



HAL
open science

Suivi de l'endommagement en fatigue des composites à base de fibres végétales = Monitoring of fatigue damage in composites based fiber plant

Abdelmonem Elouaer, Zoheir Aboura, Rezak Ayad, H. Sabhi, Malik Benzeggagh

► To cite this version:

Abdelmonem Elouaer, Zoheir Aboura, Rezak Ayad, H. Sabhi, Malik Benzeggagh. Suivi de l'endommagement en fatigue des composites à base de fibres végétales = Monitoring of fatigue damage in composites based fiber plant. JNC16, Jun 2009, Toulouse, France. 10 p. hal-00429719

HAL Id: hal-00429719

<https://hal.science/hal-00429719>

Submitted on 4 Nov 2009

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.

Suivi de l'endommagement en fatigue des composites à base de fibres végétales

Monitoring of fatigue damage in composites based fiber plant

A.Elouaer¹, Z.Aboura², R.Ayad³, H.Sabhi¹ et M.L Benzeggagh²

1 : Laboratoire d'Analyses des Contraintes Mécaniques Pôle de Haute Technologie 7, Boulevard Jean-Delautre
F - 08000 Charleville-Mézières, France
e-mail : abdelmonem.elouaer@etudiant.univ-reims.fr, hamid.sabhi@univ-reims.fr

2 : LRM, UMR 6253, UTC Centre de Recherche Royallieu, BP.20529
F - 60205 Compiègne Cedex, France
e-mail : zoheir.aboura@utc.fr, malk.benzeggagh@utc.fr

3 : Université de Reims Champagne-Ardenne, Groupe de Mécaniques, Matériaux et Structures, Moulin de la Housse, BP.1039
F - 51687 Reims Cedex 2, France
e-mail : rezak.ayad@univ-reims.fr

Résumé

Cette étude s'intéresse à l'analyse de l'endommagement et à la rupture de matériaux composites à renfort fibres végétales. Ces matériaux sont élaborés à partir d'une matrice thermoplastique (Polypropylène) renforcée par des fibres courtes (Chanvre Blanc et Chênevotte). Cet article se compose de deux parties. La première aborde le comportement statique en traction uni axiale. Elle s'attache à comprendre l'effet de l'introduction des renforts tant d'un point de vue mécanique que phénoménologique. La corrélation des signaux des émissions acoustiques aux observations microscopiques a permis d'avancer certaines conclusions. La seconde partie de ces travaux aborde le comportement en fatigue. Il s'agit, outre le fait d'acquérir une base de données, d'observer et d'essayer de comprendre l'effet de l'introduction des renforts végétaux sur la durée de vie de ces composites.

Abstract

This study concerns the analysis of the damage and the failure of composite materials with reinforcement vegetable fibers. These materials are elaborated starting from a thermoplastic matrix (Polypropylene) reinforced by short fibers (White Hemp and Chênevotte). This article is composed of two parts. The first approaches static behavior in axial traction plain. It sticks to understand the effect of the introduction of the reinforcements as well from a mechanical point of view that phenomenological. The correlation of the acoustic emissions signals to the microscopic observations permits to advance certain conclusions. The second part of this work approaches the fatigue behavior. It acts, in addition to the fact of acquiring a database, of observing and of trying to understand the effect of the introduction of the vegetable reinforcements over the service life of these composites.

Mots Clés : fatigue uni axiale / Chanvre Blanc / Emission Acoustique / perte de rigidité/ boucle d'hystérésis.

Keywords: Uniaxial fatigue / White Hemp / Acoustic emission / Stiffness loss/ hysteresis loops.

1. Introduction

Au cours des dernières années, l'utilisation des fibres naturelles dans les composites a suscité un grand engouement, et particulièrement dans le secteur des composites à matrice organique Gassan.J et al. [1], Baley.C et al. [2], Baley.C et al. [3], Baley.C et al. [4], Khalil.A et al. [5], Lilhot.H et al. [6], Pigott M.R et al. [7].

Du fait d'une demande croissante d'éco-matériaux et du coût de plus en plus élevé des fibres synthétiques (carbone ou verre), de nouveaux matériaux contenant des fibres naturelles sont en cours de développement. Ils ont pour avantage d'être plus léger tout en ayant des propriétés mécaniques intéressantes Gassan et al. Baley.C et al. Bledzki. A et al. De plus, ils présentent l'avantage d'avoir un coût beaucoup moins élevés que les synthétiques, associés à une densité plus faible, et de constituer une ressource renouvelable. Les récentes avancées dans l'utilisation des fibres naturelles (lin, cellulose, bambou, chanvre, sisal, ...) dans les composites ont été étudiées par plusieurs équipes de recherche telles Miller et al. [8] et Pallensen et al. [9], Baley.C et al.

Néanmoins, comme le rapportent Penn et al. [10], contrairement aux fibres synthétiques, les fibres végétales présentent des disparités de formes et de propriétés dépendantes de divers paramètres tel que : origine dans la plante, de la saison où elles ont été semées, du type de sol sur lequel elles ont été plantées, du climat, la manière avec laquelle elles ont été récoltées...La liste des paramètres est loin d'être exhaustif et beaucoup reste à faire pour en vue d'une maîtrise et d'une reproductibilité de fibres végétales.

Cette étude contribue à la compréhension du comportement mécanique d'une famille de ces matériaux. Il s'agit d'analyser l'effet du renforcement sur la tenue mécanique en traction uni axiale en statique et en fatigue.

2. Présentation des matériaux

Les matériaux d'étude sont des matériaux composites à base d'une résine thermoplastique, Polypropylène. Deux types de renforts sont utilisés : des fibres courtes de Chanvre Blanc de longueur moyenne, après traitement et incorporation dans la résine, égale à 4 mm et des fibres courtes de Chênevotte. Les proportions en masse sont : 70% en résine et 30% en fibres. La réalisation des matériaux se fait par injection sur une presse de type Sandretto, d'une capacité de fermeture égale à 60 Tonnes et une capacité d'injection égale à 126 cm³. Une attention particulière est donnée à la température d'injection afin d'éviter de détériorer les fibres lors de l'opération de mise en œuvre. Les éprouvettes injectées sont en forme d'haltères respectant la norme NF EN ISO 294-1.

Les compounds sont fournis par la société AFT plasturgie.

3. Etude expérimentale

3.1. Analyse du comportement statique

Des essais de tractions uniaxiales ont été menés sur les trois matériaux à une vitesse de sollicitation de 2 mm/min. pour chaque matériau 6 éprouvettes ont été testées. Les essais sont pilotés en déplacement.

La figure 1 montre un exemple de la réponse des 3 matériaux. Le comportement est caractérisé par une phase linéaire correspondante à la partie élastique de la réponse. Elle est suivie par une phase non linéaire qui est plus prononcée dans le cas du polymère vierge. Cette phase non linéaire est probablement due à un comportement viscoplastique de la résine mais doit également comporter un phénomène lié à l'endommagement de ces matériaux. Cette seconde hypothèse sera analysée par la suite en utilisant la technique de l'Emission Acoustique (EA).

Les propriétés mécaniques qui résultent de ces essais sont résumés dans le tableau 1. La dispersion des résultats reste correcte compte tenu de la nature du matériau.

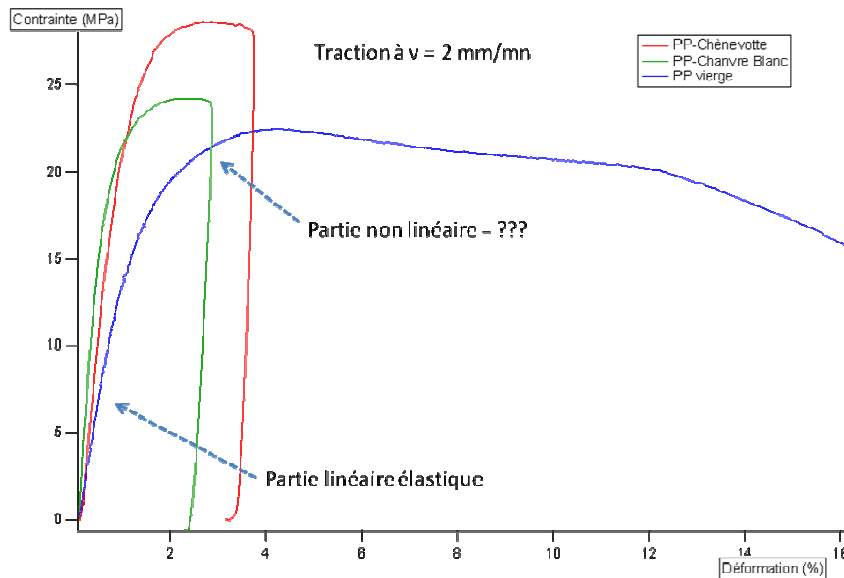


Fig. 1. Courbes de traction de différents matériaux.

Matériau	E (MPa)	σ_m (MPa)	ϵ_r (%)
PP vierge	1734.6 ± 65.28	22.77 ± 0.18	16.09 ± 3.27
PP/CB	4500.4 ± 338.34	24.46 ± 0.13	2.61 ± 0.31
PP/Chènv	3328.2 ± 501.85	27.31 ± 1.16	2.90±0.92

Tab. 1. Données expérimentales de traction.

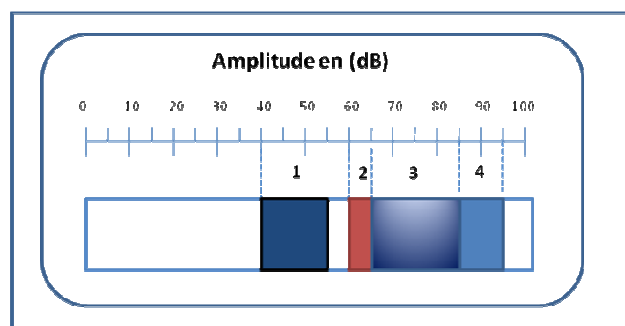
Le premier constat concerne le module de Young E. L'introduction des renforts augmente la rigidité du PP. En effet dans le cas PP/Chanvre Blanc l'augmentation relative est de 159% par rapport à celle du PP vierge alors que dans le cas PP/Chênevotte elle est de 91%. La fibre de Chanvre étant la partie noble de la plante avec des propriétés mécaniques nettement meilleure que la Chênevotte qui constitue la paille de Chanvre. En contre partie on constate une importante baisse de la déformation à rupture dû à l'influence de la fibre qui tend à rigidifier la structure. De même une amélioration de la contrainte ultime de traction pour les deux types de composites est observable. Néanmoins cette augmentation est plus modeste comparativement à l'augmentation de la rigidité. En effet elle n'est que de 9% pour le PP/Chanvre Blanc et 20% pour le PP/Chênevotte.

Il en ressort de ces premiers résultats que les fibres remplissent leur rôle en tant que charge rigidifiant le matériau. Par contre il semble que le transfert d'effort de la matrice vers la fibre n'est pas bien assuré pour la Chênevotte et encore moins pour le Chanvre Blanc.

Un suivi des essais par émission acoustique dans la phase post élastique peut apporter des compléments d'informations sur la nature des phénomènes qui se produisent durant les essais de tractions.

2.1.1. Suivi de l'endommagement par la technique de l'Emission Acoustique

Lors des essais de traction, les éprouvettes sont instrumentées par un capteur piézoélectrique capable de recueillir les signaux d'émission acoustique générés par l'endommagement du matériau. Ces signaux sont traités en amplitude maximale. Cette méthodologie de traitement a permis, dans le cas des matériaux composites à renfort synthétique et matrice organique, d'attribuer à chaque plage d'amplitude un mécanisme d'endommagement (figure 2), [11]. La même démarche est appliquée dans le cas des matériaux de l'étude.



1, 40-60 dB : fissuration matricielle (microfissuration de la matrice/coalescence des microfissures),

- 2, 60-65 dB : rupture de l'interface/décohésion,
- 3, 65-85 dB : frottement fibre-matrice, déchaussement des fibres : « pull-out »,
- 4, 85-95 dB : rupture des fibres.

Figure 2 : Attribution de plage d'amplitude des signaux acoustiques à des mécanismes d'endommagements

Les figures 3 a et b présentent d'une part l'évolution de la courbe de charge et l'énergie des signaux acoustiques en fonction du temps, et d'autre part l'évolution du nombre de coups en fonction des amplitudes des signaux pour les matériaux PP/Chanvre blanc et PP/Chênevotte.

Si l'on compare les seuils d'endommagements, on constate que celui-ci est plus bas dans le cas du PP/Chênevotte comparativement au PP/Chanvre Blanc. En effet la contrainte seuil dans le cas du premier matériau est à 50% de la contrainte max alors que dans le second cas elle représente 37% de la contrainte max. Le PP/Chênevotte s'endommage plus tôt. En analysant les distributions d'amplitudes, on constate que le PP/Chênevotte présente une distribution plus large que le PP/Chanvre blanc. Outre des amplitudes entre 40 et 60 dB faisant intervenir la rupture de la matrice, le PP/Chênevotte présente des amplitudes entre 60 et 70 dB synonyme de ruptures interraciales. Ce mécanisme est quasiment absent dans le cas du PP/Chanvre Blanc. De plus en termes de nombre d'événements acoustiques enregistrés, le PP/Chênevotte en présente plus que le PP/Chanvre Blanc.

Concernant les fortes amplitudes, synonymes de rupture de fibres, elles sont absentes pour les deux matériaux. Compte tenu de la taille des renforts, ce constat n'est pas étonnant.

Il en ressort de ces premières constatations, que l'adhésion interfaciale fibre / matrice de la chènevotte est de meilleure qualité comparativement à celle du chanvre blanc. Ce phénomène permet d'expliquer une contrainte max plus importante du PP/Chênevotte.

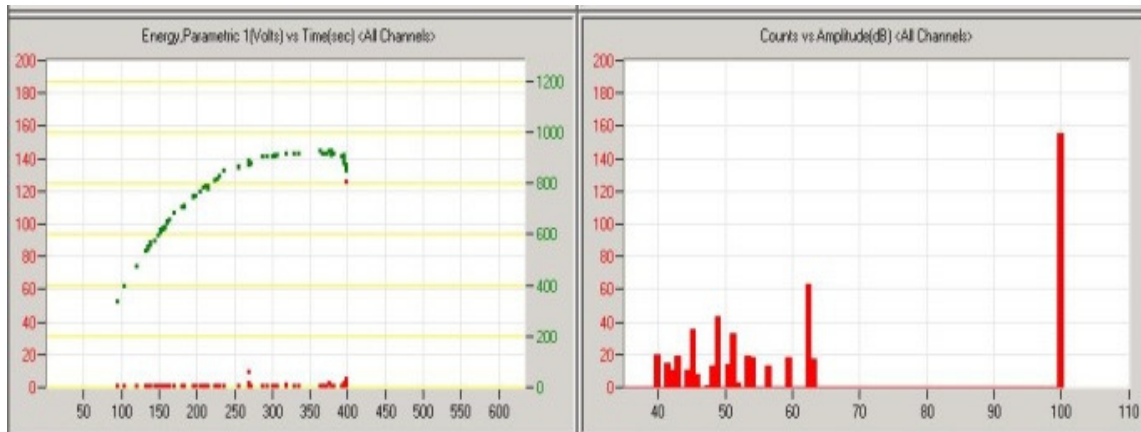


Fig. 3.a. Emission Acoustique sur PP-Chanvre Blanc

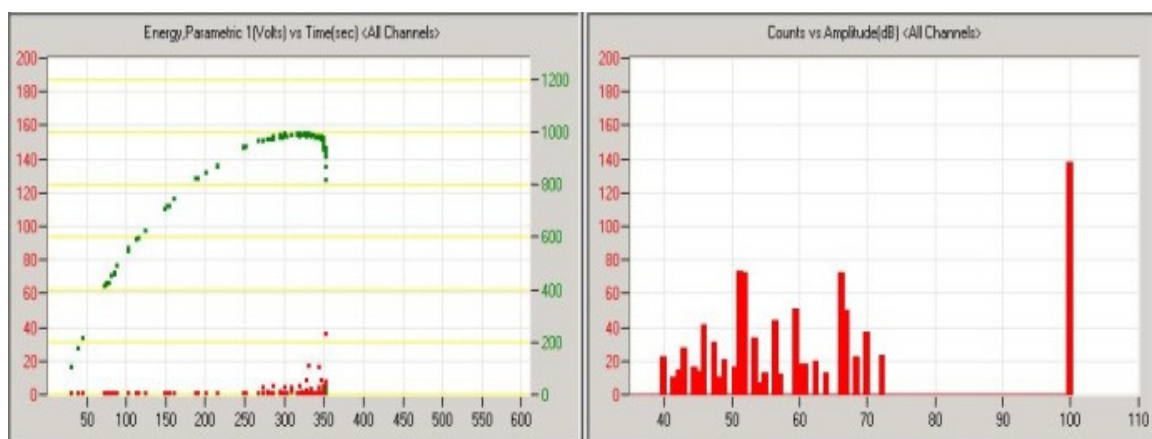


Fig.3.b. Emission Acoustique sur PP-Chênevotte

Des observations au Microscope Electronique à balayage (MEB) sur les faciès de rupture issus des essais de traction ont été effectuées. La figure 4a montre, dans le cas du PP/Chênevotte, un recouvrement total de la fibre par la résine. La matrice adhère à la fibre et la rupture est localisée dans la matrice. La présence de quelques languettes de cisaillement confirme ce constat. Concernant le PP/Chanvre Blanc (Figure 4b) les faciès de rupture présentent des fibres nues ou des empreintes de fibres bien lisses attestant d'une mauvaise adhésion fibre/matrice. Ces observations rejoignent les conclusions précédentes sur le mauvais transfert de charge fibre/matrice dans le cas du PP/Chanvre Blanc et expliquent donc les résultats mécanique. Ainsi le renforcement par ces fibres agit comme des charges rigidifiant le matériau dans la phase élastique mais ayant peu d'intérêt dans le cadre de la rupture.

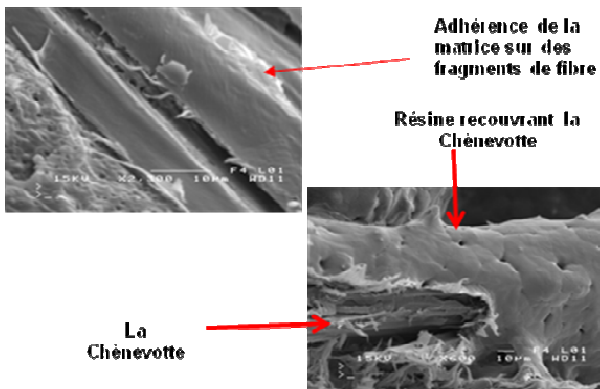


Fig. 4.a. PP/Chênevotte

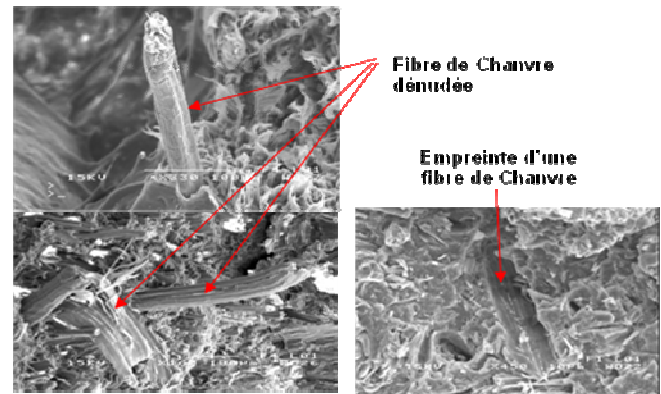


Fig. 4.b. PP/Chanvre Blanc

Figure 4 : Micrographies des faciès de rupture

Cette étude sur le comportement statique de ces matériaux se poursuit par une étude du comportement en fatigue.

2.2. Etude du comportement fatigue

2.2.1. Méthodologie expérimentale

Les essais de fatigue sont pilotés en charge à une fréquence de 1 Hz et un rapport $R=0.1$. Le choix de la faible fréquence permet d'éviter tout effet secondaire dû essentiellement à l'échauffement du matériau. Les éprouvettes sont instrumentées d'un extensomètre permettant la mesure des déformations au cours du temps ainsi que d'un capteur d'EA. Tous les essais de fatigue sont menés à l'ambiante [12].

Les éprouvettes ont subi différents niveaux de chargement par rapport à la charge maximale en traction monotone : 35%, 50%, 60%, 65%, 75% et 85%. Pour chaque niveau de charge, un minimum de trois éprouvettes a été testé.

2.2.2. Exploitation des essais de fatigue

Les premiers résultats ont permis la construction des courbes de Wöhler pour les trois matériaux (rapport des contraintes maximales en fonction de nombre de cycles à la rupture) (figure 5). Ainsi, quelque soit le matériau, les éprouvettes ne rompent pas en dessous d'un niveau de charge égal à 50%.

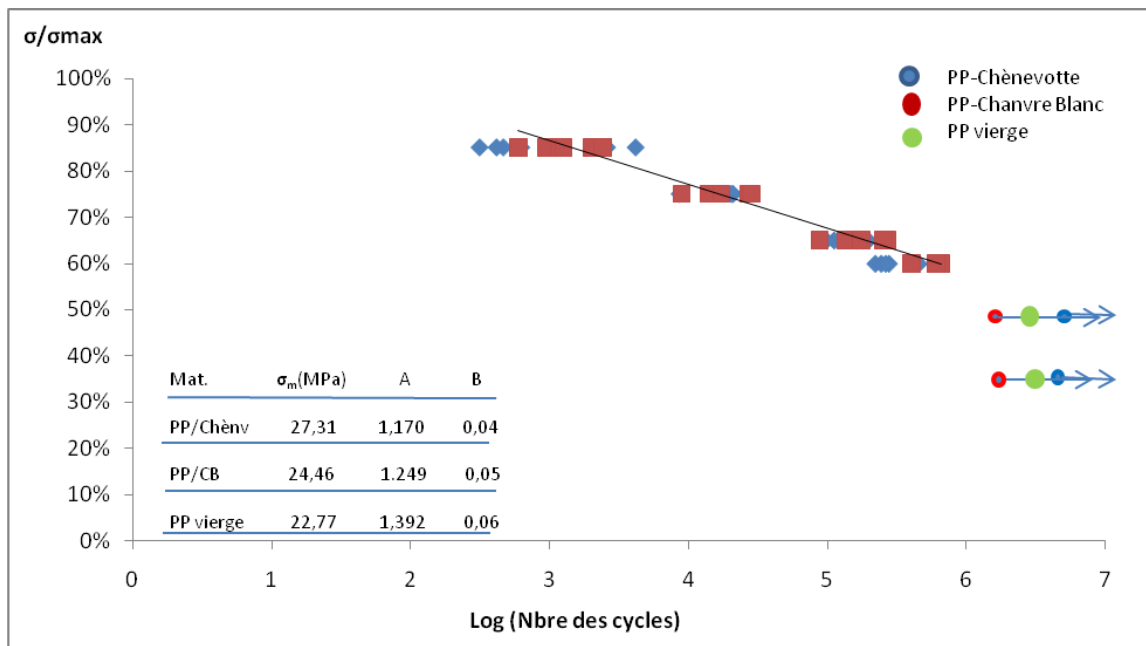


Fig. 5. Courbes de Wöhler des trois matériaux

Pour les trois matériaux, la courbe d'endurance peut être représentée par une droite de régression de la forme :

$$\sigma/\sigma_{max} = A - B \text{ Log } N \tag{eq. 1}$$

Avec A et B : Deux paramètres intrinsèques du matériau,
 N : Nombre des cycles à la rupture,
 σ/σ_{max} : Niveau de chargement normalisé par rapport à la contrainte maximale.

En comparant les pentes des droites de régression (coefficient B figure 5) on constate que le PP/Chênevotte présente la pente la plus faible suivi du PP/Chanvre Blanc et enfin le PP vierge. Même si l'écart entre les coefficients n'est pas très important, ce constat rejoint le comportement en statique de ces matériaux indiquant un meilleur comportement de la Chênevotte.

La figure 6 présente l'évolution des pertes de rigidité (évolution de la rigidité endommagée sur la rigidité initiale) en fonction du nombre de cycle pour différents niveau de chargement dans le cas du PP/Chanvre Blanc. La perte de rigidité s'accroît avec le niveau de chargement, par contre elle demeure inchangée (rapport $E/E_0 = 1$) dans le cas des chargements inférieurs ou égaux à 50%. Dans le cas d'un chargement à 85% de la contrainte ultime, la perte de rigidité atteint 40%. Ce constat est également valable pour les autres matériaux.

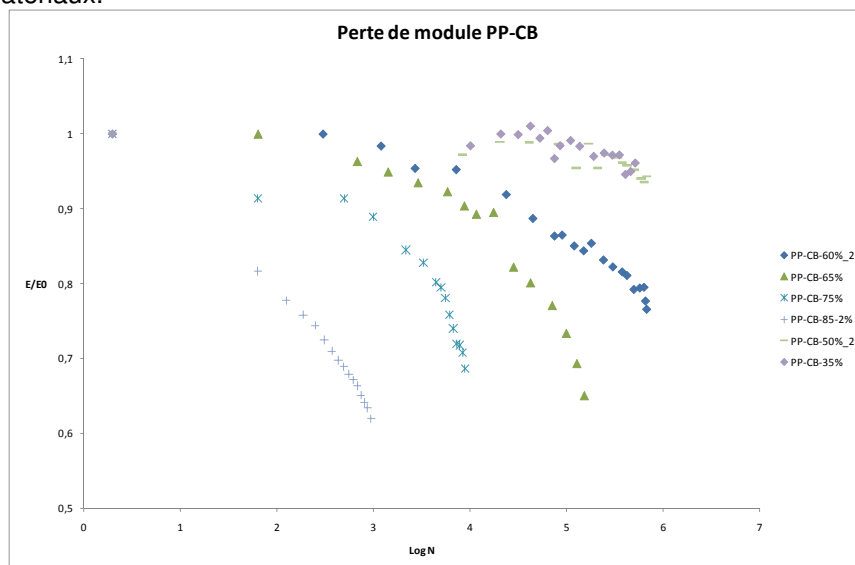


Fig.6 : Evolution du rapport E/E_0 en fonction du nombre de cycle pour différents niveaux de chargements. Cas du PP/Chanvre Blanc

Analysons à présent l'évolution de la rigidité en fonction du nombre de cycle et intéressons nous aux essais ayant entraînés la rupture de l'éprouvette soit un niveau de chargement supérieur à 50% la charge ultime.

La figure 7 présente l'évolution du module de Young dans le cas du PP/Chanvre Blanc et PP/Chènevotte sollicités à 65 et 85% de leur charge à rupture. Cette évolution est caractérisée par trois phases :

- ✓ Phase I : chute importante du module, pendant laquelle les premières fissures se forment suite au niveau de chargement appliqué. ;
- ✓ Phase II : baisse modérée du module au cours de la quelle il ya peu d'évolution des endommagements
- ✓ Phase III : la dernière phase, décroissance accélérée du module, correspond à l'endommagement final, et rupture.

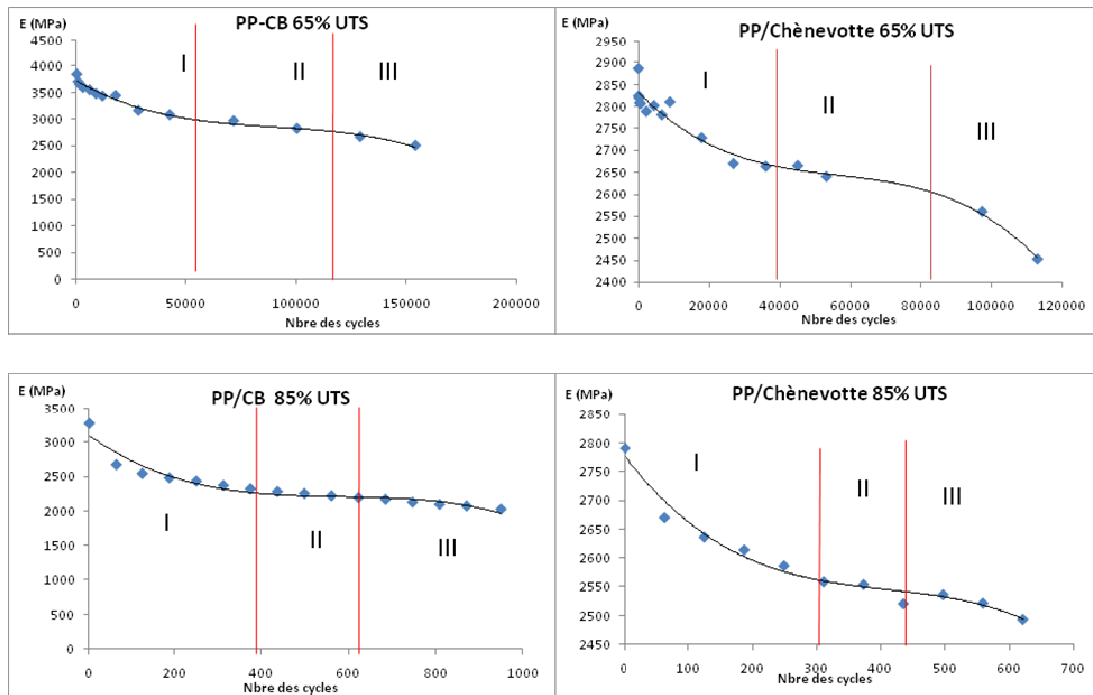


Fig. 7. Les différents stades de perte de rigidité en fatigue dans le cas du PP/chanvre blanc et PP/chènevotte.

Ce comportement se retrouve également dans le cas du PP vierge. La figure 8 représente l'évolution du rapport E/E_0 (évolution de la rigidité endommagée sur la rigidité initiale) pour les trois matériaux de l'étude et pour un niveau de chargement de 85% de la charge max. Cette représentation montre que l'introduction du renfort précipite la ruine du matériau (les nombres de cycles à la rupture sont respectivement pour la PP, PP/Chanvre Blanc et PP/Chènevotte 4357, 2349 et 2162 cycles) et génère une perte de rigidité plus importante comparativement au thermoplastique vierge. Concernant le comportement du Chanvre Blanc par rapport à la Chènevotte, là également la Chènevotte présente un comportement meilleur et terme de perte de rigidité, le nombre de cycle à rupture demeurant pratiquement inchangé.

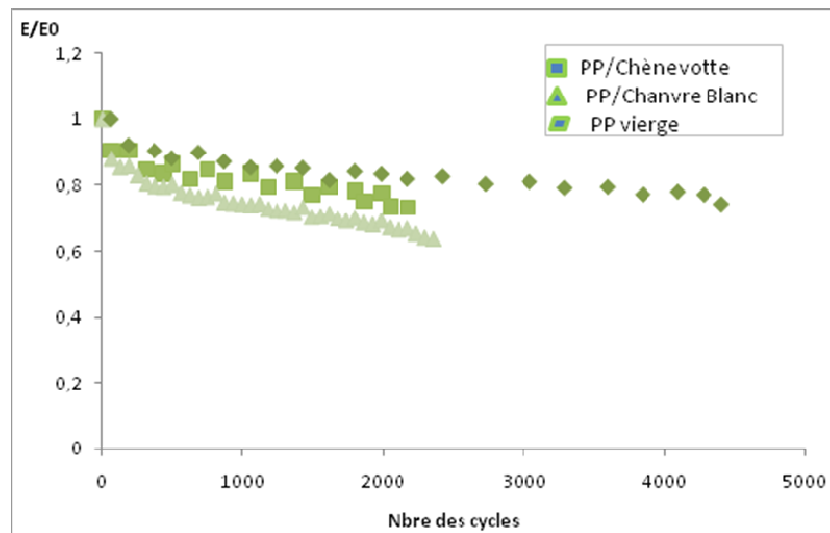


Fig.8 .Perte de rigidité à 85% UTS (Ultimate Tensile Strength)

Le même exercice est répété dans le cas des chargements à 60% et 50% de la charge max. Les figures 9 a et b présentent l'évolution des pertes de rigidité pour les trois matériaux. Jusqu'à un niveau de chargement de 60% de la charge à rupture, l'évolution de la perte de rigidité se produit selon les trois phases précédemment décrites. Par contre pour un niveau de chargement de 50% on remarque une légère chute de rigidité dans les premiers cycles suivi d'une stabilisation de l'évolution de la perte de rigidité quelque soit le matériau. Il semblerait que le réseau de fissure n'évolue plus.

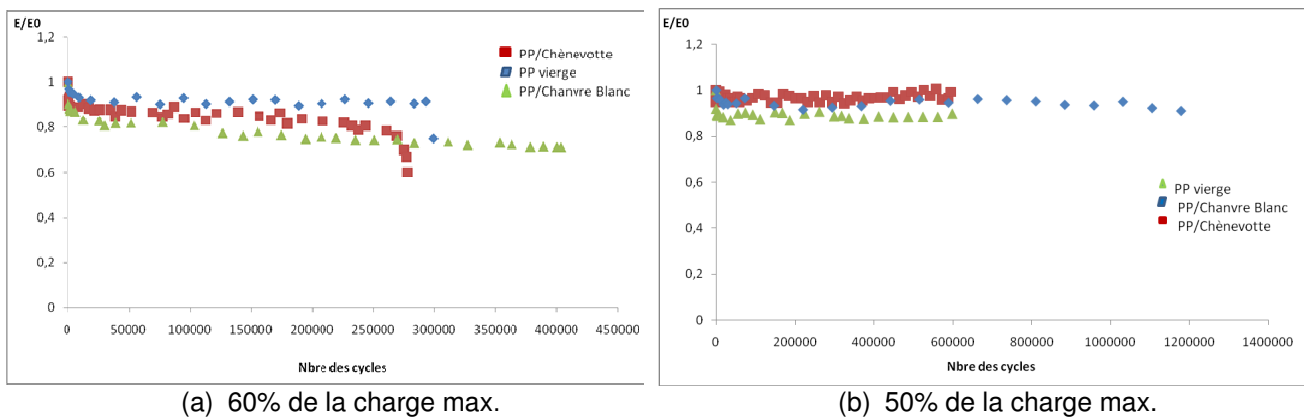


Fig. 9: Evolution de la perte de rigidité en fonction du nombre de cycle

2.2.3. Mesure de la dissipation d'énergie au cours des cycles de fatigues

Plusieurs auteurs ont avancés l'hypothèse d'une relation unique entre la durée de vie en fatigue et l'énergie totale dissipée à la rupture. Cette approche énergétique pourrait mener à des résultats plus cohérents que les lois de fatigue usuelles [14], [15], [16].

Lorsque l'on soumet un matériau à une sollicitation cyclique, la densité d'énergie locale W_i produite par dissipation visqueuse et endommagement au cours du cycle i est donnée par l'expression :

$$W_i = \pi * \sigma_i * \varepsilon_i * \sin \varphi_i \quad (\text{éq. 2})$$

- Avec
- ε_i : Amplitude de la déformation au cycle i ,
 - σ_i : Amplitude de la contrainte au cycle i ,
 - φ_i : Déphasage entre la contrainte et la déformation au cycle i

Cette énergie varie en cours de l'essai puisque :

- L'angle de phase augmente
- La déformation augmente pour un essai en contrôle de force ; l'énergie dissipée va donc augmenter.

L'énergie totale dissipée cumulée W_N sur toute la durée de l'essai est obtenue par :

$$W_N = \sum_{i=1}^N W_i \quad (\text{éq. 3})$$

En traçant l'évolution de l'énergie dissipée en fonction du nombre de cycle, on retrouve une évolution similaire aux courbes de pertes de rigidité. Les courbes de la figure 10 illustrent ces propos. Elles sont tracées pour un niveau de chargement de 85% de la charge max. Cette énergie dissipée renferme probablement deux phénomènes. Le premier est lié au comportement viscoplastique du matériau et le second doit vraisemblablement correspondre à une dissipation liée à la formation et la propagation des fissures. L'introduction des renforts limite fortement la composante visqueuse du matériau. En effet on remarque un écart important entre l'énergie dissipée par le PP vierge et les deux autres composites (25 KJ/m³ contre 9 KJ/m³). Par contre au cours de l'évolution du nombre de cycle de chargement, l'évolution de W_d dans le cas du PP vierge reste modérée ne dépassant pas les 30% alors que dans le cas du PP/Chênevotte l'évolution relative est de 122% et atteint les 233% dans le cas du PP/Chanvre Blanc. Cet écart peut être lié à l'endommagement que subit le matériau. En effet le PP/Chanvre Blanc est le matériau qui présente la plus forte perte de rigidité.

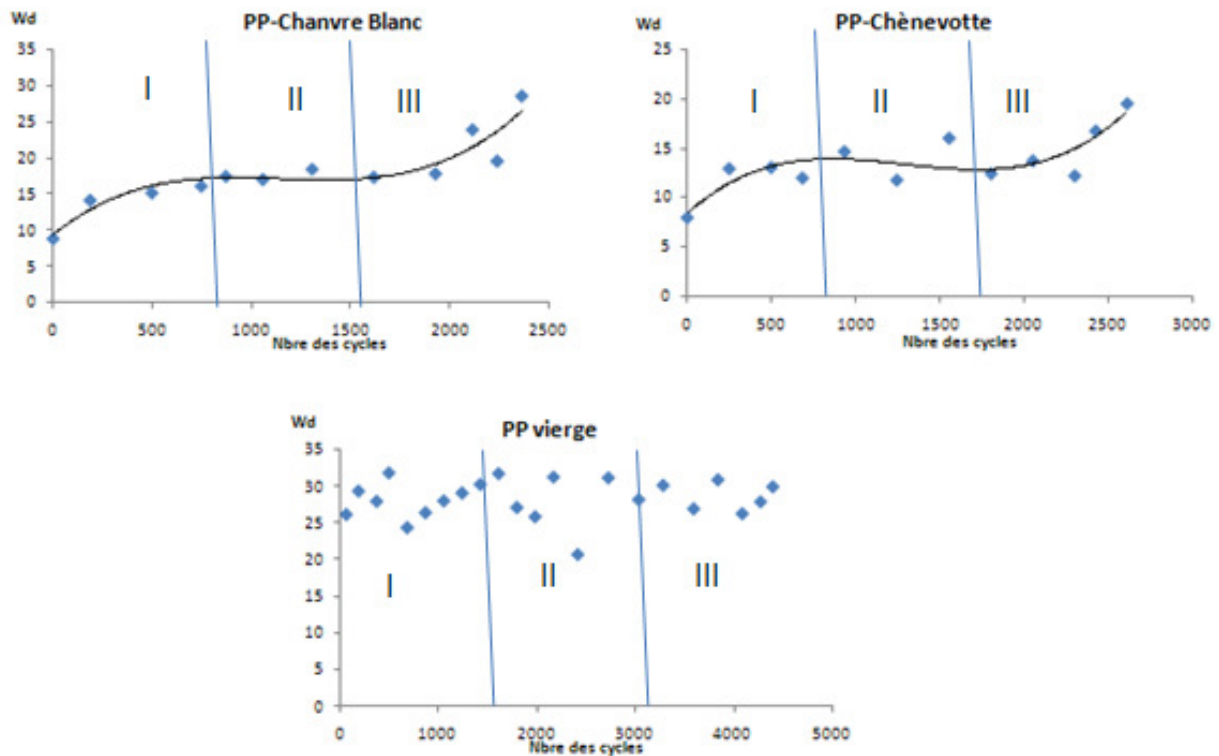


Fig. 9. Evolution de l'énergie dissipée en fonction du nombre de cycle pour un niveau de 85% UTS

Cette approche énergétique semble être intéressante pour des matériaux présentant un comportement viscoplastique couplé à de l'endommagement. Elle vient en complément aux approches classiques. A l'état actuel des connaissances, nous n'avons pas pu quantifier, énergétiquement, l'effet du Chanvre Blanc et de la Chênevotte sur la durée de vie en fatigue de ces matériaux. Les travaux futurs s'orientent vers l'élaboration d'un critère prévisionnel de la ruine de ces matériaux.

4. Conclusion

Ces travaux exploratoires ont abordé l'étude en statique et en fatigue de matériaux composites à renforts végétaux et résine thermoplastique. Ils se sont attachés à observer le comportement de ces matériaux sous une sollicitation simple de type traction uni axiale. L'objectif de cette étude est d'accumuler des connaissances et de se doter d'une base de données sur ce type de matériaux. L'effet de l'introduction des renforts a été ainsi analysé. A défaut d'une interface performante entre la fibre de Chanvre Blanc et la matrice PP, le transfert de charge est mal assuré. Il en résulte une amélioration de la rigidité mais un comportement à rupture assez proche du PP vierge. La Chênevotte, qui constitue la partie la moins noble de la plante, adhère mieux du fait d'une présence plus importante de lignine. Ce comportement en statique se retrouve en fatigue. L'introduction des renforts dans le PP atténue le comportement viscoplastique du matériau mais précipite dans certains cas la rupture. Beaucoup de verrous restent à lever afin de pouvoir espérer utiliser pleinement le potentiel de cette nouvelle génération de matériaux composites.

Références

- [1] S.J. Gassan, A. Bledzki, « Composites reinforced with cellulose based fibres ». *Progress in Polymer Science*, vol.24, p.221-274,1999.
- [2] C. Baley, T. D'Anselme, J. Guyader, « Fibres végétales : renfort de matériaux composites à matrice organique ». *Revue des composites et des matériaux avancés, Hermès*, vol.7, p.79-97,1997.
- [3] C. Baley, B. Lamy, « Propriétés mécaniques des fibres de lin utilisées comme renforts de matériaux composites ». *Revue des composites et des matériaux avancés, Hermès*, vol.10, n°1, p.7-24,2000.
- [4] C. Baley, « Analysis of the flax fibers tensile behavior and analysis of the tensile stiffness increase », *Composites Part A*, 2002.
- [5] A. Khalil, H.D Rozman, N.N Ahmad, H. Ismail, « Acetylated plant-fiber-reinforced polyester composites: a study of mechanical, hygrothermal, and aging characteristics ». *Polym. Plast. Technol. Eng.*, vo.39, n°4, p.757-781, 2000.
- [6] H. Lilholt, H. Toftegaard, A.B. Thomsen, A.S. Schmidt, « Natural composites based on cellulosic fibres and polypropylene matrix. Their processing and characterization ». *Proceedings of ICCM 12, Paris, July, 1999*.
- [7] M.R. Piggott, A. Sanadi, P.S. Chua, D. Andison, « Mechanical interactions in the interfacial region of fiber reinforced thermosets ». *In Ishida H. and Koenig J.L., eds, Composites interfaces, Elsevier Science publishing*, p.109-121, 1986.
- [8] B. Miller, P. Muri, L. Rebenfeld, « A microbond method for determination of the shear strength of a resin/fibre interface ». *Composites Science and Technology*, 28, 1987, p.17-32.
- [9] B.D. Pallensen, « The quality of combined-harvested fibre flax for industrial purposes depends on the degree of retting ». *Industrial Crops and Products*, vol.5, p.65-78, 1996.
- [10] L.S. Penn, S.M. Lee, « Interpretation of experimental results in the single pull-out filament test ». *Journal of Composites Technology and Research*, vol. 11, tome 1, p.23-30, 1989.
- [11] M.L. Benzeggagh, S. Benmedakhene, « Residual Strength of a glass/polypropylene composite material subjected to impact ». *Composites Science and Technology*, 55, 1995, p.1-11.
- [12] A.N. Towo, M.P. Ansell, « Fatigue of sisal reinforced composites: Constant-life diagrams and hysteresis loop capture ». *Composites Science and Technology*, 68, 2008, p.915-924.
- [13] S. Michelle, B. Karim, L.T. Béatrice, « Fatigue des matériaux composites à renfort carbone et verre : Influence de l'interface ». *Revue des Composites et des Matériaux Avancés, Fatigue des composites*, vol.11, n°3, 2001, p.255-287.
- [14] M. Merbouh, D. Breyesse, L. Moriceau, N. Laradi, « Comportement en fatigue des enrobés de chaussées aéronautiques sous actions de grande intensité ». *25^e rencontres de l'AUGC, 23-25 mai 2007, Bordeaux*.
- [15] I. Widyatmoko, C. Ellis, J.M. Read, « The application of the dissipated energy method for assessing the performance of polymer-modified bituminous mixtures ». *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol.32, May 1999, pp.304-310.
- [16] I. Widyatmoko, C. Ellis, J.M. Read, « Energy dissipation and the deformation resistance of bituminous mixtures ». *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol.32, April 1999, pp.218-223.