

## Valorisation des sciures de MDF pour un composite imprimable en 3D

RAMAUX Johan<sup>1,2,3</sup>, NOUVEL Cécile<sup>2</sup>, ZIEGLER-DEVIN Isabelle<sup>3</sup>, BESSERER Arnaud<sup>3</sup>, Benjamin BONNOT<sup>4</sup>, NOYEL Mélanie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Acta Mobilier, 7 Rue de Madrid, 89470 MONETEAU

<sup>2</sup> Université de Lorraine, CNRS, LRGP, F-54000 Nancy, France

<sup>3</sup> LERMAB, Université de Lorraine, GP4W, F 54 000 Nancy, France

<sup>4</sup> Scan Reality, 305 Rue de la Roche Guérin, 88000 DINOZE

[johan.ramaux@univ-lorraine.fr](mailto:johan.ramaux@univ-lorraine.fr)

**Mots clés :** Impression 3D ; Recyclage ; Panneaux de Fibres de Densité Moyenne (MDF) ; Procédés

### Contexte

La production de déchets bois et la tension sur la matière première pour les différents besoins de l'industrie sont en constante augmentation. La production de déchets bois a atteint 240 millions de mètres cubes en 2020 (FAO 2022). Par ailleurs, bien que diverses méthodes de valorisations existent, comme l'incorporation dans des composites thermoplastiques ou encore l'extraction de molécules à haute valeurs ajoutées, le réemploi de la ressource n'est pas total et nécessite la création de nouvelles filières de recyclage (Pandey 2022). Parmi les techniques de recyclage pour la création de composites plastiques à base de bois, une nouvelle technologie prometteuse est en train d'émerger : la fabrication additive (plus communément appelée impression 3D). L'impression 3D permet, en plus d'offrir des possibilités de création presque sans limites, de pouvoir utiliser une vaste source de matières premières, incluant l'utilisation de composites plastique/bois. Cette technique est donc un moyen peu coûteux de réutiliser les déchets de biomasse tout en augmentant la valeur ajoutée de ces derniers et des polymères utilisés. C'est dans ce contexte, que l'entreprise Acta Mobilier (Monéteau, France) cherche à valoriser ses déchets de panneaux de fibres de densité moyenne (MDF). Ces sciures sont présentes en grandes quantités (environ 1 m<sup>3</sup> par jour). La volonté de l'entreprise est donc de pouvoir recycler ses sciures de MDF en utilisant l'impression 3D pour la création de nouveaux produits à haute valeur ajoutée. Afin de proposer un produit le plus vertueux possible, une étape de dépollution des fibres de MDF peut être envisagée. Cette dépollution des fibres ainsi que l'imprimabilité du composite sont quelques-uns des nombreux défis qui restent encore à relever avant l'industrialisation de ces nouveaux produits.

### Matériels et Méthodes

#### *Fibres de MDF utilisées*

Les fibres de MDF utilisées sont les déchets d'usinage récupérés chez Acta Mobilier. Afin de ne pas boucher la buse de l'imprimante 3D (diamètre de 0.8 mm) les sciures ont au préalable été tamisées à 300 µm. Cette fraction correspond à plus de 90% de la masse totale de déchet MDF. Par ailleurs, une analyse granulométrique (Malvern 3000, Malvern Panalytical) a permis de montrer que leur taille moyenne (D50) est de 100 µm. Les sciures ont une humidité relative de 5%.

#### *Dépollution des sciures de MDF*

Afin de retirer la résine urée-formaldéhyde des sciures de MDF, un pré-traitement des sciures a été mis en place. Dans un cristalliseur métallique une quantité d'environ 350g de sciures de

MDF tamisée a été introduite, recouverte à hauteur d'eau distillée. L'ensemble a ensuite été placé dans un autoclave à 121°C pendant 15 minutes. Les sciures ont par la suite été filtrées deux fois sous-vide à l'aide d'un filtre Büchner avec un rinçage entre les deux filtrations. Avant d'être utilisées dans le composite, elles ont au préalable été préséchées à 60°C pendant 3 jours puis séchées sous-vide à 103°C pendant 24h dans une étuve.

#### *Fabrication des composites*

A l'aide d'une extrudeuse bi-vis (Thermo Scientific, PTW24), différents lots de composites ont été fabriqués en mélangeant le MDF à l'acide polylactique (PLA). Le PLA est amené dans l'extrudeuse par un débitmètre volumique calibré alors que les fibres de MDF sont amenées par un débitmètre massique (également calibré au préalable). Le PLA utilisé est le PLE005 de chez NaturePlast (Ifs, France) avec une densité de 1,25 et un indice de fluidité à chaud de 23 g/10 min (donnée fournisseur). Le profil de température de l'extrudeuse est constant sur toute sa longueur et de 170°C pour l'expérience de référence avec du PLA vierge contre 160°C pour produire un composite PLA / MDF (avec une teneur de 20% en masse de MDF). Dans le but de rendre le procédé le plus simple industriellement, l'ensemble des intrants n'ont pas été séchés au préalable. Différents lots ont été réalisés parmi lesquels :

- Un lot CB constitué de 20% en masse de fibres de MDF et 80% de PLA
- Un lot CC0 constitué de 20% en masse de fibres de MDF dépolluées et 80% de PLA

#### *Mesure de l'indice de fluidité à chaud (Melt Flow Index – MFI)*

Les mesures de l'indice de fluidité à chaud ont été réalisées à l'aide d'un testeur de fluidité polyvalent (CEAST MF20, Instron). La précharge utilisée est de 2.16 kg et la température de 180°C. Chaque mesure a été répétée huit fois. Les graphiques obtenus ont été réalisés sous R (R Core Team 2021).

#### *Calorimétrie Différentielle à balayage (DSC)*

La DSC est une méthode d'analyse thermique consistant à mesurer la différence de flux de chaleur entre un échantillon et une référence. L'échantillon est placé dans une capsule en aluminium et la référence consiste en une capsule vide. La variation du flux de chaleur est enregistrée en fonction du temps et de la température. Par la mesure de la différence de flux de chaleur, il est alors possible d'observer différents phénomènes physiques et de déterminer plusieurs grandeurs (Menczel et Prime 2009) dont la température de fusion ( $T_f$ ). Cette température est un point de départ pour déterminer la température d'extrusion du matériau sur l'imprimante 3D.

#### *Impression 3D*

L'objectif principal de ce projet, est l'impression 3D du matériau composite obtenu. Le procédé choisi pour l'impression 3D est l'extrusion de matière et plus spécifiquement le *Fused Granular Fabrication* (FGF, permettant l'extrusion de pellets). Pour cela, une imprimante Tumaker NX Pro Pellet a été utilisée. Différents paramètres ont fait l'objet d'une étude et d'une optimisation. Les paramètres fixes sont résumés dans le Tab. 1.

Tab. 1 : Principaux paramètres fixes sur l'imprimante 3D

<b>Paramètre</b>	<b>Valeur</b>
Vitesse d'impression	45 mm/s
Température d'impression	185 – 210 °C (selon la formulation)
Température du plateau	50 °C
Facteur de correction de débit	1,4 – 2,8 (selon la formulation)
Diamètre de la buse	0,8 mm

## Mesures de résiliences

La résilience des différents composites a été évaluée selon la norme NF EN ISO 179-1 avec la méthode d'essais de mouton de Charpy. Pour cela, un ensemble de 10 éprouvettes par formulations de composite ont été imprimées. Les éprouvettes ont des dimensions de 80x10x4 mm puis entaillées sur une profondeur de  $2,0 \pm 0,2$  mm avec un angle de  $45 \pm 1^\circ$  et un rayon de 0,25 mm comme indiqué sur la Fig. 1 (entaillures de type A).



Fig. 1 : Plan et photographie d'une éprouvette de choc avant d'être cassée

Les éprouvettes ont été imprimées une à une afin d'obtenir un minimum de défaut d'impression. Le taux de remplissage des pièces est de 100 % (le taux de remplissage est un paramètre géométrique défini par l'utilisateur), avec des couches imprimées à  $45^\circ/-45^\circ$ . La dimension de chaque éprouvette a été mesurée, afin de recalculer la résilience réelle à partir de l'énergie de rupture et la surface réelle de l'éprouvette.

## Résultats et Discussion

Les propriétés du composite obtenu dépendent grandement des intrants. Du fait de la variabilité de la sciure de MDF, c'est pourquoi, il est important de mettre en place des outils performants afin de pouvoir corréliser les propriétés initiales de la sciure et du PLA à celles du matériau composite final. L'objectif final est donc d'être en capacité de pouvoir imprimer les différentes formulations.

### Mesures de MFI

La mesure du MFI permet d'obtenir une première image de son comportement à l'état fondu à des taux de cisaillement faibles. Les échantillons testés sont le PLA pur, le lot PLA / MDF et le lot PLA / MDF dépollué. Les résultats sont présentés dans la Fig. 2.

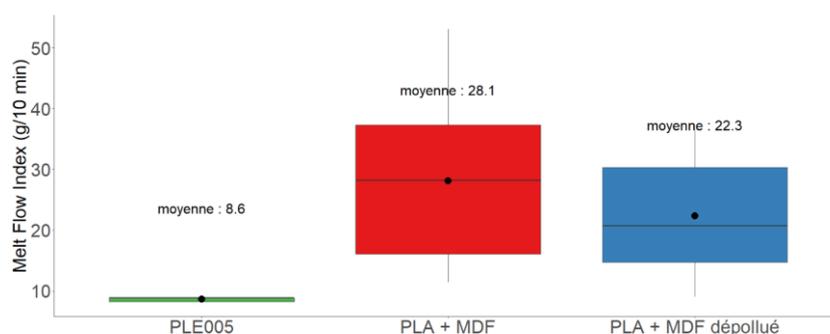


Fig. 2 : Mesures de MFI obtenues pour les différents lots

Le PLA à  $180^\circ\text{C}$  présente un MFI qui est en adéquation avec ce qui est couramment obtenu pour la fabrication additive (environ 10 g/10min) comme recommandé (Wang 2017). L'ajout de MDF dans le PLA entraîne alors une augmentation importante de ce dernier (facteur 3). De plus, la dispersion des valeurs augmente de manière très importante. La principale hypothèse permettant d'expliquer cette augmentation des valeurs est une dégradation du PLA par hydrolyse lors du procédé d'extrusion. Cela engendre des chaînes de polymères de plus petites tailles qui voient donc leurs mobilités accrues. Le MFI augmente également lorsque les fibres

sont dépolluées (facteur 2,5) mais de manière légèrement moins importante. Cela pourrait être due à une meilleure cohésion entre les fibres de MDF dépolluées et le PLA. En effet, pour le composite CB, les interactions ont lieu entre des fibres encollées et du PLA tandis que dans le cadre du composite CC0, les interactions sont entre des fibres où il n'y a plus de colle (ou très peu) et le PLA. Pour l'impression 3D, cela participe à expliquer les différences entre les paramètres d'impressions.

#### Détermination de la température de fusion par DSC

L'ajout de 20 m.% de fibres de MDF dans le PLA résulte en une baisse plus ou moins importante de la température de fusion. Sur les thermogrammes (Fig. 3), seul le PLA vierge ne présente pas de double pic de fusion. Le rajout des fibres de MDF entraîne de manière systématique l'apparition d'un double pic. A cause de la présence des sciures, les parties cristallines du PLA sont « perturbées » et ne se recristallisent pas de la même manière. Une partie des cristaux commence à fondre plus vite, entraînant l'apparition d'un premier pic de fusion (Praprudivongs et Sombatsompop 2012).

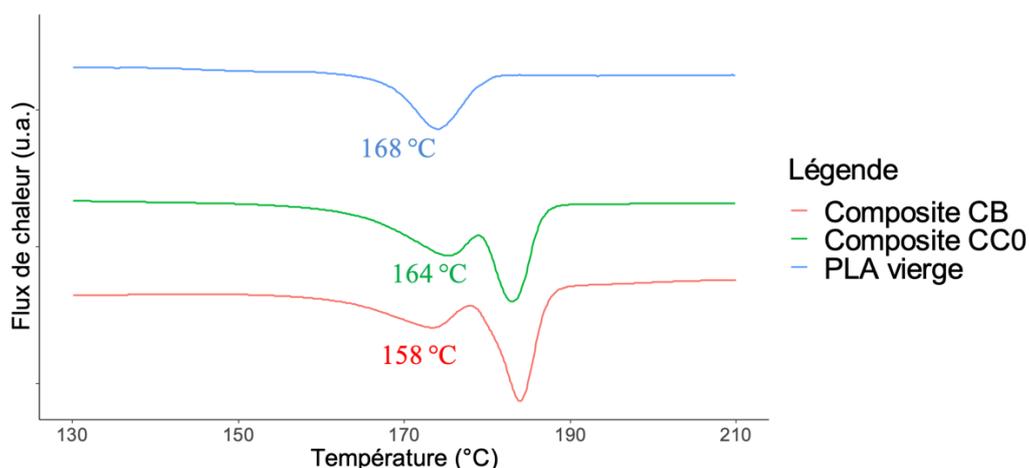


Fig. 3 : Thermogrammes des différents composites entre 130 et 210 °C

#### Impression 3D

La mise au point du procédé d'impression 3D par le procédé de *Fused Granular Fabrication* (FGF), est une étape importante qui a demandé de nombreux ajustements. Les matériaux composites obtenus n'étant pas des pellets commerciaux, il a été nécessaire de déterminer l'ensemble des paramètres permettant une impression réussie. L'impression est considérée réussie lorsque la pièce est imprimée jusqu'au bout de processus sans qu'il n'y ait eu de problèmes liés à l'imprimabilité. Cela ne garantit pas que la pièce soit sans défauts esthétiques. A partir des paramètres obtenus pour le PLA vierge (température 210°C, et correction de débit à 1,4), l'enjeu est donc d'ajuster ces paramètres pour permettre l'impression des composites à base de MDF. Pour chacun des deux lots de composites, il convient d'ajuster en premier lieu la température d'extrusion. Une fois que le matériau peut être extrudé au travers de la tête d'impression, le débit de matière est ajusté, afin que chacune des couches soit pleines et qu'il n'y est pas de manque de matière. Après plusieurs ajustements, l'impression des différents composites formulés est possible (Fig. 4).



Fig. 4 : Motif de branche de cerisier imprimé en 3D (à gauche avec le composite PLA + MDF et à droite avec le composite PLA + MDF dépollué)

D'un point de vue esthétique, la plus grosse différence est la couleur du matériau après impression. La dépollution des fibres entraîne une couleur légèrement plus foncée et plus mat du matériau. Le composite CB est très brillant avec une couleur marron clair.

#### *Essais de résilience*

Les valeurs de résilience obtenues (Tab. 2), sont beaucoup plus dispersées pour le composite brut et le PLA que pour le composite avec les fibres dépolluées. Le composite CC0 avec les fibres dépolluées a une résilience nettement supérieure (+ 31 % par rapport au composite CB). Cette augmentation plus importante peut être attribuée à une meilleure cohésion entre les fibres de MDF et le PLA. Le PLA étant directement en contact avec les fibres de bois et non plus avec la résine urée-formaldéhyde, il peut former des liaisons faibles (Van der Waals, hydrogène) avec les fibres de MDF. Les efforts encaissés seraient ainsi mieux dispersés au sein du composite.

Tab. 2 : Résilience (n=10) des différents composites formulés et imprimés en 3D

Composite	Résilience (kJ/m <sup>2</sup> )
PLA vierge	2,21 ± 0,81
Composite CB	2,14 ± 0,85
Composite CC0	2,81 ± 0,45

#### **Conclusion**

Nous avons montré qu'il est possible d'obtenir un composite doté de caractéristiques satisfaisantes pour l'impression 3D à partir de déchets d'usinage de MDF. Après plusieurs ajustements et malgré un comportement différent de ce qui est généralement fait pour l'impression 3D, le procédé de FGF donne satisfaction et permet d'obtenir de bons résultats d'impression. Les propriétés mécaniques, et notamment la résilience des matériaux a été mesurée avec succès et permet de mettre en évidence l'intérêt de la dépollution des fibres de MDF. Dans l'objectif d'améliorer encore ces différentes propriétés, l'ajout d'un compatibilisant combiné à la dépollution des fibres pourrait être une piste très prometteuse. L'ajout de compatibilisants pourrait également conférer de nouvelles propriétés au matériau composite, tel qu'une meilleure résistance au vieillissement.

#### **Remerciements**

Les travaux présentés ci-dessus sont réalisés dans le cadre d'une thèse CIFRE avec l'entreprise Acta Mobilier (Monéteau, Yonne). Pour la mise au point de l'impression 3D FGF, l'aide apportée par Benjamin Bonnot (Directeur de Scan Reality, Dinozé) a été significative.

## Références

FAO (2022) FAOSTAT. [en ligne]. [Consulté le 27 octobre 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.fao.org/faostat/fr/#data/FO>

Menczel JD, Prime RB (éd.) (2009) Thermal analysis of polymers: fundamentals and applications. Hoboken, N.J : John Wiley. ISBN 978-0-471-76917-0. QD139.P6 T445 2009

Pandey S. (2022) Wood waste utilization and associated product development from under-utilized low-quality wood and its prospects in Nepal. SN Applied Sciences. Vol. n°4, pp. 1-8.

Praprudivongs C, Sombatsompop N (2012) Roles and evidence of wood flour as an antibacterial promoter for triclosan-filled poly(lactic acid). Composites Part B: Engineering. Vol. n°43, pp. 2730-2737.

Wang SS (2017) Can the melt flow index be used to predict the success of fused deposition modelling of commercial poly(lactic acid) filaments into 3D printed materials? Plastics Rubber and composites. Vol. n°47, pp. 9-16.