

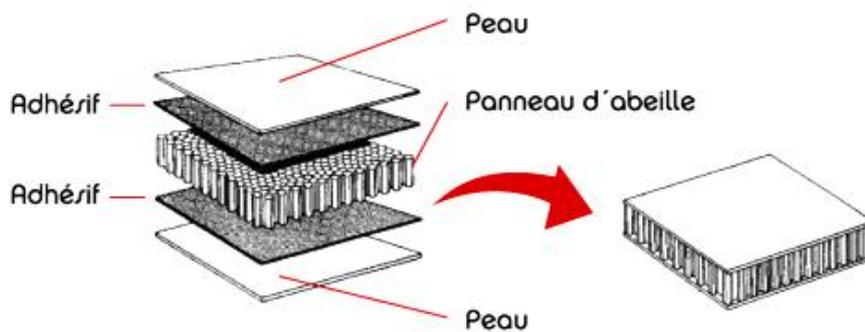
# Application industrielle

## **1 Introduction**

En se basant sur les études réalisées dans le **Chapitre 3** et le **Chapitre 4**, une application est réalisée dans ce chapitre sur une pièce agrocomposite industrielle fournie par Faurecia afin de valider l'ensemble des théories générées. L'objectif est de définir les conditions favorables pour la coupe des agrocomposites et ainsi les optimiser sur la pièce industrielle pour aboutir à des surfaces usinées avec le moins d'irrégularités et le moins d'endommagement possible.

## 2 Pièce agrocomposite sandwich "FlaxPreg™"

Les structures dites "sandwiches" occupent une place importante dans le domaine de la construction des pièces composites. Elles sont présentes dans pratiquement tous les domaines d'application. Ces structures résultent de l'assemblage par collage ou soudure de deux peaux (ou semelles) minces sur une âme (ou cœur) plus léger et de plus faibles caractéristiques mécaniques (généralement une structure nid d'abeille) qui maintient leur écartement et transmet par cisaillement les actions mécaniques d'une peau à l'autre comme présenté dans la [Figure 5.1](#).

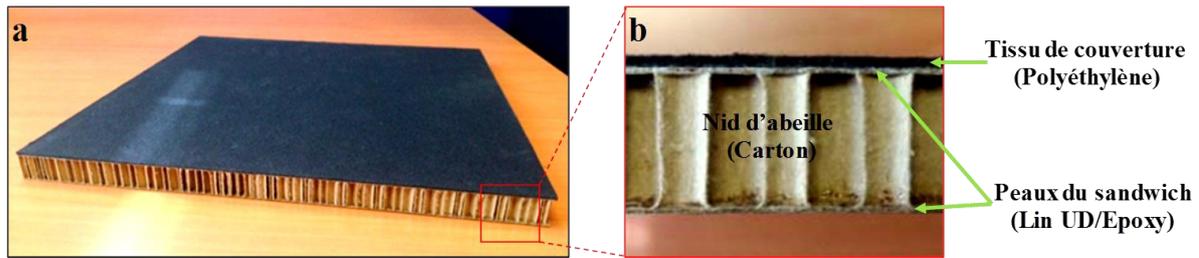


*Figure 5.1 : Schématisation d'une structure sandwich*

L'agrocomposite sandwich « Flaxpreg™ » développé par l'équipementier automobile Faurecia est un composite sandwich léger renforcé en fibres longues de lin ([Figure 5.2](#)). Ce produit a reçu le prix de l'innovation « JEC Europe 2015 » dans la catégorie semi-produits.

Flaxpreg™ peut être utilisé par les constructeurs automobiles en tant que faux-plancher de coffre à multi-positions ou comme plancher structural à l'intérieur de l'habitacle. L'utilisation comme renfort de fibres longues de lin unidirectionnelles non tissées est l'innovation clé qui permet une réduction drastique de la masse. En effet, et grâce à sa faible densité en utilisant les fibres de lin comme renfort dans la peau et du carton dans la structure nid d'abeille, Flaxpreg™ offre d'excellentes propriétés mécaniques permettant une baisse de la masse de 35% par rapport aux solutions sandwich traditionnelles utilisant du polyuréthane petro-sourcé et un renfort en fibre de verre.

Chaque peau du sandwich Flaxpreg™ est constituée de trois couches de fibres longues de lin unidirectionnelles liées par une résine époxy. La densité des fibres dans chaque couche est d'environ 200 g/m<sup>2</sup>. Ceci donne à la peau une épaisseur d'environ 1mm. Les trois couches de lin dans chaque peau s'orientent en 0°/90°/0°. L'épaisseur de la structure nid d'abeille en carton est d'environ 18 mm. Le tissu noir de couverture sur le composite est un aiguilleté non tissé de fibres de Polyéthylène.



**Figure 5.2 :** Structure agrocomposite sandwich Flaxpreg™ développée par Faurecia. a) vue 3D. b) vue de profil

### 3 Protocole expérimental

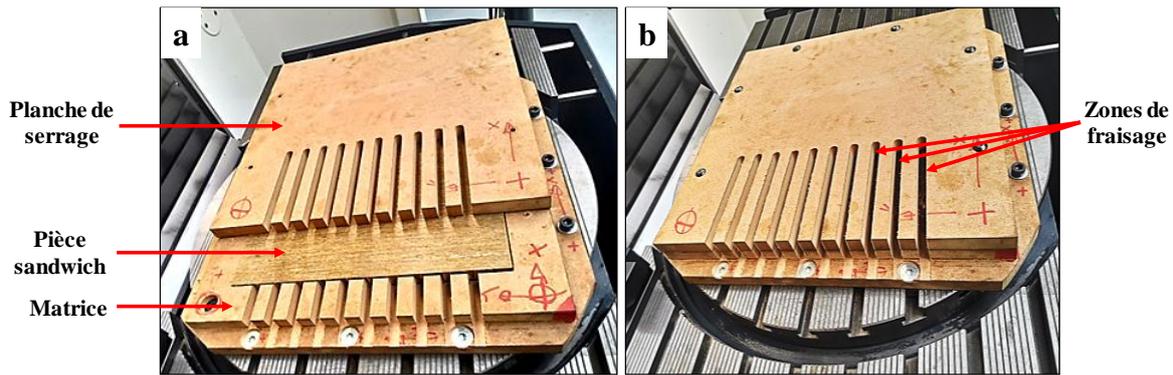
#### 3.1 Système de bridage pour la structure sandwich

Afin d'usiner la pièce sandwich Flaxpreg™ dans la machine 5 axes à commandes numériques. Il fallait développer un système de bridage spécial pour la pièce sandwich. Le système de bridage conventionnel utilisé dans le [Chapitre 3](#) ne peut pas être utilisé dans le cas d'une structure sandwich car le serrage fort sur l'épaisseur de la pièce endommagera la structure.

Pour effectuer un serrage efficace de la pièce sandwich sans pour autant endommager sa structure, un moule de serrage a été réalisé en panneau de fibres de bois à densité moyenne (connu sous la dénomination de « medium ») afin de répartir l'effort de serrage sur toute la pièce et éviter ainsi sa concentration sur des faibles surfaces et par conséquent l'endommagement de ces dernières. Le moule se compose en deux parties comme montré sur la [Figure 5.3](#) :

- La matrice dans laquelle on introduit la pièce. Elle se décompose en deux niveaux. Le niveau inférieur est plus grand que le niveau supérieur. Le niveau inférieur serre à fixer le moule avec la table de la machine 5 axes. Le niveau supérieur a été précisément usiné afin de contenir en sur-mesure la pièce sandwich.
- La planche de serrage qui va être vissé sur la matrice après l'introduction de la pièce à l'intérieur du moule.

La profondeur de la matrice étant légèrement inférieure à l'épaisseur de la pièce, ce système garantit un serrage efficace de la pièce sur les trois axes principaux après vissage de la planche de serrage sur la matrice. Les zones de fraisage sur la pièce ont été pré-usinées sur le moule afin de faciliter le passage de la fraise lors des opérations d'usinage.



**Figure 5.3 :** Monle de serrage de la pièce sandwich fixé sur la table de la machine 5 axes. a) avant fermeture de la planche de serrage. b) après la fermeture de la planche de serrage.

### 3.2 Plan d'expérience

Les essais de fraisage sur la pièce sandwich sont réalisés en mode rainurage le long de la profondeur de la pièce sur une distance de 100 mm comme défini par les zones de fraisage sur la **Figure 5.3**. Le plan d'expérience est établi en se basant sur les travaux du **Chapitre 3** afin de déterminer les conditions et les plages favorables des variables process pour l'usinage des agrocomposites et les optimiser pour cette application industrielle.

Ainsi, c'est la fraise en carbure non revêtu et à angle d'hélice nul qui a été choisie pour cette application. Ce choix est basé sur le fait que l'absence du revêtement offre une meilleure acuité d'arête et la goujure droite offre un engagement brutal qui augmentera la rigidité de contact. De plus, un angle d'hélice nul empêchera le délaminage des couches sur la surface de la pièce.

Le **Tableau 5-1** présente les paramètres process retenus pour cette application suite aux résultats du **Chapitre 3**.

**Tableau 5-1 :** Paramètres process pour l'application sur la pièce sandwich

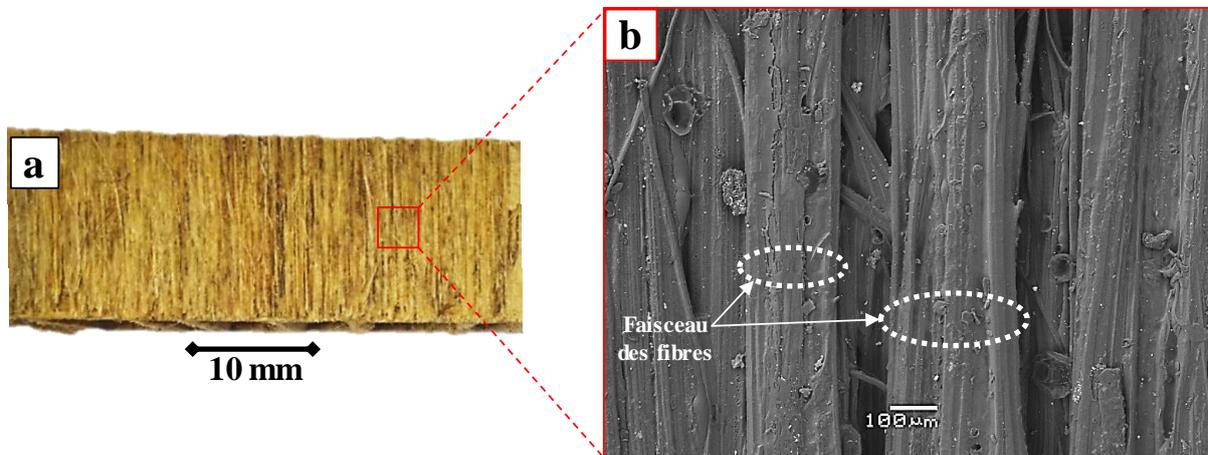
Vitesse de coupe $V_c$ (m/min)	Avance $f_z$ (mm/dent)
100	0.02
200	0.04
300	0.06
400	0.08
	0.1

### 3.3 Mesures post-mortem

On s'intéresse dans cette application industrielle à l'état de surface de la peau agrocomposite (Lin UD / Epoxy). Les comportements de la structure nid d'abeille en carton et du tissu de couverture ne sont pas pris en compte.

L'état microscopique des surfaces usinées est évalué, comme pour les études précédentes, par le microscope électronique à balayage (MEB) en mode vide dégradé. La topographie des surfaces usinée est mesurée en mode 3D par l'interféromètre à lumière blanche afin de remonter à une topographie surfacique qui inclut les différentes orientations des couches.

Suite aux résultats du [Chapitre 3](#), il a été démontré que les échelles pertinentes d'analyse sont celles de la structure du renfort fibreux. Dans le cas de la pièce sandwich Flaxpreg™, le renfort est un non tissé à fibres non tordues de lin unidirectionnelles. Les échelles pertinentes sont alors les échelles des fibres techniques qui constituent le renfort. La [Figure 5.4](#) faite par le MEB montre que la taille de la fibre technique de lin utilisée dans ce renfort est en moyenne d'environ 200  $\mu\text{m}$ . Par conséquent, l'objectif de l'interféromètre a été choisi pour obtenir une image topographique dont la dimension correspond à l'échelle des fibres techniques du renfort.



**Figure 5.4 :** a) Echantillon de pièce sandwich Flaxpreg™. b) Image MEB de la peau composite lin/époxy du sandwich

## 4 Résultats

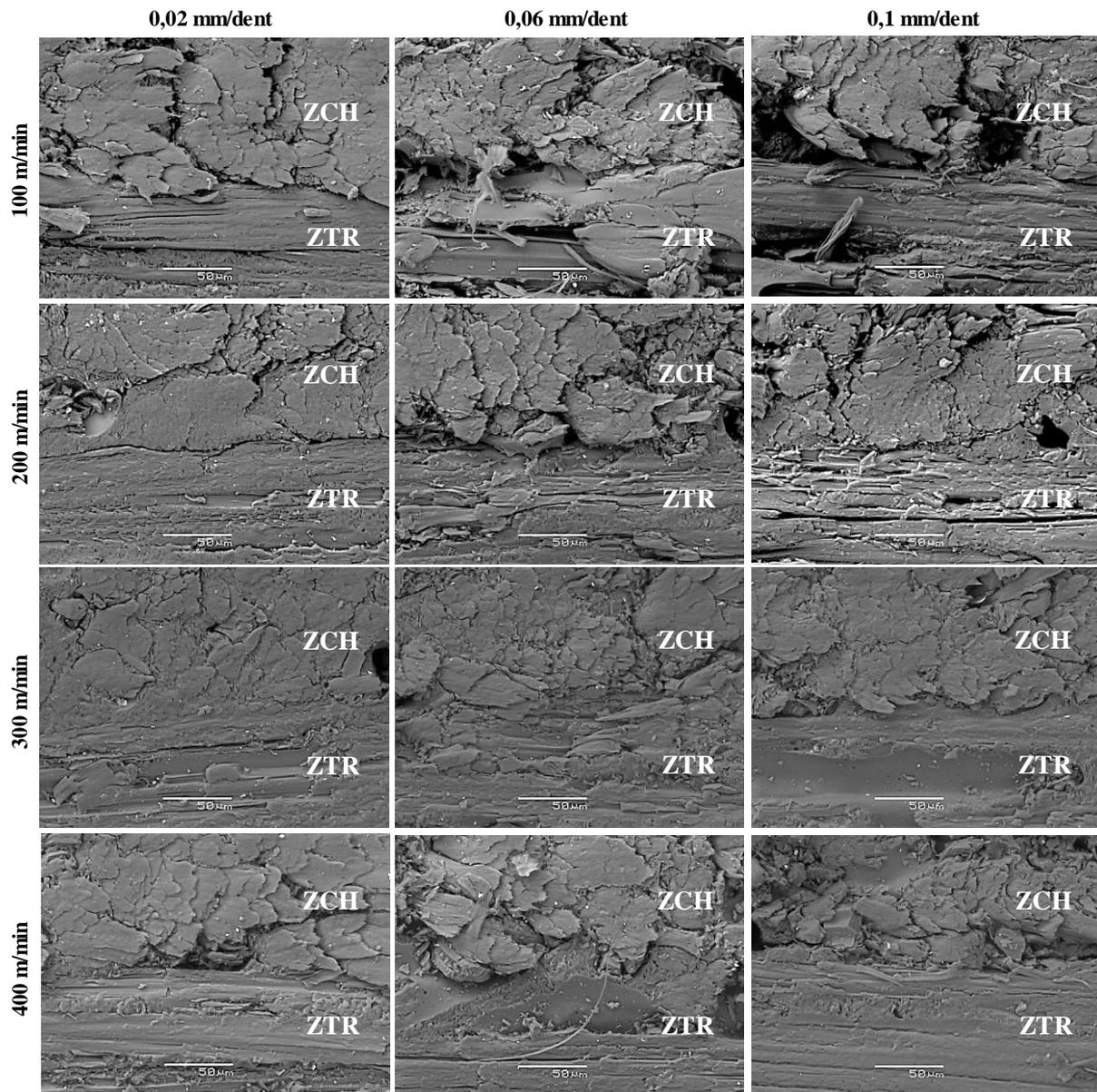
### 4.1 Observations microscopiques des états des surfaces

La **Figure 5.5** illustre des images obtenues par le MEB de l'état microscopique typique pour différentes configurations de coupe. Puisque les couches du composite sont orientées dans les deux directions principales ( $0^\circ$  et  $90^\circ$ ), on distinguera deux zones de fibres : la zone des fibres de chaîne (ZCH) dont les fibres sont perpendiculaires à la direction de l'avance de l'outil et la zone des fibres de trame (ZTR) dont les fibres sont orientées parallèlement à la direction de l'avance de l'outil.

La zone des fibres de tram (ZTR) est plus affectée par l'avance de l'outil en faible vitesse de coupe. En effet, l'augmentation de l'avance de l'outil provoque des microfissures et un arrachement de matière sur la surface usinée. En augmentant la vitesse de coupe, la ZTR ne semble plus influencée par la variation de l'avance de l'outil.

Sur la zone des fibres de chaîne (ZCH), l'augmentation de l'avance de l'outil rend les fibres difficiles à couper avec des extrémités qui restent penchées sur la surface. De plus, et comme pour la ZTR, l'augmentation de l'avance provoque aussi un arrachement de la matière. L'augmentation de la vitesse de coupe améliore l'efficacité du cisaillement des fibres et réduit l'effet de l'avance. En revanche, au-delà d'une vitesse de coupe de 300 m/min, on remarque que l'efficacité du cisaillement commence à diminuer avec des petites extrémités de fibres non coupées sur les surfaces.

Cette observation microscopique montre que le comportement des fibres végétales est le même malgré la présence, cette fois-ci, d'une matrice thermodurcissable plus rigide que la matrice thermoplastique de polypropylène. Ainsi, le comportement des fibres végétales lors de la coupe est indépendant de la matrice utilisée dans l'agrocomposite.

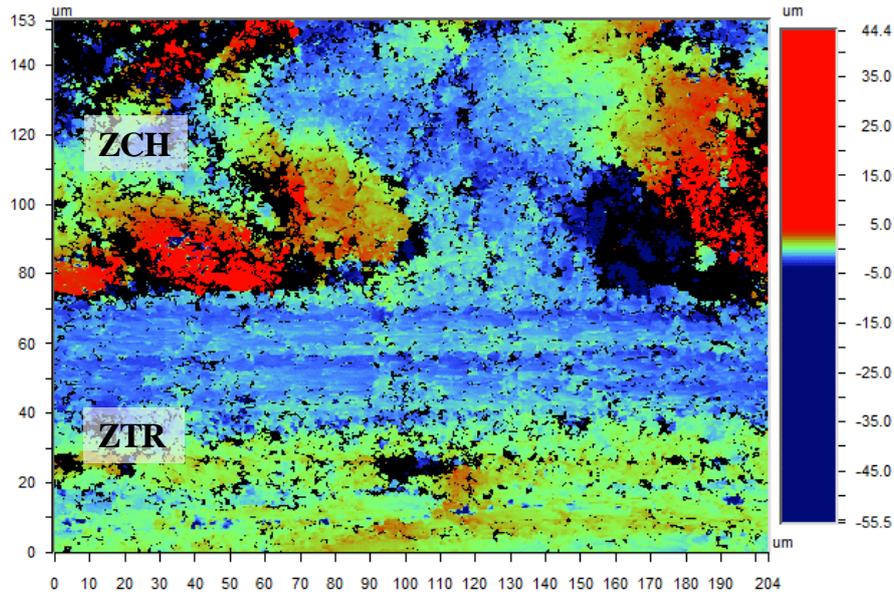


**Figure 5.5 :** Images MEB des surfaces de profil des peaux de sandwich après fraisage montrant la zone des fibres de chaîne (ZCH) et des fibres de trame (ZTR)

#### 4.2 Analyse de la rugosité des surfaces usinées

Suite aux analyses microscopiques des surfaces usinées sous différents conditions, l'intérêt de cette partie est de quantifier les constatations des observations MEB afin de pouvoir optimiser les paramètres process liés à la cinématique de l'outil (vitesse de coupe et vitesse d'avance).

La **Figure 5.1** montre une image topographique typique par interféromètre des surfaces usinée sur le profil des peaux du sandwich Flaxpreg<sup>TM</sup>. On distingue sur l'image la zone des fibres de chaîne (ZCH) et la zone des fibres de trame (ZTR). On constate aussi les zones d'arrachement de matière qui n'ont pas été mesurées et sont marquées par une couleur noire.



**Figure 5.6 :** Image topographique typique obtenue par interféromètre des surfaces usinées contenant la zone des fibres de chaîne (ZCH) et la zone des fibres de trame (ZTR)

La dimension de l'image topographique de la **Figure 5.6** correspond bien à la taille des fibres techniques de la **Figure 5.4(b)**. On est alors bien sur les échelles pertinentes pour analyser la rugosité des surfaces usinées. Ainsi, la moyenne arithmétique surfacique de la variation topographique "Sa" a été calculée sur chaque image topographique.

La **Figure 5.7** présente les résultats de la rugosité de surface en fonction de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance. On constate que la rugosité de surface augmente en augmentant la vitesse d'avance et diminue en augmentant la vitesse de coupe. Ceci est en parfaite cohérence avec les observations microscopiques. En effet, l'augmentation de la vitesse d'avance augmente le taux des extrémités non coupées des fibres en plus des zones d'arrachement de matière. Ceci augmente l'irrégularité dans la topographie des surfaces et augmente la rugosité. Ce phénomène est mieux observé en faible vitesse de coupe dans la **Figure 5.5** et c'est exactement ce qu'on retrouve en termes de rugosité de surface puisque c'est dans cette vitesse qu'on retrouve l'augmentation la plus drastique de la rugosité en fonction de l'avance (**Figure 5.7(a)**).

En revanche, on récupère sur chacun des graphes de la **Figure 5.7** un optimum malgré la tendance globale. La rugosité est à sa plus faible valeur pour une avance de 0.04 mm/dent et pour une vitesse de coupe de 300 m/min. Par conséquent, ce paramétrage est le mieux adapté pour ce matériau afin garantir les surfaces usinées les plus lisses possible avec moins d'endommagement surfacique dû à l'arrachement de matière.

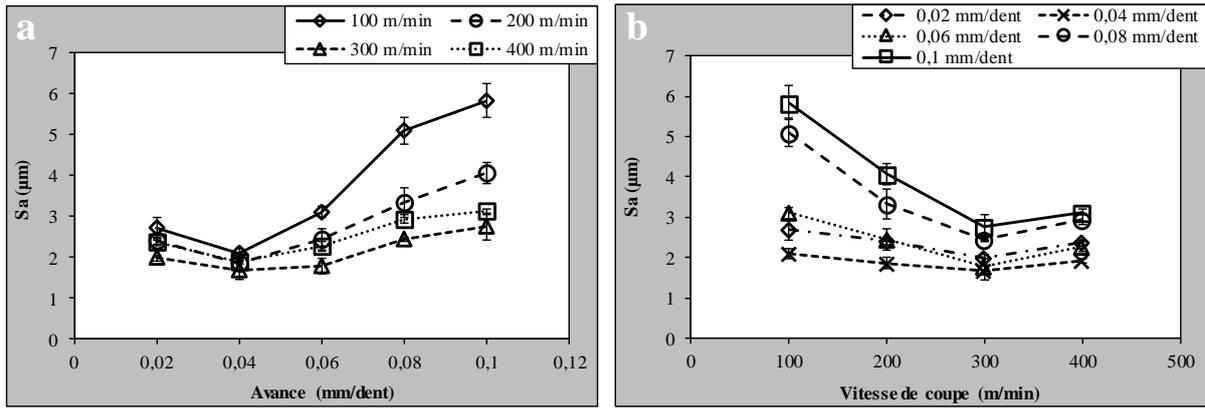


Figure 5.7 : Rugosité des surfaces usinées en fonction de (a) l'avance de l'outil (b) la vitesse de coupe

## **5 Conclusion**

Suite aux travaux d'usinage par fraisage du **Chapitre 3**, une application industrielle a été réalisée dans ce chapitre afin de valider les conclusions des travaux précédents et ainsi les exploiter pour optimiser les paramètres process de la pièce industrielle sujet de cette application. C'est ainsi qu'un outil non revêtu à goujures droites a été utilisé pour les essais de fraisage sur une pièce agrocomposites sandwich fournie par Faurecia en utilisant une plage de valeurs pour la vitesse de coupe et la vitesse d'avance en concordance avec les conditions favorables pour l'usinage des agrocomposites. A ces plages, l'augmentation de la vitesse d'avance rend le cisaillement des fibres difficile ce qui laisse en conséquence des extrémités des fibres non coupées ainsi qu'un arrachement de matière. Ces deux phénomènes augmentent la rugosité de la surface usinée. L'augmentation de la vitesse de coupe, quant à elle, réduit ces deux phénomènes et permet ainsi de réduire la rugosité de la surface usinée.

Cette étude a permis de déterminer les paramètres optimums liés à la cinématique de l'outil afin de générer une meilleure qualité de surface. La vitesse de coupe optimale est de 300 m/min et l'avance optimum est de 0.04 mm/dent.