

Simulation de l'évolution de la longueur de fibres ligno-cellulosiques durant la réalisation de composites en extrusion bivis

Françoise Berzin, Bruno Vergnes, Johnny J. Beaugrand

▶ **To cite this version:**

Françoise Berzin, Bruno Vergnes, Johnny J. Beaugrand. Simulation de l'évolution de la longueur de fibres ligno-cellulosiques durant la réalisation de composites en extrusion bivis. Rhéologie, 2014, 25, pp.65 - 71. hal-01108904

HAL Id: hal-01108904

https://minesparis-psl.hal.science/hal-01108904

Submitted on 23 Jan 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Simulation de l'évolution de la longueur de fibres ligno-cellulosiques durant la réalisation de composites en extrusion bivis

F. Berzin[1], J. Beaugrand[1], B. Vergnes[2]

[1] *Université de Reims Champagne-Ardenne, INRA,*
UMR 614 Fractionnement des AgroRessources et Environnement, 51100 Reims

[2] *MINES ParisTech, CEMEF, UMR CNRS 7635,*
CS 10207, 06904 Sophia-Antipolis

Reçu le 6 novembre 2013 - Version finale acceptée le 3 avril 2014

Résumé : les matériaux composites utilisent, de plus en plus, des renforts à base de fibres naturelles (lin, chanvre, sisal, miscanthus…) du fait de leur faible coût, de leur densité inférieure à celle des renforts traditionnels (verre, carbone…) et du caractère renouvelable de ces fibres. Lors du procédé de compoundage par extrusion, les fibres subissent une réduction importante de leur longueur et de leur ratio longueur/diamètre, ce qui nuit à l'augmentation des propriétés mécaniques recherchée. Cette étude porte sur la compréhension du mécanisme de défibrage (diminution de longueur et de diamètre) de fibres ligno-cellulosiques de chanvre associées à une matrice polycaprolactone (PCL), dans une extrudeuse bivis de laboratoire. Le comportement rhéologique de la matrice seule et du mélange PCL/fibres de chanvre a été mesuré. L'influence des conditions opératoires (débit, vitesse de rotation) sur l'évolution des longueurs et des diamètres des fibres de chanvre a été étudiée. Il a été montré qu'une faible vitesse de rotation et un débit élevé permettaient de limiter les phénomènes de décohésion et de fragmentation des fibres. La longueur des fibres peut être reliée à l'énergie mécanique spécifique (EMS) fournie au matériau au cours du procédé d'extrusion. En se fondant sur des études déjà réalisées sur l'évolution de la longueur de fibres de verre le long d'une extrudeuse bivis, il a été établi un modèle phénoménologique d'évolution de la longueur de fibres ligno-cellulosiques en fonction de l'EMS, calculée à l'aide du logiciel de simulation Ludovic©.

Mots-clé : Composites, Fibres ligno-cellulosiques, Extrusion bivis, Modélisation.

[Abridged English version on last page]

1. Introduction

L'utilisation de fibres ligno-cellulosiques comme moyen de renfort d'une matrice polymère est actuellement en constante augmentation, notamment dans le secteur de l'industrie automobile, en raison de leur caractère renouvelable et biodégradable ainsi que de leur faible coût de production. Ces fibres présentent également l'avantage d'avoir une densité plus faible que celle des fibres de verre ou de carbone [1, 2]. La réalisation de composites à base de fibres dites naturelles se fait essentiellement par extrusion bivis. De même que pour les fibres synthétiques, le problème principal rencontré lors du passage en machine est lié à la diminution de la longueur (L) et du ratio longueur/diamètre (L/D) des fibres et ce, en raison des taux de cisaillement élevés rencontrés en extrusion. Cela entraîne une diminution notable des propriétés mécaniques des matériaux composites utilisant ces fibres naturelles. Les fibres ligno-cellulosiques de chanvre ou de lin sont composées de faisceaux de fibres individuelles, liées entre elles par un ciment interfibre constitué de plusieurs polymères amorphes [3, 4]. Le défibrage, qui se produit le long des vis pendant l'extrusion, est le résultat simultané de la décohésion des fibres individuelles entre elles ou des faisceaux de fibres (au niveau du ciment interfibre) et de la fragmentation des fibres (au niveau des longueurs). Le phénomène de rupture intrafibre est identique à celui observé dans le cas des fibres synthétiques. Le phénomène de décohésion interfibre est spécifique aux fibres ligno-cellulosiques. Lors du procédé de compoundage, les deux processus se produisent simultanément, conduisant à une diminution des longueurs, des ratios L/D et à une individualisation des fibres [5, 6]. Les mécanismes de rupture des fibres rigides (notamment pour le verre) sont bien connus [7-9], mais ce n'est pas le cas

des fibres ligno-cellulosiques qui sont flexibles et qui peuvent s'enchevêtrer ou former des agrégats (faisceaux). Des études récentes menées en rhéo-optique [10] sur des fibres de lin tendent à montrer que les défauts naturels présents dans les fibres sont à l'origine des points de rupture.

Lors d'une étude préalable menée sur une matrice à base polycaprolactone associée à des fibres de chanvre, nous avions étudié l'influence des conditions opératoires du procédé d'extrusion bivis sur les phénomènes de rupture inter et intrafibre, ainsi que sur l'évolution du ratio *L*/*D*, et les conséquences induites sur les propriétés mécaniques du matériau extrudé [11]. La longueur finale des fibres diminuait lorsque la vitesse de rotation des vis augmentait (influence du cisaillement) et elle augmentait lorsque le débit était important (influence du temps de séjour). Les variations du ratio *L*/*D* étaient, quant à elles, plus difficiles à quantifier en raison de la réduction simultanée de la longueur et du diamètre pendant le procédé. Inceoglu et al. [7] ont montré que l'évolution en sortie d'extrudeuse de la longueur de fibres de verre peut être reliée à l'énergie mécanique spécifique (EMS, produit du couple par la vitesse de rotation, divisé par le débit), à travers une fonction exponentielle. Dans cet article, nous allons essayer d'appliquer ce modèle au cas de fibres de chanvre, la matrice utilisée étant de la polycaprolactone (polymère biodégradable). Nous avons caractérisé la longueur des fibres pour différentes conditions opératoires (vitesses de rotation et débits) et essayé d'établir un modèle théorique permettant de décrire l'évolution de la longueur des fibres le long des vis.

2. Matériaux et méthodes

2.1. Matériaux

Nous avons choisi comme matrice une polycaprolactone (PCL) Capa© 6800 commercialisée par Perstorp (UK). Sa température de fusion basse, à 60°C, permet de limiter lors de l'extrusion les montées en température, préjudiciables pour les fibres de chanvre. La matrice a une masse molaire en poids de 80 000 g/mol et un indice de fluidité (MFI) de 3 g/10 min (160°C, 2,16 kg). A 160°C, elle a une viscosité de 230 Pa.s et un comportement quasi-newtonien.

Les fibres de chanvre utilisées sont de type *Cannabis Sativa L* et sont fournies par Fibres Recherche Développement® (Troyes, France). Le pourcentage de fibres introduit dans la matrice a été fixé à 20 % en masse. Les fibres ont été coupées manuellement à une longueur moyenne de 1,4 cm (+/– 0,34 cm) et sont conditionnées avant extrusion à 50 % d'humidité relative.

2.2. Conditions d'extrusion

Nous avons utilisé une extrudeuse bivis de laboratoire Clextral BC 21 (diamètre *D* de 25 mm, longueur des vis *L* de 900 mm, ratio *L*/*D* de 36). Le profil de vis utilisé est schématisé sur la Figure 1. La fusion est assurée par un bloc de malaxeurs décalés à -45°, la zone de mélange est composée de deux blocs malaxeurs adjacents, décalés respectivement à 90° et -45°. La PCL est introduite au niveau du fourreau 1. Les fibres sont introduites manuellement (afin de limiter les problèmes de dosage de ces dernières), soit avant la fusion, au niveau du fourreau 1, soit après, au niveau du fourreau 4. La température de régulation du fourreau est fixée à 100°C. Nous avons étudié l'influence du débit (1, 2 et 3 kg/h) à vitesse de rotation imposée (200 tr/min) ; puis, nous avons étudié l'influence de la vitesse (100, 150, 200 et 300 tr/min) à débit constant (2 kg/h). Pour pouvoir évaluer l'évolution de longueur des fibres le long des vis, l'extrudeuse a été stoppée pour chaque condition testée et des prélèvements ont été effectués, aux positions 1 à 6 lorsque les fibres sont introduites avant fusion, et aux positions 4 à 6 lorsqu'elles le sont après fusion (Fig. 1).

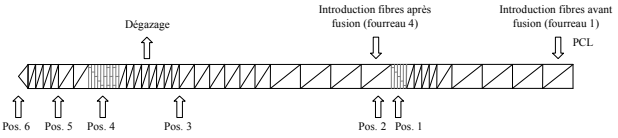


Figure 1. Profil de vis et localisation des zones de prélèvement.

2.3. Modélisation de l'écoulement

Nous avons utilisé le logiciel de simulation du procédé d'extrusion bivis Ludovic© [12] afin de calculer l'énergie mécanique spécifique fournie au matériau, et ce pour chaque condition de débit et vitesse fixée. Ces valeurs ont été comparées aux énergies mesurées expérimentalement. Nous nous sommes basés sur l'évolution de l'EMS le long des vis pour calculer ensuite les évolutions de longueurs de fibres.

2.4. Caractérisation des longueurs de fibres

Afin de caractériser les distributions de longueurs de fibres pour chaque échantillon prélevé, la matrice a été dissoute à l'aide d'un solvant et les fibres ont ensuite été analysées par microscopie optique (logiciel MorFi©, Techpap, Grenoble). Plus de 100 000 éléments sont comptés pour chaque prélèvement. Par convention, les éléments comptés sont ensuite triés par taille entre "Fines" (longueur inférieure à 200 µm) et "Fibres" (longueur supérieure à 200 µm). Les éléments sont également caractérisés selon leur ratio *L*/*D*. Les éléments d'une longueur supérieure à 10

mm ne sont pas pris en considération car ils restent bloqués lors de la mesure. Dans ce cas précis, les valeurs moyennes expérimentales sont donc sous-estimées et ne seront pas prises en compte par la suite, pour comparaison avec le résultat des simulations.

3. Résultats et discussion

3.1. Extrusion

Afin d'éviter de modifier les propriétés des fibres de chanvre, il est nécessaire de ne pas dépasser localement le long des vis une température de 160°C [11]. La Figure 2 montre les températures finales mesurées en sortie de filière en fonction de la vitesse de rotation, ainsi que l'évolution de l'EMS estimée à partir du couple mesuré (fibres introduites après la fusion). On observe une évolution presque linéaire de ces deux paramètres en fonction de la vitesse des vis. La température maximale est de 158°C à 300 tr/min. Pour ce qui est du débit, l'EMS diminue lorsque le débit augmente et la température finale est très peu affectée lors du passage de 1 à 3 kg/h (quelques degrés). Lorsque les fibres sont introduites avant la fusion (au fourreau 1), la température est plus importante, de l'ordre de 2 à 4°C, et l'EMS plus élevée, de l'ordre de 30 à 50 kWh/t (données non montrées sur la Fig. 2).

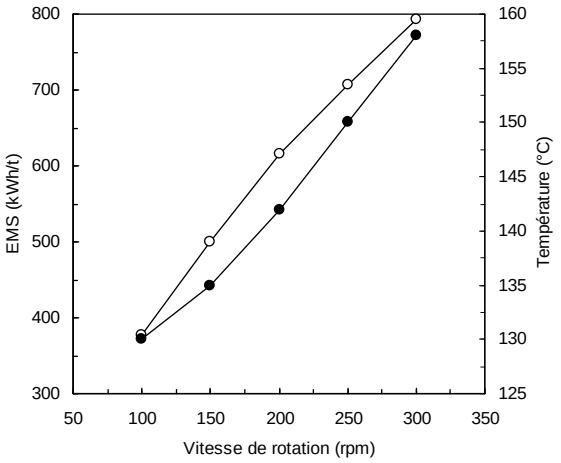


Figure 2. Évolution de l'EMS totale (○) et de la température finale (●) avec la vitesse de rotation des vis.

Nous avons ensuite utilisé le logiciel Ludovic© afin de modéliser l'évolution de la longueur des fibres [12]. Les viscosités de la PCL seule et du mélange PCL/fibres de chanvre à 20 % ont été mesurées en rhéométrie dynamique (Fig. 3). On peut utiliser une loi de Carreau-Yasuda pour modéliser le comportement de la PCL seule (Eq. (1)) et une loi-puissance pour le mélange avec les fibres (Eq. (2)) :

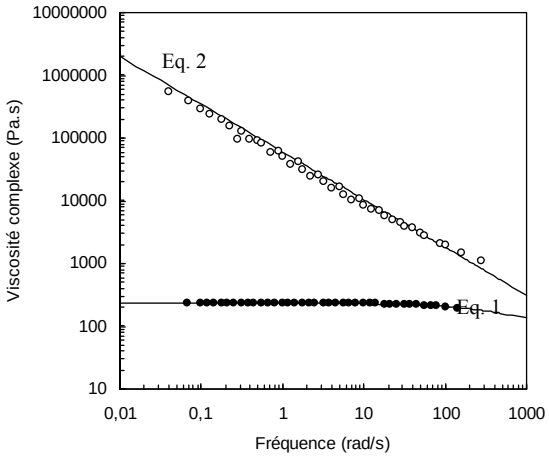


Figure 3. Courbes maîtresses de viscosité (à 160°C) pour la PCL (●) et le mélange PCL/fibres (○).

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_0\, a_T \left[1 + (\lambda\, \dot{\gamma} a_T)^a\right]^{\frac{m-1}{a}} \quad (1)$$

$$\eta(\dot{\gamma}) = a_T{}^m K\, \dot{\gamma}^{m-1} \quad (2)$$

$$\text{avec } a_T = \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (3)$$

Nous avons obtenu pour la PCL seule η_0 = 232 Pa.s, λ = 0,0035 s, m = 0,646, a = 0,935 et E_a/R = 3485 K, et pour le mélange PCL/fibres : K = 60 000 Pa.s, m = 0,241 et E_a/R = 9880 K (pour T_0 = 160°C).

Nous nous sommes ensuite intéressés aux évolutions d'énergie mécanique calculée par Ludovic© avec ces lois de viscosité. Sur la Figure 4 est représentée l'évolution de l'EMS totale pour le cas de 1 kg/h et 200 tr/min (valeur que l'on peut comparer à la valeur expérimentale mesurée à partir du couple global de l'extrudeuse) et l'évolution de l'EMS calculée à partir de l'introduction des fibres.

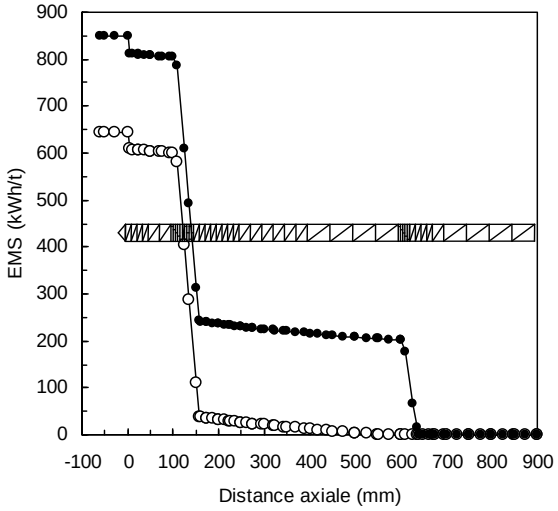


Figure 4. Évolution de l'EMS totale (●) et de l'EMS fournie après introduction des fibres (○) (cas 1 kg/h - 200 tr/min).

Dans le cas présenté ici, l'EMS fournie au composite après introduction des fibres représente 76 % de l'énergie totale. C'est bien sûr cette valeur de l'énergie qu'il faut prendre en considération lors du calcul de la longueur des fibres, lorsque ces dernières sont introduites après la fusion et non pas la valeur globale. Les valeurs d'EMS calculées et mesurées ont été comparées pour les différents débits et vitesses étudiées. Pour la gamme d'EMS testée (entre 300 et 1100 kWh/t), la corrélation entre calcul et expérience est tout à fait correcte, avec une sous-estimation des énergies calculées de 15 % maximum pour les valeurs situées au-delà de 1000 kWh/t [13].

3.2 Longueur des fibres

Quantifier la dimension des fibres n'est pas une tâche évidente et elle peut être influencée par la méthode utilisée [14, 15]. Pour cette étude, nous avons utilisé le logiciel MorFi© qui permet de traiter une quantité de fibres très importante (supérieure à 100 000 éléments), même si, comme cela a été précisé plus haut, les fibres longues (de longueur supérieure au centimètre) ne peuvent pas être prises en compte au niveau des résultats finaux. La Figure 5 montre un exemple de distribution de la longueur des fibres obtenu pour un échantillon prélevé en sortie de filière (avec un débit de 1 kg/h et une vitesse de 200 tr/min). Il faut notifier tout d'abord que 97 % des éléments mesurés sont constitués par des "Fines" (576 811 éléments de longueur inférieure à 200 μm) et 3 % par des "Fibres" (15 192 éléments de longueur supérieure à 200 μm). Indépendamment des conditions de débit et vitesse testées, les "Fines" ont une longueur moyenne généralement comprise entre 19 et 38 μm. Le rôle des ces petits éléments dans les propriétés finales du composite reste à déterminer. Toutefois, au vu de leurs faibles dimensions, on peut penser qu'elles ne jouent pas un rôle moteur sur les propriétés renforçantes. C'est pourquoi, pour une première approche qui reste à améliorer par la suite, nous n'avons pris en compte pour le calcul des longueurs expérimentales finales que les longueurs des "Fibres". Pour une longueur moyenne de 1,4 cm au départ, nous arrivons à une longueur finale de 383 μm en sortie de vis, dans le cas présenté à la Figure 5 (à un débit de 1 kg/h et une vitesse de 200 tr/min), ce qui représente un facteur de réduction supérieur à 36. Des résultats similaires sont observés pour les autres conditions opératoires étudiées. Le diamètre des fibres diminue, quant à lui, de 300 à 20 μm (soit un ratio L/D passant d'une valeur moyenne de 46 avant extrusion à 19 après).

Sur la Figure 6 est représentée l'évolution des longueurs moyennes le long des vis, avec introduction

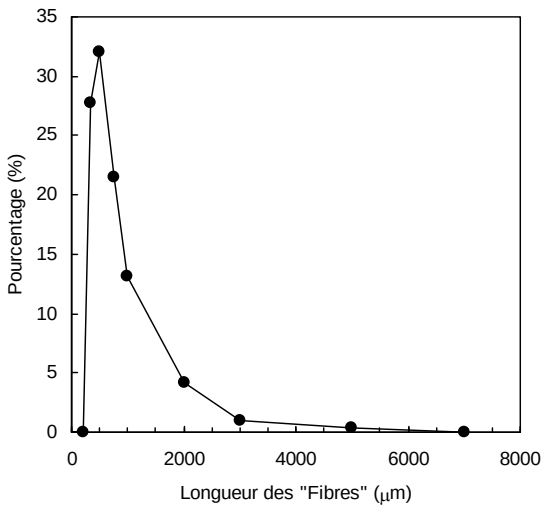


Figure 5. Distribution des longueurs des "Fibres" en sortie de filière (1 kg/h, 200 tr/min, introduction après fusion).

des fibres avant la fusion, mesurées à des débits de 1 et 2 kg/h. Les évolutions des longueurs sont similaires pour les deux débits. A 1 kg/h, les longueurs finales sont inférieures à celles mesurées pour 2 kg/h, du fait du temps de séjour plus important du matériau dans l'extrudeuse. On peut observer une forte diminution des longueurs au niveau du premier bloc de malaxeur (zone de fusion, les fibres passant de 14 000 à 1000 μm) et ensuite une réduction des longueurs le long des zones de transport et dans le second bloc de malaxeurs.

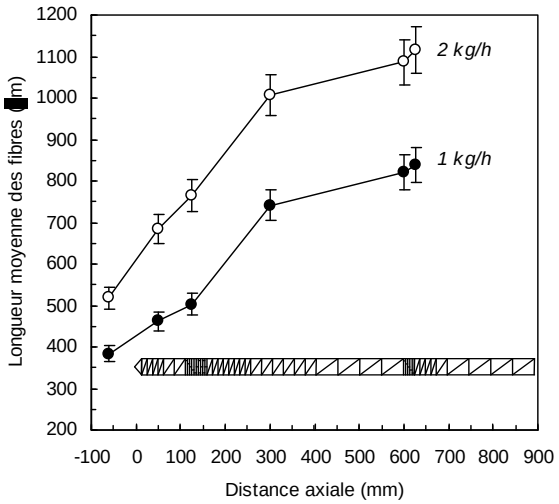


Figure 6. Influence du débit sur l'évolution des longueurs moyennes des fibres à 200 tr/min (introduction avant fusion).

Lorsque les fibres de chanvre sont introduites après la fusion, trois prélèvements ont été faits le long des vis (Fig. 7). Les résultats montrent que les longueurs sont plus importantes lorsque l'introduction des fibres se fait après la zone de fusion, du fait d'un temps de séjour plus court. On observe les mêmes

tendances, lors de l'introduction des fibres avant et après fusion, pour les trois débits étudiés.

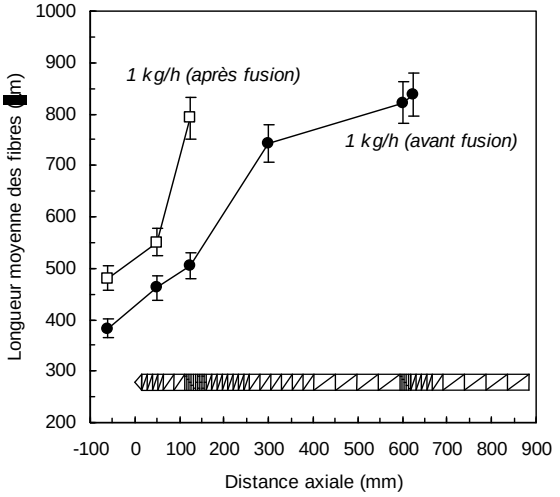


Fig. 7. Influence de la position d'introduction des fibres sur leurs longueurs moyennes (à 200 tr/min et 1 kg/h).

La Figure 8 montre l'influence de la vitesse de rotation. Comme attendu, les fibres ont une longueur moins élevée à 300 tr/min qu'à 100 tr/min, en raison du cisaillement plus important à forte vitesse de rotation. Les évolutions du ratio *L*/*D* sont similaires à celles observées pour les longueurs moyennes.

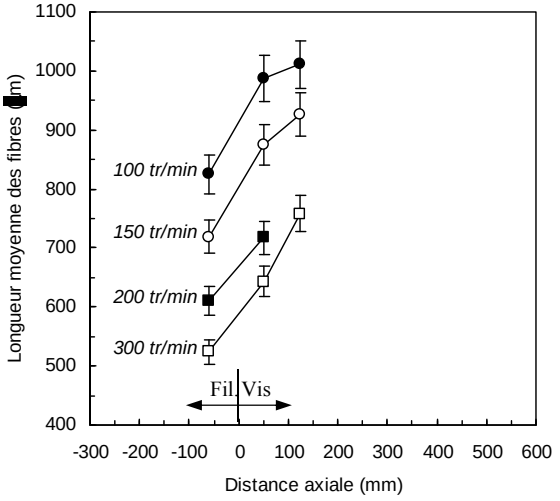


Figure 8. Influence de la vitesse de rotation sur l'évolution des longueurs moyennes des fibres à 1 kg/h (introduction après fusion)
● 100 tr/min, ○ 150 tr/min, ■ 200 tr/min, □ 300 tr/min

3.3 Simulation de l'évolution de la longueur des fibres

Il a été démontré par Inceoglu et al. [7] que, pour des fibres de verre, les longueurs finales pouvaient être reliées, à l'aide d'une loi exponentielle, à l'énergie spécifique reçue par le matériau extrudé. Mais cette relation ne peut pas être utilisée pour suivre l'évolution des longueurs le long des vis, qui nécessite un modèle plus complexe, fondé sur la compréhension des mécanismes de rupture des fibres de verre [8, 9]. Dans une étude précédente [11], nous avions montré que les longueurs des fibres de chanvre mesurées en sortie de filière, notées *L*, pouvaient également être reliées à l'EMS, quelles que soient les conditions opératoires observées :

$$L = L_\infty + (L_0 - L_\infty) \exp(-K\,EMS) \qquad (4)$$

où L_0 représente la longueur initiale, L_∞ la longueur finale, K est une constante et *EMS* représente l'énergie spécifique reçue par les fibres depuis leur introduction.

Dans notre cas, L_0 vaut 14 000 µm, L_∞ 350 µm et K 0,009 $(\text{kWh/t})^{-1}$. La Figure 9 montre que cette loi décrit correctement la longueur finale, mais ne se superpose pas aux points expérimentaux mesurés (large surestimation des valeurs calculées par rapport à l'expérience). Une meilleure approximation des longueurs le long des vis est obtenue à partir des paramètres suivants : L_0 = 1500 µm, L_∞ = 350 µm et K = 0,0035 $(\text{kWh/t})^{-1}$, comme on peut l'observer sur la Figure 9. C'est ce jeu de valeurs qui sera retenu pour la suite des calculs. On peut penser que la réduction de taille très importante qui a lieu pendant la fusion du polymère obéit à des mécanismes différents, qui ne sont pas explicités par le modèle proposé. Un long travail de compréhension des mécanismes de rupture des fibres ligno-cellulosiques reste encore à faire, afin de proposer un modèle plus complet et surtout généraliste.

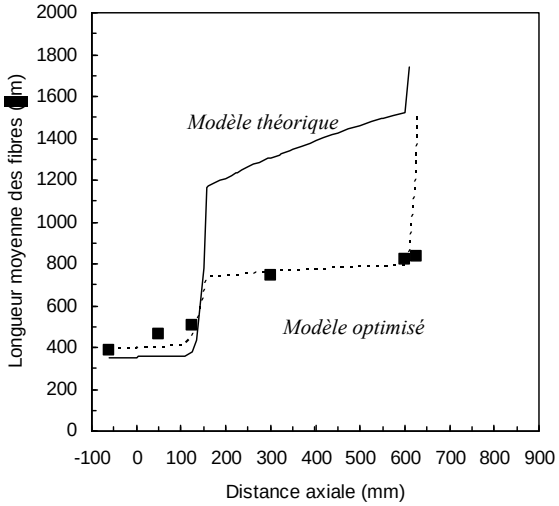


Figure 9. Évolution des longueurs calculées d'après l'équation (4). Comparaison avec l'expérience (■).

En combinant le calcul de l'évolution de l'EMS et l'équation (4) dans le logiciel Ludovic©, nous pouvons donc calculer les évolutions de longueurs des fibres de chanvre le long des vis, pour les trois débits (Fig. 10) et les trois vitesses de rotations étudiés

(Fig. 11). Pour les débits, la comparaison avec les valeurs expérimentales mesurées est correcte (Fig. 10). A 3 kg/h, il manque deux valeurs expérimentales, cela est dû à la présence de nombreuses fibres de longueur supérieure à 1 mm. On voit clairement l'influence du temps de séjour sur la longueur finale des fibres.

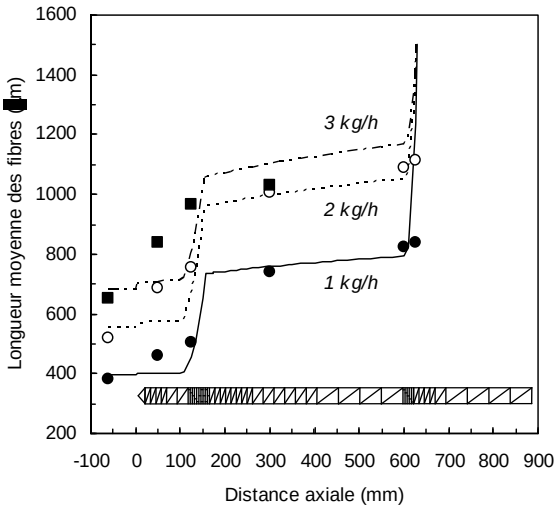


Figure 10. Influence du débit à 200 tr/min ; comparaison modèle/ expérience : ● 1 kg/h, ○ 2 kg/h, ■ 3 kg/h (introd. fibres avant fusion).

L'influence de la vitesse de rotation sur les longueurs est schématisée à la Figure 11 (introduction des fibres après la fusion). Comme précédemment, le modèle optimisé permet une approximation satisfaisante des longueurs le long du profil. Les longueurs des fibres de chanvre sont plus préservées à basse vitesse de rotation, du fait d'un cisaillement moins sévère qu'à haute vitesse.

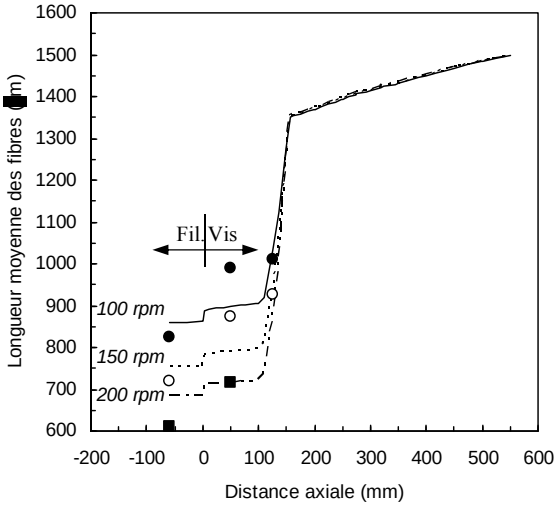


Figure 11. Influence de la vitesse (à 2 kg/h) ; comparaison modèle/expérience: ● 100 tr/min, ○ 150 tr/min, ■ 200 tr/min (introduction des fibres après fusion).

L'équation (4) est donc capable de décrire les variations de longueur des fibres de chanvre, pour différentes conditions de débit et vitesse, ce qui n'était pas le cas pour les fibres de verre [8, 9]. Pour suivre les évolutions de longueur de fibres longues et flexibles (cas du chanvre, du lin…), un critère basé sur l'énergie mécanique spécifique semble donc approprié. Mais le choix du paramètre représentatif de la longueur initiale L_0, fixée ici à 1500 µm au lieu de 14 000 µm, montre que le modèle ne peut s'appliquer que lorsque les fibres ont déjà été réduites à une certaine longueur. Le passage de 14 000 µm à 1500 µm obéit vraisemblablement à des lois et des mécanismes de décohésion/fragmentation beaucoup plus complexes que le modèle utilisé ici.

4. Conclusions

Des composites à base de polycaprolactone et de fibres de chanvre (20 % en masse) ont été préparés par extrusion bivis, dans différentes conditions opératoires. Le défibrage sévère qui se produit au cours du procédé d'extrusion est plus prononcé à haute vitesse de rotation et faible débit. Les évolutions des longueurs des fibres de chanvre le long du profil peuvent être calculées à partir de l'énergie mécanique fournie au composite extrudé, à partir d'une loi exponentielle. Le modèle proposé permet de suivre correctement les variations de longueur le long des vis, mais reste à améliorer, notamment pour la prédiction du défibrage initial. Ce modèle reste aussi à valider pour d'autres types de fibres longues à base de ligno-celluloses.

Références bibliographiques

[1] Bailey, C. A review of biocomposite development. *JEC Compos. Mag.*, 46, 32-33 (2009).

[2] Mohanty, A.K., Misra, M., Hinrichsen, G. Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: an overview. *Macromol. Mater. Eng.*, 276/277, 1-24 (2000).

[3] Andersons J., Porike, E., Sparnins, E. Modeling strength scatter of elementary flax fibers: The effect of mechanical damage and geometrical characteristics. *Composites: Part A*, 42, 543-549 (2011).

[4] Placet, V., Trivaudey, F., Cisse, O., Gucheret-Retel, V., Boubakar, M.L. Diameter dependence of the apparent tensile modulus of hemp fibres: a morphological, structural or ultrastructural effect? *Composites: Part A*, 43, 275-287 (2012).

[5] Liu, W.J., Drzal, L., Mohanty, T., Misra, A.K. Influence of processing methods and fiber length on physical properties of kenaf fiber reinforced soy based biocomposites. *Composites: Part B*, 38, 352-359 (2007).

[6] Chinga-Carrasco, G., Solheim, O., Lenes, M., Larsen, A. A method for estimating the fibre length in fibre-PLA composites. *J. Micros.*, 250, 15-20 (2013).

[7] Inceoglu, F., Ville, J., Ghamri, N., Pradel, J.L., Durin, A., Valette, R., Vergnes, B. Correlation between processsing conditions and fibre breakage during compounding of glass fibre-reinforced polyamide. *Polym. Comp.*, 32, 1842-1850 (2011).

[8] Durin, A., de Micheli, P., Ville, J., Inceoglu, F., Valette, R., Vergnes, B. A matricial approach of fibre breakage in twin-screw extrusion of glass fibres reinforced thermoplastics. *Composites: Part A*, 48, 47-56 (2013).

[9] Ville, J., Inceoglu, F., Ghamri, N., Pradel, J.L., Durin, A., Valette, R., Vergnes, B. Influence of extrusion conditions on fibre breakage along the screw profile during twin screw compounding of glass fibre-reinforced polyamide. *Intern. Polym. Proc.*, 28, 49-57 (2013).

[10] Le Duc, A., Vergnes, B., Budtova, T. Polypropylene/ natural fibres composites: Analysis of fibre dimensions after compounding and observations of fibre rupture by rheo-optics. *Composites: Part A*, 42, 1727-1737 (2011).

[11] Beaugrand, J., Berzin, F. Lignocellulosic fiber reinforced composites: Influence of compounding conditions on defibrization and mechanical properties. *J. Appl. Polym. Sci.*, 128, 1227-1238 (2013).

[12] Vergnes, B., Della Valle, G., Delamare, L. A global computer software for polymer flows in corotating twin screw extruders. *Polym. Eng. Sci.*, 38, 1781-1792 (1998).

[13] Berzin, F., Vergnes, B., Beaugrand, J. Evolution of lignocellulosic fibre length along the screw profile during twin screw compounding with polycaprolactone. *Composites: Part A*, 59, 30-36 (2014).

[14] Le Moigne, N., van den Oever, M, Budtova, T. A statistical analysis of fibre size and shape distribution after compounding in composites reinforced by natural fibres. *Composites: Part A*, 42, 1542-1550 (2011).

[15] Legland, D., Beaugrand, J. Automated clustering of lignocellulosic fibres based on morphometric features and using clustering of variables. *Indus. Crops Prod.*, 45, 253-261 (2013).

[Abridged English version]

Modelling of lignocellulosic fibre length evolution during composite compounding in twin screw extrusion

Composites made of polycaprolactone reinforced by 20 wt% hemp fibres were prepared by melt blending in a twin screw extruder. The influence of extrusion parameters (feed rate and screw speed) on the fibre length evolution along the screw profile was investigated. The fibre length rapidly decreased after fibres introduction and during the flow through kneading blocks. Fibre breakage was increased at high screw speed and low feed rate. Flow conditions along the twin screw extruder were calculated using Ludovic© software, with a focus on the specific mechanical energy (SME) provided to the fibres. Fibre length evolution can be correctly estimated in various flow conditions by an exponential function of the SME.