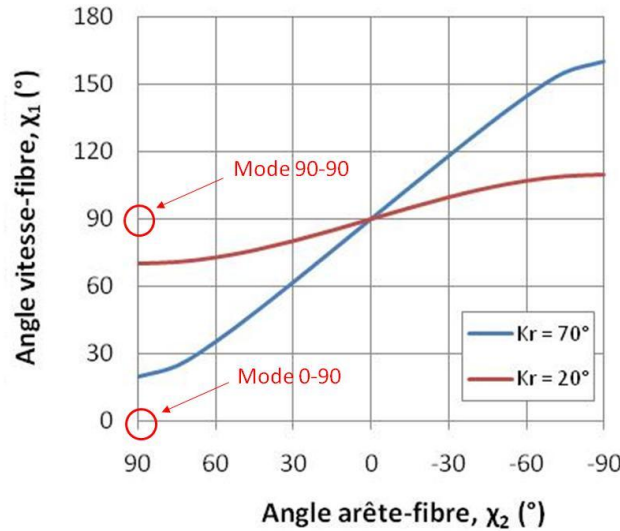


Figure 171 - Evolution continue des modes de coupe en perçage pour différents κ_r

Les modes de coupe changent pour chaque nouvelle position angulaire de l'outil. L'angle χ_1 mesuré entre la direction de l'arête de coupe et la fibre est fortement influencé par l'angle de direction d'arête κ_r . Deux cas sont présentés $\kappa_r = 70^\circ$ et $\kappa_r = 20^\circ$. En diminuant l'angle κ_r , il est possible de se rapprocher d'un mode de coupe 90-90, plus favorable à une coupe franche des fibres. En pratique, l'angle κ_r d'un foret ne peut pas être nul le long de l'arête. Par contre il vaut bien 90° sur les listels, mais la notion de coupe sur cette partie du foret est encore très discutée dans la littérature.

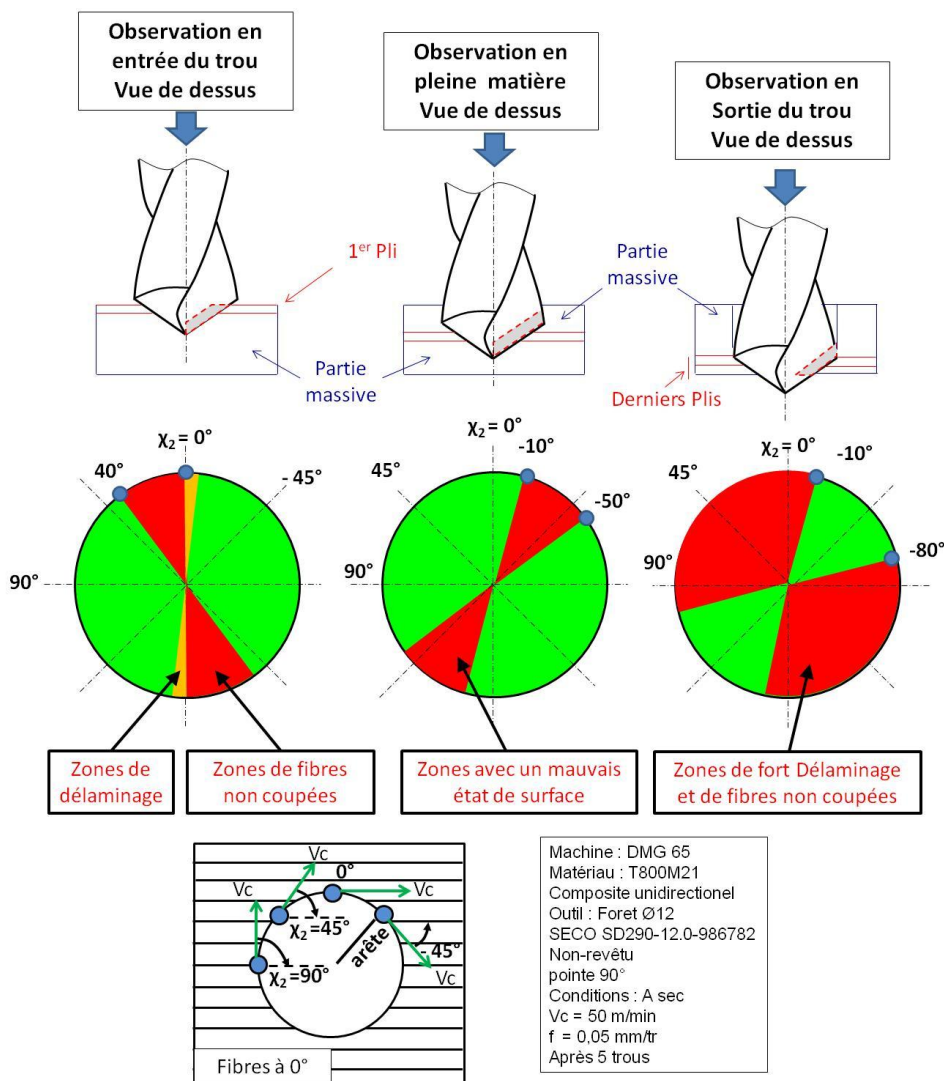
Remarque : par la suite une notation avec seulement l'angle χ_2 sera utilisée pour désigner plus simplement le mode de coupe rencontré.

3.2 Corrélation entre mode de coupe et défauts à l'échelle locale

Les différents modes de coupe (ou d'enlèvement de matière) rencontrés dans l'usinage des composites ont été répertoriés dans le chapitre 1. Il a été montré, dans le cas de la coupe orthogonale, que la position de la fibre par rapport à l'outil de coupe détermine l'ordre d'apparition des mécanismes de cisaillement de la fibre et de la matrice. Lors d'une opération de perçage, la position de la fibre par rapport à l'arête varie constamment. Les conditions aux limites (bords libre) changent au fur et à mesure de la pénétration de l'outil dans la matière (entrée, pleine matière, sortie). De plus, la géométrie complexe du foret ne permet pas de rester dans les conditions d'un état plan de déformation. Pour ces raisons, une étude spécifique au cas du perçage est proposée afin d'analyser les effets des différentes positions d'arête sur les mécanismes d'enlèvement de la matière et les défauts initiés.

3.2.1 Rappel des zones de défauts rencontrées

La Figure 172 synthétise l'étendue et la nature des défauts, pour les conditions de perçage vues précédemment sur un **composite unidirectionnel**.



Les conditions de maintien des plis sont très différentes et auront un impact sur l'ordre des mécanismes de coupe :

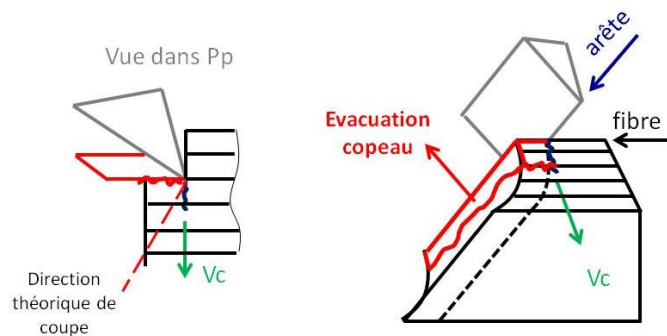
- en entrée du trou : le 1er pli supérieur de la pièce est en appui sur la partie massive de la pièce située au dessous. Seule la cohésion fibre/matrice assure son maintien lors de sollicitations orientées vers le haut
- pleine matière : les plis sont maintenus à la fois par une partie massive située au dessous et au dessus
- en sortie de trou : les derniers plis sont maintenus par la partie massive située au dessus. Seule la cohésion fibre/matrice permet d'assurer sa tenue lors de sollicitations orientées vers le bas

Aux vue des constatations expérimentales de la Figure 172, les mécanismes d'enlèvement de matière sont analysés pour les six modes de coupe suivant :

- Mode de coupe $\chi_2 = 90^\circ$
- Mode de coupe $\chi_2 = 45^\circ$
- Mode de coupe $\chi_2 = 0^\circ + \Delta$, avec $0^\circ < \chi_2 < 45^\circ$
- Mode de coupe $\chi_2 = 0^\circ$
- Mode de coupe $\chi_2 = 0^\circ - \Delta$, avec $-45^\circ < \chi_2 < 0^\circ$
- Mode de coupe $\chi_2 = -45^\circ$

3.2.2 Mode de coupe 90°

Ce mode est illustré sur la Figure 173 :



(...)- (90)

Figure 173 - Mode de coupe 90°

L'ordre des mécanismes de coupe est le suivant :

- 1 / Cisaillement de la fibre (ou d'un ensemble fibre/matrice), suivant une direction comprise entre la direction théorique, définie dans le chapitre bibliographique comme étant la résultante de l'action mécanique de la face de coupe sur la pièce, et la direction de moindre résistance, c'est à dire perpendiculairement aux fibres.
- 2 / Cisaillement de la matrice, le long des fibres suivant un mode II sous l'action de la face de coupe (goujure).

- 3 / Fragmentation de la matière, du côté du copeau, suite à la propagation de la fissure vers la paroi libre de la pièce

Ce mode de coupe est globalement favorable à la coupe des fibres en entrée du trou et en pleine matière. Même si elle peut induire un défaut de fléchissement des fibres à l'échelle micro, vu sur la Figure 152, le risque de refus de coupe est faible. Une coupe franche des fibres est assurée, même lorsque l'arête perd en acuité. Le phénomène de délaminage observé en sortie, présenté précédemment sur la Figure 172, est donc surprenant. Les conditions aux limites modifient le comportement des fibres à la coupe. Les niveaux d'effort locaux générés par ce mode de coupe doivent être analysés pour expliquer le phénomène de décohésion entre les fibres et la matrice.

3.2.3 Mode de coupe 45°

Ce mode est illustré sur la Figure 174 :

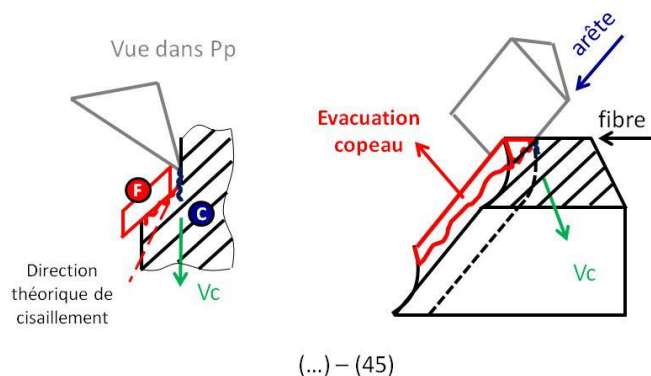


Figure 174 - Mode de coupe 45°

L'ordre des mécanismes de coupe est le suivant :

- 1 / Cisaillement de la fibre, suivant une direction difficile à définir car la fibre est pratiquement parallèle à la direction théorique de cisaillement. Or, les observations faites sur les aspects de surface de la paroi, présentés précédemment sur la Figure 165, ont montré un état de surface similaire pour les orientations 90° et 45°. Il semble donc que la direction de cisaillement des fibres reste colinéaire à la vitesse
- 2 / Cisaillement de la matrice le long des fibres à 45°. La direction de propagation de la fissure est ici très proche de la direction théorique des efforts de coupe, ce qui facilite la formation du copeau.
- 3 / Fragmentation de la matière du côté du copeau, suite à la propagation de la fissure vers le bord intérieur libre de la pièce

Ce mode de coupe reste encore favorable à la coupe des fibres, exception faite de la sortie, pour les mêmes raisons que pour le mode précédent. Une coupe franche est assurée en entrée et en pleine matière, sous réserve d'une bonne acuité d'arête. Dans le cas contraire, les fibres plongent sous l'arête et se comportent comme le mode 0+Δ développé dans le paragraphe suivant.

3.2.4 Mode de coupe $0^\circ + \Delta$

Un mode nommé $0^\circ + \Delta$, illustré sur la Figure 175 est défini pour étudier le comportement des fibres s'approchant du mode 0°

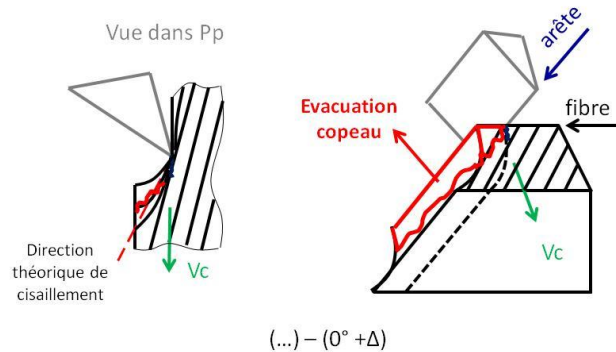


Figure 175 - Mode de coupe $0^\circ + \Delta$

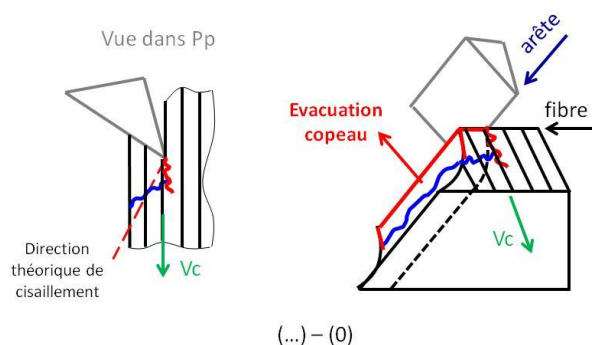
L'ordre des mécanismes de coupe est le suivant :

- 1 / Cisaillement des fibres suivant une direction de cisaillement qui n'a ici pas de sens. Les fibres sont comprimées les unes sur les autres avant de rompre par écrasement (ou pincement) sous l'arête. Une partie des fibres peuvent ne pas céder si l'ensemble fibre/matière comprimé est libre de se déformer suivant une autre direction ; ce qui est le cas en entrée et en sortie de trou, comme le montre la Figure 26. En effet, le premier et le dernier pli peuvent se déformer suivant une direction normale au plan des fibres. Il se désolidarise en partie de la pièce et échappe ainsi à la coupe. En pleine matière, les fibres n'ont pas la possibilité de refuser la coupe. Elles sont maintenues au-dessus et au-dessous par des parties massives qui empêchent toutes déformations autres que dans le plan des fibres. Néanmoins, l'épaisseur de coupe doit être suffisamment importante pour éviter que les fibres ne plongent sous l'arête sans subir l'action de pincement.
- 2 / Cisaillement de la matrice le long des fibres
- 3 / Fragmentation de la partie restante de matière en direction du copeau

Ce mode de coupe est très défavorable car il génère des défauts importants en entrée et en sortie de trou. Lorsque l'acuité d'arête se dégrade, les phénomènes de refus de coupe apparaissent de plus en plus tôt angulairement, Δ augmente. L'étude expérimentale a montré que ce mode de formation du copeau pouvait apparaître dès l'orientation à 40° en entrée de trou.

3.2.5 Mode de coupe 0°

Ce mode est illustré sur la figure Figure 176 :



(...)-(0)

Figure 176 - Mode de coupe 0°

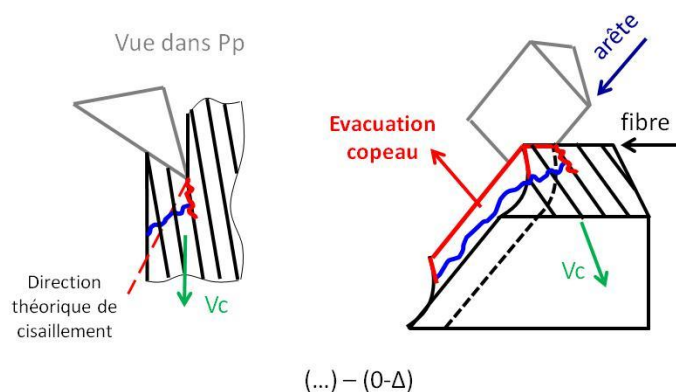
L'ordre des mécanismes de coupe est le suivant :

- 1 / Cisaillement de la matrice en mode I le long des fibres. L'outil agit ici comme un « coin » ; c'est le fendage, suivant les termes utilisés dans la coupe du bois
- 2 / Cisaillement des fibres, sous l'action de la face de coupe, qui crée une torsion du copeau et le cisaille perpendiculairement aux fibres
- 3 / Fragmentation de la matière du côté de la pièce, suivant une direction tangente au bord du trou. Le copeau peut ne pas se détacher et rester solidaire de la pièce

Ce mode de coupe est très défavorable. Un écaillage apparaît en entrée et en sortie. La coupe se fait par fissuration ; il est ainsi très difficile d'en maîtriser la propagation de l'ouverture du premier pli en surface. La présence d'un pli de verre permet de renforcer les propriétés mécaniques dans le sens transversal et ainsi de contenir la fissure, pour basculer plus rapidement dans le mécanisme de cisaillement des fibres.

3.2.6 Mode de coupe $0-\Delta$

Un mode nommé $0-\Delta$, illustré sur la Figure 177, est défini pour étudier le comportement des fibres s'éloignant du mode 0° .



(...)-(0-Δ)

Figure 177 - Mode de coupe $0^\circ-\Delta$

L'ordre des mécanismes de coupe est le suivant :

- 1 / Cisaillement de la matrice en mode I, qui se propage le long des fibres et pénètre donc sous la future surface de la paroi
- 2 / Cisaillement des fibres sous l'action de la face de coupe qui crée une torsion du copeau et cisaille les fibres dans leur sens travers
- 3 / Fragmentation d'une petite portion de matière appartenant à la pièce finie. Le copeau peut ne pas se détacher et rester solidaire de la pièce si la fissure est importante.

Ce mode de coupe est plutôt défavorable. Les défauts géométriques du trou, d'état de surface et délaminage augmentent si la fissure, du côté de la pièce finie, n'est pas rapidement contenue par la partie massive. L'orientation des fibres permet à l'outil de s'engager sous la matière et de tirer les fibres avant la coupe. Une perte d'acuité d'arête ne modifie que légèrement ce comportement. L'étude expérimentale a montré que ces mécanismes de formation du copeau pouvaient se déplacer angulairement, mais ne dépassaient pas l'orientation à 10° .

3.2.7 Mode de coupe -45°

Ce mode est illustré sur la figure Figure 178 :

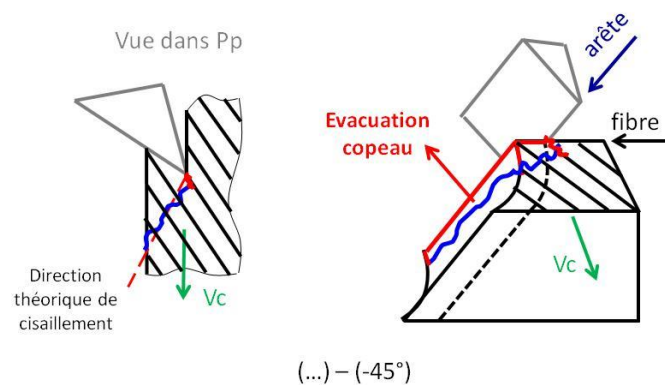


Figure 178 - Mode de coupe -45°

L'ordre des mécanismes de coupe est le suivant :

- 1 / Cisaillement de la matrice suivant un mode I. La fissure se propage en profondeur si elle n'est pas rapidement contenue par la partie massive de la pièce.
- 2 / Cisaillement de la fibre suivant la direction de coupe théorique, qui dans ce cas est perpendiculaire aux fibres.
- 3 - Fragmentation d'une portion de matière appartenant à la pièce finie.

Il est difficile de dire si ce mode de coupe est favorable ou non. La coupe des fibres est franche, le risque d'écaillage est très faible. Par contre, la qualité géométrique du trou et l'état de surface de la paroi sont fortement dégradés. La surface obtenue, illustrée précédemment sur la Figure 165, présente un aspect très rugueux du fait de l'arrachement de matière.

3.2.8 Synthèse

Ce premier niveau d'analyse des modes de coupe permet de faire une bonne corrélation entre les modes de coupe et les défauts générés :

- en entrée du trou : l'analyse confirme l'existence de zones potentiellement à risque pour les positions d'arête aux abords des modes $0^\circ+\Delta$, 0° et $0^\circ-\Delta$. Elle a également justifiée qu'une perte d'acuité d'arête déplace le mode $0^\circ+\Delta$ en direction du mode 45° et augmente ainsi les refus de coupe dans cette zone
- en pleine matière : l'analyse menée permet d'expliquer les différents aspects de surface observés sur la paroi du trou. Il est intéressant de constater qu'une coupe franche des fibres, c'est-à-dire sans refus de coupe, n'est pas forcément corrélée à un bon état de surface de la paroi.
- en sortie du trou : les travaux menés ici ne permettent pas d'expliquer pourquoi le phénomène de délaminage apparaît aussi tôt angulairement, soit dès 90° . La notion d'effort doit être prise en compte pour appréhender les mécanismes de décohésion fibre/matrice en sortie du trou.

4. Analyse des efforts de coupe

Les différentes séquences et mécanismes de coupe mis en évidence précédemment ont une forte répercussion sur les efforts. Un signal mesuré lors du perçage d'un **composite unidirectionnel**, où tous les plis sont orientés suivant une seule et même direction, est représenté sur la Figure 179.

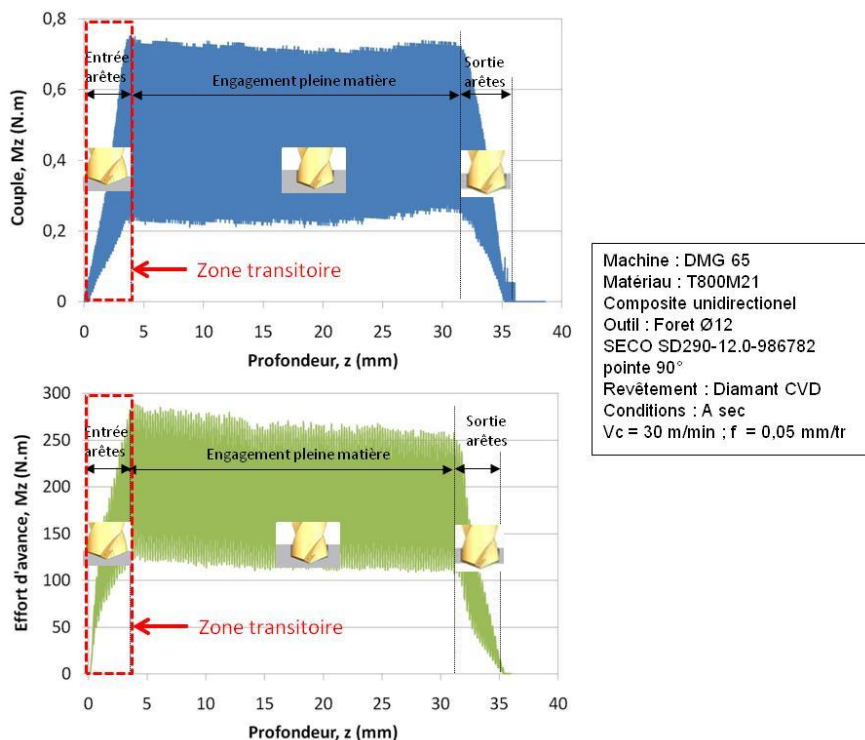


Figure 179 - Couple mesuré lors du perçage d'un composite unidirectionnel

Une méthode est proposée pour récupérer la contribution locale par portion d'arête, suivant l'orientation instantanée des fibres à couper. Ces efforts sont ensuite corrélés avec les différents modes de coupe, afin d'améliorer la compréhension des phénomènes à l'échelle locale. Enfin, à partir de ces données locales élémentaires, la reconstruction du comportement en perçage d'un composite multidirectionnel est proposée pour comprendre l'effet des arrangements des plis sur le risque d'écaillage en sortie.

4.1 Analyse à l'échelle locale

Il s'agit ici de récupérer la contribution locale par portion d'arête à partir de la mesure de l'effort cumulé dans la zone transitoire, précédemment illustrée sur la Figure 179. La méthode proposée peut s'appliquer aussi bien sur l'effort d'avance que sur le couple mesuré. Elle se déroule en 3 étapes :

- Décomposition du signal, pour séparer les effets du 1^{er} ordre et du 2^{ème} ordre, liés aux modes de coupe des fibres rencontrés.
- Discrétisation par portions d'arêtes, pour récupérer la contribution élémentaire de chacun des efforts, du 1^{er} ordre et du 2^{ème} ordre
- Calcul de la contribution locale en fonction de la position des fibres par rapport à l'arête

4.1.1 Application de la démarche locale sur le couple

4.1.1.1 1^{ère} étape : Dissocier l'effet des modes de coupe

Les signaux d'efforts sont composés de signaux basses fréquences inférieurs à 10 Hz qui permettent de suivre l'élévation continue du couple durant l'engagement progressif de l'arête : c'est le signal dit de 1^{er} ordre. Ils sont également composés de signaux hautes fréquences supérieurs à 10 Hz qui permettent d'identifier les effets des différents modes de coupe rencontrés : c'est le signal dit de 2^{ème} ordre. La démarche utilise la zone d'entrée progressive de l'arête, précédemment illustrée sur la Figure 179, pour identifier les contributions locales. Le traitement du signal permettant de dissocier les contributions de 1^{er} et 2^{ème} ordre du couple, est illustré sur la Figure 180.

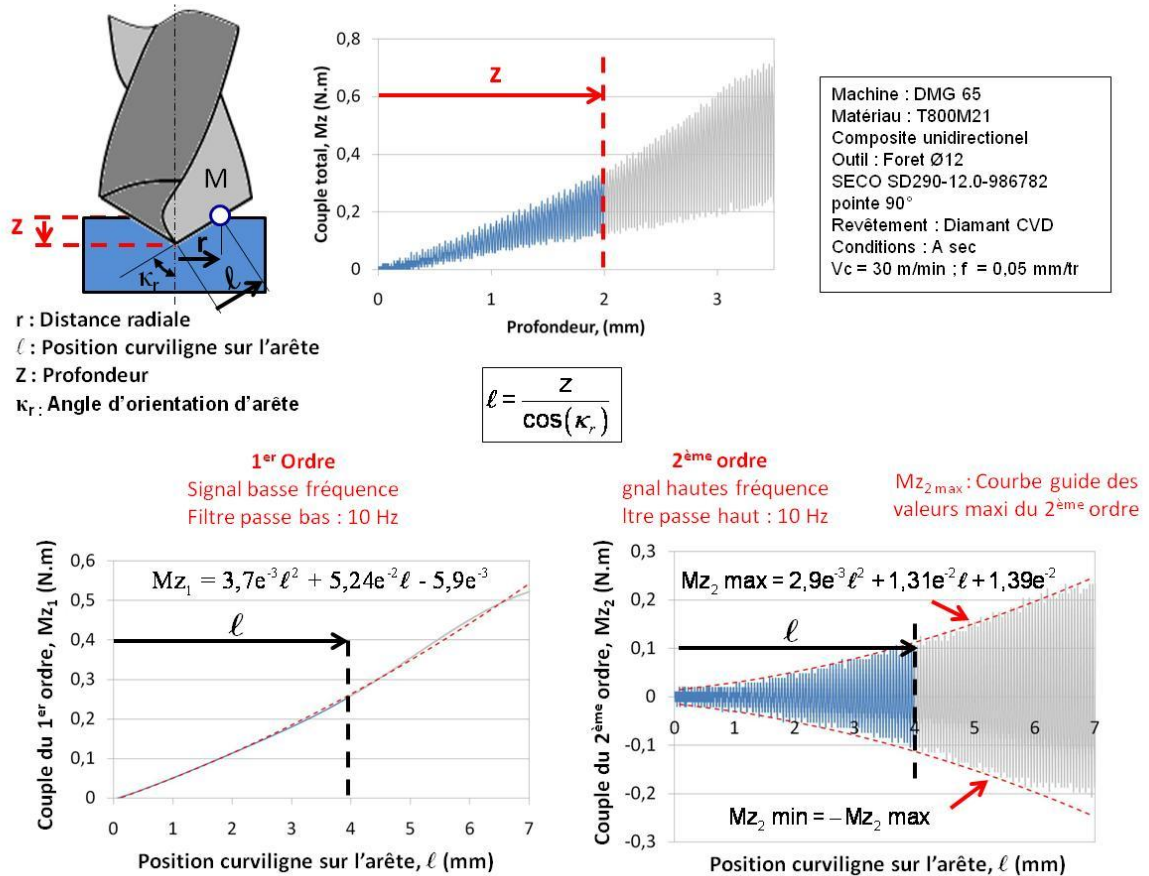


Figure 180 – Traitement du signal du couple Mz

Le couple du 1^{er} ordre peut-être modélisé par un polynôme de degré 2, comme l’a montré Claudin [Clau_06] dans ses travaux sur le couple arête-matière. Le couple du 2^{ème} ordre est lui centré autour de 0. Il est constitué d’oscillations qui augmentent au fur et à mesure de l’engagement progressif de l’arête. Cette tendance est modélisée par des courbes guides polynomiales de degré 2. L’amplitude des oscillations observées sur le signal du couple dépend également de la position angulaire de la fibre : elles sont périodiques sur π , comme le montre la Figure 181.

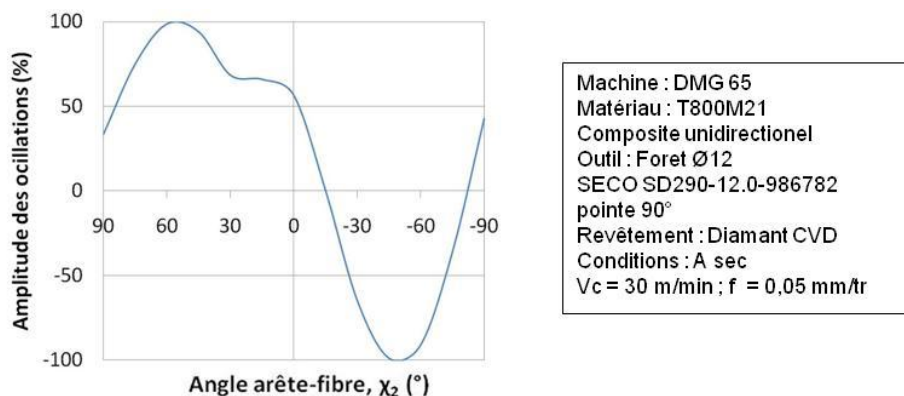


Figure 181 – Motif des oscillations du 2^{ème} ordre sur le couple, extrait à $\ell = 4$ mm

Le signal est quasi-sinusoïdal ; il présente un incident entre 60 et 0°, qui a été confirmé après plusieurs répétitions. Le phénomène sera expliqué dans la suite de l’étude. Le calage angulaire de l’effort en fonction de l’orientation des fibres nécessite l’utilisation

d'un système de comptage par impulsion. Un signal est émis à chaque tour de l'outil. La fréquence d'acquisition doit être très supérieure à la fréquence de rotation de l'outil, afin de détecter avec précision le front montant de l'impulsion. Dans l'exemple considéré, la fréquence de rotation de l'outil est de 44 Hz pour une acquisition à 10 000 Hz, soit une précision angulaire de 1,6°.

4.1.1.2 2^{ème} étape : Discrétiser par portions d'arête

Le passage de la contribution cumulée le long de l'arête à une contribution discrète par portions d'arête se fait par la méthode du couple arête matière (CAM). En admettant les hypothèses de linéarité et d'indépendance des éléments de matière voisine, il est possible d'extraire la participation d'une portion d'arête par soustraction des effets de l'élément précédent. Les signaux modélisés aux 1^{er} et 2^{ème} ordres sont dérivés pour obtenir une répartition linéique. L'effort linéique (ou élémentaire) de coupe, sur une dent le long de l'arête, est donné par la relation (1) et illustré sur la Figure 182.

$$dF_c = \frac{1}{z.r} \cdot \frac{dM_z}{d\ell} \tag{1}$$

- dF_c : Effort de coupe linéique (N/mm)
- z : Nombre de dents
- r : Position radiale (mm)
- M_z : couple au point considéré sur l'arête(N.mm)
- dℓ : Portion curviligne sur le long de l'arête (mm)

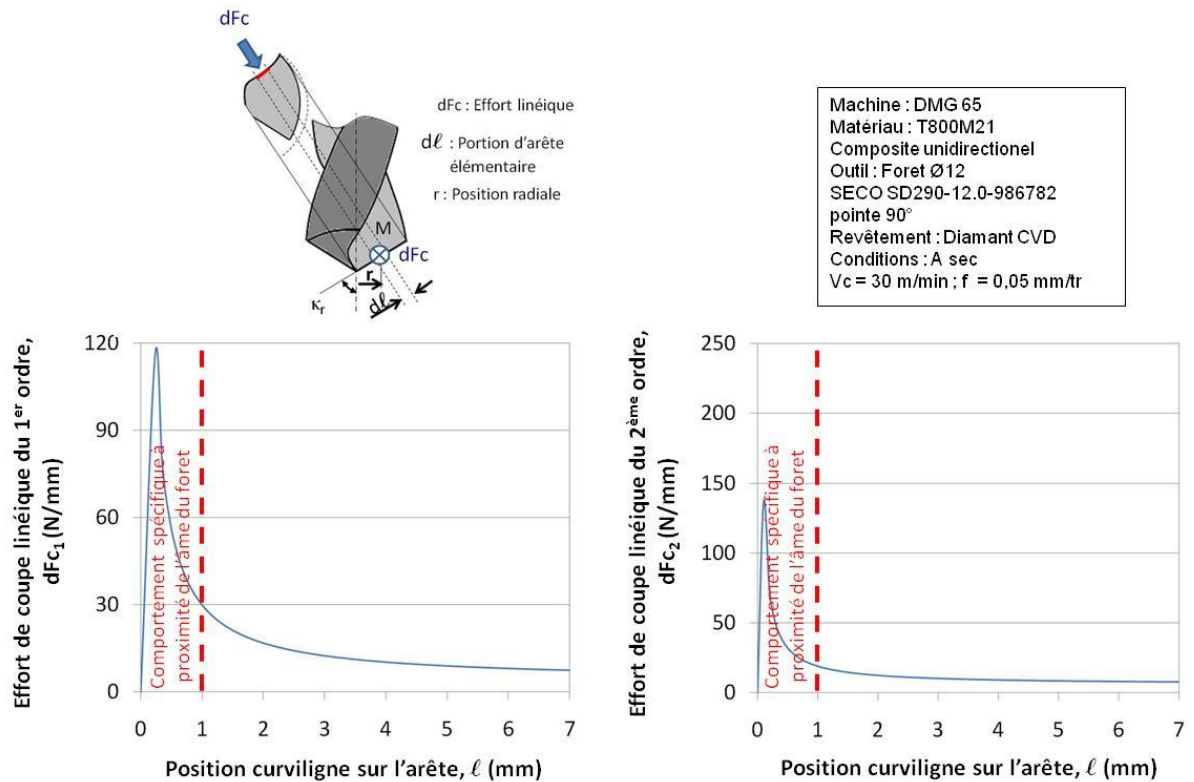


Figure 182 – Répartition de l'effort de coupe linéique le long de l'arête

4.1.1.3 3^{ème} étape : Calculer la contribution locale

La contribution locale s'obtient à partir des efforts linéiques et du motif des oscillations. La Figure 183 illustre les opérations de calcul devant être réalisées.

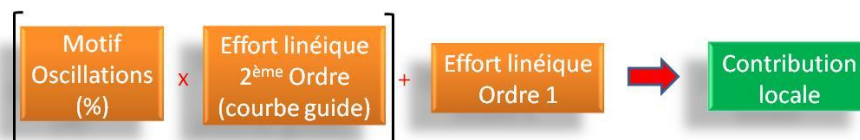


Figure 183 – Méthode de calcul de la contribution locale

Pour chaque position radiale le long de l'arête, le motif des oscillations est multiplié par l'effort linéique d'ordre 2, afin d'en obtenir l'amplitude correspondante. Puis l'effort linéique d'ordre 1 est ajouté pour centrer les oscillations autour du niveau d'effort « moyen » consommé par cette portion d'arête. La Figure 184 montre l'évolution de l'effort linéique de coupe à la position $\ell = 4$ mm sur l'arête, pour différentes orientations de fibres vues sur un demi-tour.

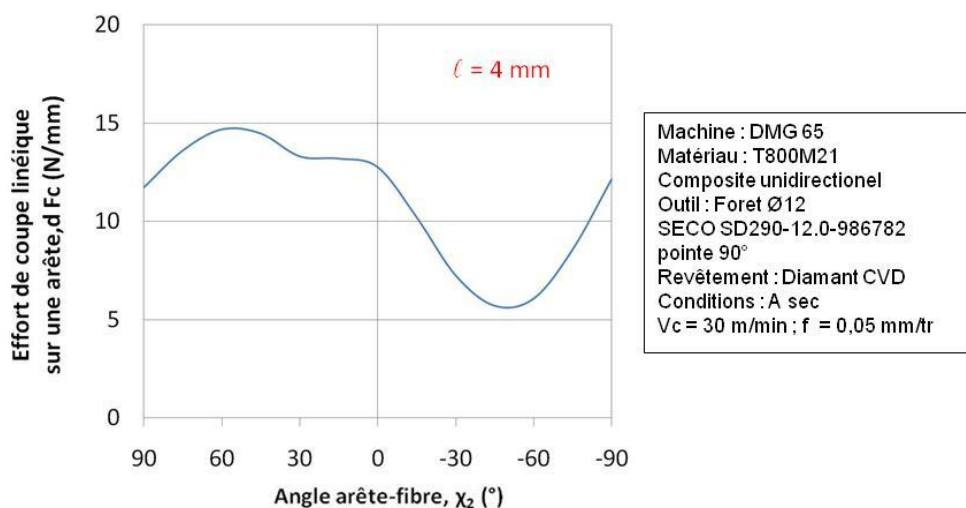


Figure 184 – Motif des oscillations d'ordre 2 de l'effort de coupe, extrait à $\ell = 4$ mm

4.1.2 Application de la démarche locale sur l'effort d'avance

La démarche est appliquée à l'identique à l'effort d'avance. Le signal est dans un premier temps dissocié suivant les contributions du 1^{er} et 2^{ème} ordre, comme illustré sur la Figure 180.

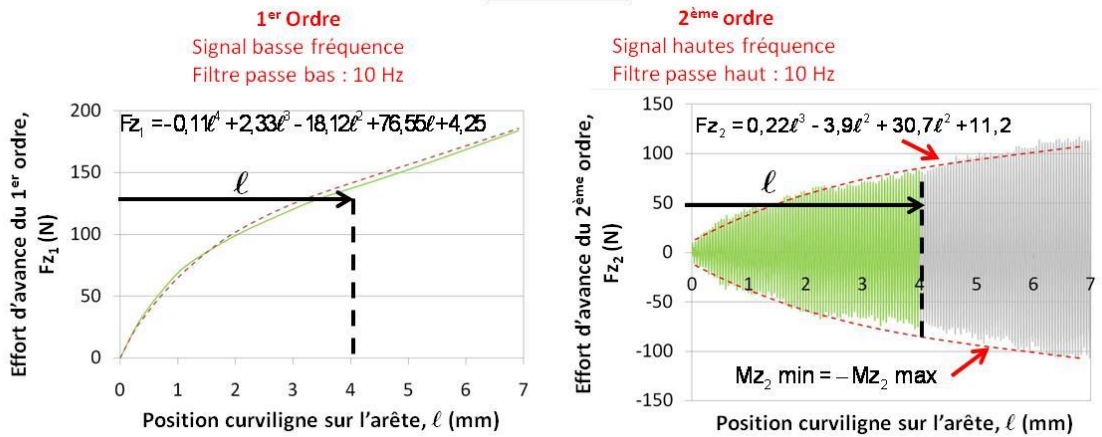
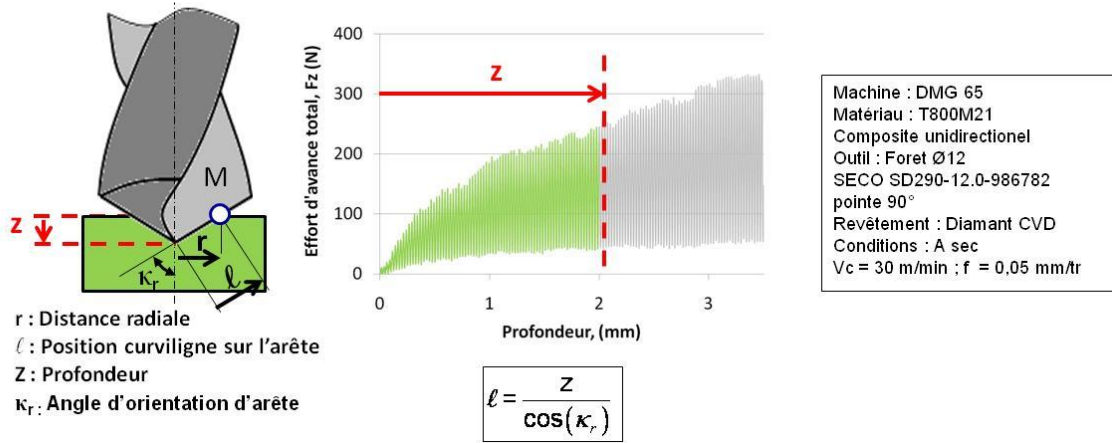


Figure 185 – Traitement du signal de l'effort d'avance

L'effort d'avance du 1^{er} ordre est modélisé par un polynôme de degré 4, comme l'ont montré les travaux de Claudin [Clau_06]. L'effort d'avance du 2^{ème} ordre est lui modélisé par des courbes guide de degré 3 et un motif d'oscillations présenté sur la Figure 186.

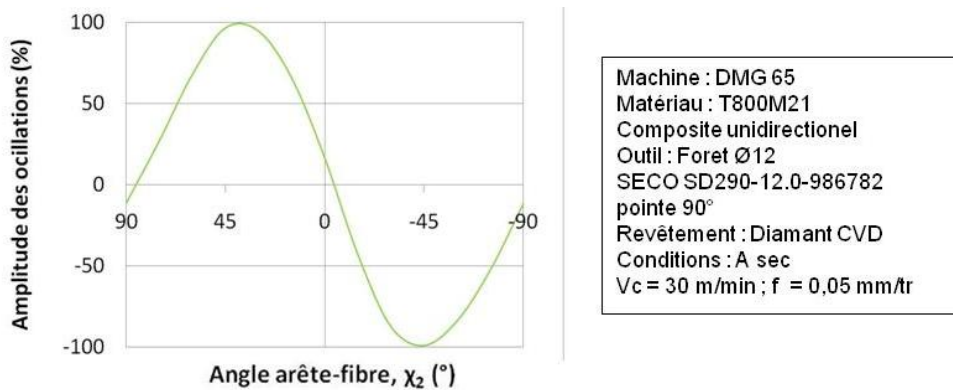


Figure 186 – Motif des oscillations d'ordre 2 de l'effort d'avance, extrait à $l = 4$ mm

L'effort linéique d'avance le long de l'arête, donné par la relation (2), est présenté sur la Figure 187.

$$dF_z = \frac{1}{z} \cdot \frac{dF_z}{dl} \tag{2}$$

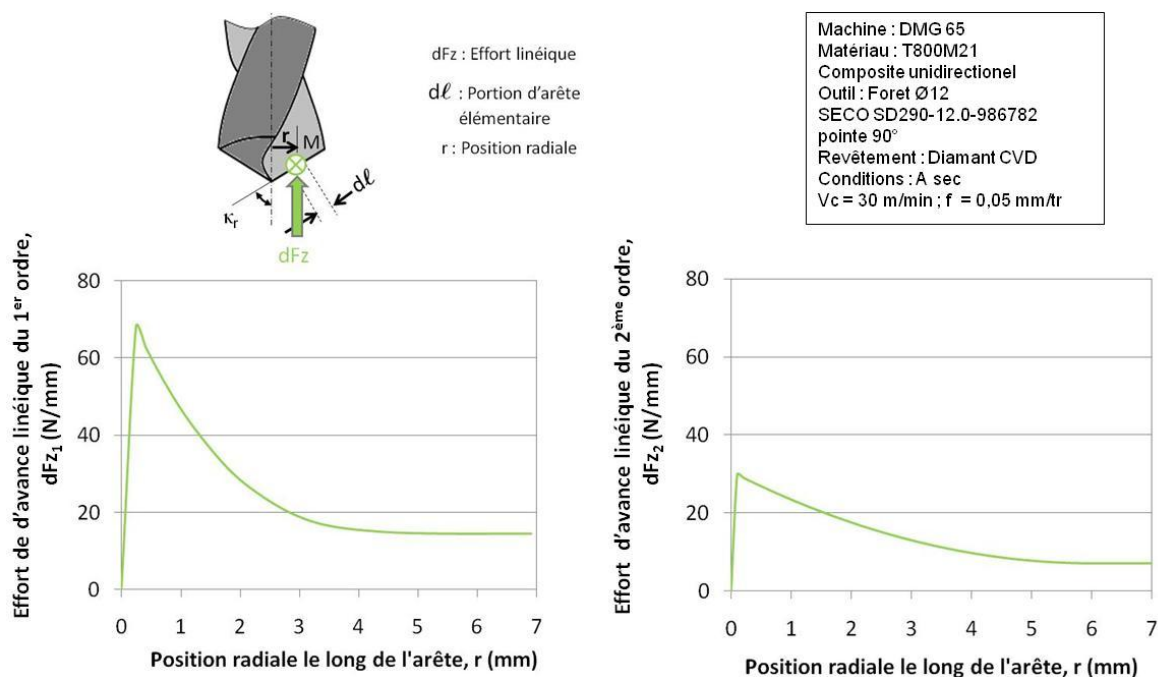


Figure 187 – Répartition de l'effort d'avance linéique le long de l'arête

Enfin, la Figure 188 montre l'évolution de l'effort linéique d'avance pour différentes orientations de fibres vues sur un demi-tour, à la position $\ell = 4$ mm sur l'arête.

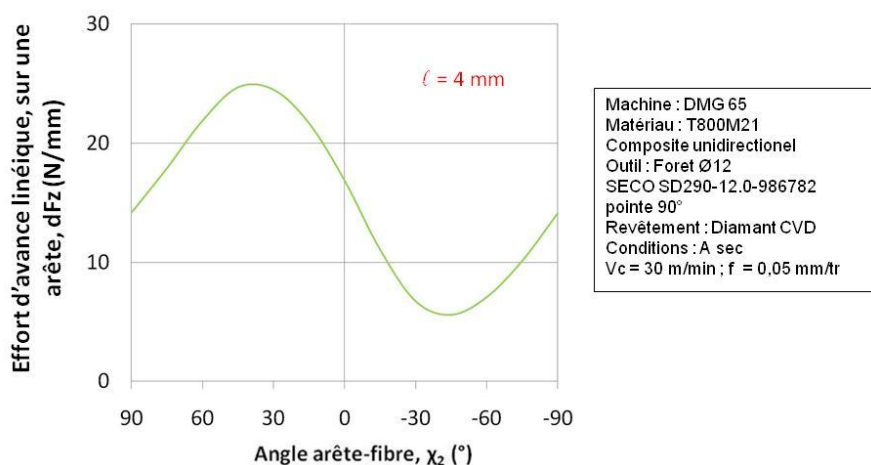


Figure 188 - Evolution de l'effort d'avance linéiques, à la position $\ell = 4$ mm

4.2 Interprétation des niveaux d'efforts locaux

4.2.1 Corrélation entre efforts locaux et modes de coupe

Les efforts de coupe et d'avance varient en fonction des modes de coupe rencontrés, comme le montre la Figure 189 :

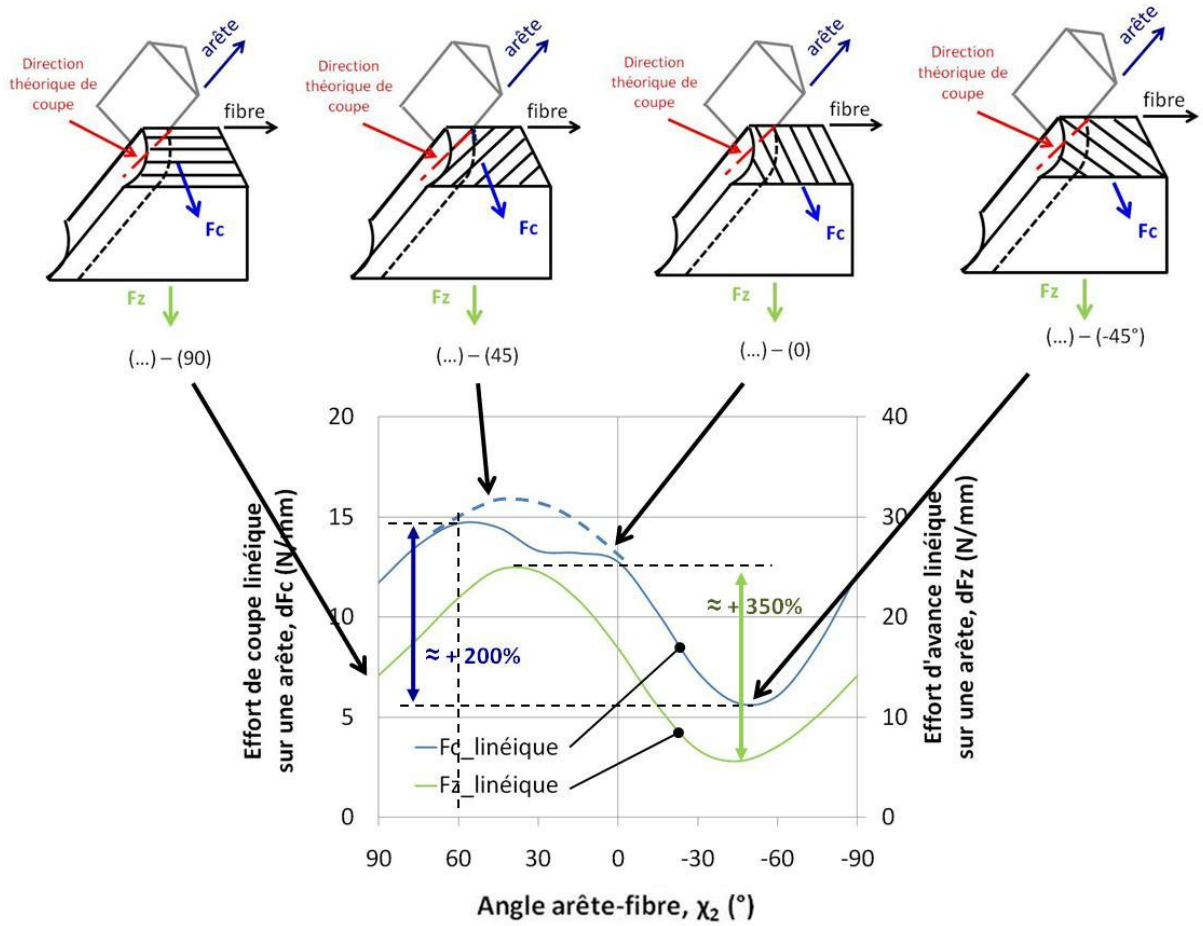


Figure 189 - Evolution des efforts en fonction des modes de coupe rencontrés

Les deux signaux sont en phase et présentent une allure générale de type sinusoïdale. Seul l'effort de coupe présente un changement de comportement entre les modes de coupe 60° et 0° . Les niveaux d'effort sont au plus bas à proximité du mode de coupe -45° . Dans ce mode, la fibre semble rencontrer une direction privilégiée de cisaillement. La fibre est ici perpendiculaire à la notion de « direction théorique de coupe » générée par l'outil au contact de la pièce. Durant les modes de coupe -45° à -90° , puis 90° à 60° , la fibre s'éloigne de cette direction privilégiée et devient plus difficile à couper. Dans l'exemple illustré sur la Figure 189, l'effort linéique de coupe augmente de 200%, tandis que dans le même temps l'effort linéique d'avance subit une élévation de 350%. Entre 60° et 0° , l'effort de coupe linéique change d'évolution. Il commence par diminuer puis se stabiliser, alors que l'effort linéique d'avance est maximal à 45° . Dans cette zone, la fibre s'oriente suivant la direction théorique de coupe, au bénéfice de la matrice qui se fissure d'autant plus facilement dans ce mode. La rencontre du mode 0° maintient une opposition importante à la coupe, tandis que la sollicitation axiale de l'outil diminue. Entre 0° et -45° , la chute de l'effort de coupe et de l'effort d'avance est très rapide. Les modes de coupe rencontrés sur cette plage tendent à orienter la fibre dans sa direction de coupe privilégiée.

4.2.2 Corrélation entre efforts locaux et défauts en sortie

L'effort d'avance linéique exercé par l'outil sur la pièce peut être corrélé avec les défauts observés en sortie trou, comme illustré sur la Figure 190.

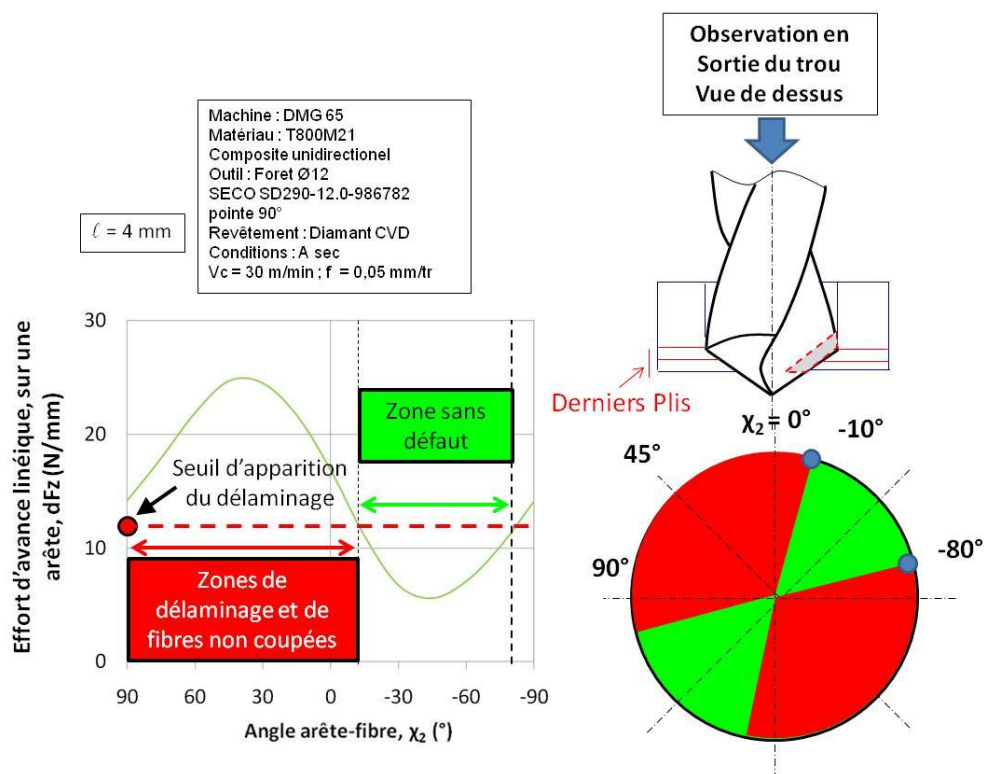


Figure 190 – Corrélation entre l'effort d'avance linéique et les défauts en sortie du trou

La zone sans défaut, observée expérimentalement sur le trou entre $\chi_2 = -10^\circ$ et $\chi_2 = 90^\circ$, correspond à la plage de positions angulaires de l'arête pour laquelle l'effort d'avance est minimal. Il y a une bonne corrélation entre les efforts locaux et l'apparition des défauts à l'échelle locale. Les sollicitations mécaniques exercées sur l'arête au fond du trou sont ici inférieures au seuil d'apparition du délaminage. Le dernier pli est donc parfaitement maintenu au reste de la pièce. La cohésion entre les fibres et la matrice en sortie du trou n'est plus assurée si ce niveau est dépassé. Dans certains cas, il peut arriver que l'effort d'avance soit en permanence au-dessus du seuil de délaminage. Dans ce cas, le défaut est présent sur tout le pourtour du trou.

4.3 Comportement d'un composite multidirectionnel

Le perçage d'un composite multidirectionnel fait apparaître des oscillations irrégulières, illustrées sur la Figure 191.

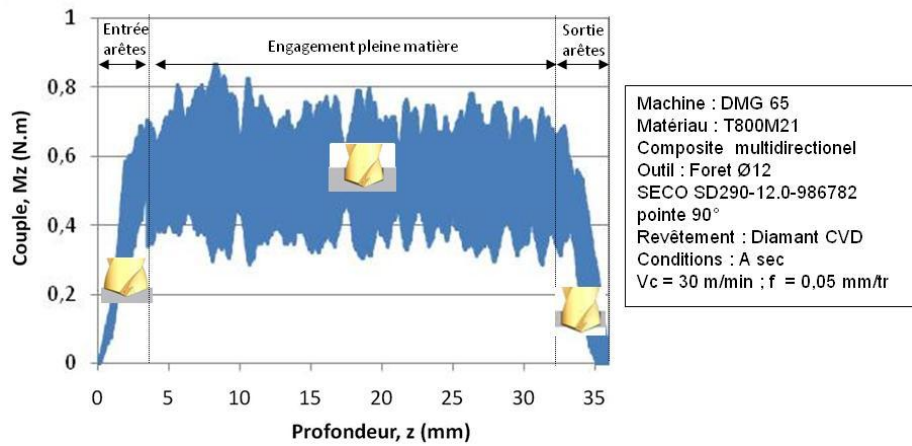


Figure 191 - Couple mesuré lors du perçage d'un composite multidirectionnel

Le comportement varie en fonction de l'arrangement des plis. A partir de l'étude locale menée précédemment sur la coupe d'un pli, il est possible de reconstruire le signal complet du perçage d'un composite multidirectionnel et d'identifier les arrangements responsables des changements d'oscillations. Une reconstruction du chargement mécanique local sur l'arête est également proposée.

4.3.1 Méthode de reconstruction des efforts

Le principe de la méthode est schématisé sur la Figure 192

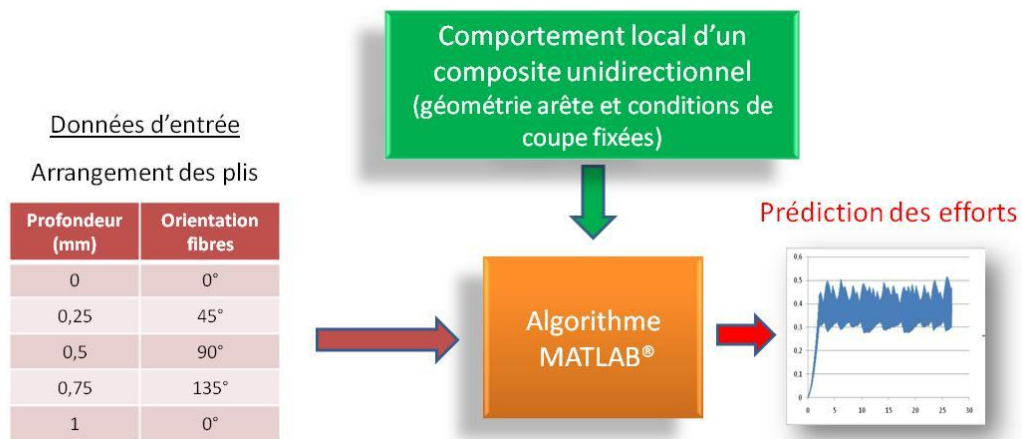


Figure 192 - Principe de la reconstruction du comportement d'un composite multidirectionnel

Les données d'entrées sont les suivantes :

- Evolution de l'orientation des plis dans l'épaisseur de la plaque
- Evolution de l'effort de coupe linéique en fonction de l'orientation des fibres et de la position le long de l'arête, fournie par le perçage d'un composite unidirectionnel et la démarche de traitement proposée précédemment.

Le traitement des données en chaque instant est le suivant :

- Détermination des plis engagés sur l'arête
- Détermination de l'orientation locale des fibres par portion d'arête
- Affectation des niveaux des efforts linéiques pour chaque portion d'arête

Les données de sortie sont les suivantes :

- Evolution temporelle du couple et de l'effort d'avance durant le perçage
- Evolution temporelle des efforts linéiques de coupe et d'avance le long de l'arête

Cette méthode simple permet de recréer avec une bonne fidélité le comportement d'un composite multidirectionnel, comme illustré sur la Figure 193.

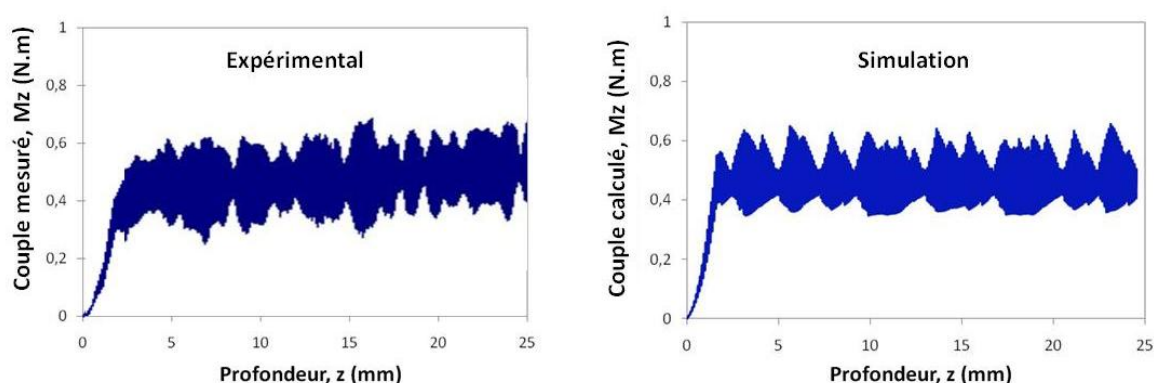


Figure 193 - Comparaison entre le signal expérimental et la simulation du comportement d'un composite multidirectionnel

Il est ainsi possible d'expliquer avec précision l'action des différents arrangements des plis sur les efforts globaux. La démarche permet également d'accéder à des informations locales le long de l'arête qui ne peuvent pas être mesurées expérimentalement. Cette exploitation du modèle est présentée par la suite.

4.3.2 Exploitation du modèle comportemental

4.3.2.1 Effet de l'arrangement des plis à l'échelle globale

Trois arrangements sont testés :

- multidirectionnel irrégulier : alternance non périodique de plis à $-45^\circ/0^\circ/45^\circ/90^\circ$
- multidirectionnel équilibré: alternance périodique de plis à $-45^\circ/0^\circ/45^\circ/90^\circ$
- unidirectionnel : plis à 0° exclusivement

Afin de comparer les différences de comportement entre les arrangements, le perçage d'une plaque « virtuelle » est proposé. Cette plaque contient 9 mm de composite multidirectionnel irrégulier en entrée, puis 5 mm de composite multidirectionnel équilibré, puis encore 6 mm de composite multidirectionnel irrégulier et enfin 3 mm de composite unidirectionnel. L'évolution du couple est présentée sur la Figure 194.

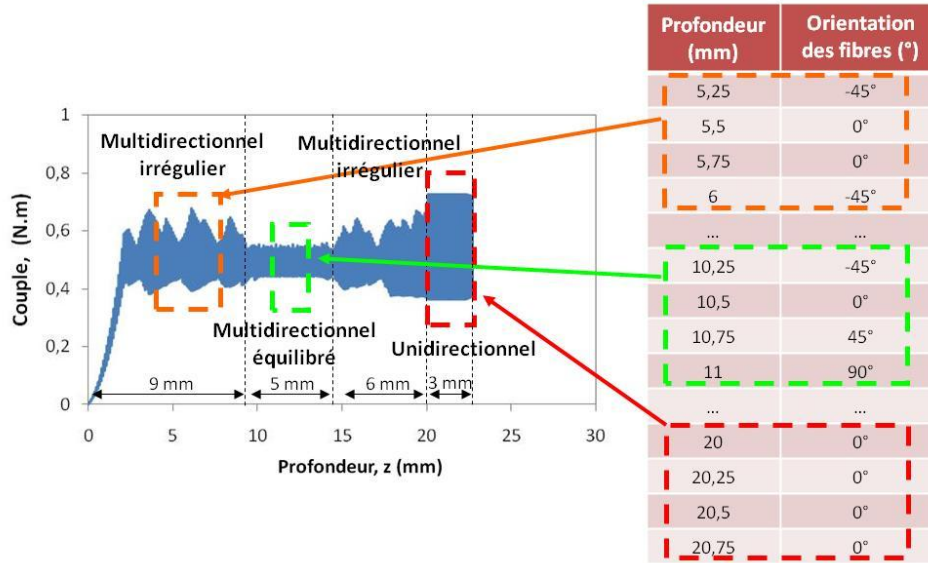


Figure 194 - Simulation du comportement de différents arrangements

L'influence de l'orientation des plis sur la forme du signal est clairement mise en évidence. Un arrangement multidirectionnel équilibré permet de réduire l'amplitude des oscillations et d'obtenir un comportement plus homogène. Un arrangement unidirectionnel augmente l'amplitude des oscillations, mais permet de conserver un comportement cyclique stable. Enfin, un arrangement irrégulier engendre un comportement très hétérogène. L'amplitude des oscillations est variable. Elle est maximale lorsque l'arête est engagée sur des plis à dominantes unidirectionnelles, et minimale lorsqu'il s'agit d'un arrangement plus régulier.

4.3.2.2 Effet de l'arrangement des plis à l'échelle locale

L'action de l'arête engagée sur plusieurs plis arrangés de façon irrégulière est comparée à trois instants proches : $t_1=t-\Delta t$; $t_2=t$; $t_3=t+\Delta t$.

L'évolution de l'effort de coupe linéique le long de l'arête de coupe est présentée sur la Figure 195

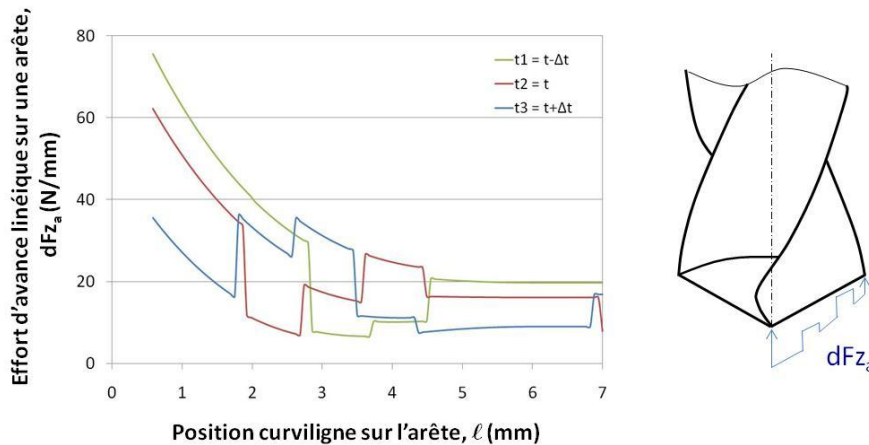


Figure 195 - Evolution de l'effort d'avance linéique le long de l'arête, en différents instants du perçage d'un composite multidirectionnel irrégulier

L'effort d'avance linéique présente des discontinuités le long de l'arête. Elles apparaissent aux frontières des plis ne présentant pas la même orientation de fibres. Cette tendance confirme l'effet majeur des modes de coupe sur l'effort, montré précédemment. En dehors des zones de transition, une seconde tendance peut être mise en évidence. En effet, l'effort le long de l'arête décroît rapidement, puis se stabilise. Ce comportement est similaire à ceux mis en évidence par Claudin [Clau_06] dans les matériaux métalliques isotropes. Elle s'explique par l'évolution des angles de coupe le long de l'arête et l'effet de l'âme au centre. En effet l'angle de coupe est nul à proximité de l'âme et maximum (30°) au niveau des becs du foret.

L'évolution de l'effort de coupe linéique le long de l'arête de coupe est présentée sur la Figure 196 :

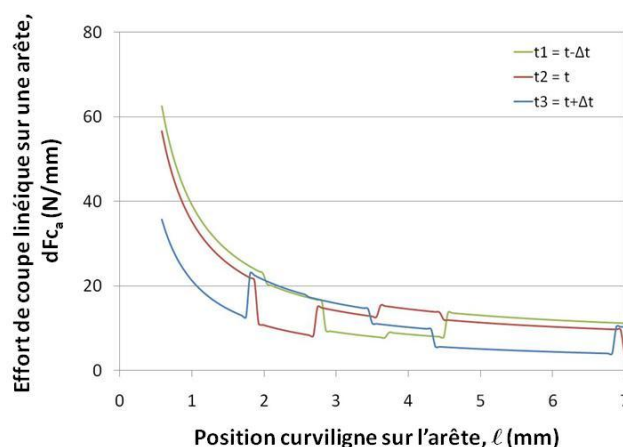


Figure 196 - Evolution de l'effort de coupe linéique le long de l'arête, en différents instants du perçage d'un composite multidirectionnel irrégulier

L'effort de coupe linéique présente des discontinuités similaires à celles décrites pour l'effort d'avance. Les discontinuités du chargement s'expliquent par le changement de l'orientation des fibres par rapport à l'arête. La tendance décroissante est quant à elle expliquée par l'évolution de la géométrie de coupe sur l'arête.

4.3.2.3 Synthèse

Les travaux mettent en évidence d'importantes discontinuités sur le chargement mécanique le long de l'arête. Les effets en fatigue sur l'outil sont encore méconnus, mais pourront être approfondis à partir des données fournies par ces travaux. Le risque de délaminage en sortie de trou est plus prononcé pour certaines orientations de fibres par rapport à l'arête. Un arrangement équilibré en sortie permet d'assurer une répartition plus homogène du chargement mécanique sur le fond du trou et de limiter les risques de cohésion fibre/matrice. Généralement, ce choix est défini par le bureau d'étude, pour satisfaire un critère de résistance mécanique de la pièce en service. En aucun cas, il n'est choisi pour satisfaire des contraintes de fabrication ; de nouvelles règles de conception sont peut-être à définir.

Conclusion

Les travaux menés dans ce mémoire proposent de traiter les matériaux séparément dans un premier temps, afin de comprendre les spécificités propres à chacun, pour ensuite proposer des solutions technologiques, tout en gardant à l'esprit qu'elles devront être utilisées dans le perçage des empilages Titane/Composite. La majeure partie du mémoire est donc consacrée à la compréhension des mécanismes de coupe, qui constitue le cœur du travail scientifique sur le sujet. Les solutions technologiques, mises au point suite à ces travaux, sont présentées en Annexe 3.

L'état de l'art dans les alliages de titane a mis en évidence toutes les conséquences liées à l'augmentation de la température dans la zone de coupe : usure catastrophique des outils et endommagement de l'intégrité matière. La distribution de la chaleur dans la zone de coupe a permis de mettre clairement en évidence l'intérêt de proposer des solutions sur la géométrie de coupe et de guidage des outils pour limiter la production de chaleur et optimiser son évacuation. Ces constatations ont permis de définir le premier axe de recherche de ces travaux de thèse. L'état de l'art dans les composites, a mis en évidence les phénomènes de délaminage, d'échauffement thermique de la paroi, qui sont liés à la décohésion des fibres au passage de l'arête de coupe. Un second axe pour ces travaux de thèse a donc été défini sur la compréhension des modes d'enlèvement de la matière. Enfin l'usure abrasive des outils est une limitation majeure qui autorise l'utilisation des outils carbure seulement avec un revêtement diamant CVD. En configuration empilage, les dégradations thermiques constatées sont liées à la montée en température de l'outil dans la partie titane. L'évacuation des copeaux affecte la paroi usinée, dans le sens composite titane.

Une étude tribologique menée sur l'alliage Ti6Al4V, a permis de caractériser les interfaces copeau/outil et pièce/outil. Pour ces deux cas de contacts régénérés, le coefficient de frottement diminue quand la vitesse et la pression diminuent. Les valeurs des coefficients mesurés à sec et sous lubrification, sur une plage vitesse de 0 à 90 m/min, sont de l'ordre de 0,2-0,3. Ces valeurs sont en moyenne deux fois plus faibles que celles observées dans les aciers ; ce qui signifie que la production de chaleur par frottement est plus faible dans les alliages de titane. Dans le contact paroi/listels (cas de contact non-régénéré), le coefficient de frottement augmente avec le passage répété des listels sur la paroi, et avec la vitesse de glissement. La lubrification permet de réduire significativement cet effet. Le coefficient de partage du flux de chaleur généré à l'interface dépend fortement de la vitesse d'écoulement de la matière. Plus la matière s'écoule à grande vitesse, plus la part de flux de chaleur reçue par l'outil diminue. Les tendances identifiées montrent que la part de flux reçu par l'outil est en moyenne deux fois plus importante dans les alliages de titane que dans les aciers. Enfin, la présence d'un revêtement (TiN et AlCrN) ne modifie pas les conditions tribologiques du contact. L'adhésion de titane sur l'outil forme un troisième corps solide sur laquelle la matière s'écoule, sans contact avec le revêtement. Cette étude tribologique est très enrichissante

de part son apport sur la modélisation des interfaces et sur l'optimisation des conditions de frottement. L'étude tribologique menée sur les composites, montre une forte sensibilité à la vitesse de glissement sur la plage comprise entre 10 m/min et 200 m/min. Les coefficients de frottement mesurés dans les composites sont deux fois plus faibles que dans les alliages de titane. Le contact non-régénéré entre la paroi et les listels est moins sévère que dans les alliages de titane. Le passage répété des listels et l'orientation des fibres à 0° tendent à faire diminuer le coefficient de frottement.

Une étude approfondie des mécanismes thermo-mécaniques de la coupe des alliages de titane a permis de localiser les zones de forte production de chaleur et d'en comprendre les origines. Une part de chaleur pouvant atteindre 50% de la puissance totale est produite par les listels. La mise en évidence du retour élastique et du retreint thermique du trou, par une approche expérimentale et numérique a permis de donner une explication au phénomène. La dilatation de la matière est dans un premier temps bloquée par la partie massive de la pièce. Si l'élévation des contraintes internes d'origine thermique dépasse la limite d'écoulement du matériau, alors la matière se resserre sur l'outil. Fort de ces constatations, il est possible de diminuer la consommation énergétique du listel en proposant une surface de contact réduite, afin de ne pas dépasser le seuil de déclenchement du retreint thermique de la matière. Une chute importante de la température de l'outil a été mise en évidence. Elle permet d'éviter la brûlure à l'interface Titane/Carbone. L'étude expérimentale menée sur la géométrie de l'arête fournit des données intéressantes pour limiter la production de chaleur. Le choix des conditions de coupe pour le perçage à sec des alliages de titane doit s'orienter vers de fortes avances, soit $f = 0,4 - 0,5$ mm/tr, qui permettent d'augmenter la productivité de l'opération en minimisant la montée en température de l'outil, Un angle de coupe important, environ 30° , associé à une forte variation de l'angle d'inclinaison d'arête, proche de 30° , et à un angle de dépouille de 11° , est la combinaison minimisant d'un part le chargement mécanique et d'autre part le chargement thermique, plus sensible aux variations géométriques de l'outil. Il semble dans l'intérêt des fabricants d'outils de prendre en compte ces considérations thermiques pour le développement de nouvelles géométries à basse production de chaleur. Dans le cas du foret hélicoïdal, cela passe par la définition de nouvelles règles de conception. Les approches semi-analytiques et numériques menées sur la distribution des flux de chaleur s'accordent pour dire que près de 65 % de la puissance thermique totale est évacuée par le copeau. L'outil quant à lui reçoit 20 % de cette puissance, répartie sur ces deux surfaces de contact copeau/outil et pièce/outil. Pour finir, la pièce évacue 15 % de chaleur provenant de la zone de cisaillement primaire et du contact avec la dépouille de l'outil.

L'étude expérimentale sur la coupe des fibres a permis de définir quelques règles élémentaires de conception des forets. Le délaminage des fibres en sortie dépend de la vitesse de coupe et est maximal à $V_c = 10$ m/min. Le délaminage des fibres en sortie augmente fortement avec l'avance, au-delà de $f = 0,05$ mm/tr. Aucun délaminage en sortie n'est constaté pour les angles de pointe $2\kappa_r$ de 90° et 110° . Un faible endommagement apparaît pour l'angle 140° , mais reste néanmoins dans les critères de qualité. Le revêtement diamant CVD présente une bonne répétabilité. L'analyse des modes de coupe a permis de faire une bonne corrélation entre les modes de coupe et les défauts générés. Des zones potentiellement à risque apparaissent pour certaines positions d'arête. Les phénomènes de refus de coupe, de délaminage et d'état de surface ont pu être expliqués. Enfin, la méthode mise en place pour reconstruire le chargement local sur l'arête, a permis de comparer les niveaux des efforts locaux avec les défauts précédemment observés. Un seuil local de décohésion fibre/matrice a pu être défini.

Perspectives

Depuis une dizaine d'années, les travaux scientifiques menés sur les empilages Titane/Composite, Aluminium/composite et Aluminium/Composite/Titane sont en pleine augmentation, preuve qu'il existe une forte demande de la part des industriels sur cette thématique. Les travaux de thèse ont mis en évidence l'intérêt de développer des géométries de listels spécifiques au perçage des empilages Titane/Composite. Pour des raisons de confidentialité, elles n'ont pu être présentées dans ce mémoire. La plage de travail à sec va pouvoir être étendue vers les hautes avances. Les revêtements diamant CVD permettent d'utiliser des outils carbures, avec de bonnes performances en termes de durée de vie, mais l'acuité d'arête reste néanmoins médiocre et entraîne des bavures plus importantes dans le titane qu'avec un outil non revêtu. Des recherches dans ce domaine sont attendues. La simulation de l'opération de perçage par une méthode d'application de flux de chaleur demande à être mise en place. Les données d'entrée ont été fournies par les travaux de thèse. Cette approche permettra de donner une estimation des champs de température sur l'outil et la paroi, et permettra ensuite d'estimer l'état de contraintes résiduelles dans le trou, inconnus jusqu'à présent.