Etude expérimentale du procédé de détourage sur les agrocomposites à fibres courtes et longues

1 Introduction

L'étude bibliographique du <u>Chapitre 1</u> met en évidence le manque de travaux traitant l'usinage des agrocomposites. Ces travaux se résument à des études empiriques (fraisage et perçage) non approfondies scientifiquement qui se contentent de déterminer l'endommagement global (délaminage, rugosité de surface) en fonction de la cinématique de l'outil (vitesse de coupe, vitesse d'avance) sans une compréhension des mécanismes physiques mis en jeu. Néanmoins, cet état de l'art révèle une sensibilité particulière des agrocomposites à la fibre végétale utilisée lors de l'usinage. Une sensibilité importante a été constatée aux paramètres process, notamment la cinématique de l'outil et sa géométrie.

L'objectif de ce chapitre est d'explorer l'usinabilité des agrocomposites avec des études expérimentales exploratoires qui font intervenir, à chaque fois, un paramètre significatif afin d'étudier son effet sur les mécanismes d'interaction outil / matière lors de la coupe et, ainsi, identifier les critères d'usinabilité pour les agrocomposites.

Afin d'optimiser ces études expérimentales, chacune a été réalisée avec une structure agrocomposite différente pour mettre aussi en évidence la contribution de la structure du renfort fibreux sur l'usinabilité des agrocomposites.

Ces études expérimentales vont introduire une méthode de décomposition multiéchelle de la topographie des surfaces usinées. Une méthode qui permet d'extraire la signature topographique des conditions process aux différentes échelles de la surface usinée, en allant des échelles microscopiques jusqu'aux échelles globales macroscopiques.

2 Effet du type de fibre végétale sur l'usinabilité des agrocomposites à fibres courtes

Les trois agrocomposites à fibres courtes présentés dans le <u>Chapitre 2</u> (Bambou/PP, Miscanthus/PP et Sisal/PP) ont subi des essais de détourage sur la machine 5 axes (DMU 60 monoBLOCK®) avec l'outil "AMAYA SA3" qui ont aussi été décrits dans le <u>Chapitre 2</u>. Les essais ont été réalisés en absence de lubrifiant tout en variant l'avance par dent de la fraise. Les autres paramètres de coupe ont été maintenus constants. Trois valeurs d'avance (0.04, 0.08 et 0.12 mm/dent) ont été considérées. La vitesse de coupe (V_o) a été fixée à 47 m/min et la profondeur de passe (a_b) à 1 mm.

Lors de cette étude, les efforts de coupe ont été enregistrés à l'aide du système d'acquisition à table Kistler. Les observations microscopiques ont été réalisées avant et après usinage par le MEB en mode LV. La topographie de surface a été mesurée à l'aide du rugosimètre 2D avant et après usinage.

2.1 Observations microscopiques des surfaces usinées

La <u>Figure 3.1</u> présente une comparaison de l'état microscopique des surfaces usinées pour chaque type d'agrocomposite avant et après le procédé de détourage. L'état initial est caractérisé par des stries et des débris dus au polissage. Le renfort fibreux est sous forme de faisceaux de fibres élémentaires (<u>Figure 3.1(a,c,e)</u>). Les fibres de sisal ont un plus grand diamètre.

Après l'opération de détourage, les fibres prennent des aspects morphologiques différents. Le mécanisme de coupe activé pour l'usinage de chacune des fibres semble être à l'origine de la différence constatée. Les fibres de bambou ont une apparence lisse au niveau de la section du faisceau des fibres avec des zones creuses au niveau de la matrice causées par le détachement des fibres (Figure 3.1(b)). Le cisaillement des fibres n'est pas parfait puisque la morphologie des sections des fibres élémentaires n'est pas observable comme pour l'état initial (Figure 3.1(a)). Le même aspect est observé sur les échantillons en fibres de miscanthus en plus de la rupture des interfaces entre les fibres élémentaires qui constitue le faisceau de fibres (Figure 3.1(d)). La morphologie de la section des fibres n'apparait pas comme pour l'état initial (Figure 3.1(c)). Les fibres de sisal font apparaitre clairement la rupture de l'interface entre les fibres élémentaires qui provoque l'apparition de quelques zones creuses (Figure 3.1(f)). Les extrémités des fibres de sisal qui dépassent la surface usinée sont plus longues que dans le cas de bambou ou du miscanthus.

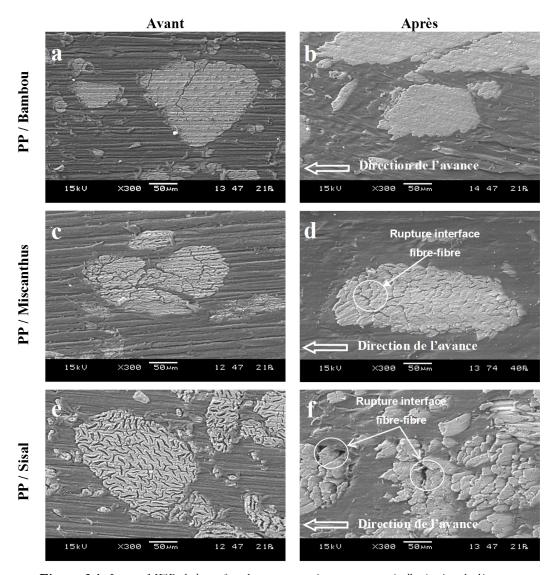


Figure 3.1: Images MEB de la surface des agrocomposites avant et après l'opération de détourage

Les observations MEB montrent que le mécanisme de cisaillement des fibres végétales est imparfait et son efficacité dépend du type de fibre. Ceci peut être dû aux propriétés mécaniques intrinsèques des fibres végétales ainsi que les propriétés d'adhésion entre les fibres élémentaires. En pratique, les fibres végétales sont sous forme de faisceaux d'une à trois douzaines de fibres élémentaires et la cohésion entre ces dernières est assuré par des lamelles pectiques dont les propriétés mécaniques sont faibles [31]. De plus, les fibres naturelles sont souples par nature à cause de leur forte teneur en cellulose et c'est cette propriété qui leur donne une habilité de se déformer durant l'interaction avec l'outil de coupe [61].

2.2 Analyse énergétique de l'opération de coupe

Les efforts de coupe mesurés lors de l'opération de détourage ont été exploités pour calculer l'énergie spécifique de coupe E_{sc} pour chaque configuration expérimentale. La <u>Figure 3.2</u> montre que, peu importe l'avance imposée, l'énergie spécifique de coupe générée par l'agrocomposite à fibres de bambou est la plus faible, suivie par celle générée par l'agrocomposite à fibres de miscanthus. L'agrocomposites à fibres de sisal a l'énergie spécifique de coupe la plus élevée. L'augmentation de l'avance de l'outil contribue à une diminution de cette énergie spécifique.

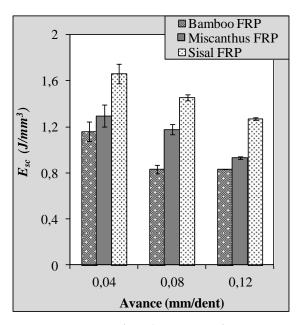


Figure 3.2 : Energie spécifique de coupe pour chaque agrocomposite

D'après les résultats de l'énergie spécifique de coupe (Figure 3.2) et les propriétés mécaniques estimées des fibres végétales (Tableau 2-2), une rigidité élevée rend le cisaillement des fibres facile. Ceci est caractérisé par une faible énergie spécifique de coupe. En effet, les fibres de bambou ont la rigidité la plus élevée et présentent le mécanisme de cisaillement le plus facile par rapport aux autres fibres étudiées. Toutefois, cette rigidité n'est pas suffisante pour générer un cisaillement parfait des fibres durant l'opération de détourage semblable à la configuration de la Figure 3.3(a). La souplesse des fibres végétales est donc à l'origine d'un léger glissement contre l'outil de coupe avant le cisaillement. Les extrémités des fibres qui dépassent la surface usinée à cause de ce glissement restent alors penchées suivant la direction de l'avance de l'outil sur la surface usinée (Figure 3.3(b)). De plus, la faible adhésion entre les fibres élémentaires [72] peut provoquer une rupture des interfaces fibre/fibre (Figure 3.3(c)) et la perte du maintien au sein du faisceau fibreux comme c'est le cas pour les fibres de sisal (Figure 3.1(f)).

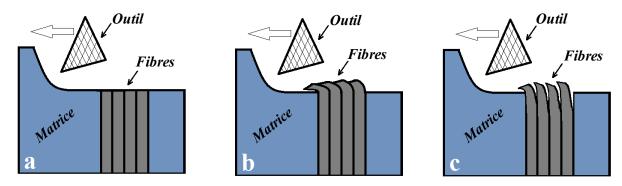


Figure 3.3: Mécanismes de coupe des agrocomposites. a) cisaillement parfait des fibres, b) cisaillement imparfait des fibres, c) cisaillement imparfait avec une rupture des interfaces.

2.3 Analyse standard de l'état topographique des surfaces usinées

La <u>Figure 3.4</u> montre un exemple de profil de rugosité pour chaque agrocomposite avant et après l'opération du détourage. Les pics correspondent aux extrémités des fibres dépassant la surface usinée et les vallées représentent les zones creuses générées par le détachement de certaines fibres ou par la rupture des interfaces fibre/fibre et fibre/matrice. On peut remarquer que le profil de rugosité des agrocomposites en fibres de sisal et de miscanthus présentent plus d'irrégularités que celui des agrocomposites en fibres de bambou.

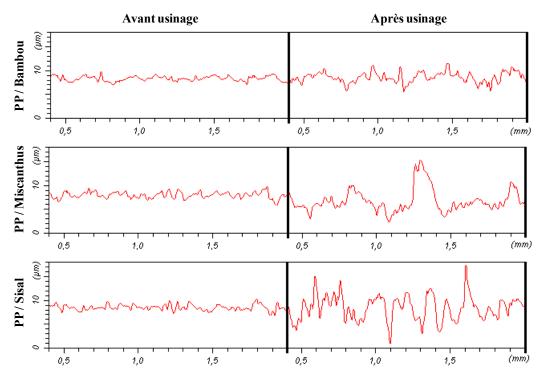


Figure 3.4: Profil de la rugosité de surface avant et après l'opération du détourage à 0.04 mm/ dent

Afin de quantifier l'état de surface finie des différents matériaux, on calcule le gain relatif en rugosité moyenne défini par <u>l'équation 3.1</u> [73].

$$\Delta R_a(\%) = \frac{R_a^{end} - R_a^{init}}{R_a^{init}} \times 100$$
(3.1)

 R_a^{init} and R_a^{end} sont respectivement la rugosité de surface avant et après le processus de détourage. La <u>Figure 3.5</u> présente le rapport de rugosité globale pour les trois agrocomposites étudiés.

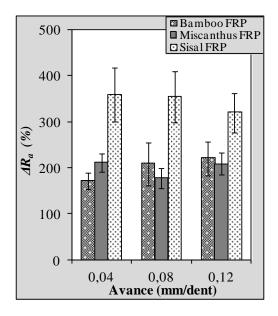


Figure 3.5 : Gain relatif en rugosité moyenne pour les trois agrocomposites étudiés

La <u>Figure 3.5</u> montre que, après l'opération du détourage, la rugosité de surface usinée peut atteindre quatre fois la valeur de rugosité initiale avant usinage pour les agrocomposites en fibres de sisal. Les agrocomposites en fibres de bambou et de miscanthus semblent avoir la même contribution à la hausse de rugosité. L'effet de l'avance n'est pas significatif pour ce paramètre de rugosité globale. La différence entre l'effet de chaque fibre végétale sur l'état de surface final a été beaucoup plus perceptible avec les observations MEB et l'analyse énergétique. En revanche, cette comparaison démontre le fait que les fibres de sisal, dont la rigidité est la plus faible par rapport aux deux autres fibres végétales, sont les plus contribuant à l'augmentation des irrégularités de surface après usinage à cause des extrémités de fibres qui dépassent la surface usinée.

La <u>Figure 3.5</u> montre que les rugosités des surfaces des agrocomposites en fibres de bambou et de miscanthus sont quasi-similaires. Ce constat est contradictoire avec les irrégularités observées sur les profils topographiques de ces deux surfaces générées par usinages sur la <u>Figure 3.4</u>. Ceci peut être dû à l'échelle dans laquelle les valeurs de rugosité Ra ont été calculées. Une analyse multiéchelle va être réalisée dans la section suivante afin de vérifier l'effet de l'échelle d'analyse.

2.4 Analyse multiéchelle de la topographie des surfaces usinées

La structure géométrique d'une surface contient des irrégularités complexes comprenant de la rugosité, des ondulations et des composantes de forme tout au long de la longueur de mesure. Les paramètres matériaux et process imposent des irrégularités caractéristiques sur la surface lors de son procédé de génération [74]. L'objectif de l'approche multiéchelle illustrée dans cette partie est de déterminer les échelles caractéristiques dans lesquelles chaque paramètre matériau/process affecte la morphologie de la surface usinée.

2.4.1 Décomposition par transformée en ondelettes discrètes

A l'opposé de la transformée de fourrier qui est une méthode limitée par une résolution fixée dans l'espace et en fréquence, la transformée en ondelettes discrètes (DWT) se distingue par une résolution espace-fréquence flexible en compensant une meilleur résolution dans l'espace par une réduction de la résolution en fréquence et vice versa [75]. L'approche DWT décompose le signal topographique brut en plusieurs sous-bandes suivant un processus récursif. A chaque décomposition, le signal topographique global est soumis à une série de filtres passe -haut et passe-bas afin d'analyser les hautes et les basses fréquences [76]. La procédure ainsi décrite est répétée pour les décompositions ultérieures jusqu'à atteindre la résolution désirée. Les coefficients sont ensuite déduits à travers des filtres de synthèse afin de reconstruire le signal topographique à chaque échelle de décomposition.

La fonction base de filtrage est obtenu à partir d'un unique prototype d'ondelette, nommé ondelette mère " $\psi(x)$ ", par translation et dilatation [75]. La formule générale pour la discrétisation de l'ondelette est de la forme :

$$\psi_{m,n}(x) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi(\frac{x - nb_0 a_0^m}{a_0^m})$$
 (3.2)

Dans l'expression de l'équation, m et n sont les paramètres de translation et de dilatation, respectivement. La mise à l'échelle logarithmique des deux étapes de translation et de dilatation conduit à la construction d'une base d'ondelettes orthogonale ($a_0 = 2$ et $b_0 = 1$). L'équation devient alors :

$$\psi_{m,n}(x) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m} x - n)$$
(3.3)

La DWT d'un signale topographique "W(m,n)" est définie par :

$$W(m,n) = \left\langle \overline{\psi}_{m,n}(x), f(x) \right\rangle \tag{3.4}$$

 $\overline{\psi}_{m,n}(x)$ est la fonction conjuguée de la fonction ondelette. La reconstruction du signal topographique initial est alors donnée par :

$$f(x) = \sum_{m,n} W(m,n) \psi_{m,n}(x)$$
 (3.5)

2.4.2 Signature multiéchelle de la fibre végétale sur la surface usinée

Suite à la méthode de décomposition DWT, la fonction de transfert multiéchelle de la modification morphologique de la surface après le procédé de détourage peut être déterminée [77]. En effet, ceci consiste à calculer la moyenne arithmétique de la rugosité (M_a) sur chaque échelle de décomposition "i" du signal initial et final (après usinage). La signature multiéchelle du procédé (MPS) est obtenu en calculant le ratio de <u>Péquation 3.6</u> où $M_a^{inil}(i)$ an $M_a^{fin}(i)$ sont les moyennes arithmétiques de rugosité pour l'état initial avant usinage et l'état final après le procédé de détourage, respectivement, pour chaque échelle de décomposition "i". La signature multiéchelle du procédé quantifie, en effet, les irrégularités du profil topographique induites par le procédé de détourage en allant des échelles microscopiques jusqu'aux échelles macroscopiques tout en prenant en compte l'état initial de la surface et les conditions d'usinage.

$$MPS_{i}(\%) = \left| \frac{M_{a}^{fin}(i) - M_{a}^{init}(i)}{M_{a}^{init}(i)} \right| \times 100$$
 (3.6)

Les résultats de la Figure 3.6 montrent que le niveau de rugosité est dépendant de l'échelle de mesure. Pour les fibres végétales étudiées, la rugosité est maximale pour les échelles correspondant à la taille du renfort fibreux (~1 mm). La microrugosité devient quasi constante sur les échelles inférieures à 100 µm et qui correspondent aux diamètres des sections de fibres élémentaires. L'effet du type de fibre sur la rugosité de surface est clairement identifié sur les échelles entre 100 µm et 1 mm.

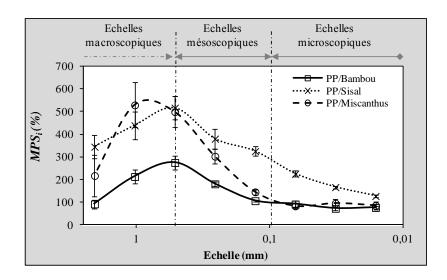


Figure 3.6 : Signature multiéchelle du processus de détourage à 0.04 mm/dent

La <u>Figure 3.7</u> montre que la microrugosité est indépendante de l'avance de l'outil (échelles entre 10 et 100 µm). L'effet de l'avance sur la rugosité des surfaces usinées n'est détectable qu'à partir d'une échelle de 200 µm correspondant aux échelles des sections de faisceaux de fibres incluses dans les échantillons. Les agrocomposites en fibres de miscanthus sont les plus affectés par l'augmentation de l'avance. Cette augmentation contribue à une baisse de rugosité de surface sur les échelles correspondantes aux faisceaux des fibres et au composite. Ceci montre que l'augmentation de l'avance facilite le mécanisme de cisaillement des fibres végétales lors de l'opération de détourage comme déjà montré avec l'analyse énergétique de la <u>Figure 3.2</u> où on a constaté une baisse de l'énergie spécifique de coupe par l'augmentation de l'avance de la fraise.

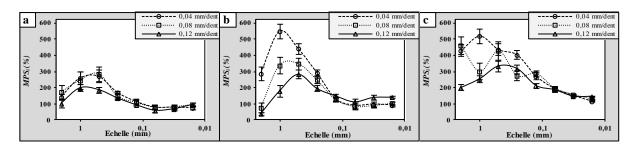


Figure 3.7: Signature multiéchelle du processus de détourage pour les différentes valeurs de l'avance

La <u>Figure 3.8</u> présente la relation entre la rugosité de surface et la rigidité de la fibre végétale. Δ*MPS* (%) est la moyenne de la fonction de transfert du process sur les différentes échelles correspondantes à la section de faisceaux de fibres (entre 100 et 500 μm). Les valeurs des modules d'élasticité sont obtenues à partir des propriétés estimées des fibres végétales (<u>Tableau</u> 2-2).

La <u>Figure 3.8</u> révèle une dépendance linéaire entre la rugosité de surface et la rigidité des fibres végétales sur les échelles des faisceaux de fibres. La moyenne de la signature process sur ces

échelles est inversement proportionnelle à la rigidité des fibres avec un coefficient quasi-similaire d'environ 23 en moyennant les pentes des trois courbes.

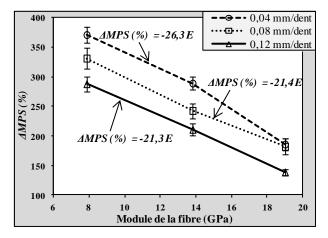


Figure 3.8: Moyenne de la signature process en fonction de la rigidité des fibres sur les échelles des faisceaux de fibres

3 Effet du revêtement de la fraise sur l'usinabilité des agrocomposites à fibres longues unidirectionnelles

Dans cette étape de l'étude, les échantillons d'agrocomposites à renfort en fibres de lin unidirectionnelles ont subis des opérations de détourage avec les fraises à différents revêtements présentées dans le <u>Chapitre 2</u>. La vitesse de coupe (i.e. vitesse linéique de rotation de l'outil) a été fixée à 100 m/min. La profondeur de passe a été fixée aussi à 1 mm. Une large plage de la vitesse d'avance de l'outil a été testée [0.005; 0.01; 0.02; 0.04; 0.08; 0.16 mm/dent]. Les deux configurations de coupe en détourage (en opposition / en avalant) ont été réalisées.

3.1 Mécanismes de coupe des fibres végétales

3.1.1 Bilan énergétique des opérations de détourage

Une analyse énergétique similaire à celle de la <u>Section 2.2</u> a été réalisée afin de comprendre les mécanismes de coupe surgis dans chaque configuration. La <u>Figure 3.9</u> montre que l'énergie spécifique dans le cas d'un fraisage en opposition est plus faible que celle dans le cas d'un fraisage en avalant, plus particulièrement en faibles et moyennes vitesses d'avance de l'outil. Pour les fortes vitesses d'avance, le comportement énergétique est quasi-similaire entre les deux configurations ainsi qu'entre les trois outils. En effet, les conditions de coupe sont favorables en fortes vitesses d'avance puisque ces dernières vont satisfaire le concept de l'épaisseur minimum de copeau où l'épaisseur du copeau non déformé est supérieure à l'épaisseur minimum du copeau [78].

La Figure 3.9 montre clairement que le cisaillement de la fibre végétale lors de l'opération de coupe est mieux accompli avec un fraisage en opposition qu'avec un fraisage en avalant. Ceci peut être expliqué par le maintien de la fibre végétale au sein de la structure agrocomposite durant le contact de coupe comme schématisé dans la Figure 3.10. En configuration de fraisage en opposition, les fibres à couper lors du passage de la dent sont bien supportées par la matière agrocomposite en avale (Figure 3.10(b)). Cette configuration permet d'augmenter la rigidité de contact de l'outil avec la fibre et ainsi faciliter son cisaillement. A l'opposé, dans le cas d'un fraisage en avalant, le maintien de la fibre lors de l'interaction est assuré par la matière agrocomposite en amont. Cette dernière est en grande partie enlevée lors du passage de la dent

d'avant comme la montre la <u>Figure 3.10(a)</u>. Ceci réduit la rigidité de contact et rend le cisaillement de la fibre végétale plus difficile.

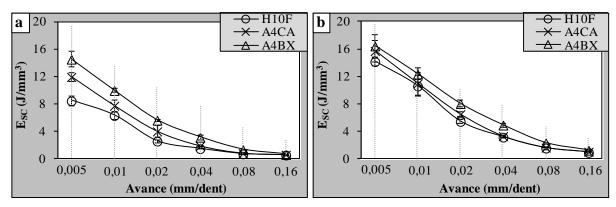


Figure 3.9: L'énergie spécifique de coupe pour les trois outils de coupe étudiés. a) cas du fraisage en opposition. b) cas du fraisage en avalant.

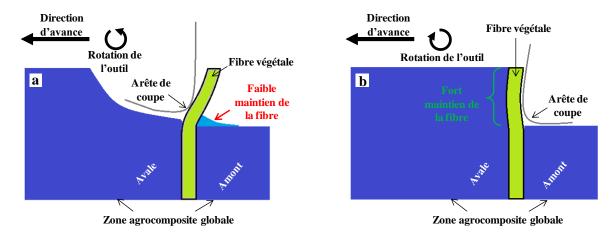


Figure 3.10: Schématisation du comportement de la fibre végétale au sein d'un agrocomposite lors du procédé de détourage.

a) cas du fraisage en avalant. b) cas du fraisage en opposition

Dans la zone des faibles et moyennes vitesses d'avances où l'effet du revêtement de l'outil est observé (Figure 3.9), on remarque que l'outil non revêtu (H10F) présente l'énergie spécifique la moins élevée, suivi par l'outil à revêtement TiB₂ (A4CA) tandis que l'outil en revêtement diamant (A4BX) présente l'énergie spécifique de coupe la plus élevée. Ceci est dû en grande partie au rayon d'acuité de l'arête généré par le dépôt du revêtement sur l'arête de coupe. En effet, et comme montré dans la Figure 2.20 du Chapitre 2, l'outil en revêtement diamant (A4BX) génère le plus grand rayon d'acuité (i.e. la plus faible acuité d'arête) tandis que l'outil non revêtu présente la plus forte acuité puisqu'il garde son rayon d'acuité d'origine. Il est bien connu dans la littérature que plus le rayon d'acuité est élevé, plus la présence des mécanisme de déformation plastique et du glissement sont importantes, surtout quand le rayon d'acuité devient de l'ordre de l'épaisseur du copeau non déformé [79]. Ceci va automatiquement augmenter l'énergie spécifique de coupe.

Introduire un revêtement sur l'outil de coupe va alors augmenter le rayon d'acuité et, par conséquence, réduire l'efficacité de cisaillement des fibres végétales lors de la coupe.

3.1.2 Observations microscopiques

La <u>Figure 3.11</u> présente une comparaison entre l'état des surfaces usinées dans les deux configurations de coupe (en opposition et en avalant). Ces observations confirment les conclusions de l'analyse énergétique puisqu'en configuration de fraisage en avalant, les extrémités non coupées des fibres sont plus observables que dans le cas du fraisage en opposition. Ce phénomène est dû, en effet, au cisaillement plus difficile des fibres végétales lors de la coupe dans le cas du fraisage en avalant. De plus, la <u>Figure 3.11</u> montre que le taux des extrémités des fibres non coupées augmente considérablement avec les outils revêtus. Il est encore plus élevé pour le revêtement diamant que pour le revêtement TiB2. Ceci confirme le rôle du rayon d'acuité de l'arête de coupe dans l'activation du mécanisme de cisaillement des fibres comme expliqué dans la <u>Section 3.1.1</u>.

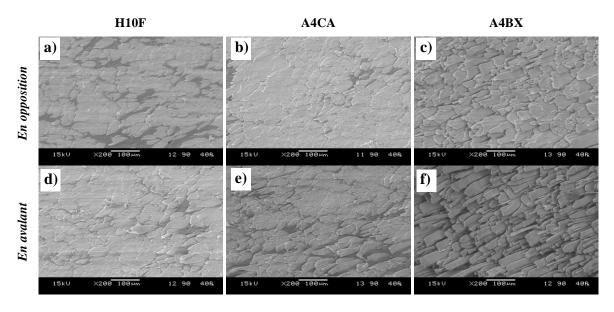


Figure 3.11 : Image microscopiques par MEB des surfaces usinées pour les deux configurations de coupe avec les trois outils étudiés. Cas d'une vitesse d'avance de 0.02 mm/dent

La <u>Figure 3.12</u> montre l'influence de la vitesse d'avance sur l'état microscopique des surfaces usinées. L'augmentation de la vitesse d'avance de l'outil diminue fortement le taux des extrémités non coupés des fibres. Ceci confirme que le mécanisme de cisaillement des fibres lors de la coupe est bien évidement activé en grandes vitesses d'avance puisqu'on est dans les conditions favorables de coupe comme démontré dans la <u>Section 3.1.1</u>.

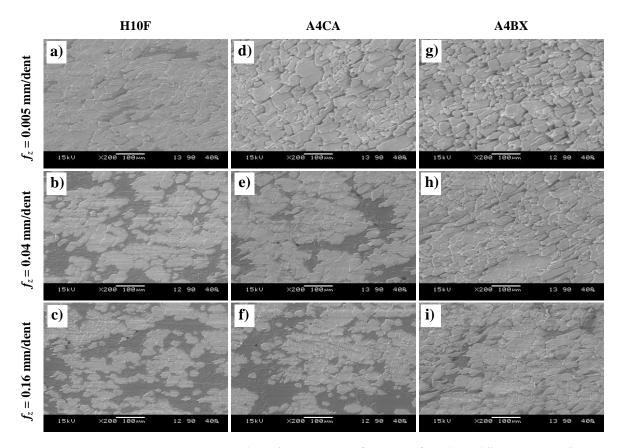


Figure 3.12: Images microscopiques MEB des surfaces usinées avec les trois outils étudiés à différentes vitesses d'avance.

Pour conclure, lors de la coupe d'un agrocomposite, le cisaillement de la fibre végétale est plus efficace avec une configuration de fraisage en opposition et un rayon d'acuité le plus faible possible. L'efficacité du mécanisme de cisaillement augmente avec l'augmentation de la vitesse d'avance.

3.2 Irrégularités des surfaces usinées

3.2.1 Analyse standard de l'état de surface

La <u>Figure 3.13</u> présente la moyenne arithmétique de rugosité "Ra" mesurée par le profilomètre 2D après l'opération de détourage et calculée suivant les normes standard ISO4287.

L'analyse standard de la topographie de surface de la <u>Figure 3.13</u> montre que, généralement, la configuration de fraisage par avalant génère beaucoup plus de rugosité que celle en opposition, spécialement en faibles et moyennes vitesses d'avance. C'est cette plage de vitesse d'avance qui permet aussi de mieux discriminer l'effet du revêtement de l'outil. Globalement, l'outil avec la faible acuité d'arête (A4BX) génère les valeurs de rugosité les plus fortes. L'outil non revêtu

(H10F) qui possède la forte acuité d'arête génère la rugosité de surface la plus faible. Ces constats sont en parfaite cohérence avec les résultats de l'analyse énergétique et les observations microscopiques. En effet, les extrémités des fibres non coupés sont les principales responsables de la hausse de rugosité par l'augmentation du taux d'irrégularité des profils topographiques comme déjà expliqué dans la Section 2.

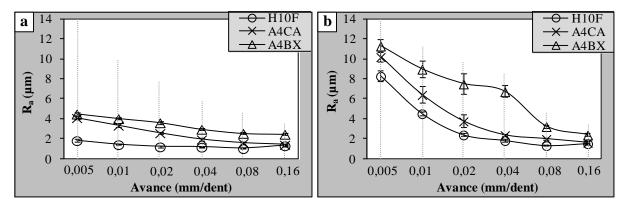


Figure 3.13: Moyenne arithmétique standard de rugosité des surfaces usinées par les trois outils étudiés. a) cas du fraisage en opposition. b) cas du fraisage en avalant

3.2.2 Analyse multiéchelle de l'état de surface

Afin de déterminer les échelles d'analyse les plus pertinents qui permettent de mettre en évidence l'influence des paramètres étudiés, l'approche multiéchelle décrite dans la <u>Section 2.4.1</u> a été adoptée afin déterminer le niveau de rugosité sur différentes échelles.

La <u>Figure 3.14</u> représente les spectres multiéchelle de rugosité pour les différentes configurations étudiées. Les spectres sont tracés pour différentes valeurs de l'épaisseur du copeau enlevé " h_m " au lieu des valeurs de vitesse d'avance. L'épaisseur h_m est proportionnelle à l'avance de l'outil par la relation de <u>l'équation 3.7</u>:

$$h_m = f_z \times \sqrt{\frac{a_p}{\phi}} \tag{3.7}$$

 f_z est l'avance par dent, a_p est la profondeur de passe, ϕ est le diamètre de l'outil.

Globalement, L'amplitude moyenne de la rugosité dépend de l'échelle de mesure. Elle est à son minimum pour les échelles microscopiques et augmente en augmentant l'échelle d'analyse jusqu'à atteindre son maximum à l'échelle de 1 mm qui correspond à l'échelle de diamètre des fils de lin dans les échantillons agrocomposites étudiés. Les échelles qui permettent de bien discriminer l'effet de l'épaisseur du copeau sur le niveau de rugosité sont entre 50 µm et 1 mm. Ces échelles

pertinentes se situent entre la taille de la fibre technique et celle du fils de renfort. On peut conclure que les échelles pertinentes pour l'analyse correspondent à celles de la structure du renfort fibreux présent dans l'agrocomposite.

Sur ces échelles pertinentes, on constate que le niveau de rugosité se comporte de deux manières différentes suivant les valeurs de l'épaisseur du copeau h_m par rapport au rayon d'acuité de l'outil revêtu :

- Quand b_m < r_e: On se place dans les conditions défavorables de coupe. La rugosité de surface est à ses niveaux maximums et décroit considérablement en augmentant l'épaisseur du copeau car on se rapproche des conditions favorables de coupe qui favorisent le cisaillement de la fibre végétale et ainsi réduire les extrémités des fibres non coupées.
- Quand h_m > r_e: On atteint les conditions favorables de coupe. L'effet de l'épaisseur du copeau devient insignifiant et la rugosité de surface atteint ses niveaux minimums.

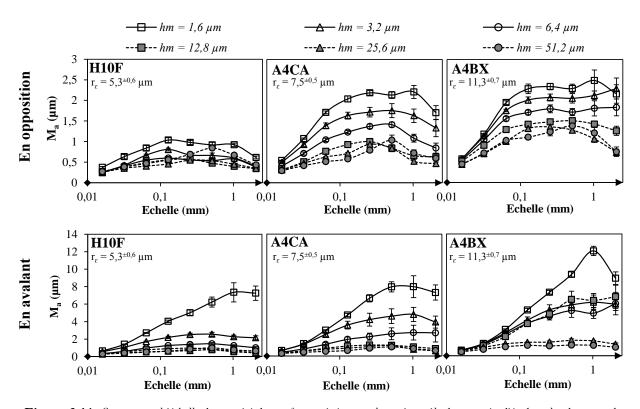


Figure 3.14 : Spectres multiéchelle de rugosité des surfaces usinées avec les trois outils de coupe étudiés dans les deux cas de fraisage

3.3 Etude des défauts induits par le procédé de détourage

3.3.1 Décohésion périphérique fibre/matrice : peluchage

Le peluchage est parmi les principaux défauts induits par usinage dans l'industrie des matériaux composite. Ce défaut est dû à une décohésion entre les fibres et la matrice, plus spécialement dans les couches présentes aux bords de la pièce composite. Ce phénomène empêchera les fibres présentes aux bords de se couper complètement et vont rester sur la périphérie de la surface tout en étant dirigées vers l'extérieur comme le montre la Figure 3.15. On distingue le peluchage à l'entrée (Δy) et à la sortie (Δx) de l'arête de coupe (Figure 3.15(b)) puisque cette dernière est hélicoïdale avec un angle d'hélice (i.e. engagement progressif de l'arête dans la matière). Ces deux paramètres ont été mesurés sur l'image obtenue par microscope optique de la Figure 3.15(b).

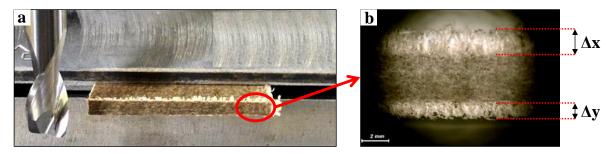


Figure 3.15 : a) peluchage sur la périphérie de la surface après le procédé de détourage. b) Image par microscope optique pour le calcul du peluchage à l'entrée (Δy) et à la sortie (Δx) de l'arête de coupe

La <u>Figure 3.16</u> montre que le défaut par peluchage est plus apparent à la sortie de l'arête de coupe. Le fraisage en avalant génère plus de défaut par peluchage que le fraisage en opposition. L'effet du rayon d'acuité sur ce défaut d'usinage est plus apparent dans la configuration de fraisage en opposition où l'outil avec la plus faible acuité (A4BX) génère le plus important défaut par peluchage. L'outil H10F sans revêtement (la plus forte acuité) cause le moins de défauts de peluchage.

Le défaut de peluchage peut aussi être expliqué par le maintien de la fibre végétale au sein de l'agrocomposite comme dans la <u>Section 3.1</u>. Les fibres présentes sur les couches périphériques de la pièce agrocomposites n'ont pas suffisamment de maintien durant l'opération de détourage et auront donc une tendance à se déformer plus que les fibres présentes dans les couches intérieures de la pièce. De plus, l'augmentation du rayon d'acuité affaiblie le mécanisme de cisaillement de la fibre et donc participe aussi à la déformation de fibres et leur décohésion de la matrice. Ceci provoque un taux considérable de défauts par peluchage.

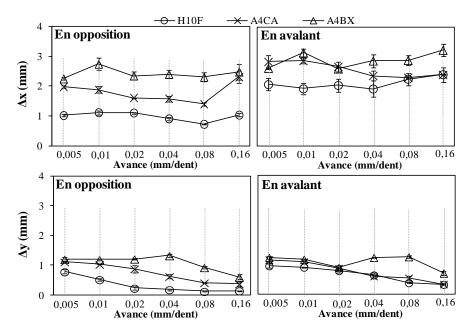


Figure 3.16: Longueur de défaut de peluchage à l'entrée (Δy) et à la sortie (Δx) de l'arête de coupe sur les surfaces usinées avec les trois outils étudiés pour les deux configurations de fraisage.

3.3.2 Usure de l'outil

Les fibres végétales sont connues par leur caractère peu abrasif par rapport aux fibres synthétiques de verre et de carbone. Pour ces raisons, il n'y avait pas d'usure observée après les essais de détourage. Afin de caractériser l'usure des outils en fonction des revêtements lors de l'usinage des agrocomposites, les outils en question ont subi une opération d'usure accélérée en par procédé de détourage sur des échantillons d'agrocomposites en fibres de lin UD et matrice PP. Ces essais d'usure sont des essais cycliques de détourage sur une longueur de coupe de 200 mm à 100 m/min de vitesse de rotation et 32 mm/min de vitesse d'avance. Pour chaque outil, 50 cycles consécutifs ont été réalisés pour que chaque test d'usure dure approximativement 5 heures. Après les tests d'usure, les arêtes de coupe ont été observées par MEB afin de comparer avec l'état initial et les rayons d'acuité ont été mesurés de la même manière qu'à l'état initial avec le profilomètre 2D.

La caractérisation des arêtes de coupe des outils après les essais d'usure montre que les outils revêtus (A4CA et A4BX) ne présentent pas de signe d'usure. Seul l'outil non revêtu (H10F) montre des traces d'usure au niveau du sommet de l'arête de coupe comme le montre la <u>Figure</u> 3.17. L'usure se manifeste, en effet, sous forme d'enlèvement de matière sur le sommet de l'arête mais aucune modification de la structure surfacique de la face n'est observée. Ceci peut s'expliquer par les endommagements mécaniques (endommagements sub-surfaciques,

microfissures, ...) induites par le procédé de fabrication des outils, notamment le procédé d'affûtage des arêtes de coupe qui peut induire des microfissures ainsi que des contraintes résiduelles au niveau de la région ciblée de l'arête (i.e. son sommet). Ces défauts de fabrication rendent l'arête de coupe sensible aux sollicitations de contact avec la matière à usiner lors du procédé de détourage. L'ajout d'un revêtement dur va certainement protéger ces arêtes de coupe contre ces sollicitations.

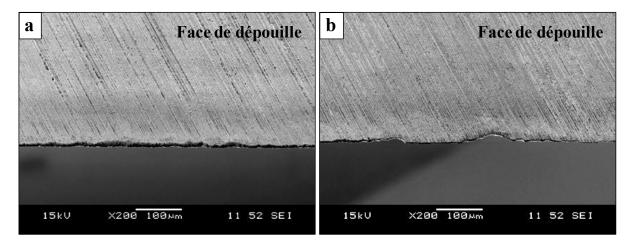


Figure 3.17 : Images MEB de l'arête de coupe de l'outil non revêtu H10F a) avant le test d'usure et b) après le test d'usure

La Figure 3.18 montre que, effectivement, l'endommagement de l'arête de coupe après les tests d'usure ne se manifeste que sur l'outil non revêtu. Le rayon d'acuité de l'outil non revêtu H10F augmente considérablement après le test d'usure tandis que le rayon d'acuité des deux autres outils est similaire à celui avant les tests d'usure. Ce phénomène d'usure par réduction de l'acuité d'arête est très important à prendre en compte dans le cas de l'usinage des agrocomposites. En effet, il a été démontré tout au long de cette partie que l'augmentation du rayon d'acuité affecte considérablement l'état de la surface usinée en réduisant l'efficacité de cisaillement des fibres végétales. L'outil non revêtu, qui présente une bonne acuité d'arête à l'état initial (i.e. outil neuf) et génère un cisaillement efficace des fibres végétales lors de l'usinage, perdra son acuité après l'usure par augmentation du rayon de l'arête de coupe. Ceci va réduire la capacité de l'outil en question à cisailler les fibres et l'état des surfaces usinées générées par un outil non revêtu vont devenir similaire à celles générées par un outil revêtu.

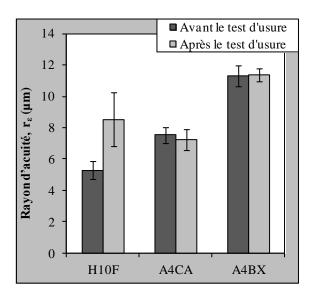


Figure 3.18: Comparaison du rayon d'acuité pour les trois outils étudiés avant et après le test d'usure

4 Effet de l'angle d'hélice de l'outil sur l'usinabilité des agrocomposites à fibres longues bidirectionnelles

Pour cette partie de l'étude, Les agrocomposites à fibres longue tissées de lin bidirectionnelles ont été testés lors du procédé de détourage avec les trois fraises à différents angles d'hélice présentées dans le <u>Chapitre 2</u>. Comme pour la <u>Section 3</u>, la vitesse de coupe a été fixée à 100 m/min et la profondeur de passe a été fixée à 1 mm. La vitesse d'avance de l'outil a été variée afin de tester 5 valeurs [0.08; 0.12; 0.16; 0.2 et 0.24 mm/dent]. En se basant sur les résultats de la <u>Section 3</u>, c'est la configuration de coupe de fraisage en opposition qui a été adoptée dans cette partie.

4.1 Qualité microscopique des surface usinées

La Figure 3.19 montre que l'état microscopique des surfaces usinées est divisé en deux zones qui correspondent à l'orientation de la fibre au sein de la pièce agrocomposite. La zone correspondante aux fils de trame (ZTR) génère des fortes irrégularités quant à la coupe des fibres élémentaires. En effet, sur toute les configurations de coupe, on retrouve des fibres cisaillées, d'autres arrachées et d'autres détachées qui laissent des cavités vides sur la surface usinée. Ceci est dû au tribo-contact entre l'arête de coupe et le faisceau de fibres concerné. En effet, le comportement de la fibre au contact avec l'arête de coupe est dépendant de son positionnement par rapport à cette dernière comme schématisé dans la Figure 3.20. Elle peut être soit cisaillée, soit arrachée ou détaché selon ce positionnement. L'arrachement des fibres est aussi dû à la flexibilité transversale des fibres qui favorise leur déformation au contact avec l'arête de coupe. Le détachement de fibres, quant à lui, est dû en partie à la faible adhésion entre les fibres végétales et la matrice polymère démontrée dans le Chapitre 1. Ceci explique le comportement aléatoire des fibres lors de la coupe dans cette zone.

En ce concerne la zone de fibres de chaine (ZCH), on remarque une différence sur l'aspect microscopique des fibres coupées à la surface usinée (Figure 3.19). Pour une arête de coupe droite (H=0°), les fibres sont plutôt bien cisaillées qu'on arrive à apercevoir la section des fibres. Plus on augmente l'angle d'hélice, plus on aperçoit des extrémités non coupées des fibres qui restent penchées sur la surface usinée. Ceci veut dire que l'augmentation de l'angle d'hélice affaiblie le mécanisme de cisaillement des fibres végétales et favorise la déformation de ces dernières lors du contact avec l'outil de coupe.



Figure 3.19: Images MEB des surfaces usinées avec les différents angles d'hélices. a) H=0°; b) H=20° et c) H=40°

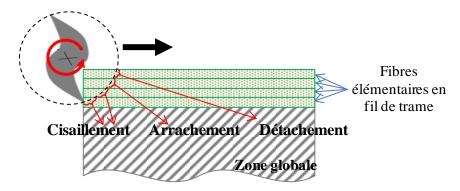


Figure 3.20 : Schématisation du comportement des fibres de trame suivant le positionnement du contact avec l'arête de coupe

4.2 Analyse des efforts de coupe

Afin de comprendre des effets observés microscopiquement de l'angle d'hélice, les efforts de coupe mesurés pour chaque configuration de coupe ont été tracés. La <u>Figure 3.21</u> représente l'évolution des trois composantes de l'effort générées lors de la coupe. F_x est l'effort radial à la fraise, F_y est l'effort dans le sens de l'avance et F_z est l'effort axial.

La <u>Figure 3.21</u> montre que l'angle d'hélice n'affecte pas significativement l'effort radial F_x . En revanche, l'augmentation de l'angle d'hélice diminuera l'effort tangentiel de coupe F_y et augmentera l'effort axial F_z . En effet, Une augmentation de l'angle d'hélice réorientera le vecteur de la résultante de l'effort surfacique F_r (dans le plan de la surface usinée) vers l'axe Z comme schématisé dans la <u>Figure 3.22</u>.

Les efforts de coupe élevés dans le cas d'une arête de coupe droite (H=0°) résultent d'un engagement brutal de l'arête dans la matière (Figure 3.22(a)). Ceci augmente la rigidité de contact outil/matière et participe à un cisaillement efficace des fibres végétales comme observé dans la Section 4.1. En augmentant l'angle d'hélice de l'outil, l'engagement de l'arête de coupe dans la matière sera progressif (Figure 3.22(b)) et ceci diminuera la rigidité de contact et permettra à la

fibre végétale de se déformer lors du processus de coupe. Ceci empêchera un cisaillement efficace des fibres végétales et générera les extrémités des fibres non coupées.

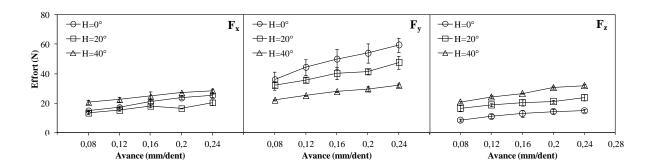


Figure 3.21: Efforts de coupe générés lors du procédé de détourage avec les trois outils étudiés

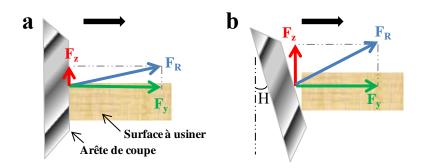


Figure 3.22 : Schématisation de l'effet de l'angle d'hélice sur les composantes des efforts et sur l'engagement de l'arête de coupe dans la matière. a) H=0 et b) H>0

4.3 Effet de l'angle d'hélice sur le frottement outil/matière

Le frottement est un phénomène important à prendre en compte lors des opérations d'usinage. Son effet est inhérent sur les mécanismes de coupe, la qualité finale de la surface et l'usure de l'outil de coupe. On propose, dans cette partie, l'évaluation du frottement durant l'usinage en fonction de l'angle d'hélice. Pour cela, on calcule le coefficient de frottement apparent (μ_{app}) par le biais des efforts de coupe mesurés comme le montre la Figure 3.23(a).

La <u>Figure 3.23(b)</u> montre que le coefficient de frottement apparent est à son maximum pour l'outil à angle d'hélice nul et décroit considérablement en augmentant l'angle d'hélice. Cette chute du coefficient de frottement peut être expliquée par les composantes du coefficient de frottement apparent et qui sont liées à des mécanismes spécifiques. En effet, le μ_{app} est un concept global. Il peut être décomposé, dans le cas des agrocomposites en trois composantes principales comme le montre <u>l'équation 3.8</u>.

$$\mu_{\rm app} = \mu_{\rm sh} + \mu_{\rm df} + \mu_{\rm ad} \tag{3.8}$$

 μ_{sh} est la composante de cisaillement, μ_{df} est la composante de déformation et μ_{ad} est la composante d'adhésion.

En augmentant l'angle d'hélice, le cisaillement des fibres perd de l'efficacité (Section 4.2). Ceci diminuera la composante de cisaillement μ_{sh} . De plus, le mauvais cisaillement des fibres entrainera des extrémités des fibres non coupées qui resteront penchées sur la surface usinée. Ces extrémités des fibres vont réduire le contact de la face de dépouille de l'outil avec la matrice polymère et augmenter, en conséquence, le contact de cette face avec les fibres végétales. Et puisque le contact avec la matrice polymère engendre de forts coefficients d'adhésion et de déformation [80,81] et le contact avec les fibres végétales est connu comme non abrasif [61,82,83], alors les deux composantes μ_{df} et μ_{ad} vont aussi diminuer en augmentant l'angle d'hélice car ces extrémités non coupées des fibres végétales vont jouer le rôle d'un troisième corps lubrifiant.

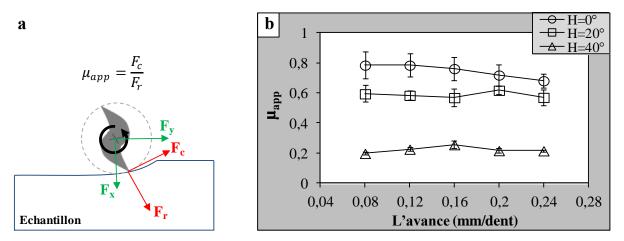


Figure 3.23 : a) Calcul du coefficient de frottement apparent. b) Evolution du coefficient de frottement apparent pour les trois outils étudiés

4.4 Analyse standard de l'état des surfaces usinées

Contrairement aux études précédentes, les fibres présentes dans le renfort sont bidirectionnelles. Pour évaluer l'état topographique des surfaces usinées, il est plus judicieux de mesurer un profil surfacique au lieu d'un profil linéique afin de prendre en compte les deux orientations. C'est pour cette raison que la mesure de la topographie des surfaces a été effectuée dans cette partie par l'interféromètre à lumière blanche au lieu du profilomètre.

La Figure 3.24(b) permet de bien différencier les deux zones des fibres de chaine (ZCH) et des fibres de trame (ZTR) puisque la topographie est différente dans les deux zones. La zone ZTR

présente plus de dispersion à cause du comportement aléatoire des fibres lors de la coupe comme expliqué dans la <u>Section 4.1</u>.

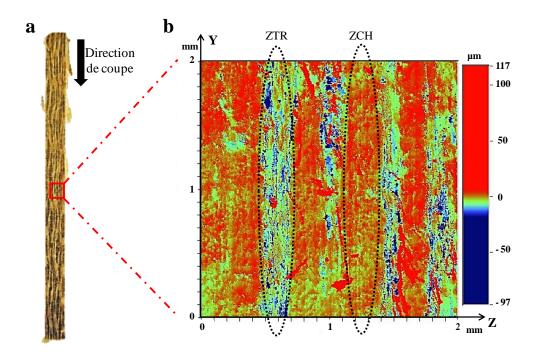


Figure 3.24 : a) Surface complète de l'échantillon agrocomposite après usinage. b) Image topographique typique obtenue par interféromètre

A partir des images topographiques de la <u>Figure 3.24(b)</u>, la moyenne arithmétique standard "Ra" de rugosité a été extraite séparément le long des profils de la zone ZTR et ZCH respectivement. La <u>Figure 3.25</u> présente l'évolution du "Ra" dans ces deux zones caractéristiques en fonction de l'avance de l'outil pour les différents angles d'hélice.

La <u>Figure 3.25</u> montre que, globalement, la rugosité de surface augmente légèrement avec l'augmentation de la vitesse d'avance. Le niveau de rugosité est beaucoup plus élevé dans la zone ZTR que dans la zone ZCH. Sur la zone ZCH, la rugosité de surface augmente légèrement avec l'augmentation de l'angle d'hélice. Sur la zone ZTR, le comportement aléatoire des fibres lors de la coupe se manifeste dans le Ra mesuré. Aucune différence dans le Ra mesuré dans les surfaces générées par les trois outils à part le cas des grandes vitesses d'avance où l'outil à angle d'hélice nul génère moins de rugosité de surface.

L'analyse standard de rugosité de surface montre encore une fois que cette dernière est due essentiellement aux extrémités non coupées des fibres dans le cas des agrocomposites.

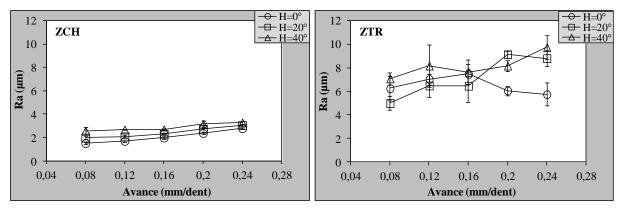


Figure 3.25: Moyenne arithmétique de rugosité des surfaces usinées sur la zone des fibres de chaine (ZCH) et la zone des fibres de trame (ZTR)

4.5 Analyse multiéchelle de l'état des surfaces usinées

Dans cette partie, les profils topographiques récupérés dans la <u>Section 4.4</u> ont été traités à l'aide de l'approche multiéchelle 2D par transformé en ondelettes continue (CWT) [84–86]. Le principe de cette approche est similaire à celui de la DWT décrit dans la <u>Section 2.4.1</u>. En revanche, CWT permet d'avoir la moyenne arithmétique de la rugosité de surface "Ma" sur toute la gamme des échelles de décomposition d'une manière continue. Ceci donnera plus d'informations par rapport à l'effet de l'échelle d'analyse dans les spectres multiéchelle obtenus. L'approche CWT a été choisie dans cette partie pour ne pas perdre des informations par discrétisation de la méthode DWT à cause des irrégularités présentes dans la zone ZTR. L'approche CWT a été appliquée sur des profils longitudinaux dans la direction de la coupe (parallèlement aux zones d'orientation des fibres) et sur des profils transversaux (perpendiculairement aux zones d'orientation des fibres).

La Figure 3.26 montre que pour les deux directions d'analyse, la rugosité est à son minimum sur les échelles microscopique et augmente progressivement jusqu'à atteindre les échelles mesoscopique où la rugosité va augmenter fortement jusqu'à atteindre sa valeur max à l'échelle i=500μm. La rugosité correspondante aux surfaces générées par l'outil à angle d'hélice nul est bien discriminée sur toute la gamme des échelles. Entre la rugosité générée par la fraise à H=20° et celle par la fraise à H=40°, la discrimination est bien évidente entre l'échelle i=50μm et i=1mm. Ceci correspond, comme pour les résultats de la Section 3.2.2, aux échelles entre la fibre technique et le fils de fibres. Pour les profils transversales (Figure 3.26(b)), on remarque une convergence des trois courbes vers un pic quasi identique à l'échelle i=500μm. Les échelles entre i=300μm et i=700μm correspondent alors aux échelles où se manifestent les irrégularités dues à la zone ZTR.

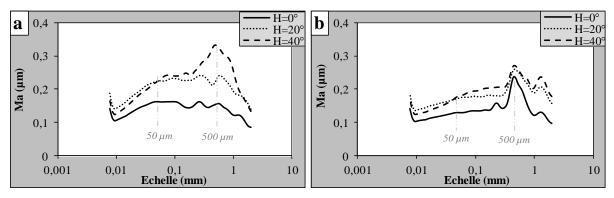


Figure 3.26: Spectre multiéchelle de la topographie des surfaces usinées par les outils étudiés. a) dans la direction longitudinale. b) dans la direction transversale

4.6 Effet de l'angle d'hélice sur les zones de décohésion périphérique (peluchage)

Les zones de peluchage ont été mesurées d'une manière identique à celle de la Section 3.3.1. La Figure 3.27 illustre l'évolution des longueurs de peluchage à l'entrée (Δy) et à la sortie (Δx) de l'arête de coupe. Globalement, les longueurs de peluchage diminuent légèrement avec l'augmentation de l'avance de l'outil. Pour le peluchage à l'entrée, il diminue significativement en augmentant l'angle d'hélice de l'outil jusqu'à devenir quasi-nul pour l'angle d'hélice H=40°. En revanche, l'augmentation de l'angle d'hélice augmente la longueur de peluchage à la sortie de l'arête de coupe. En effet, l'augmentation de l'angle d'hélice renforce le maintien des fibres qui sont au voisinage de l'entrée de l'arête de coupe par le biais de cette dernière comme schématisé précédemment dans la Figure 3.22(b). Les fibres qui sont au voisinage de la sortie de l'arête de coupe auront moins de maintien, surtout que l'augmentation de l'angle d'hélice va les rediriger vers la direction axiale.

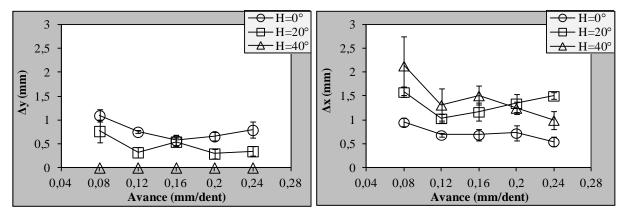


Figure 3.27: Evolution de la longueur de peluchage à l'entrée (Δy) et à la sortie (Δx) de l'arête de coupe pour les trois angles d'hélice étudiés

5 Conclusions

A partir de ces études paramétriques, on peut conclure que l'usinabilité des agrocomposites est fortement sensible à la variation des paramètres matériau/process ainsi qu'à la configuration de coupe. Ceci est dû à la structure cellulosique multiéchelle des fibres végétales, largement différente des fibres synthétiques, qui les rend très sensibles à l'échelle de contact outil/matière.

L'analyse multiéchelle par transformé en ondelette a été utilisée pour étudier l'usinabilité des agrocomposites. Cette approche a montré que les échelles pertinentes pour évaluer l'effet des paramètres matériaux/process sont celles qui correspondent à la taille de la structure du renfort fibreux présent dans l'agrocomposite. Sur ces échelles pertinentes, on identifie des critères mécaniques et géométriques pour qualifier l'usinabilité des agrocomposites et ainsi la qualité des surfaces usinées. Ces critères, qui sont indépendants du caractère naturel des fibres végétales, permettent une qualification efficace de l'usinabilité des agrocomposites en s'affranchissant de la variabilité des propriétés des fibres végétales.

Les contacts mécanique et tribologique de coupe sont alors différents d'un point de vue multiéchelle puisque les éléments en contact sur chaque échelle n'ont pas les mêmes comportements. En effet, si l'on se réfère à la structure des fibres végétales, on peut distinguer trois échelles caractéristiques de contact de coupe :

- Echelle microscopique : entre l'arête de coupe et la fibre élémentaire.
- Echelle mesoscopique : entre l'arête de coupe et le faisceau des fibres.
- Echelle macroscopique : entre l'arête de coupe et le mélange fibres/matrice.

Ainsi, le <u>Chapitre 4</u> expose une analyse tribo-mécanique des phénomènes physiques de coupe en sollicitant le matériau agrocomposite sur ces différentes échelles caractéristiques de contact.