

Comportement au fluage de composites à fibres végétales

Benjamin Sala, Xavier Gabrion, Violaine Guicheret-Retel, Frédérique Trivaudey, Vincent Placet

► To cite this version:

Benjamin Sala, Xavier Gabrion, Violaine Guicheret-Retel, Frédérique Trivaudey, Vincent Placet. Comportement au fluage de composites à fibres végétales. 21ème Journées Nationales sur les Composites, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) - Bordeaux, Jul 2019, Bordeaux, Talence, France. hal-02423986

HAL Id: hal-02423986

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02423986>

Submitted on 26 Dec 2019

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.

Comportement au fluage de composites à fibres végétales

Creep behaviour of plant fibre composites

Benjamin Sala¹, Xavier Gabrion¹, Violaine Guicheret-Retel¹, Frédérique Trivaudey¹, Vincent Placet¹

¹ : Département Mécanique Appliquée, Institut FEMTO-ST,
Université Bourgogne Franche-Comté
24 rue de l'Épithaphe, F- 25000 Besançon
e-mail : benjamin.sala@femto-st.fr et vincent.placet@univ-fcomte.fr

Résumé

Pour réduire leur empreinte environnementale, les industriels recherchent des matériaux renouvelables pouvant se substituer aux solutions pétrosourcées. De par leur faible densité et leurs propriétés mécaniques élevées, l'intérêt pour les matériaux composites à fibres végétales se fait grandissant. Cependant, le manque de données concernant le comportement différé de ces composites est un frein à leur utilisation dans des applications structurales. Le but de ce travail de thèse est de caractériser et modéliser le comportement en fluage dans des conditions hygrothermiques variables. La première partie de l'étude est dédiée à la validation du procédé de fabrication utilisé. Puis, les isothermes de sorption d'eau sont déterminées pour les composites fabriqués. Une comparaison des déformations mesurées à l'aide de trois moyens métrologiques différents est réalisée avant d'analyser l'effet du niveau de sollicitation sur le comportement différé d'un composite unidirectionnel sous chargement de traction dans la direction des fibres. Les principaux résultats montrent qu'une augmentation du niveau de sollicitation a pour conséquence une augmentation de la déformation totale, de la vitesse de déformation, de la durée de fluage primaire. Le comportement du matériau est viscoélastique jusqu'à une contrainte de 55 MPa. Une dépendance à la contrainte est visible pour les niveaux de chargement étudiés.

Abstract

To reduce their environmental footprint, companies are looking for renewable solutions that can replace fuel-based solutions. Due to their low density and attractive mechanical properties, interest in plant fibre composites is growing. However, the lack of data on the delayed behaviour of these composites does not allow them to be used in structural applications. The aim of this PhD research works is to characterise and to model the creep behaviour under varying hygrothermal conditions. The first part of this study is dedicated to the validation of the manufacturing process. Then, water sorption isotherms are determined for manufactured composites. A comparison between three metrological means is done before analysing the effect of stress level on the delayed behaviour of tensile unidirectional composites in fiber direction. The main results show the increase in the stress level causes the increase of total strain, the rate of strain, the duration of primary creep stage. The material behavior is viscoelastic until a stress equal to 55 MPa. A dependence to the stress is observable for the studied stress levels.

Mots Clés : Fibres végétales, matériaux composites, fluage, humidité

Keywords : Vegetal fibers, composite materials, creep, moisture

1. Introduction

Le réchauffement climatique et les enjeux environnementaux occupent une place importante dans la société actuelle. L'accroissement du relâchement de gaz à effet de serre, causé en parti par l'activité industrielle, a pour conséquence une montée en température du globe [1]. Afin de réduire leur empreinte carbone et faire face aux normes environnementales plus strictes, certains industriels s'intéressent à de nouveaux matériaux pouvant constituer des solutions alternatives aux solutions pétrosourcées [2]. Parmi ces matériaux renouvelables se trouvent les composites à fibres végétales. Souvent comparées aux composites à fibres de verre, ces solutions biosourcées possèdent une densité plus faible et des propriétés mécaniques quasiment équivalentes [2-4]. Certains objets sont déjà réalisés à partir de ces matériaux composites [5] et leur utilisation dans des applications structurales devrait croître dans le futur [2].

Cependant, il demeure des réticences à l'utilisation de ces matériaux. Bien que le comportement en traction monotone de ces composites soit relativement bien documenté dans la

littérature, la création de modèles prédictifs n'en est qu'à son début [6-7, 9]. De plus, les composites à fibres végétales ont pour particularité d'absorber l'eau ce qui a pour conséquence une modification des propriétés mécaniques [8]. Le comportement différé de ces matériaux n'est que très peu étudié dans la littérature et ne permet pas de construire des outils de modélisation pouvant prédire la durée de vie des composites sur le long terme. Les résultats collectés montrent cependant l'existence de modes de fluage primaire et secondaire dans la direction des fibres. Lors de la recouvrance, des déformations résiduelles peuvent également être observées [9]. Une plus grande teneur en fibres permet de réduire cette déformation résiduelle [10]. L'environnement hygrothermique influe sur la réponse en fluage du matériau. Une augmentation de la température induit une déformation totale plus importante [11] tandis que l'absorption d'eau fait croître le niveau de déformation résiduelle [12].

Ce travail, mené dans le cadre du projet européen SSUCHY (www.ssuchy.eu), a pour but de contribuer à la compréhension du comportement différé de composites à fibres végétales. La non-linéarité de la déformation par rapport au temps mais aussi par rapport à la contrainte, peu décrit dans la littérature, sera en particulier étudiée. Pour cela, deux états hygrothermiques sont considérés, à savoir 23°C - 50% HR et 70°C - 85% HR. Seuls les résultats mécaniques à 23°C - 50% HR sont présentés dans ce papier.

Dans un premier temps, la fiabilité du processus de fabrication des plaques composites est étudiée. La cinétique de sorption est ensuite mesurée afin de déterminer le temps minimal permettant aux éprouvettes d'atteindre l'équilibre hygroscopique dans un environnement à 70°C - 85 % HR. De plus, une étude préalable, consistant à comparer les déformations mesurées à l'aide de trois moyens métrologiques différents, a permis de choisir celui qui sera à utiliser lors de la campagne d'essais de fluage. Ce travail se termine en s'intéressant à l'influence de la contrainte nominale sur le comportement différé des composites.

2. Matériaux et Méthodes

2.1 Matériaux

Le renfort utilisé pour la réalisation des plaques composites est un ruban unidirectionnel de lin de masse surfacique 110 g/m² (L-Flaxtape-110-36 Lineo®). Une résine époxy partiellement biosourcée provenant de la société Sicomin (GreenPoxxy 56) et son durcisseur (SD 7561) ont été choisis comme constituants de la matrice.

2.2 Fabrication

Le ruban unidirectionnel de lin est, tout d'abord, découpé en 20 plis de dimension 300 mm x 200 mm. Un cordon de matrice est déposé manuellement au centre et sur toute la largeur de chaque pli. Le moule est ouvert à deux de ses extrémités pour permettre l'évacuation de l'excédent de matrice. Tous les plis sont orientés dans la direction des fibres. L'épaisseur moyenne des plaques est d'environ 2,8 mm.

L'ensemble est ensuite placé sous une presse de thermocompression (Agila 100kN) pour y subir le cycle de cuisson décrit ci-dessous (Fig. 1). Sous l'effet de la pression, la matrice va migrer le long des fibres [13]. Une fois ce cycle terminé, une post-cuisson à 80°C pendant 2 heures est réalisée dans un délai de 2 jours. Six plaques identiques ont été fabriquées. Les fractions volumiques de fibres, de matrice et de porosité des différentes plaques ont été déterminées en utilisant la méthode décrite par Berges & al. [14] et directement adaptée de la norme ASTM D 3171-99. Les résultats sont donnés comme étant la valeur moyenne des fractions volumiques calculées sur 4 éprouvettes d'une même plaque. L'intervalle de confiance est donné à plus ou moins l'écart-type.

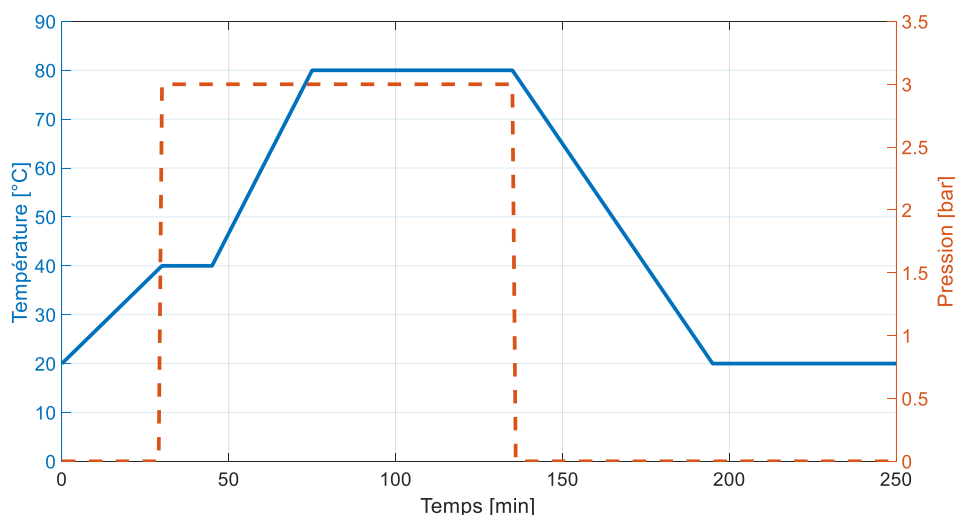


Fig. 1. Cycle de thermocompression des plaques composites fabriquées

2.3 Préparation et conditionnement des éprouvettes

Des éprouvettes de longueur 250 mm et de largeur 15 mm sont découpées au laser dans la direction des fibres. Ce mode de découpe permet d'éviter l'utilisation d'une quelconque lubrification ou humidification. Ces échantillons ont ensuite été conditionnés dans une enceinte climatique à 23°C, 50% HR pendant une durée minimale de 20 jours.

2.4 Essais de sorption

Cinq échantillons de dimensions 250x15x2.8 mm ont été préalablement séchés à une température de 103°C pendant 7 jours. Ils ont ensuite été immédiatement conditionnés dans une enceinte Climats® Excal 1411-HA à 70°C - 85% HR.

En s'appuyant sur la norme ASTM D 5229-92, lorsque les éprouvettes sont retirées de la chambre de conditionnement, celle-ci sont placées immédiatement dans un sac plastique. La masse de chaque éprouvette est ensuite mesurée puis les échantillons sont directement remis dans l'enceinte climatique. La mesure de la masse est faite sur une balance de précision 0.001 g et ne dépasse pas une durée de 5 min.

Le coefficient de diffusion est calculé à partir de l'expression fournie par la norme ASTM D 5229-92.

2.5 Essais mécaniques

Les différents essais mécaniques sont réalisés sur une machine MTS® Criterion C45 équipée d'une cellule de force de 100 kN.

2.5.1 Essais de traction monotone

Les essais de traction ont été réalisés selon la norme ASTM D-3039-00 sur 6 éprouvettes de dimensions 250x15x2.8 mm. La vitesse de déplacement de la traverse a été fixée à 1 mm/min. Un extensomètre à contact Instron® de longueur de jauge 50 mm et d'étendue de mesure de $\pm 10\%$, a été placé sur chaque éprouvette. La contrainte est calculée en effectuant le rapport entre la force mesurée et la section initiale de l'éprouvette.

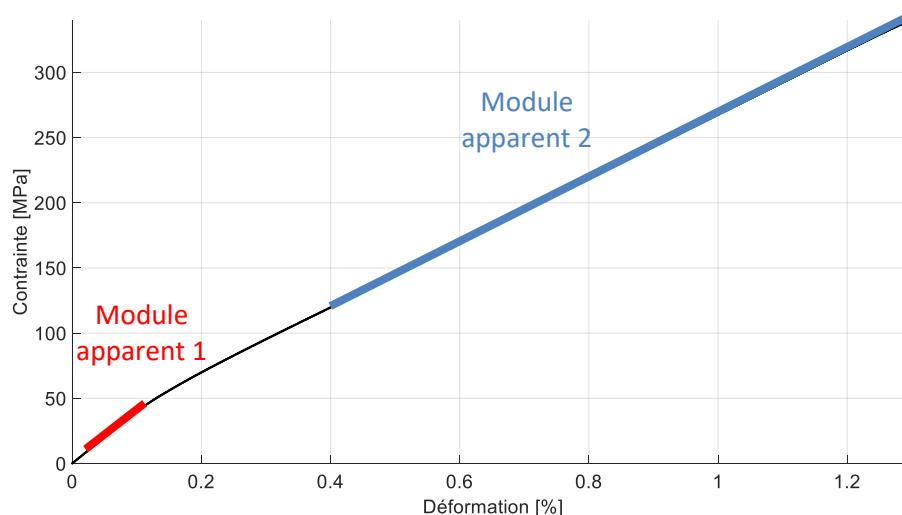


Fig. 2. Courbe de traction typique d'un composite à fibres de lin sollicité dans le sens des fibres et mise en évidence des intervalles de détermination des modules apparents

La courbe contrainte/déformation typique de ce matériau (Fig. 2) met en évidence un comportement bi-phasique au sein duquel sont définis deux modules apparents [14-15]. Le point limite séparant les deux phases du comportement est appelé par la suite le point d'inflexion. Les modules sont calculés par une régression linéaire : le premier dans l'intervalle entre 0.01% et 0.15% de déformation (E_{app1}) et le second entre 0.4% et la déformation à rupture (E_{app2}). Les modules apparents, les contraintes à rupture et les déformations à rupture ont été mesurés et exprimés comme étant la moyenne des valeurs obtenues sur les 6 éprouvettes. L'intervalle de confiance est pris égal à un écart-type.

2.5.2 Essais de fluage en traction

Les essais ont été réalisés pour différentes contraintes nominales et des temps de fluage/recouvrance identiques et égaux à 30 minutes ou 1 heure. La durée nécessaire pour atteindre la contrainte nominale est comprise entre 1 et 5 secondes conformément à la norme ISO 899-1. Lors d'essais préliminaires, plusieurs moyens métrologiques pour la mesure de la déformation axiale ont été utilisés et comparés, afin de déterminer le moyen le plus adapté pour la réalisation de la campagne d'essais de fluage. Il s'agit : (i) de jauges de déformation bidirectionnelles de la société Micro-Measurements® dotées d'une longueur de grille de 1.57 mm et d'une étendue de mesure de $\pm 3\%$, (ii) d'un extensomètre à contact de longueur utile 50 mm et doté d'une étendue de mesure de $\pm 10\%$, d'une caméra Grasshopper 3 Flir® 4,1MP pour la réalisation d'images optiques de l'éprouvette durant les essais et la détermination des champs de déformation par corrélation d'images. Aucun mouchetis n'a été appliqué sur le composite. Les champs de déformations ont été calculés en utilisant l'algorithme de Réthoré & al. [16]. Les résultats ont été exprimés comme étant la moyenne des déformations calculées.

3. Résultats et Discussion

3.1 Étude de la variabilité des propriétés des plaques composites

Dans le but de valider le protocole de fabrication des plaques composites, il convient d'étudier, tout d'abord, les différentes fractions volumiques (Tab. 1.). Les conditions de fabrication utilisées permettent d'obtenir des fractions volumiques de fibres proche de 50% et des fractions volumiques de porosité très faibles pour l'ensemble des plaques réalisées. Ces valeurs sont en adéquation avec

les résultats obtenus dans la littérature pour une fabrication par thermocompression avec le même renfort [13-14].

N° plaque	Fraction vol. de fibre [%]	Fraction vol. de matrice [%]	Fraction vol. de porosité [%]
1	52.8 ± 1.8	45.0 ± 1.8	2.3 ± 0.7
2	50 ± 0.5	46.5 ± 1.6	3.5 ± 1.6
3	49.9 ± 0.6	49.5 ± 1.6	1.1 ± 0.7
4	50.1 ± 1.7	49.5 ± 1.3	1.2 ± 0.7
5	49.7 ± 0.6	48.7 ± 1.1	1.6 ± 0.7
6	52.6 ± 2.4	45.0 ± 4.0	2.4 ± 1.6

Tab. 1. Fractions volumiques de fibre, de matrice et de porosité de chaque plaque

Dans un second temps, des essais de traction dans le sens des fibres ont été effectués sur les éprouvettes prélevées dans chacune des 6 plaques composites fabriquées (Tab. 2). En utilisant le même renfort et sur des composites ayant 45% de fibres en volume, Berges & al. [14] ont obtenus des modules apparents 1 et 2 égaux respectivement à 33 GPa et 20 GPa. Cadu & al. [17] ont quant à eux obtenus des modules de 32 GPa et 22 GPa.

Module E_{app1} [GPa]	Module E_{app2} [GPa]	Contrainte à rupture [MPa]	Déformation à rupture [%]
36 ± 2.1	24 ± 0.9	311 ± 21	1.18 ± 0.10

Tab. 2. Caractéristiques mécaniques moyennes en traction dans le sens des fibres

À la vue des résultats précédents, le processus de fabrication permet d'obtenir, avec une résine époxy partiellement biosourcée, des résultats en accord avec les données obtenues dans la littérature avec une résine époxy pétrosourcée. Il a donc été décidé d'utiliser ces constituants et ce même procédé pour la réalisation des futures éprouvettes.

3.2 Influence de l'environnement hygrothermique sur la teneur en eau des composites

En observant la courbe de sorption (Fig. 3.), il apparaît que la diffusion de l'eau au sein du composite suit une loi de Fick.

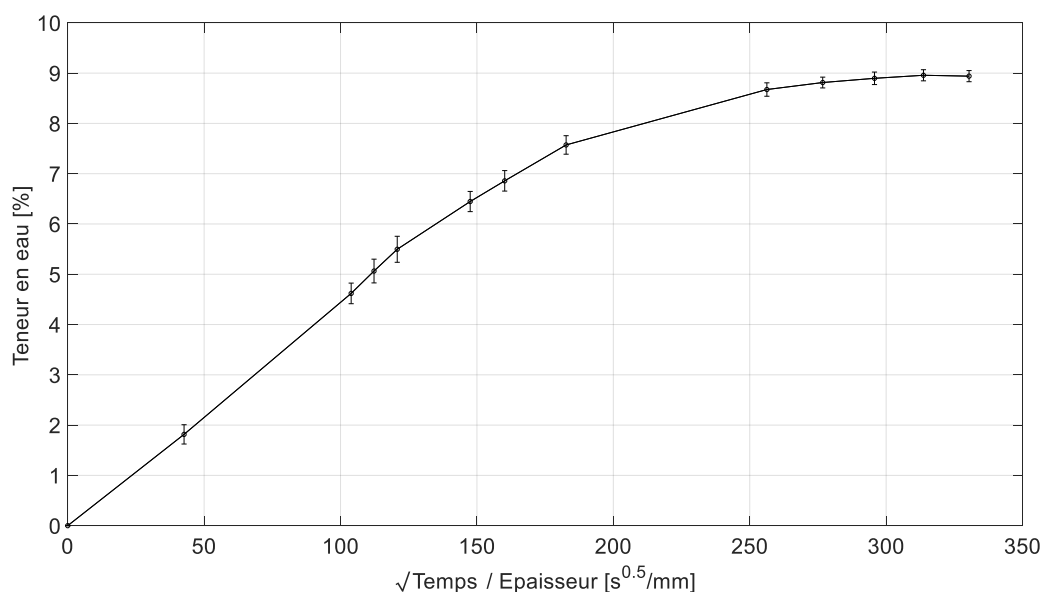


Fig. 3 Courbe de sorptions à 70°C – 85 % HR

L'équilibre hygroscopique des éprouvettes est atteint pour une durée proche de 200 h. La teneur en eau de ce matériau à l'équilibre est de $8,9 \pm 0,1$ % à 70°C - 85 % HR contre $3,3 \pm 0,1$ % dans un environnement à 23°C - 50% HR. Le coefficient de diffusion moyen à 70°C - 85 % HR est égal à $4,76 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, valeur en accord avec les résultats issus de la littérature [18]. Cette courbe montre également une faible variabilité des mesures effectuées sur des éprouvettes prélevées dans des plaques différentes.

3.3 Choix de l'outil de mesure des déformations pour les essais en fluage

Un essai préliminaire a été effectué pour mettre en parallèle les résultats obtenus avec les 3 outils de mesure (Fig. 4.). Contrairement aux autres essais de fluage, le composite utilisé pour cette expérience a été fabriqué à partir d'un renfort de lin pré-imprégné (Flaxpreg T-UD Lineo® à 110 g/m^2).

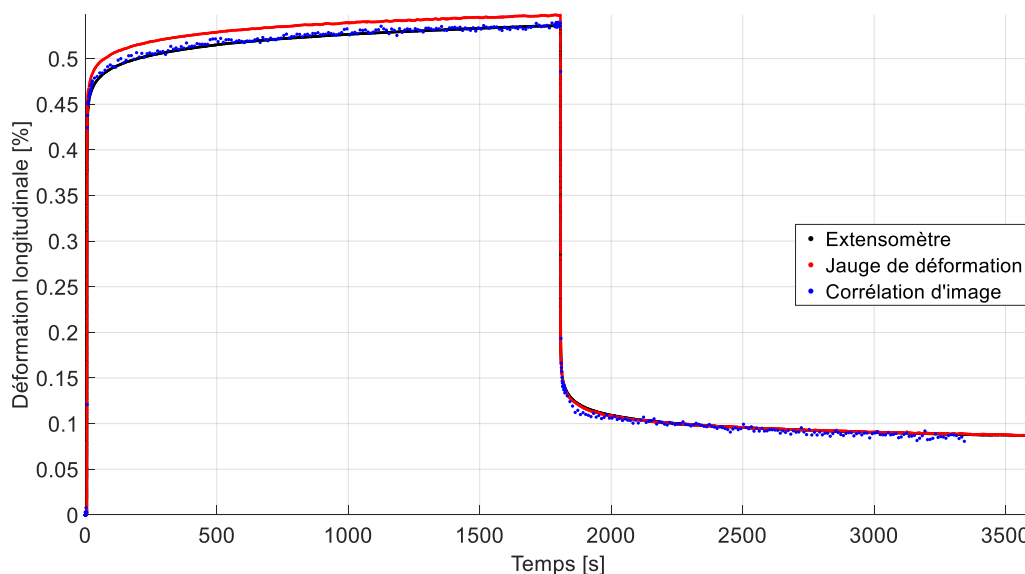


Fig. 4. Comparaison des différents moyens de mesure pour un essai de fluage/recouvrance de 30 min dans le sens des fibres sur une éprouvette fabriquée à partir du Flaxpreg T-UD Lineo® à 110 g/m^2

Les trois moyens de mesure utilisés conduisent à des résultats similaires. Lors de la réponse instantanée du matériau, le module apparent 1 est de 41 GPa contre 35 GPa lors d'un essai en traction monotone quasi-statique. Il en va de même pour le second module apparent passant de 26 GPa à 30 GPa. Ceci est certainement dû à la différence de vitesse de chargement. La déformation instantanée maximale est évaluée à 0,42%. La réponse différée du matériau met en évidence d'une part, une zone où la déformation totale croît rapidement, et d'autre part, une zone où la vitesse de déformation est constante et égale à $1,7 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. On parlera respectivement de zone de fluage primaire et de zone de fluage secondaire. La déformation totale atteinte pour ce chargement est estimée à 0,54 % au bout de 30 min. À la décharge, la déformation instantanée est d'environ 0,31 % et on observe une déformation résiduelle de l'ordre de 0,09 %, considérée comme irréversible au vu du faible temps de recouvrance. On constate que la mesure des déformations par l'extensomètre et la corrélation d'images donne des résultats identiques. Un très faible écart peut être détecté avec les jauges de déformation. Néanmoins, l'écart maximum entre les déformations ne dépasse pas 0,02% de déformation. Plusieurs éléments peuvent expliquer ces faibles différences. Les trois moyens de mesure couvrent des zones utiles de tailles différentes.

La mesure par jauge de déformation, plus locale que celle réalisée par l'extensométrie à contact, peut expliquer l'écart entre les données. On constate également, dans le mode de fluage secondaire, une vitesse de déformation mesurée par la jauge égale à $1,5 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ et légèrement plus faible que celle obtenue par l'extensométrie. Le comportement visqueux de la colle permettant de fixer la jauge à l'éprouvette pourrait être responsable de ce phénomène. Au regard des mesures effectuées et pour une simplicité de mise en place, les éprouvettes utilisées pour la suite des essais de fluage seront instrumentées par l'extensométrie à contact.

3.4 Influence de la contrainte nominale sur la réponse en fluage

Les essais de fluage réalisés montrent l'influence de la contrainte nominale sur la réponse en déformation des composites sollicités dans le sens des fibres (Fig. 5.). On remarque tout d'abord que l'augmentation de la contrainte nominale a pour effet une augmentation de la déformation totale, instantanée et différée (Tab. 3.). Le comportement bi-phasique observé lors d'essais monotones est également visible dans la réponse instantanée du matériau.

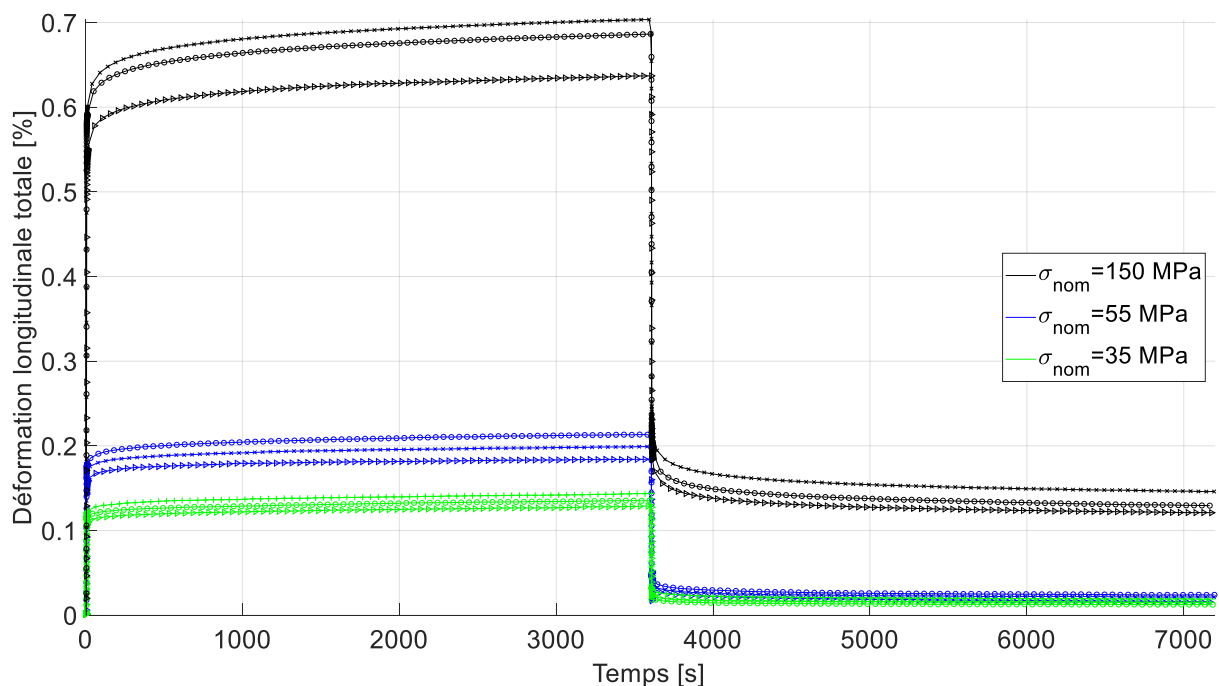


Fig. 5. Déformation longitudinale totale de neuf éprouvettes soumises à différents niveaux de sollicitation lors d'un essai de fluage/recouvrance d'une heure

Les contraintes nominales de 55 et 35 MPa sont respectivement égales et inférieures à la contrainte au point d'inflexion. Or, pour ces niveaux de sollicitation, la déformation résiduelle est très faible. Le comportement du composite peut être qualifié de viscoélastique lorsque la contrainte nominale est plus faible que la contrainte au point d'inflexion. Au-delà de ce point, un comportement irréversible sur les temps courts est également mis en jeu. Il peut être dû à de la plasticité [19] ou à de l'endommagement. Afin de mieux identifier l'origine de ce comportement irréversible aux temps courts, des essais complémentaires, mettant en jeu des profils de chargement plus complexes, sont nécessaires.

Niveau de contrainte [MPa]	Déformation totale maximale [%]	Déformation instantanée [%]	Déformation différée maximale [%]	Vitesse de déformation dans le mode de fluage secondaire [s ⁻¹]
248	1.14 ± 0.06	0.96 ± 0.01	0.22 ± 0.02	9. 10 ⁻⁸ ± 3. 10 ⁻⁸
150	0.68 ± 0.03	0.56 ± 0.02	0.12 ± 0.01	7. 10 ⁻⁸ ± 2. 10 ⁻⁸
55	0.20 ± 0.01	0.15 ± 0.03	0.038 ± 0.002	4. 10 ⁻⁸ ± 2. 10 ⁻⁸
35	0.14 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.024 ± 0.001	3. 10 ⁻⁸ ± 2. 10 ⁻⁸

Tab. 3. Déformation maximale totale, instantanée, différée et vitesse de déformation obtenue pour différents niveaux de contrainte nominale (moyenne ± écart-type)

La séparation de la déformation instantanée et de la déformation différée permet de mieux étudier le comportement visqueux du matériau (Fig. 6.). L'augmentation de la contrainte nominale a pour impact une durée de fluage primaire plus longue. Pour le mode de fluage secondaire, les vitesses de déformation ont été calculées (Tab. 3.). On remarque que ces vitesses de déformation sont une fonction croissante du niveau de sollicitation.

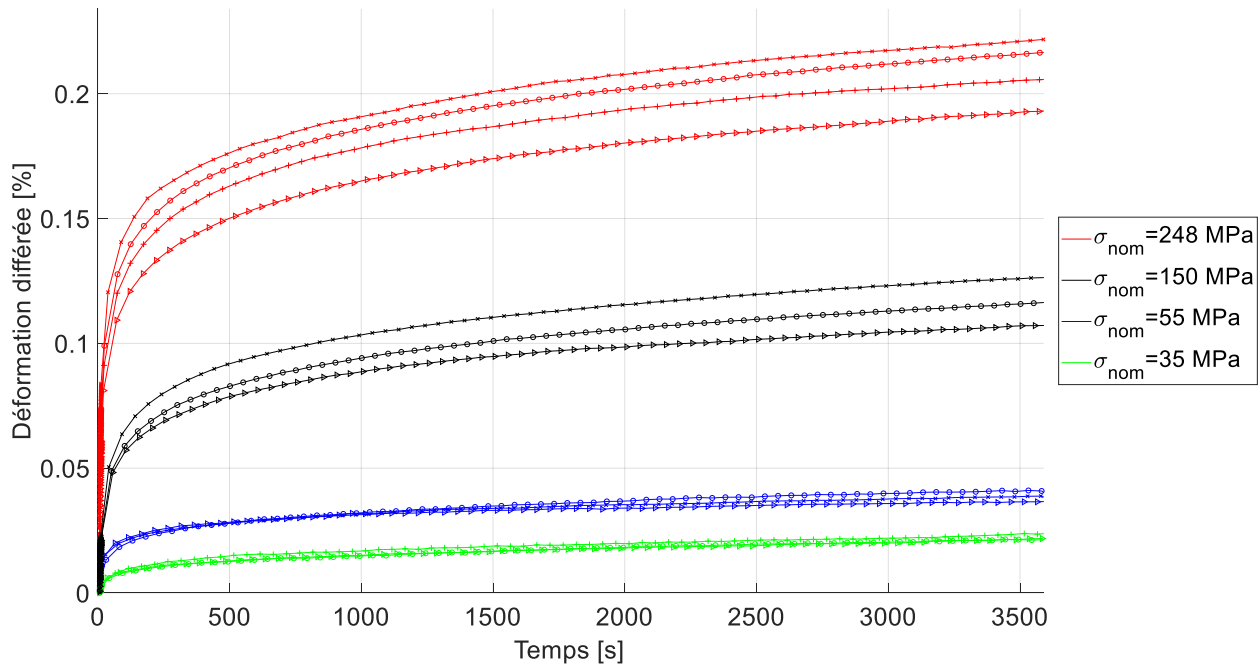


Fig. 6. Déformation longitudinale différée de treize éprouvettes soumises à différents niveaux de sollicitation lors d'un essai de fluage d'une heure

Pour évaluer l'impact de la contrainte nominale sur le niveau de déformation, il convient d'étudier la complaisance viscoélastique (Fig. 7.). Pour les niveaux de sollicitation étudiés, l'étagement des courbes montre une certaine dépendance à la contrainte nominale appliquée. Les résultats obtenus pour une sollicitation de 35 MPa semblent se démarquer des autres résultats. Pour conclure sur le comportement linéaire du matériau en dessous d'un seuil de contrainte, il conviendra de faire des nouveaux essais à contrainte nominale inférieure à 35 MPa.

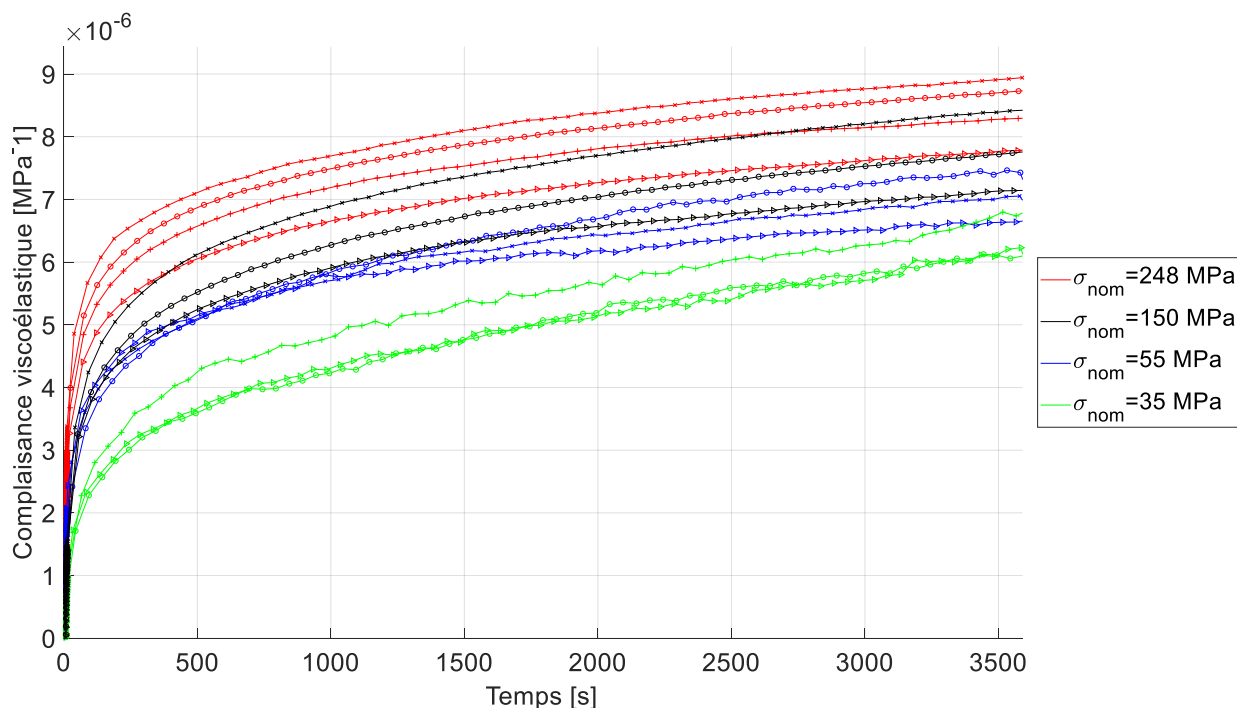


Fig. 7. Complaisance viscoélastique de treize éprouvettes soumises à différents niveaux de sollicitation lors d'un essai de fluage d'une heure

4. Conclusions

Cette étude a pour vocation de contribuer à la compréhension du comportement en fluage de composites renforcés par des fibres végétales en étudiant principalement l'influence de la contrainte nominale sur la réponse du matériau. Une étude préliminaire a permis de choisir l'extensométrie comme étant le moyen de mesure des déformations le plus simple à mettre en œuvre, tout en garantissant une mesure globale de cette grandeur. La réponse instantanée du matériau met en évidence un comportement biphasique identique à celui observé lors d'essais monotones. Un mode de fluage primaire et secondaire est visible lors de la réponse différée du matériau. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la contrainte nominale a pour impact : (i) une augmentation de la déformation totale, instantanée et différée, (ii) une augmentation de la vitesse de déformation dans le mode de fluage secondaire, (iii) une augmentation de la durée du mode de fluage primaire, (iv) une augmentation de la complaisance viscoélastique. Le comportement du matériau peut être qualifié de viscoélastique jusqu'à une contrainte nominale seuil. Cette dernière est égale à la contrainte au point d'inflexion observable lors d'essais monotones. La linéarité de ce comportement ne peut être déterminée que par la réalisation de nouveaux essais pour des contraintes inférieures à ce seuil. Des profils de chargement plus complexes permettront également de mieux appréhender le comportement du matériau.

Par la suite, le comportement en traction puis en fluage des composites conditionnés à 70°C - 85 % HR sera étudié. Un modèle sera également mis au point afin de prédire le comportement en fluage de composites à fibres végétales, dans un premier temps sans prise en compte du couplage hygro-mécanique.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet SSUCHY financé par le partenariat public-privé BBI (Bio Based Industries) dans le cadre du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union Européenne au titre de la convention de subvention n° 744349.

Références

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change, « Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty », Rapport, 2018
- [2] M. Ramesh, K. Palanikumar, K. Hemachandra Reddy, « Plant fibre based bio-composites: Sustainable and renewable green materials », *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 79, pp 558-584, 2017.
- [3] S. V. Joshi, L. T. Szal, A. K. Mohanty, S. Arora, « Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites ? », *Composites : Part A* Vol. 35, pp 371-376, 2004.
- [4] L. Pil, F. Bensadoun, J. Pariset et I. Verpoest, «Why are designers fascinated by flax and hemp fibre composites», *Composites : Part A*, pp. 193-205, 2016.
- [5] Confédération Européenne du Lin et du Chanvre, « Flax & Hemp Fiber Composites, a market reality - The biobased solutions for the industry », JEC Group, 2018
- [6] Z. Mahboob, Y. Chemisky, F. Meraghni, H. Bougherara, « Mesoscale modelling of tensile response and damage evolution in natural fibre reinforced laminates », *Composites : Part B* Vol. 119, pp 168-183, 2017.
- [7] K. Strohrmann, M. Hajek, « Bilinear approach to tensile property of flax composites in finite element analyses », *J Mater Sci* Vol. 54, pp 1409-1421, 2019.
- [8] M. Assarar, D. Scida, A. El Mahi, C. Poilâne, R. Ayad, « Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials : Flax-fibres and glass-fibres », *Materials and Design* Vol. 32, pp788-795, 2011.
- [9] C. Poilâne, Z. E. Cherif, F. Richard, A. Vivet, B. Ben Doudou et J. Chen, «Polymer reinforced by flax fibres as a viscoelastoplastic material», *Composites Structures* Vol. 112, pp. 100-112, 2014.
- [10] V. A. Alvarez, J. M. Kenny et A. Vazquez, «Creep behavior of biocomposites based on sisal fiber reinforced cellulose derivatives/starch blends», *Polymer Composites* Vol. 25, pp. 280-288, 2004.
- [11] Y. Xu, Q. Wu, Y. Lei et F. Yao, «Creep behavior of bagasse fiber reinforced polymer composites», *Bioresource Technology* Vol. 101, pp. 3280-3286, 2010.
- [12] S. K. Najafi, H. Sharifnia et M. Tajvidi, «Effects of water absorption on creep behavior of wood-plastic composites», *Composite Materials* Vol. 42, pp. 993-1002, 2008.
- [13] T. Cadu, M. Berges, O. Sicot, V. Person, B. Piezel, L. Van Schoors, V. Placet, S. Corn, R. Léger, L. Divet, P. Ienny, S. Fontaine, « What are key parameters to produce a high-grade bio-based composite ? Application to flax/epoxy UD laminates produced by thermocompression », *Composites: Part B* Vol. 150, pp. 36-46, 2018.
- [14] M. Berges, R. Léger, V. Placet, V. Person, S. Corn, X. Gabrion, J. Rousseau, E. Ramasso, P. Ienny, S. Fontaine, « Influence of moisture uptake on the static, cyclic and dynamic behaviour of unidirectionnal flax fibre-reinforced epoxy laminates », *Composites : Part A* Vol. 88, pp. 165-177, 2016
- [15] D. U. Shah, « Damage in biocomposites : Stiffness evolution of aligned plant fibre composites during monotonic and cyclic fatigue loading », *Composites : Part A* Vol 83, pp.160-168, 2016
- [16] J. Réthoré, F. Hild, S. Roux, « Shear-band capturing using a multiscale extended digital image correlation technique », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* Vol. 196, pp.5016-5030.
- [17] T. Cadu, L. Van Schoors, O. Sicot, E. Keita, L. Divet, S. Fontaine, « Influence des conditions de fabrication sur les propriétés mécaniques et physicochimiques d'un composite lin/époxy unidirectionnel », Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Juin 2017.
- [18] M. Habibi, L. Laperrière, H. M. Hassanabadi, « Effect of moisture absorption and temperature on quasi-static and fatigue behavior of nonwoven flax epoxy composite», *Composites : Part B* Vol. 166, pp. 31-40, 2019.
- [19] F. Richard, C. Poilâne, H. Yang, F. Gehring, E. Renner, « A viscoelastoplastic stiffening model for plant fibre unidirectionnal reinforced composite behaviour under monotonic and cyclic tensile loading », *Composite Science and Technology* Vol. 167, pp 396-403, 2018