

Etude du comportement visco-élasto-plastique endommageable d'un composite verre/époxy pour la prévision de la durée de vie

Characterisation of the visco(elasto-plastic damageable behavior of a glass/epoxy composite for the prediction of its service life

F. Hache¹, C. Bois¹, J.C. Wahl¹, A. Renaud², E. Boissin¹ et D. Caous³

1 : Institut Ingénierie Mécanique I2M, CNRS Université de Bordeaux
15 rue Naudet, 33170 Gradignan, France

e-mail : florian.hache@u-bordeaux.fr, christophe.bois@u-bordeaux.fr, jean-christophe.wahl@u-bordeaux.fr, eileen.boissin@u-bordeaux.fr

2 : Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) UMR CNRS 7356
Pôle Sciences et Technologie, Université de La Rochelle
Avenue Michel Crépeau 17042 La Rochelle Cedex 1 - France
e-mail : alexis.renaud@univ-lr.fr

3 : TENSYL
48, rue Jacques de Vaucanson, Pôle Arts et Métiers, 17180 PERIGNY
e-mail : damien.caous@tensyl.com

Résumé

Les composites verre/époxy utilisés dans les pales d'hydroliennes sont extrêmement sollicités en fluage et en fatigue. Etant en contact permanent avec l'eau, ils subissent par ailleurs un vieillissement hydrique. Il s'agit donc dans cette étude d'étudier les couplages entre les effets visqueux décrits par des essais de fluage, dynamiques via des tests de fatigue et les dégradations induites par le vieillissement. Les tests de fluage montrent que l'élasto-visco-plasticité du matériau est causée par la matrice. Les paramètres d'une loi rhéologique de fluage à base thermodynamique sont identifiés pour caractériser le comportement du composite soumis à une sollicitation constante. Des essais de fatigue réalisés à différents rapports de charges et fréquences montrent que la rupture du composite ne dépend pas de la fréquence lorsque la contrainte moyenne appliquée est faible. Pour un grand rapport de charge, à de faibles fréquences, l'endommagement est piloté par le fluage tandis que les effets dynamiques conduisent à une ruine prématurée de la structure à hautes fréquences. Enfin, le composite vieilli se déforme bien plus en fluage que le matériau sain. L'objectif final est d'enrichir les modèles existants pour prendre en compte tous ces effets.

Abstract

Fatigue and creep phenomena are extremely present for glass/epoxy composites used in turbine blades. Being permanently in contact with water, there is also a water ageing effect. The aim of this study is to analyze the interactions between viscous effects from creep tests, dynamic ones via fatigue experiments and damages induced by water ageing. Creep tests show that the elasto-visco-plastic behavior of the composite material is due to the matrix. The parameters of a rheological law based on thermodynamic considerations are identified in order to characterize the behavior of a composite under a constant stress. Fatigue tests are performed at different stress levels and frequencies and show that the rupture of the composite does not depend on the frequency when the applied stress is small. For big applied stress, at low frequencies, the damages are due to the creep effects whereas dynamic effects lead to the degradation of the structures at high frequencies. Moreover, the comparison of the creep data for composites after a few months of water ageing and the normal ones shows that the water ageing induce much more important strains. The final objective is to improve the existing models to take into account these effects.

Mots Clés : Fluage, fatigue, vieillissement hydrique

Keywords : Creep, fatigue, water ageing

1. Introduction

Alors que la France a pour but de compter 23% d'énergie renouvelable dans sa consommation totale d'ici 2020 et afin de répondre aux demandes énergétiques mondiales en constante

augmentation, l'étude et la compréhension de la durabilité des matériaux utilisés pour les hydroliennes apparaît comme un enjeu crucial et une priorité pour atteindre cet objectif. En moyenne utilisées pendant 20 ans, une des principales causes de la ruine des structures hydroliennes est qu'elles sont soumises à d'importantes sollicitations cycliques. Celles-ci sont étudiées dans la littérature par des essais de fatigue à différents rapports de charges et des fréquences élevées afin de réduire le temps d'expérimentation. Ce chargement cyclique ayant une contrainte moyenne non nulle, cette dernière peut également endommager la structure par fluage. Cependant, la plupart des modèles de fatigue développés dans la littérature ignorent ces effets élasto-visco-plastiques. De plus, au contact de l'eau, les composites des hydroliennes se dégradent chimiquement (corrosion, plastification, hydrolyse, ...). Cela s'accompagne d'une chute des propriétés mécaniques (rigidité, contrainte à rupture, ...). Différents modèles ont été développés dans la littérature pour prédire la durée de vie de la structure et décrire l'endommagement du matériau. Parmi eux, les modèles à l'échelle du pli [1-6] développés à partir d'une approche thermodynamique ont montré leur intérêt pour le dimensionnement en bureau d'études. Pourtant, malgré un intérêt croissant de la communauté scientifique pour les couplages multi-physiques et l'incorporation de ces derniers dans des modèles mécaniques, il n'existe pas de modèle de fatigue à l'échelle du pli prenant en compte les effets de fluage et du vieillissement. L'objectif de ces travaux est de caractériser les couplages entre la fatigue, le fluage et le vieillissement hydrique intervenant lors de l'utilisation des hydroliennes afin de les intégrer dans un méso-modèle.

Il convient de décrire le comportement visco-élastique et visco-plastique du matériau composite considéré sans effets dynamiques ou de vieillissement. Différents modèles existent dans la littérature [7-10]. Le plus commun et adopté dans cette étude est celui de Schapery-Zapas-Crisman. Il s'agira ici de réaliser des essais de fluage et à partir de ces derniers, d'analyser les mécanismes responsables de la déformation et notamment le rôle de la matrice et des fibres dans le comportement visqueux du stratifié. Les paramètres du modèle seront alors identifiés à partir des courbes expérimentales.

2. Caractérisation du couplage fluage/fatigue

2.1. Matériaux utilisés

L'ensemble de l'étude est réalisé en considérant des éprouvettes de composites verre/époxy à renfort NCF (Non Crimp Fabric), de dimension $250 \times 25 \times 2.2 \text{ mm}^3$ avec des talons aux extrémités (voir Fig. 1). Les échantillons ont été extraits d'une plaque par une scie à lame de diamant, conformément aux normes EN6031 et EN6035.

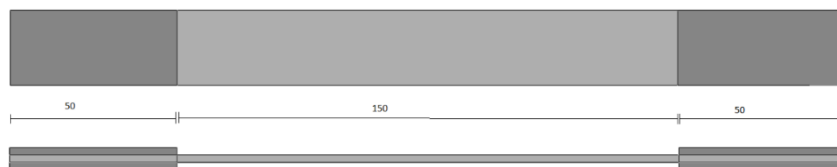


Fig. 1. Dimensions (en mm) et géométrie des éprouvettes.

Le vieillissement est réalisé en immergeant le matériau dans un bain d'eau pure thermostaté au pH contrôlé et est caractérisé par des pesées d'échantillons de dimensions $2.5 \times 4 \times 2.2 \text{ mm}^3$.

2.2. Modèle élasto-visco-plastique

Le comportement élasto-visco-plastique d'un composite est caractérisé par des essais de fluage-recouvrement à différents niveaux de charges. L'éprouvette est successivement sollicitée à une contrainte constante pendant un temps donné puis relâché à une contrainte nulle, comme le montrent les figures 2 et 3. Les déformations sont mesurées via des jauges toutes les secondes pendant la charge, toutes les 5 secondes pendant le palier de contraintes. Les contraintes sont normalisées par rapports aux charges à rupture du stratifié.

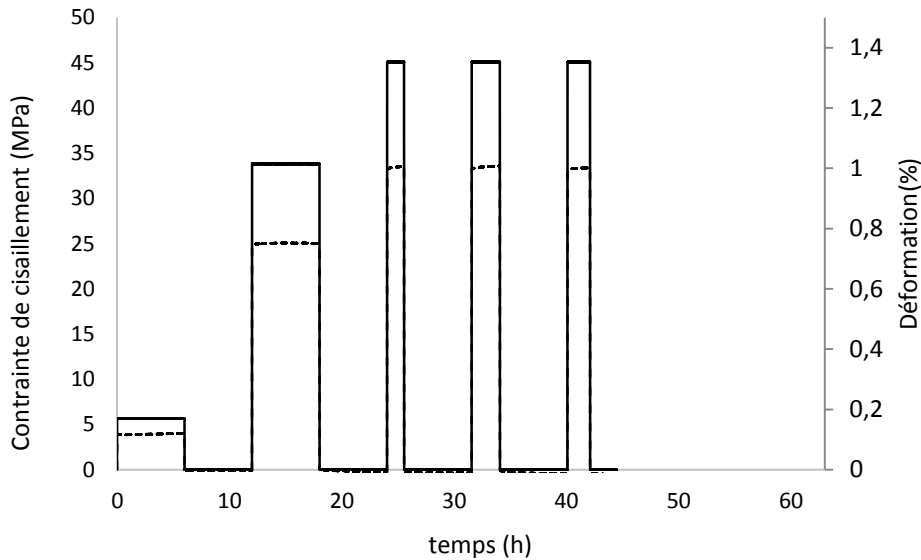


Fig. 2. Essais de fluage recouvrement pour un composite unidirectionnel $[0]_3$ et réponse en déformation

Des essais de fluage-recouvrement ont été réalisés sur des stratifications $[0]_3$ et $[\pm 45]_{2s}$ afin de mettre en évidence le rôle de la matrice et des fibres. Comme le montre la figure 2, sur un composite unidirectionnel $[0]_3$ la déformation longitudinale ne varie pas avec le temps, même à de hauts niveaux de charge. En effet, l'effort étant principalement supporté par les fibres, les déformations irréversibles induites par le fluage sont minimales. Les résultats sur le stratifié $[\pm 45]_{2s}$ sont présentés sur la figure 3. Au-delà du seuil d'élasticité, à chaque niveau de charge, on considère trois différentes durées de maintien : 3h, 2h30 et 1h30. Ces différentes durées permettent de mettre en évidence les phénomènes de cumul.

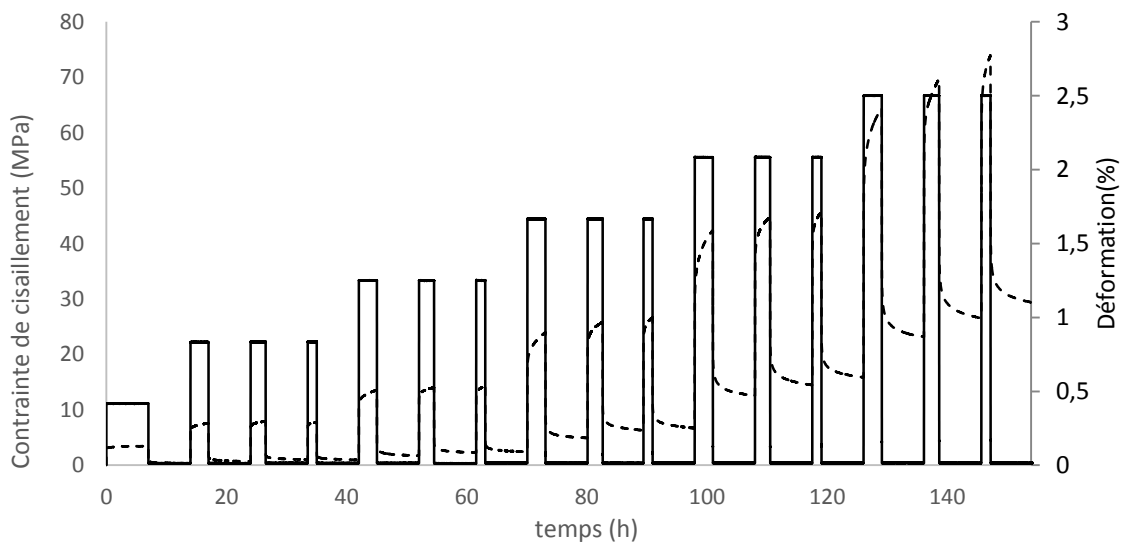


Fig. 3. Essais de fluage recouvrement pour un composite $[\pm 45]_{2s}$ et réponse en déformation

A de hauts niveaux de chargements, le recouvrement de la déformation n'est que partiel, ce qui montre que le composite présente un comportement viscoélastique et viscoplastique non-linéaire. L'évolution de la déformation ε du composite avec le temps t et de la contrainte appliquée σ peut être décrite par une loi élasto-visco-plastique comme proposé par Marklund et Varna [7]. Elle est la superposition d'une déformation instantanée, ε_{inst} d'une déformation viscoélastique donnée par le modèle de Schapery, ε_{ve} , et d'une autre viscoplastique de Zapas-Crisman, ε_{vp} [12]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{inst} + \underbrace{\varepsilon_{ve}}_{Schapery} + \underbrace{\varepsilon_{vp}}_{Zapas-Crisman} \quad (\text{Eq. 1})$$

La déformation viscoélastique est donnée par

$$\varepsilon_{ve} = \int_0^t g_1 \Delta D(\psi - \psi') \frac{\partial(g_2 \sigma)}{\partial \tau} d\tau \quad (\text{Eq. 2})$$

où g_1 et g_2 sont des paramètres non linéaires dépendants de la contrainte appliquée. g_1 représente la différence entre la contrainte maximale du modèle et celle de l'expérience. $\psi = \int_0^t \frac{dt'}{a_\sigma}$ et $\psi' = \int_0^\tau \frac{dt'}{a_\sigma}$ sont des temps réduits. a_σ est un paramètre, dépendant de la contrainte, donnant la vitesse à laquelle la déformation atteint sa valeur limite. Dans le domaine élastique, $g_1 = g_2 = a_\sigma = 1$. ΔD est la souplesse transitoire du matériau, traditionnellement exprimée selon une série de Prony de paramètres D_i :

$$\Delta D(t) = \sum_{i=1}^{\infty} D_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right) \quad (\text{Eq. 3})$$

Les temps caractéristiques de relaxation τ_i sont traditionnellement donnés par $\tau_i = 10^i$ s.

La déformation visco-plastique est donnée par la loi de Zapas-Crisman :

$$\varepsilon_{vp} = C \sigma^{N.n} t^n \quad (\text{Eq. 4})$$

où C , n et N sont des paramètres qu'il convient d'identifier à partir des données empiriques

La déformation s'écrit alors lorsqu'on applique successivement des contraintes constantes:

$$\varepsilon = \varepsilon_{inst} + g_1 g_2 \sigma \sum_{i=1}^{\infty} D_i \left(1 - e^{-\frac{t}{a_\sigma \tau_i}}\right) + C \sigma^{N.n} t^n \quad (\text{Eq. 5})$$

Les paramètres du modèle sont identifiés selon la méthode proposée par Albouy [7].

Dans la phase de recouvrement du domaine élastique après un temps de chargement t_b , la déformation est :

$$\varepsilon_{rec} = \sigma \sum_{i=1}^{\infty} D_i \left(1 - e^{-\frac{t-t_b}{\tau_i}}\right) \quad (\text{Eq. 6})$$

Seuls les 5 premiers termes de la série de Prony ont une réelle importance. Les paramètres $(D_i)_{i=1..5}$ sont ainsi déterminés par la méthode des moindres carrés en comparant la déformation expérimentale avec celle du modèle (voir table 1 et Figure 4).

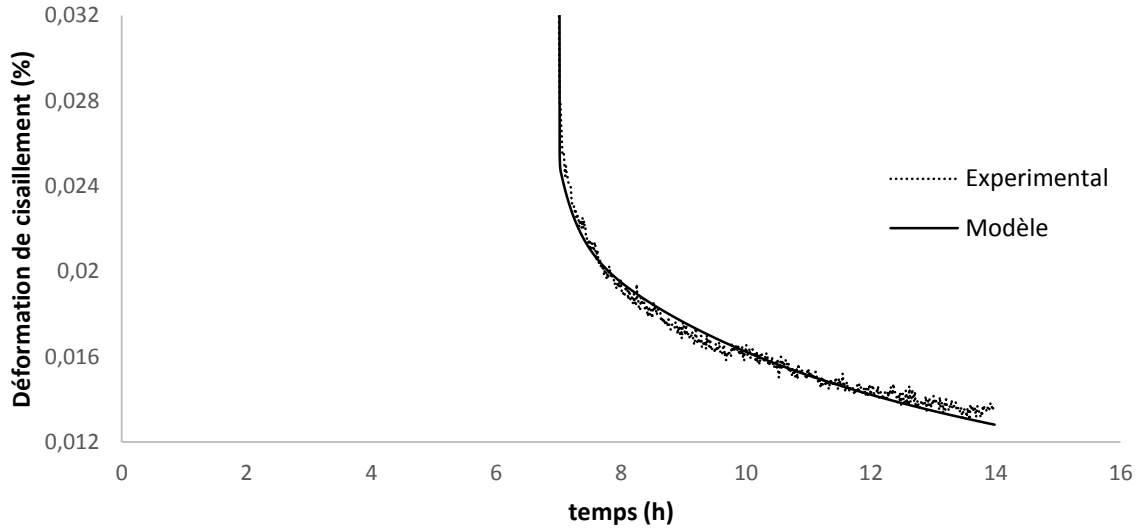


Fig. 4. Déformation de recouvrement expérimentale et prédite par le modèle de fluage considéré dans le domaine élastique

C , n et N sont alors obtenus en considérant les paliers de chargement dans le domaine plastique en calculant la déformation résiduelle en fin de recouvrement pour différents plateaux via la relation suivante :

$$\ln \varepsilon_{vp} = \ln C + N \cdot n \ln \sigma + n \ln t \quad (\text{Eq. 7})$$

Il reste à déterminer les paramètres g_1 , g_2 et a_σ .

Pour chaque essai de fluage-recouvrement, la déformation de recouvrance est donnée par

$$\varepsilon_{rec} = \sigma \sum_{i=1}^{\infty} A_i e^{-\frac{t-t_b}{\tau_i}} \quad (\text{Eq. 8})$$

Où

$$A_i = g_2 D_i \left(1 - e^{-\frac{t_b}{a_\sigma \tau_i}} \right) \quad (\text{Eq. 9})$$

Les paramètres A_i sont identifiés par la méthode des moindres carrés en comparant à tout instant du recouvrement la déformation expérimentale et celle du modèle. On montre alors que g_1 est exprimée selon l'expression suivante:

$$g_1(\sigma) = \frac{\varepsilon(t_b, \sigma) - \varepsilon_{inst}(\sigma) - C \sigma^{N \cdot n} t_b^n}{\sigma \sum_{i=1}^{\infty} A_i(\sigma)} \quad (\text{Eq. 10})$$

g_2 puis a_σ sont enfin identifiés à nouveau par la méthode des moindres carrés en comparant la déformation du modèle avec celle obtenue empiriquement.

L'ensemble des paramètres du modèle est donné table 1 pour les différents niveaux de charge considérés dans le domaine plastique :

Contrainte de cisaillement(MPa)	10	15	20	25	30
D1	$1,361 \times 10^{-2}$				
D2	$3,472 \times 10^{-6}$				
D3	$6,783 \times 10^{-4}$				
D4	$1,278 \times 10^{-3}$				
D5	$1,423 \times 10^{-2}$				
N	4,240				
n	0,671				
C	$6,034 \times 10^{-10}$				
g_1	0,352	0,375	0,363	0,404	0,443
g_2	1,501	1,241	3,157	2,347	3,012
a_σ	0.314	0.024	103.337	0.070	0.054

Tab. 1. Paramètres du modèle élasto-visco-plastique du composite $[\pm 45]_{2s}$.

Une certaine variabilité est observée au niveau des valeurs.

Figure 5 montre l'évolution de la déformation expérimentale et déterminée selon le modèle pour une contrainte de cisaillement égale à 15 et 30 MPa :

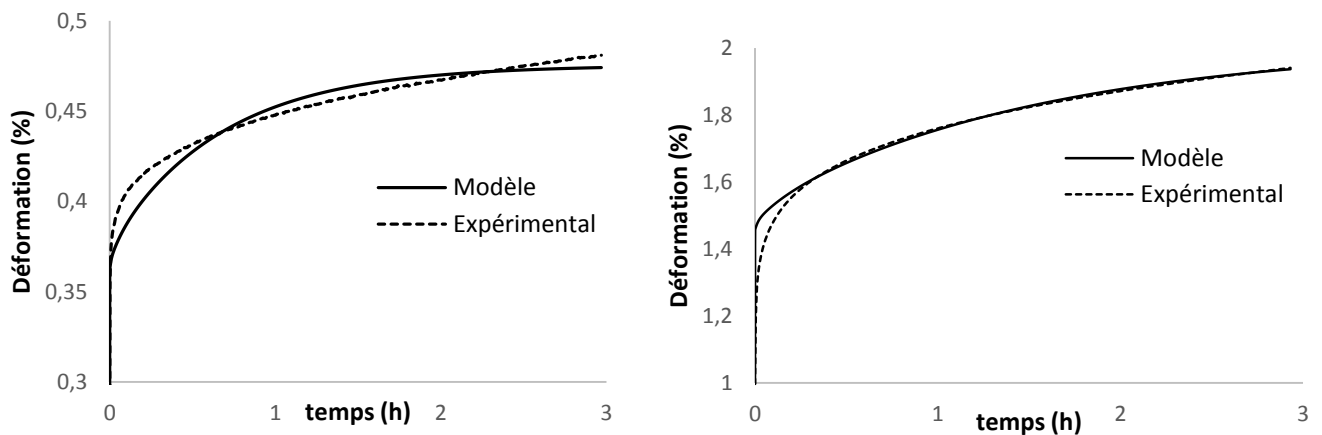


Fig. 5. Déformation expérimentale et prédite par le modèle de fluage considéré pour une contrainte de cisaillement appliquée de 15 MPa (Figure a) et 30 MPa (Figure b)

Le modèle prédit parfaitement les résultats empiriques.

Les modèles rhéologiques utilisés ici, tout comme les modèles de fatigue à l'échelle du pli développés dans la littérature, sont basés sur une approche thermodynamique [11]. Il est alors possible de développer un modèle d'endommagement à l'échelle du pli intégrant les effets visqueux du composite.

3. Conclusion

Des essais de fluage-recouvrement pour deux stratifications différentes, $[\pm 45]_{2s}$ et $[0]_3$, montrent que les fibres ne participent pas au comportement élasto-visco-plastique du composite. Les effets visqueux sont ainsi causés par la matrice époxy. Un modèle basé sur des considérations thermodynamiques est proposé et les paramètres de ce dernier ont été déterminés. Afin d'inclure l'élasto-visco-plasticité du composite dans un modèle de fatigue, des tests ont été réalisés à une contrainte donnée pour différentes fréquences et rapports de charge. Pour de faibles rapports de charge, la ruine du composite est dû aux cycles de fatigue. Pour des rapports élevés, l'endommagement est piloté par les effets visqueux à de faibles fréquences, par les effets dynamiques à de hautes fréquences. Il s'agira par la suite de prendre en compte ces couplages dans les modèles de fatigue et d'intégrer les effets du vieillissement hydrique dont les conséquences sur le comportement en fluage a déjà été observé.

Remerciements

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence ANR-10-IEED-0006-23.

Références

- [1] P. Ladevèze, E. Le Dantec, « Damage modelling of the elementary ply for laminated composites », *Compos. Sci. Technol.* Vol. 43, pp. 257-267, 1992.
- [2] J. Payan, « Etude du comportement de composites stratifiés sous chargement statique et de fatigue », Ph.D. thesis, Université Aix-Marseille II, 2004.
- [3] C. Hochard, Y. Thollon, « A generalized damage model for woven ply laminates under static and fatigue loading conditions », *Int. J. Fatigue* Vol. 32, pp. 158-165, 2010.
- [4] D. Caous, C. Bois, J.-C. Wahl, T. Palin-Luc, J. Valette, « Toward composite wind turbine blade fatigue life assessment using ply scale damage model », *Procedia engineering* Vol. 213, pp. 173-182, 2018.
- [5] D. Caous, « Rôle de l'endommagement sur la durée de vie en fatigue des matériaux composites stratifiés: application au domaine éolien », Thèse, Université Bordeaux, 2017.
- [6] D. Caous, J.-C. Wahl, C. Bois, T. Palin-Luc, J. Valette, « Apport des modèles d'endommagement à l'échelle du pli pour l'optimisation du dimensionnement des pales d'éoliennes en fatigue », Journées Nationales sur les Composites 2017, Champs sur Marne, France.
- [7] W. Albouy, B. Vieille, L. Taleb (2011). « Etude expérimentale du comportement en fluage/recouvrement de composites C/TP et évaluation du modèle de Schapery », Congrès Français de Mécanique 2011, Courbevoie, France.
- [8] Dasappa, P., Lee- Sullivan, P., Xiao, X., & Foss, P. H. (2009). « Tensile creep of a long- fiber glass mat thermoplastic composite. I. Short- term tests ». *Polymer Composites*, 30(8), 1146-1157.
- [9] M. Megnis, J. Varna, « Nonlinear viscoelastic, viscoplastic characterization of unidirectional GF/EP composite », *Mechanics of Time-Dependent Materials* Vol. 7, pp. 269-290, 2003.
- [10] E. Marklund, J. Varna, L. Wallström, « Nonlinear viscoelasticity and viscoplasticity of flax/polypropylene composites », *Journal of Engineering Materials and Technology* Vol. 128, pp. 527-536, 2006.
- [11] R.A. Schapery, « Nonlinear viscoelastic and viscoplastic constitutive equations based on thermodynamics », *Mechanics of Time-Dependent Materials*, Vol. 1, pp. 209-240, 1997.
- [12] L.J. Zapas, J.M. Crissman, « Creep and recovery behavior of ultra-high molecular weight polyethylene in the region of small uniaxial deformation », *Polymer*, Vol. 25, pp. 57-62, 1984.