



UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” din BUCUREȘTI

ȘCOALA DOCTORALĂ FIIR

Nr. Decizie 541 din 28.07.2020

TEZĂ DE DOCTORAT

-Résumé-

Contribution à l'étude du comportement visco-élastoplastique d'un composite structural lin/époxy

Doctorand: **Ing. STOCHIOIU Constantin**

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof. Dr. Ing. ZAPCIU Miron	de la	Univ. Politehnica București
Conducător de doctorat	Prof. Dr. Ing. GHEORGHIU Horia-Miron	de la	Univ. Politehnica București
Conducător de doctorat	Prof. des Univ. FONTAINE Stéphane	de la	Université de Bourgogne
Referent	Prof. des Univ. GONG Xiaojing	de la	Université Toulouse 3
Referent	Prof. Dr. Ing. MOCANU Costel Iulian	de la	Univ. „Dunărea de Jos” din Galați
Referent	Prof. Dr. Ing. HADĂR Anton	de la	Univ. Politehnica București
Referent	M. des conf. PIEZEL Benoît	de la	Université de Bourgogne

BUCUREȘTI 2020

Table de matières

Introduction générale	4
Chapitre 1 : Etat de l'art	4
1.1 Introduction	4
1.2 Les matériaux composites	4
1.3 Fibre de lin et application structurales.....	6
1.4 De la plante de lin à la fibre de lin.....	6
1.4.1 Production de la fibre	6
1.4.3 Microstructure	7
1.4.3 Propriétés mécaniques	7
1.4.4 Mécanismes liés au comportement des fibres	8
1.5 Résine époxyde.....	8
1.6 Les composites lin-époxy	9
1.7 1.7 Viscoélasticité.....	9
1.7.1 Viscoélasticité linéaire.....	10
1.7.3 Viscoélasticité non-linéaire	10
1.7.4 Viscoplasticité	11
1.8 Conclusions	11
Chapitre 2 : Fabrication et caractérisation mécanique du composite à fibre de lin	12
2.1 Introduction	12
2.2 Fabrication du matériau et des éprouvettes	12
2.3 Essais de caractérisation mécanique.....	12
2.4 Essais de type charge-décharge à vitesse de chargement variable	14
2.5 Essais de type charge-décharge à vitesse de chargement variable	16
2.6 Conclusions	17
Chapitre 3 : Essais de caractérisation visco-élastoplastique.....	18
3.1 Introduction	18
3.2 Essais préliminaires	18
3.2.1 Conception des essais préliminaires.....	18

3.2.2 Machines et appareils	18
3.3.3 Résultats des essais préliminaires	18
3.3 Essais de fluage-recouvrance à durée de fluage variable	19
3.4 Essais de fluage-recouvrance à contrainte variable	20
3.5 Conclusions	21
Chapitre 4 : Identification de la loi de comportement visco-élastoplastique	21
4.1 Introduction	21
4.2 Procédure d'identification des paramètres de la loi de comportement.....	21
4.2.1 Modélisation de la déformation viscoplastique	22
4.2.2. Modélisation de la déformation viscoélastique linéaire	22
4.2.2 Identification des paramètres de nonlinéarité	23
4.3 Résultats de l'identification des paramètres du modèle et discussion	23
4.3.1 Paramètres du modèle de viscoplasticité	23
4.3.2 Paramètres du modèle de viscoélasticité linéaire	24
4.3.3 Paramètres du modèle de viscoélasticité nonlinéaire	25
4.4 Conclusions	26
Chapitre 5 : Formulation incrémentale de la loi de comportement	26
5.1 Introduction	26
5.2 Formulation incrémentale de la loi de viscoélasticité non-linéaire	26
5.3 Formulation incrémentale de la loi de viscoplasticité	27
5.4 Validation du modèle numérique	27
5.5 Simulation d'un essai charge/décharge à vitesse variable	28
5.6 Simulation d'un essai de charge-décharge a contrainte variable.....	28
5.7 Simulation d'un essai de traction.....	29
5.8 Conclusions	30
Conclusions générales et perspectives	30
Contributions personnelles	31
Bibliographie	32

Introduction générale

La thèse vise à enrichir les connaissances sur les matériaux composites à renfort végétale. Bien que étudiés en détail ces derniers 20 années, plusieurs verrous ralentissent leur implémentation dans des applications structurales. Ils sont, en grande majorité, liés au comportement dans le temps, sous l'influence de divers facteurs : la charge appliquée, les conditions environnantes, le vieillissement, la fatigue...

Dans ce chapitre d'introduction générale, on exprime le contexte de l'étude de cette thèse, le positionnement du matériau étudié par rapport aux matériaux « classiques », tel que l'acier ou l'aluminium et par rapport aux matériaux composites d'haute performance, tel que ceux à renfort unidirectionnel de carbone ou verre dans des matrices polymériques.

En même temps, on présente une résumée des activités décrites dans chacun des cinq chapitres de la thèse. On débute avec l'étude bibliographique, dans le chapitre 1, pour continuer avec une série d'essais de caractérisation mécanique et de traction à différentes vitesses de chargement et contraintes, dans le chapitre 2. Les essais de caractérisation visqueuse sont présentés dans le chapitre 3, l'identification d'une loi de comportement et de ses paramètres, dans le chapitre 4. On achève avec des différentes modélisations numériques, dans le chapitre 5.

Mots clés : Fibre de lin, Biocomposite, Viscoélasticité, Viscoplasticité, Fluage :

Chapitre 1 : Etat de l'art

1.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à l'étude de la littérature de spécialité afin d'établir l'état actuel de la recherche dans le domaine des matériaux composites à renfort végétal et de la modélisation du comportement visqueux.

1.2 Les matériaux composites

La présentation du cadre de l'étude part d'une courte description du terme de « matériau composite », l'intérêt étant ceux à renfort végétale et du comportement visqueux.

Un matériau composite est défini comme le résultat du mélange, à l'échelle macroscopique de deux ou plusieurs matériaux, dont les propriétés sont supérieures à ses constituants [1].

Il a été remarqué, ainsi, que le principal avantage d'utiliser des matériaux composites et liées à leur masse réduite, par rapport aux matériaux métalliques, tout en gardant des excellentes propriétés mécaniques [2, 3].

Malgré ces aspects, on constate un problème important de leur utilisation en masse : ils ont une empreinte écologique élevée. Elle se fait remarquée par le cout énergétique élevé

[4] et, plus important, la manque d'une réponse qui concerne la fin de vie [5] ; une méthode efficace d'élimination des pièces en composite n'existe pas et, souvent, elles sont incinérées.

Par conséquent, l'utilisation des matériaux d'origine végétale est proposée comme alternative. En dehors le coût énergétique très réduit pour la fabrication, par voie de leur nature, ils sont écologiques. On vise ces matériaux qui puissent rivaliser ceux synthétiques, comme on exemplifie dans le Tableau 1.

Tableau 1: Propriétés mécaniques des fibres de renfort

Fibre	Contrainte à rupture	Module d'Young	Déformation à rupture	Densité	Résistance spécifique	Source
	[MPa]	[GPa]	[%]	[g/cm ³]	[kNm/kg]	
Lin	345-2000	27,5 - 85	1 - 4	1,54	224-1300	[6]
Jute	393 - 773	10 – 30	1,5 – 1,8	1,44	273-536	[6]
Chanvre	368 – 800	17 – 70	1,6	1,47	250-540	[6]
Kénaf	930	53	1.6	1.45	640	[7]
Cotton	287 - 597	5,5 – 12,6	7-8	1,5	191 - 398	[8]
Verre	2000 – 3500	70	2,5	2,5	800 - 1400	[6]
Carbone	4000	230 – 400	1,4 – 1,8	1,4	2860	[6]

Leur introduction dans des matériaux composites représente une grande avancée vers des matériaux à empreinte écologique réduite ou même nulle.

L'idée de les utiliser dans des applications techniques date depuis plus de 70 ans, dans le désir de réduire la dépendance de l'acier mais, seulement dans les dernières années, l'intérêt est significativement augmenté. L'explication vient des différentes lois européennes (et pas seulement), tel que « L'accord de Paris » [9], qui concernent la réduction de la pollution, spécialement dans le domaine des transports.

Pour l'étude de cette thèse, on a choisi un matériau à renfort végétale, la fibre de lin, unidirectionnelle, dans une matrice époxy. La motivation pour ce choix est liée aux propriétés mécaniques élevées de ce matériau, tel qu'il a été conclu par plusieurs études de la littérature [10]. Le matériau, bien qu'il contienne une fibre végétale, est partialement écologique, à cause de la résine époxy, une résine synthétique.

De la littérature, on a constaté que les résines « vertes » sont encore en développement, leurs propriétés mécaniques étant significativement inférieurs à ceux matériaux classiques, dans ce stade de leur recherche. Cela produirait un composite à propriétés mécaniques réduites [11].

L'analyse de la fibre de lin a révélé les prochaines avantages [12–14] :

- La faible densité, qui mène à des propriétés spécifiques élevés ;

- La fibre de lin n'est pas abrasive, ce qui réduit les effets sur les outils ;
- La procédure de fabrication est non-toxique ;
- Le cout réduit de la matière première.

En même temps, une série de désavantages a été trouvée [6, 15, 16]:

- La température d'exploitation est inférieure à 200°C ;
- La fibre est hydrophile ;
- Variation importante des propriétés mécaniques.

Bien que le premier désavantage ne peut pas être dépassé, il réduit seulement les domaines d'utilisation des matériaux à de tels renforts. Les deux autres ont été abordés pour recherche et des solutions ont été proposés : des traitements chimiques [17] et mélanges des fibres de plusieurs récoltes.

La recherche, actuellement, est concentrée sur l'identification d'applications pour lesquelles les matériaux à renfort végétale sont optimales et sur la compréhension de leurs propriétés, spécialement dans le temps, sous l'influence de différents facteurs d'exploitation, où les données sont très rares.

1.3 Fibre de lin et application structurales

La fibre de lin est un matériau connu depuis des temps immémorables, avec les plus anciennes preuves de son usage par datant depuis 30.000 ans [18]. Les applications étaient, dans la plupart, dans le domaine des textiles, jusqu'au 20^{ème} siècle, quand d'autres utilisations ont été développées, parmi lesquelles, on cite celle de renfort des composites.

Bien que rare, cette application est de notoriété. Parmi les exemples, on peut citer des cadres de vélo d'haute performance, équipements sportifs et même éléments de carrosserie d'automobile [19–21]. Les études montrent que le remplacement des matériaux « traditionnelles » avec ceux composites à renfort de lin, mènent à des réductions du besoin énergétique jusqu'à 50%, des réductions de couts et de masse [22].

1.4 De la plante de lin à la fibre de lin

1.4.1 Production de la fibre

La fibre de lin, sous ses formes commerciales, est extraite de la tige de la plante de lin, *Linum usitatissimum* (Figure 1). C'est une plante annuelle, cultivé dans des zones à climat tempérât, qui atteint des hauteurs d'un mètre et ne nécessite pas d'engrais. Apart l'utilisation comme textile et celle de renfort, elle est valorisée pour ses semences, comme éléments nutritifs ou pour l'extraction des huiles siccatives.

Le climat tempérât fait que la plante de lin soit extensivement cultivée dans l'Union Européenne et, actuellement, la France est le plus grand cultivateur, spécialement grâce à sa région de nord, qui a des vieilles traditions dans les cultures de lin [23].

La fibre technique, celle qui est exploitée, est obtenue par la séparation partielle des fibres situées à la périphérie de la tige (Figure 1) [24]. Elle est composée de plusieurs fibres élémentaires, collées par une couche de pectine. Les fibres élémentaires ont une structure complexe, similaire à un matériau composite (Figure 1) [25].

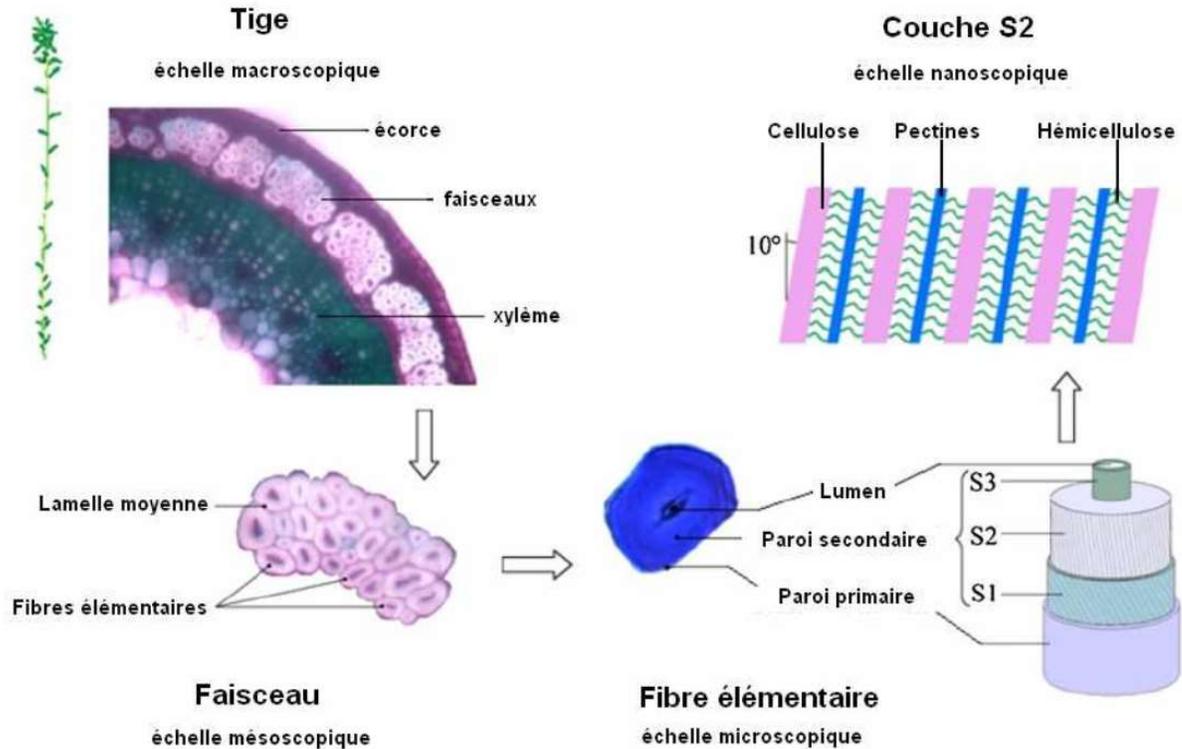


Figure 1 : Fibre de lin de l'échelle macroscopique à l'échelle nanoscopique [26]

1.4.3 Microstructure

La fibre élémentaire a une longueur entre 2 et 5 cm et sa section est approximée à une forme circulaire, de diamètre entre 10 et 20 μm . Sa structure est hiérarchisée, dans deux parois : celle primaire, à rôle de protection et celle secondaire, à rôle structurale. Cette dernière contient un mélange de cellulose cristalline, organisée en microfibrilles hélicoïdales, qui renforce une matrice d'hémicellulose. Au centre, on trouve le lumen, un vide, vestige du développement de la fibre durant sa maturation (Figure 1).

De point de vue biochimique, la fibre de lin contient approximatif 68% cellulose cristalline, 15% hémicellulose, 2% pectines, 3% lignine, 1,5 cires, 9% eau, 1,5% autres composants [27–30]. Ce contenu varie significativement, en fonction de plusieurs facteurs, tels que l'année de récolte, la quantité d'humidité durant la maturation, la procédure d'extraction des fibres [27, 31, 32]...

1.4.3 Propriétés mécaniques

Le comportement des fibres s'est prouvé d'être complexe. Il est influencé par une série de facteurs, tels que la composition biochimique, l'âge de la fibre, les conditions environnementales de l'essai ... Les courbes caractéristiques de ces fibres sont, généralement, tri-

linéaires (Figure 2); la littérature révèle aussi l'existence des courbes linéaires et bi-linéaires [33–35].

Le consensus est que la première portion est linéaire élastique, la deuxième présente un comportement visqueux, élastique et plastique, et la troisième est à nouveau linéaire [33]. Les essais à longue durée ont montré l'existence de ce comportement visqueux des fibres (Figure 3) [36].

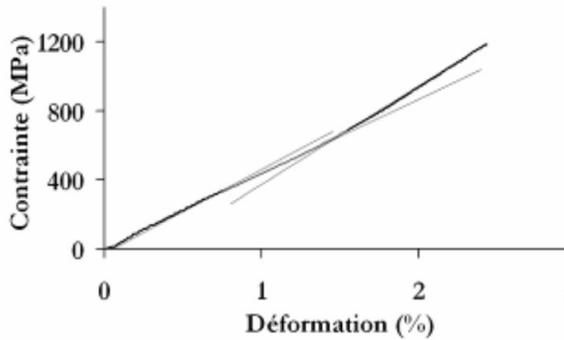


Figure 2 : Courbe caractéristique tri-linéaire

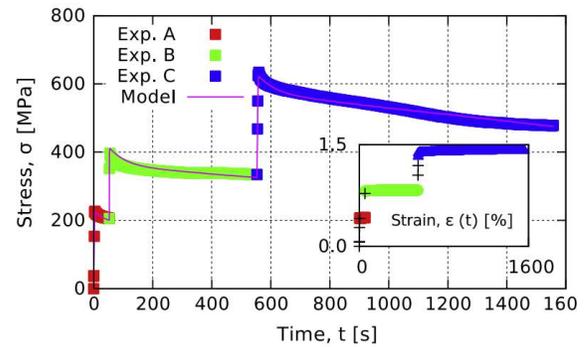


Figure 3 : Test de relaxation d'une fibre de lin [36]

1.4.4 Mécanismes liés au comportement des fibres

L'explication complète de cette réponse est encore au niveau d'étude. Les mécanismes principaux ont été identifiés comme un résultat de l'orientation hélicoïdale de la cellulose [37]. Durant le chargement, les microfibrilles se réorientent, suivant la force. Les conséquences sont, d'une part, la zone de transition, où la rigidité de la fibre augmente et, aussi, une réorganisation de la matrice de hémicellulose, causée par le mouvement des fibrilles [38].

1.5 Résine époxyde

La résine époxy joue le rôle de matrice dans le composite.

La matrice, généralement, assure la cohésion du matériau, transmet les efforts dans le matériau et protège la fibre.

La résine époxyde est parmi les plus utilisées matrices pour les matériaux à renfort fibreux. C'est une matrice thermodure, consacrée dans l'industrie des matériaux composites, avec une haute capacité d'imprégnation, haute stabilité mécanique et thermique [39].

Elle est une matrice bi-composante, avec le temps de réticulation variable et température de polymérisation réduite, selon la recette. La déformation à la rupture est de 3-6% et l'humidité de saturation, de 4-5% [40].

Ces qualités font de la résine époxyde idéale pour la renforcer avec des fibres végétales.

Des tentatives de résines époxy 100% naturelles existent aussi mais, en ce moment, leurs propriétés mécaniques sont trop faibles pour les faire viables.

1.6 Les composites lin-époxy

Les propriétés mécaniques des composites sont dictées par les matériaux constituants, leur organisation et leur taux dans le composite. Parmi les matériaux à renfort végétal, les composites à fibre de lin ont fait preuve des propriétés mécaniques les plus élevées, sur une large plage de taux de fibre/matrice.

La courbe caractéristique est, généralement, bilinéaire, avec la portion de transition du module d'élasticité appelée, conventionnellement, « coude » (Figure 4). Certains études ont montré aussi une évolution trilineaire, similaire à la fibre, pour des vitesses de chargement très réduites ou des températures élevées [41, 42].

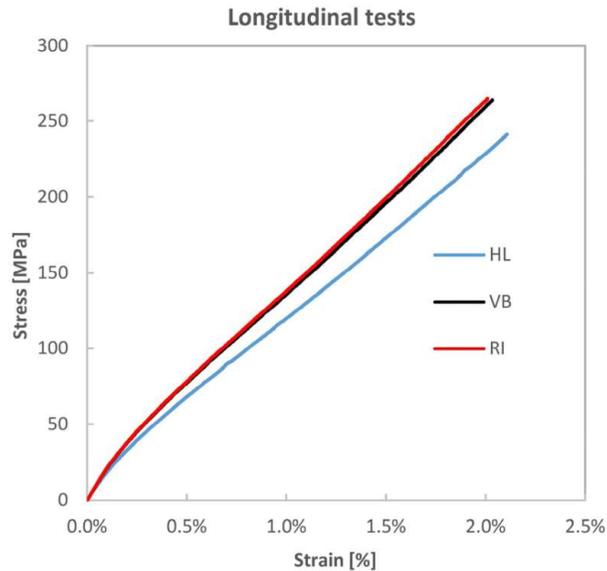


Figure 4 : Courbe caractéristique pour des composites à renfort de lin [42]

Similairement à la fibre, il a été théorisé que cette évolution est causée par un comportement visqueux. Les rares travaux identifiés dans la littérature avec le temps comme paramètre d'étude ont renforcé cette théorie tel que des essais de rupture ou cycliques à différentes vitesses de chargement [42, 43]. Sur ce sujet, l'auteur de cette thèse a fait, avant cette étude, une série d'essais de fluage qui ont mis en évidence le comportement viscoélastique et viscoplastique [44].

La réponse visqueuse élevée des matériaux à fibre de lin produit des propriétés importantes d'absorption des vibrations et du son, supérieures aux composites à renfort synthétique [45, 46].

1.7 1.7 Viscoélasticité

D'une manière générale, le terme de viscoélasticité représente une déformation variable en temps. Par exemple, dans un essai de fluage, Figure 5, durant le chargement et le déchargement, considérés brusques, on a une réponse instantanée (déformation élastique) mais, durant la période de maintien de la charge et après son élimination, une déformation

variable en temps apparait. Après une durée suffisamment longue, le matériau revient à sa forme initiale [47], c'est-à-dire qu'il a une réponse viscoélastique.

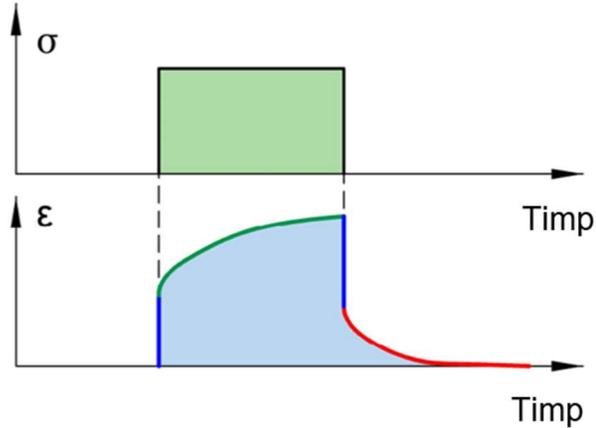


Figure 5 : Schéma d'un essai de fluage-recouvrance

1.7.1 Viscoélasticité linéaire

Si la déformation viscoélastique est proportionnelle à la contrainte appliquée, (1), le domaine est linéaire, avec le facteur de proportionnalité, $D_{(t)}$, appelé compliance transitoire. La modélisation est faite par voie des modèles rhéologiques, assemblages équivalents de ressorts et d'amortisseurs. Ainsi, on peut parler de modèles de base, de Maxwell et de Kelvin-Voigt, modèles plus développés, ceux de Zener et de Burger et le modèle le plus général, le développement en série de Prony (2). Leurs formes sont, habituellement, adaptées à modéliser des essais de fluage et de relaxation où, soit la contrainte, soit la déformation, sont constantes.

$$\Delta \varepsilon_{(t)} = D_{(t)} \cdot \sigma \quad (1)$$

$$D_{(t)} = \sum_{i=1}^n D_i (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (2)$$

où λ_i est l'invers du temps de relaxation « i » et D_i , la compliance correspondante à ce temps.

Ces modèles peuvent être implémentés dans l'intégrale de Boltzman, (3), la forme pour la modélisation linéaire des cycles de chargement quelconques.

$$\varepsilon_{(t)} = D_0 \sigma + \int_0^t \Delta D_{(t-t_i)} \frac{\Delta \sigma_{i(t)}}{dt} dt \quad (3)$$

1.7.3 Viscoélasticité non-linéaire

Si la proportionnalité entre la déformation et la contrainte n'est pas respectée, on est dans le domaine non-linéaire. Les modèles sont, généralement, sous forme intégrale. Parmi ceux-ci, le plus pratique s'est prouvé d'être celui proposé par Schapery, (4) qui, pour passer du domaine linéaire à celui non-linéaire, introduit quatre paramètres de non-linéarité, ici g_0 ,

g_1, g_2 si a_σ [48]. Ils sont dépendants de la contrainte, mais peuvent avoir d'autres facteurs d'influence aussi (humidité, température, âge du matériau...).

$$\varepsilon_{(t)} = g_0 D_0 \sigma + g_1 \int_0^t \Delta D_{(\psi-\psi')} \frac{dg_2 \sigma}{d\tau} d\tau \quad (4)$$

avec $\psi = \int_0^t \frac{dt}{a_\sigma} d\tau$ représentant le temps réduit

1.7.4 Viscoplasticité

La pratique a montré que, pour certains matériaux, les déformations transitoires ne sont pas éliminées après l'élimination de la charge. On a, alors, des déformations plastiques. Les études expérimentales ont montré qu'elles dépendent du temps d'application de la charge, ce qui leur rend une nature viscoplastique [49, 50].

Les fonctions capables de les modéliser ne sont pas nombreuses. On se résume ici de citer deux : une particularisation du modèle de Schapery [51], où on considère que le temps de recouvrance est infini et le modèle de Zapas Crissman (5) [52, 53].

$$\varepsilon_{pl(\sigma,t)} = C_{pl} \cdot \left(\int_0^t \sigma_{(\tau)}^M d\tau \right)^m \quad (5)$$

Il vaut noter que la majorité des matériaux viscoplastiques, ont aussi une réponse viscoélastique et la modélisation des deux et analysée en parallèle, approche qu'on va prendre dans cette thèse aussi.

1.8 Conclusions

Par voie de ce chapitre d'étude bibliographique, on a analysé le potentiel des matériaux composites à renfort végétales d'être utilisés dans des applications structurales, l'appui étant sur le matériau choisi, un composite fibre de lin – résine époxy. On a présenté l'utilisation de ce matériau, ainsi que les défis à dépasser pour l'implémentation dans des application structurales.

Parmi les éléments à des lacunes, on compte le comportement en temps, sous l'action d'une charge, comportement qui a été choisi pour analyse et modélisation.

Malgré l'inexistence des travaux de modélisation sur ce matériau, cette étude bibliographique a révélé des travaux similaires sur d'autres matériaux à renfort fibreux, ce qui représente un point de départ de l'étude de ce matériau à renfort de lin.

Chapitre 2 : Fabrication et caractérisation mécanique du composite à fibre de lin

2.1 Introduction

On présente dans ce chapitre la procédure de fabrication du composite et des échantillons, la caractérisation mécanique du matériau sur la direction de la fibre et une série de tests de charge/décharge à différentes vitesses de chargement et contraintes maximales.

2.2 Fabrication du matériau et des éprouvettes

La matière première est fournie sous forme de rouleaux de fibre de lin unidirectionnelle, pré-imprégnée avec la résine [54].

La procédure de fabrication implique la découpe de lamines selon les spécification, leur arrangement dans une moule est la soumission à un cycle de thermocompression à 130°C et 3 bars pour 60 minutes. Après ce cycle, dans le but d'assurer la réticulation complète et l'élimination des possibles contraintes internes dues à la cuisson, le composite est soumis à un cycle de post cuisson à 130°C pour une heure.

On a obtenu, ainsi, des plaques rectangulaires de 280x280 mm, à 15 plis, ce qui assure une épaisseur d'approximatif 2 mm. De des plaques, on a découpé les éprouvettes à laser, de 250x25x2 mm.

Les dimensions des éprouvettes ont été mesurées et un contrôle de leur composition a été fait. On a calculé, ainsi, que le matériau a $46,6 \pm 0,8$ % fibre, $42,53 \pm 1,8$ % résine și $10,81 \pm 1,3$ % vides.

Les échantillons ont été équipées avec des talons aux extrémités (Figure 6) et ont été soumises, pour 7 jours, à un cycle de conditionnement à 23°C et 50% d'humidité.



Figure 6 : Eprouvette équipée avec des talons en aluminium

2.3 Essais de caractérisation mécanique

Un lot de 5 éprouvettes issues de la même plaque ont été soumises à des essais de traction jusqu'à la rupture.

Pour ce faire, on a utilisé une machine d'essai universale, Instron 8872, pour l'application de la charge et des jauges de déformation HBM LY18-6/120 pour la lecture de la déformation. Les jauges ont été connectées en pont complet Wheatstone et leur signal a été enregistré par un système d'acquisition de données, HBM MX840B. Une des éprouvettes a été équipée avec un set de jauges transversale, afin de calculer le coefficient du Poisson.

La vitesse de chargement a été choisie de 10 kN/min, afin de réduire les effets de glissement dans le mors et la fréquence d'échantillonnage de 10 Hz.

Bien qu'elles aient été équipées avec des talons, la majorité des éprouvettes ont cédé autour des mors, avec les ruptures se propageant le long de l'échantillon (Figure 7). La conséquence est qu'on sous-évalue la contrainte à rupture, propriété qui est insignifiante dans les études à suivre dans cette thèse.

On remarque une courbe caractéristique non-linéaire, Figure 8, souvent notée dans la littérature de spécialité pour les composites à renfort de lin. Elle est associée à une évolution bi-linéaire, avec deux modules d'élasticité, E_1 et E_2 et un point de transition, le coude.



Figure 7 : Défaillance d'une éprouvette

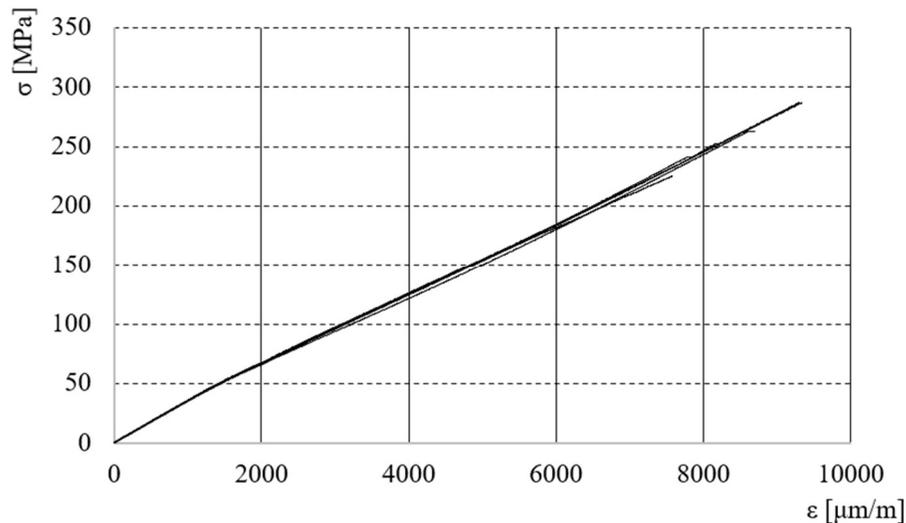


Figure 8 : Courbes caractéristiques obtenues pour les cinq éprouvettes

Pour le calcul de ces informations, une méthode de régression linéaire a été appliquée sur chacune des deux portions, ce qui a produit deux droites. Leurs pentes représentent les deux modules et leur intersection, les coordonnées du coude, Figure 9.

Les propriétés résultantes sont présentées dans le Tableau 2.

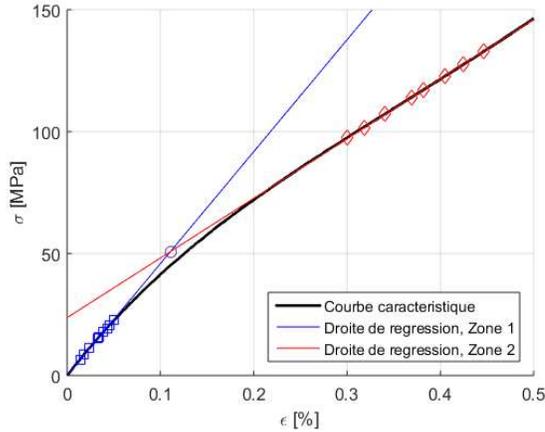


Figure 9 : Schéma de la régression linéaire

Tableau 2 : Propriétés mécaniques du composite testé

Propriété	Moyenne	Ecart type
$E1$ [GPa]	35.00	0.594
$E2$ [GPa]	28.72	0.322
ν [-]	0,371	-
E_{coude} [%]	0.133	0.032
σ_{coude} [MPa]	47.69	10.85
ϵ_{max} [%]	0.852	0.082
σ_{max} [MPa]	260.44	27.65

2.4 Essais de type charge-décharge à vitesse de chargement variable

Un matériau avec un comportement visqueux présente des déformations en temps dès qu'il est chargé. Ainsi, dans ce sous-chapitre, on souhaite évaluer ce comportement durant le chargement, par la variation de la vitesse d'application de la charge.

Ainsi, une série d'essais de chargement à différentes vitesses, suivies par recouvrance, ont été effectuées sur trois éprouvettes issues de la même plaque. La contrainte maximale a été choisie de 80 MPa, au-dessus du coude. Entre deux essais consécutifs, on a fait aussi des essais à une contrainte en dessous du coude, Figure 10, de 30 MPa, afin d'évaluer l'intégrité de l'éprouvette [55].

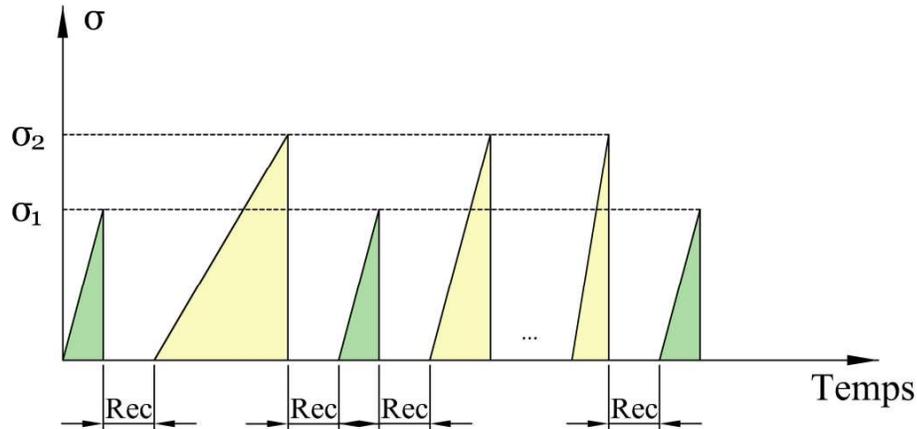


Figure 10 : Schéma de la procédure

Les résultats obtenus pour l'une des éprouvettes, présentés dans la Figure 11, montre l'existence du comportement viscoélastique, par la variation des déformations durant la recouvrance, mais aussi d'une réponse plastique lors du premier cycle.

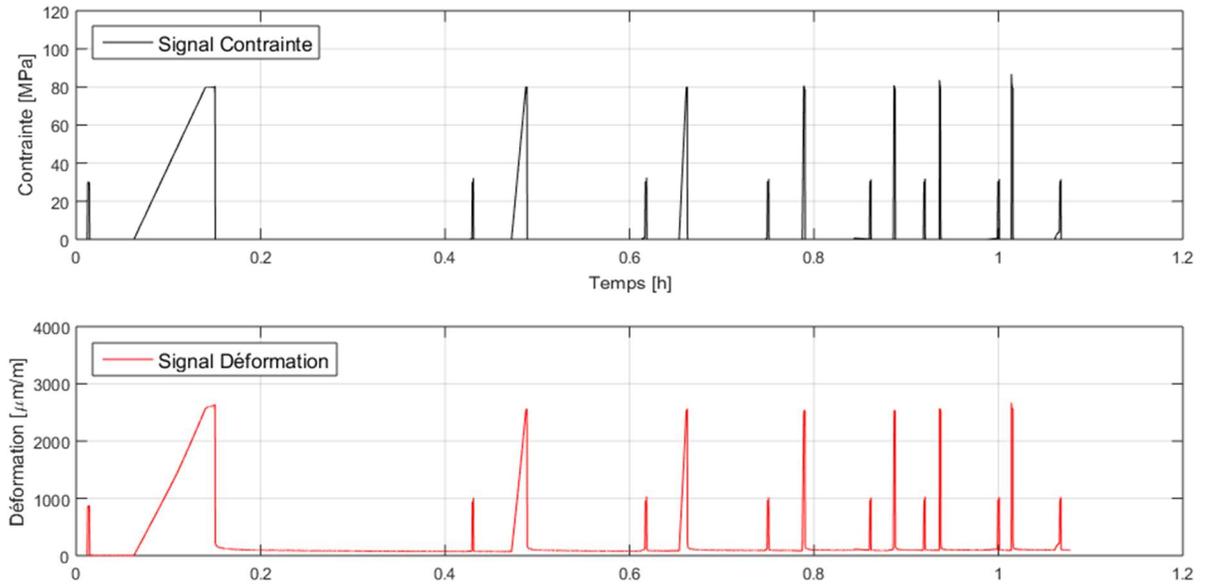


Figure 11 : Résultats obtenus pour l'une des éprouvettes

La superposition des phases de chargement montre la tendance de rigidification de l'éprouvette, avec l'augmentation de la vitesse, mais aussi, le dépassement du consigne, à partir de 100 kN/min, Figure 12.

Le calcul des modules sécants à 30 MPa et à 80 MPa, Figures 13 et 14, montrent une influence réduite de la vitesse avant le coude, mais importante après.

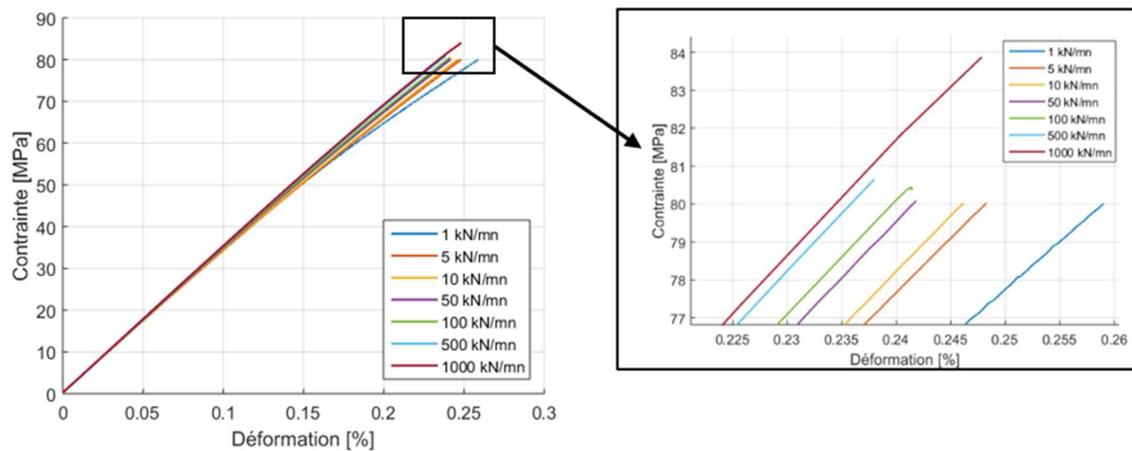


Figure 12 : Superposition des phases de chargement

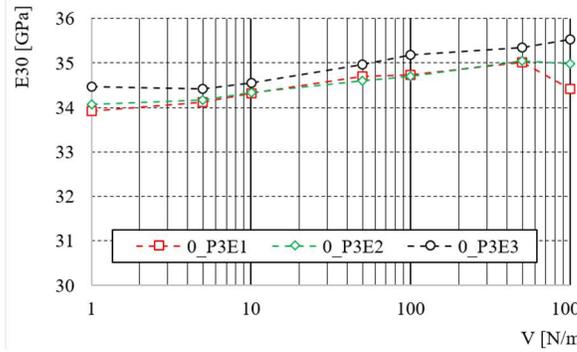


Figure 13 : Module sécant à 30 MPa

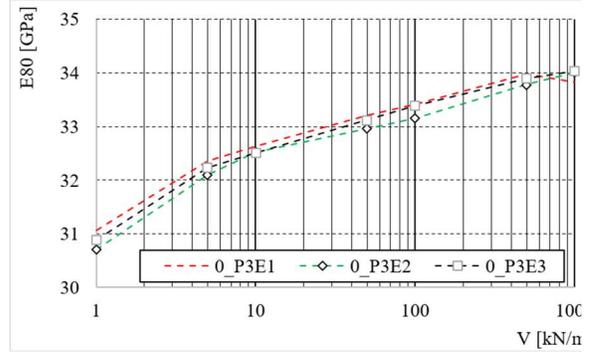


Figure 14 : Module sécant à 80 MPa

2.5 Essais de type charge-décharge à vitesse de chargement variable

La dernière série d'essais de ce chapitre vise l'analyse de l'influence de la contrainte appliquée sur la dégradation du matériau à différents niveaux de contrainte. Les essais ont été de chargement à contrainte variable, suivi par une période de recouvrance. Après chaque cycle, on a introduit un essai d'évaluation, pour le calcul du module d'élasticité.

L'essai a été fait sur cinq éprouvettes issues d'une même plaque.

Les résultats montrent qu'une dégradation du matériau existe, à partir de 150 MPa, audible durant le chargement, mais elle affecte les déformations plastiques et non le module d'élasticité.

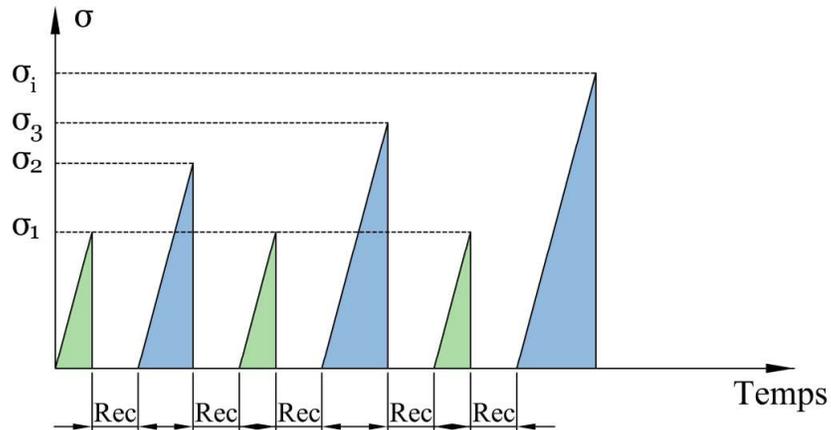


Figure 15 : Schéma des essais charge-décharge à contrainte variable

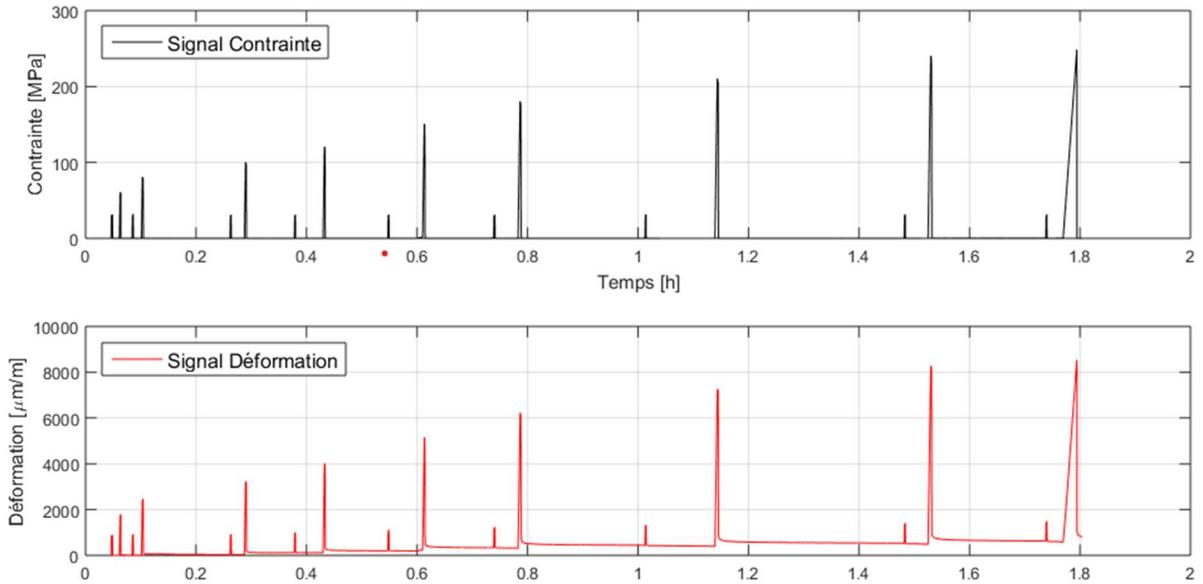


Figure 16 : Résultats obtenus pour l'une des éprouvettes

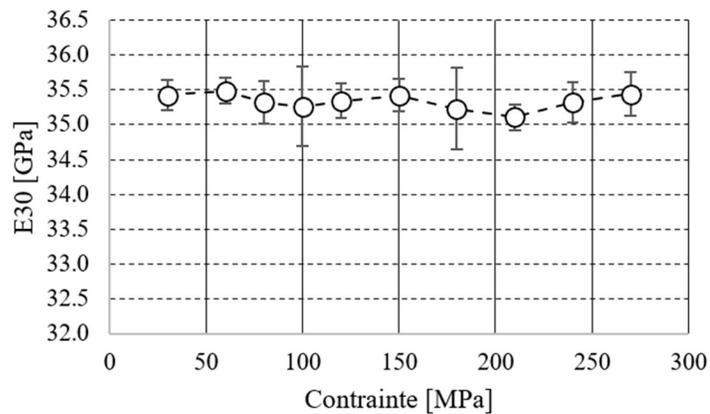


Figure 17 : Module sécant à 30 MPa par rapport à la contrainte maximale du cycle

2.6 Conclusions

Les résultats présentés dans ce chapitre ont permis d'identifier les propriétés mécaniques du matériau, suivant la direction du renfort et des informations sur les contraintes et les vitesses qui peuvent être appliquées lors des essais de fluage, qui permettront de quantifier les déformations visqueuses. Ainsi, on a constaté qu'une vitesse de 50 kN/min représente un compromis pour la période de chargement en fluage et que, afin d'éviter l'endommagement, on devrait se limiter en dessous de 150 MPa.

Chapitre 3 : Essais de caractérisation visco-élastoplastique

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente les essais de fluage-recouvrance avec lesquels on évalue les caractéristiques visqueuses du matériau.

3.2 Essais préliminaires

3.2.1 Conception des essais préliminaires

On a effectué, pour début, trois testes de fluage-recouvrance qui permettent d'établir les paramètres nécessaires pour les essais de caractérisation. Ainsi, on a choisi deux niveaux de contrainte, un avant le coude, à 30 MPa et l'autre après, à 100 MPa et des durées de fluage du niveau des heures.

On a souhaité une durée raisonnable pour les essais, spécialement due à la durée de la recouvrance, qu'on a souhaité d'être inférieure à 48 heures.

3.2.2 Machines et appareils

Les essais ont été faits sur un dispositif à leviers (Figure 18) et la lecture des déformations avec des jauges de déformation en pont complet Wheatstone, présentées dans le chapitre antérieur.

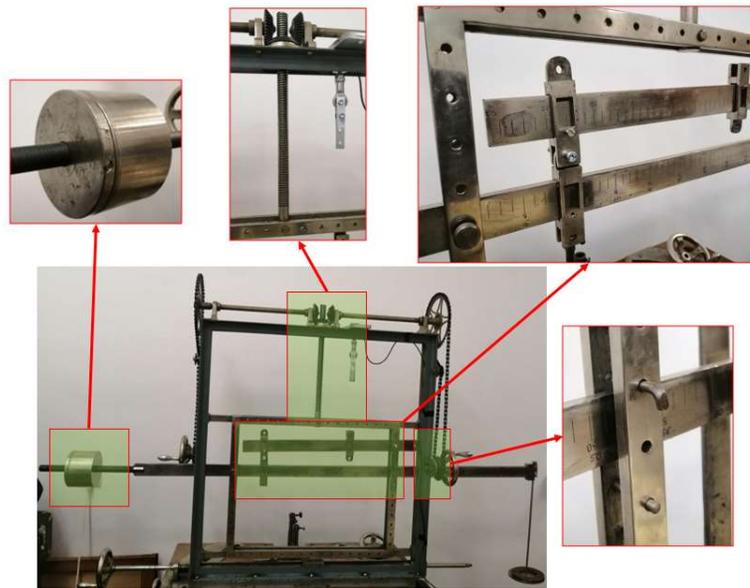


Figure 18 : Description du dispositif utilisé pour les essais de fluage

La charge appliquée a été lue par voie d'un traducteur de force, monté en série avec l'éprouvette, dans le mors supérieur du dispositif.

3.3.3 Résultats des essais préliminaires

On note que, pour la contrainte de 30 MPa, on a enregistré une réponse purement viscoélastique et pour celle de 100 MPa, une réponse viscoélastique et viscoplastique. Pour

les essais qui dépassent 3 h, la recouvrance dure plus de 48 heures. On a décidé, alors, que les essais de caractérisation contiennent des niveaux avant et après le coude et la durée de fluage soit d'une heure, pour obtenir les temps de recouvrance souhaités.

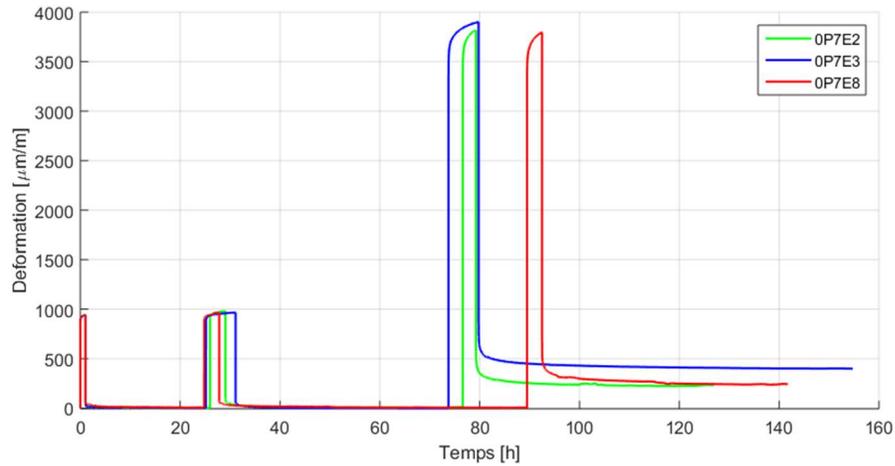


Figure 19 : Réponse en déformation des éprouvettes testées en fluage/recouvrance

3.3 Essais de fluage-recouvrance à durée de fluage variable

L'objectif de ces essais a été d'évaluer l'influence du temps sur le comportement viscoélastique et, spécialement sur celui viscoplastique. Par la variation du temps de fluage, on obtient une variation des déformations plastiques, mesurées au final de la recouvrance.

Cinq éprouvettes ont été soumises à une procédure de fluage-recouvrance multi-cyclée, où la durée de fluage augmente à chaque cycle avec une heure. Quatre cycles ont été appliquées, à durées de 1, 2, 3 et 4 heures et une contrainte de 80 MPa, Figure 20.

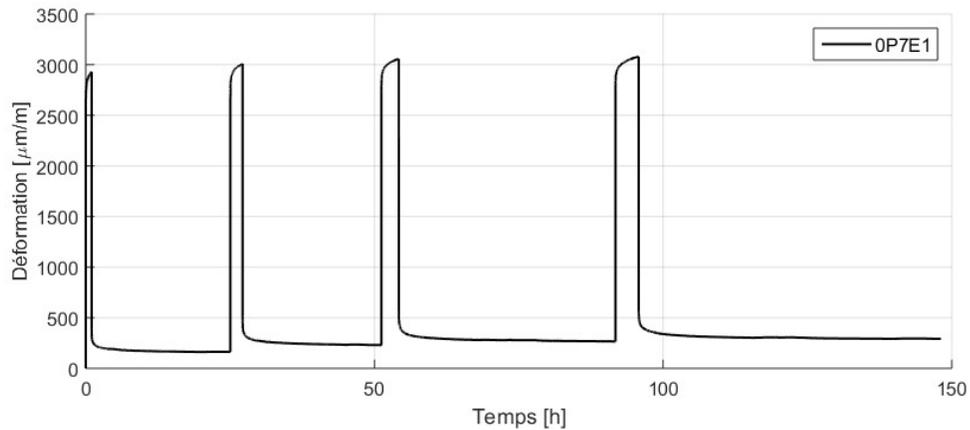


Figure 20 : Résultat d'un essai de fluage-recouvrance à durée de fluage variable

On a remarqué, pour les quatre des cinq éprouvettes, une évolution de ces déformations viscoplastiques. De plus, cette évolution, en échelle logarithmique par rapport au temps total de fluage (temps cumulé) est linéaire, ce qui montre une forme exponentielle, à exposant sous-unitaire, Figure 21.

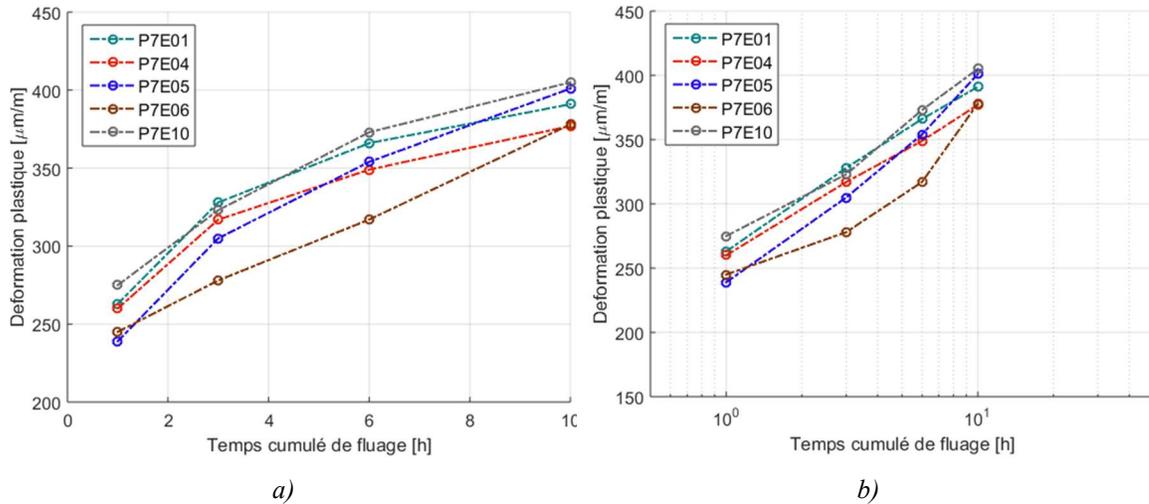


Figure 21 : Evolution de la déformation permanente en fonction de la durée de la phase de fluage a) en échelle linéaire ; b) en échelle logarithmique

3.4 Essais de fluage-recouvrance à contrainte variable

Le deuxième set d'essais de caractérisation visqueuse a eu la contrainte en fluage variable. On a, ainsi, identifié l'influence de la charge.

Cinq éprouvettes venues d'une même plaque ont été soumises à une procédure multi-cyclée, à quatre cycles, dont les niveaux ont été de 30 MPa, 60 MPa, 80 MPa et 100 MPa. La durée de phases de fluage a été d'une heure, à l'exception de la première, qui a été de trois heures.

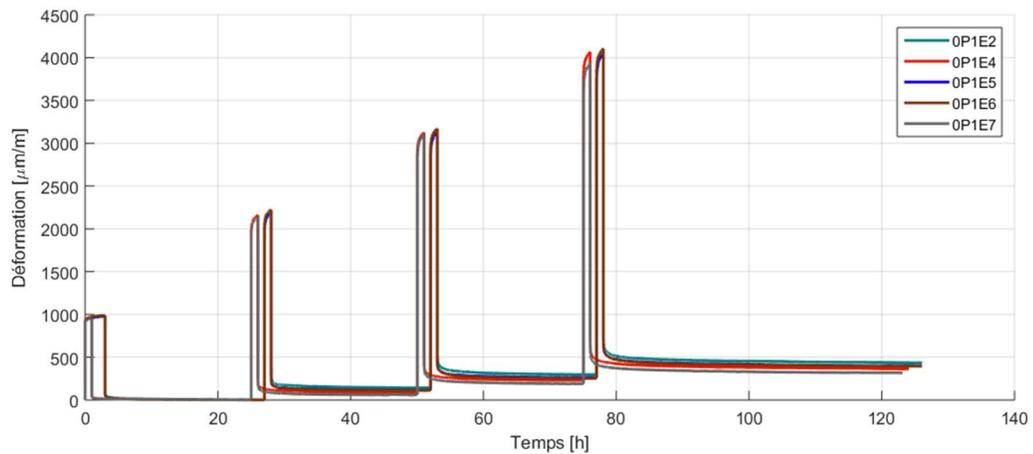


Figure 22 : Résultats des essais à contrainte de fluage variable

Pour les déformations viscoplastiques, à l'exception du premier cycle, on a enregistré une évolution linéaire par rapport à la contrainte, Figure 23.

Pour les déformations viscoélastiques, les courbes isochrones en recouvrance ont montré la variation nonlinéaire par rapport à la contrainte, Figure 24.

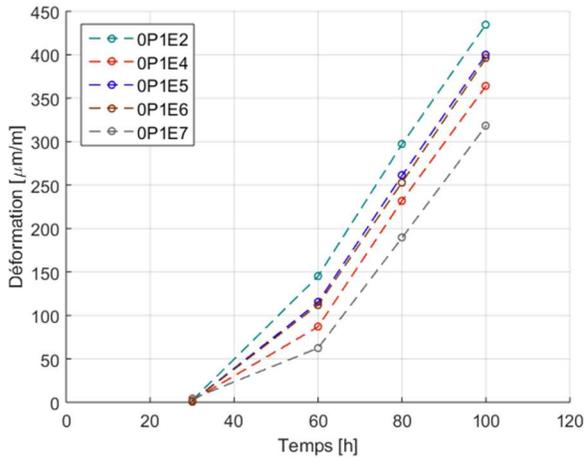


Figure 23 : Déformations viscoplastiques par rapport à la contrainte de fluage

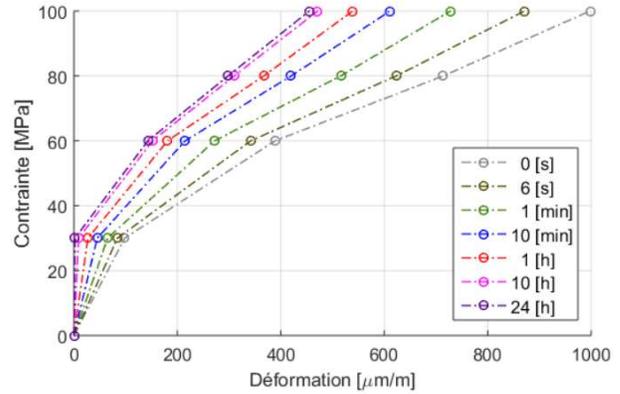


Figure 24 : Courbes isochrones en recouvrance

3.5 Conclusions

Les essais présentés dans ce chapitre ont mis en évidence et permis de quantifier le comportement visco-élastoplastique du composite à renfort de fibre de lin. Dans la suite, elle servent comme base de données pour l'identification de la loi de comportement.

Chapitre 4 : Identification de la loi de comportement visco-élastoplastique

4.1 Introduction

Dans ce quatrième chapitre, on présente les démarches prises pour l'identification de la loi de comportement et de ses paramètres, à partir des données expérimentales discutées dans le troisième chapitre. Vu que le comportement exhibé par le matériau est visco-élastoplastique, la loi de comportement doit être capable de tenir compte des deux composantes de la réponse. Ainsi, on a choisi une combinaison entre le modèle de Schapery pour la viscoélasticité nonlinéaire et de Zapas-Crissman pour la viscoplasticité.

4.2 Procédure d'identification des paramètres de la loi de comportement

Les deux modèles dont, dans leur forme générale, sous forme d'intégrales, ce qui montre la dépendance de la déformation de l'historique de chargement. Pour l'identification des paramètres, ces formes doivent être intégrées. Par conséquent, il est nécessaire de faire appel à des cycles de chargement particuliers.

Les essais de fluage-recouvrance représentent un tel cycle, où la charge est constante et, alors, les paramètres de nonlinéarité sont constants, ce qui simplifie la procédure d'intégration.

4.2.1 Modélisation de la déformation viscoplastique

On a déjà noté que la déformation viscoplastique dépend du temps et de la charge en fluage. Par la variation du premier facteur et maintien du deuxième, l'intégration mène à :

$$\varepsilon_{pl}^n = C_{pl} \cdot \sigma^{M \cdot m} \cdot \left(\sum_{i=1}^n t_f^i \right)^m \quad (6)$$

avec C_{pl} , M et m les paramètres de modèle ; t_f^i la durée de fluage du cycle „i” ; σ - la contrainte en fluage.

Dans le cas de différentes contraintes de fluage à même durée, l'intégration mène à :

$$\varepsilon_{pl}^n = C_{pl} \cdot t_f^m (\sigma_1^M + \dots + \sigma_n^M)^m = C_{pl} \cdot t_f^m \cdot \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i^M \right)^m \quad (7)$$

où t_f la durée de la phase de fluage ; σ_i la contrainte en fluage du cycle „i”.

La superposition des équations (6) et (7) avec les données des essais à durée et contraintes variables en fluage produit le set de paramètres nécessaires pour la modélisation de la viscoplasticité. Une procédure d'optimisation a été implémentée dans cette étude.

De plus, le composite à fibre de lin a fait preuve d'une dépendance linéaire avec la contrainte, ce qui a conduit à implémenter une contrainte seuil d'apparition des déformations plastiques, σ_{seuil} , extrapolée des courbes expérimentales. Ainsi, on introduit la notion de contrainte équivalente, σ_{eq} :

$$\sigma_{eq} = \sigma - \sigma_{seuil} \quad (8)$$

4.2.2. Modélisation de la déformation viscoélastique linéaire

On a discuté, déjà, dans le premier chapitre que le modèle de Schapery adapte la viscoélasticité du domaine linéaire par l'utilisation de quatre paramètres de nonlinéarité. Par suite de cette logique, pour l'identification des paramètres de viscoélasticité, il est nécessaire de commencer avec la viscoélasticité linéaire.

Dans ce domaine, les paramètres de nonlinéarité sont égaux à 1. Pour la phase de fluage, le modèle devient :

$$\varepsilon_{f(t)}^1 = D_0 \sigma + \left[\sum_{i=1}^n D_i (1 - e^{-\lambda_i t}) \right] \sigma \quad (9)$$

et pour celle de recouvrance :

$$\varepsilon_r^1(t) = \sigma \sum_{i=1}^n D_i [1 - e^{(-\lambda_i t_f)}] e^{-\lambda_i (t - t_f)} \quad (10)$$

Ces deux fonctions peuvent être superposées aux données expérimentales, (9) avec ceux en fluage et (10) en recouvrance, pour l'identification des paramètres de viscoélasticité linéaire.

4.2.2 Identification des paramètres de nonlinéarité

Les quatre paramètres de nonlinéarité sont déterminés des données expérimentales à des contraintes élevées. Vue qu'ils sont dépendants de la contrainte, ils deviennent des fonctions de forme $f(\sigma)$. Il faut noter que la fonction qui les décrit est valable seulement dans le domaine analysé.

Pour le premier paramètre, g_0 , il est identifié de la phase de chargement :

$$g_0 = \frac{\varepsilon_0^i}{\varepsilon_0^1} \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_i} \quad (11)$$

avec ε_0^1 et σ_1 représentent la déformation instantanée et la contrainte du cycle dans le domaine linéaire ; ε_0^i et σ_i la déformation instantanée et la contrainte du cycle « i » dans le domaine nonlinéaire.

Le deuxième paramètre, g_1 , est calculée du rapport entre la déformation viscoélastique en fluage, $\Delta\varepsilon_f^i$ et celle en recouvrance, $\Delta\varepsilon_r^i$ d'un cycle « i » :

$$g_1^\sigma = \frac{\Delta\varepsilon_f^i}{\Delta\varepsilon_r^i} \quad (12)$$

Finalement, les derniers deux paramètres, g_2 et a_σ , sont identifiés en même temps, par des procédures d'optimisation du modèle adapté soit la phase de fluage, (13), soit pour celle de recouvrance, (14).

$$\varepsilon_f^i(t) = D_0 \sigma g_0^\sigma + g_1^\sigma g_2^\sigma \left[\sum_{i=1}^n D_i (1 - e^{-\lambda_i \psi}) \right] \sigma \quad (13)$$

$$\varepsilon_r^i(t) = g_1^0 [g_2^\sigma \sigma \Delta D(\psi) - (g_2^0 - g_2^\sigma \sigma) \Delta D(\psi - \psi_f)] \quad (14)$$

4.3 Résultats de l'identification des paramètres du modèle et discussion

La procédure d'identification a été appliquée sur les résultats d'un set d'éprouvettes, ceux moyens, obtenus pour les deux types d'essais, à durée et contrainte de fluage variable.

4.3.1 Paramètres du modèle de viscoplasticité

L'extrapolation des courbes expérimentales a mené à l'identification du seuil d'apparition des déformations plastiques, $\sigma_{seuil} = 43 \text{ MPa}$.

La procédure d'optimisation a produit les paramètres du modèle de viscoplasticité (Figure 25) : $C_{pl} = 7,13$, $M = 5,52$, $m = 0,18$.

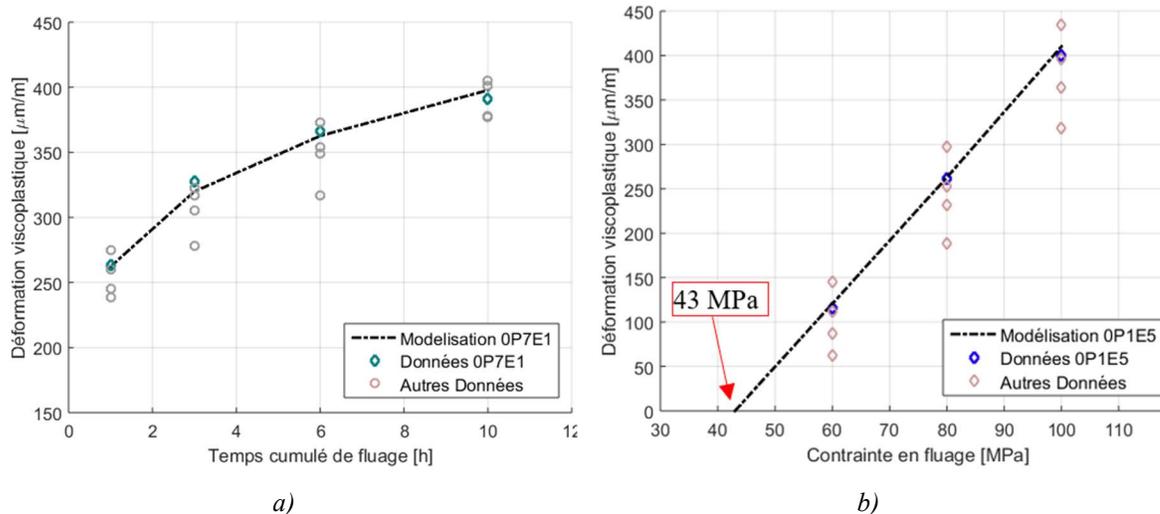


Figure 25 : Modélisation des déformations viscoplastiques par rapport à : a) la durée cumulée de fluage ; b) la contrainte en fluage

4.3.2 Paramètres du modèle de viscoélasticité linéaire

L'identification des paramètres de la série de Prony a consisté, en premier, dans la détermination du nombre optimal de termes. Ainsi, on a identifié qu'un set à 5 termes représente le meilleur choix pour la modélisation, avec les temps de relaxation et leurs inverses, sous forme de multiples de 10. L'identification a été faite, initialement, en fluage et en recouvrance pour comparaison. On a constaté que les données en fluage produisent les meilleurs résultats. On a, ainsi, calculé le set présenté dans le Tableau 3.

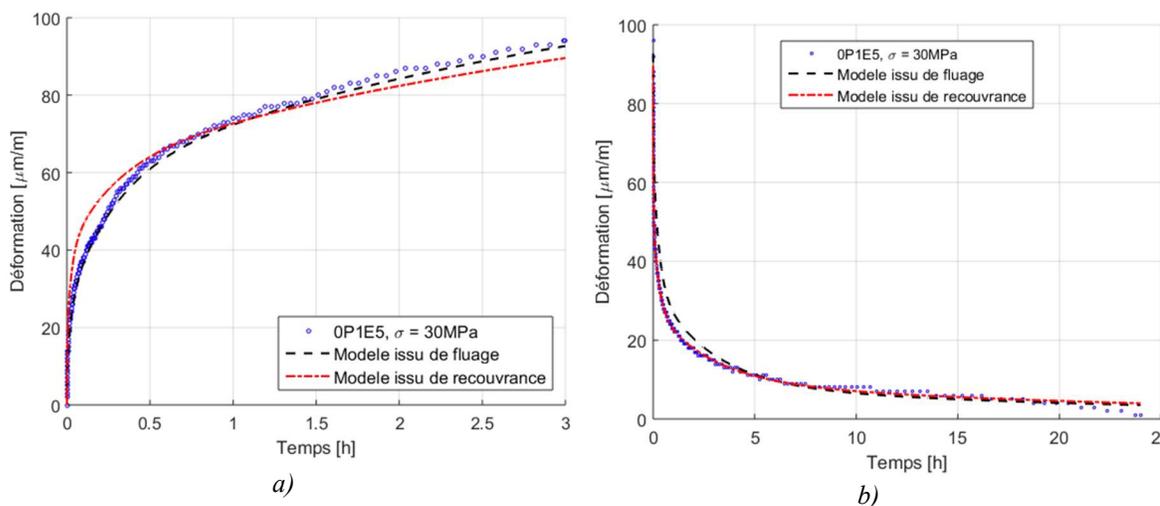


Figure 26 : Modélisation de la phase de : a) fluage ; b) recouvrance

Tableau 3 : Les paramètres du modèle de viscoélasticité linéaire

D	λ	τ	Compliance
	$[s^{-1}]$	$[h]$	$[Pa^{-1}]$
$D0$	∞	0	28.122
$D1$	0.1	2.78E-03	0.337
$D2$	0.01	2.78E-02	0.505
$D3$	0.001	2.78E-01	1.110
$D4$	0.0001	2.78E+00	1.301
$D5$	1.00E-05	2.78E+01	2.722

4.3.3 Paramètres du modèle de viscoélasticité nonlinéaire

Le calcul des paramètres a été fait selon la procédure présentée antérieurement. Ensuite, à l'aide des valeurs obtenues, on a identifié les fonctions de variation (15)-(18), (Figure 27).

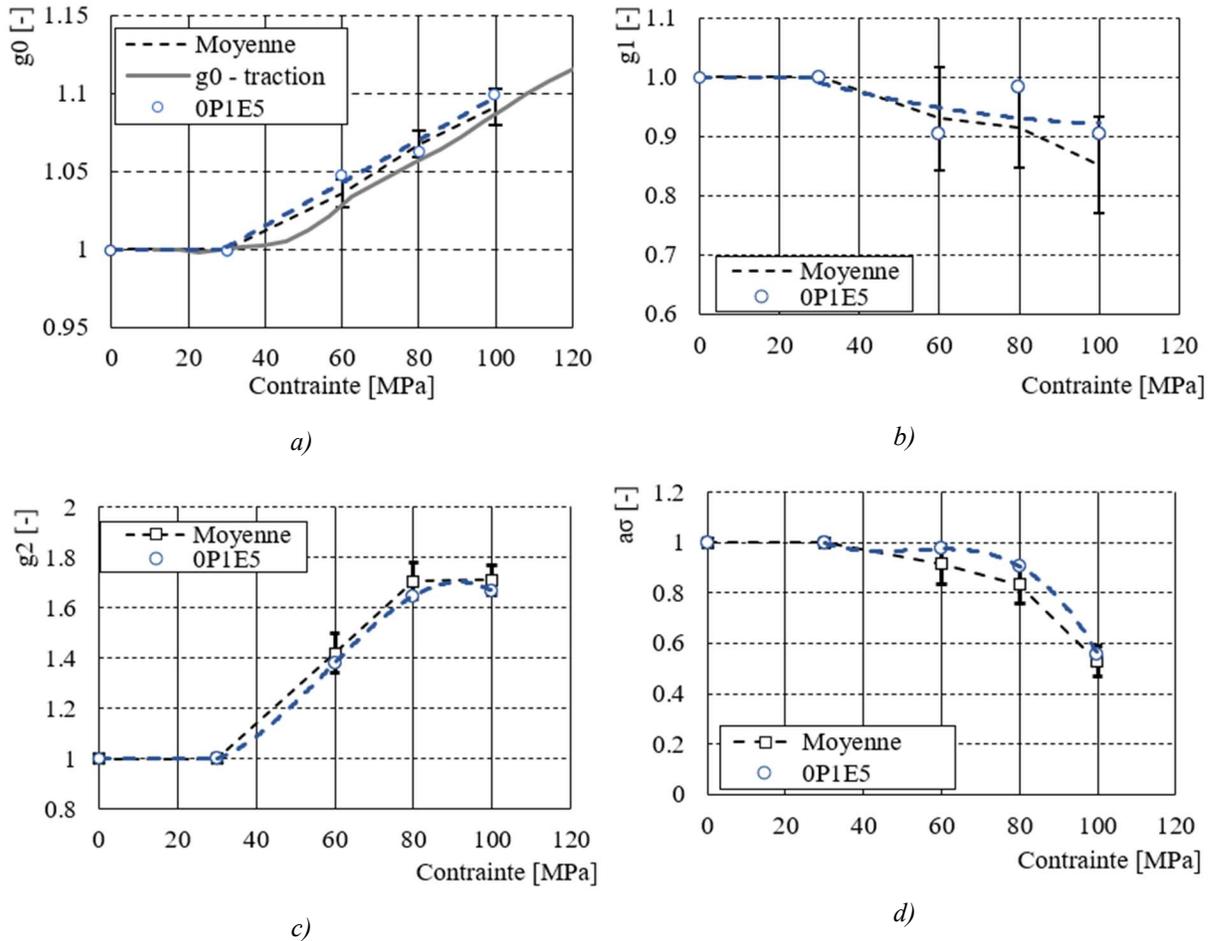


Figure 27 : Les paramètres de nonlinéarité : a) g_0 , b) g_1 ; c) g_2 ; d) a_σ

$$g_0 = \begin{cases} 1 & \sigma \leq 30 \text{ MPa} \\ 1,4 \cdot 10^{-3} \sigma + 0,9601 & \sigma > 30 \text{ MPa} \end{cases} \quad (15)$$

$$g_1 = \begin{cases} 1 & \sigma \leq 30 \text{ MPa} \\ 10^{-5} \sigma^2 - 2,3 * 10^{-3} \sigma + 1,05 & \sigma > 30 \text{ MPa} \end{cases} \quad (16)$$

$$g_2 = \begin{cases} 1 & \sigma \leq 30 \text{ MPa} \\ -4,5 \cdot 10^{-6} \sigma^3 + 7,9 \cdot 10^{-4} \sigma^2 - 2,9 \cdot 10^{-2} + 1,3 & \sigma > 30 \text{ MPa} \end{cases} \quad (17)$$

$$a^\sigma = \begin{cases} 1 & \sigma \leq 30 \text{ MPa} \\ -1,67 \cdot 10^{-4} \sigma^2 + 1,510^{-2} \sigma + 0,7 & \sigma > 30 \text{ MPa} \end{cases} \quad (18)$$

4.4 Conclusions

On a présenté, dans ce chapitre, les démarches pour l'identification de la loi de comportement et de ses paramètres.

Chapitre 5 : Formulation incrémentale de la loi de comportement

5.1 Introduction

Ce dernier chapitre de la thèse aborde les possibilités de modélisation pour d'autres cycles de chargement que ceux de fluage-recouvrance

5.2 Formulation incrémentale de la loi de viscoélasticité non-linéaire

Comme il a été expliqué dans le chapitre précédent, les paramètres de la loi de variation ont été identifiées à base des cycles de chargement particuliers, par le maintien de la charge pour une durée de temps.

Pour un cycle quelconque de chargement, une nouvelle forme du modèle est nécessaire. Ainsi, l'intégrale de Schapery est séparée en deux parties : le calcul de la déformation d'un pas incrémental et celle d'avant de ce pas.

$$\varepsilon_{(t)} = g_0^t D_0 \sigma^t + g_1^t \left(\int_0^{t-\Delta t} \sum_{i=1}^n D_i (1 - \exp[-\lambda(\psi^t - \psi^\tau)]) \frac{dg_2^\tau \sigma^\tau}{d\tau} d\tau \right. \\ \left. + \int_{t-\Delta t}^t \sum_{i=1}^n D_i (1 - \exp[-\lambda(\psi^t - \psi^\tau)]) \frac{dg_2^\tau \sigma^\tau}{d\tau} d\tau \right) \quad (19)$$

La division conduit à une forme incrémentale, récursive, où la déformation du temps t_i dépend de celle du temps précédent, t_{i-1} et le pas incrémental entre les deux :

$$\varepsilon(t) = \sigma^t \left[g_0^t D_0 + g_1^t g_2 \sum_{i=1}^n D_i - g_1^t g_2^t \sum_{i=1}^n D_i \frac{\{1 - \exp[-\lambda_i(\Delta\psi^t)]\}}{\lambda_i \Delta\psi^t} \right] - g_1^t \sum_{i=1}^n D_i \left[\exp[-\lambda_i \Delta\psi^t] \cdot A_i^{t-\Delta t} - \frac{\{1 - \exp[-\lambda_i(\Delta\psi^t)]\}}{\lambda_i \Delta\psi^t} g_2^{t-\Delta t} \sigma^{t-\Delta t} \right] \quad (20)$$

où les termes avec l'exposant "t" font référence au pas actuel, alors que ceux avec "t - Δt", au pas précédent.

5.3 Formulation incrémentale de la loi de viscoplasticité

Pour la résolution de l'intégrale, d'une manière incrémentale, on considère que, durant le pas incrémental, la contrainte ne varie pas. On obtient, ainsi, pour le modèle de Zapas-Crissman :

$$\varepsilon_{VP}^t = C_{pl} (p_{(t-\Delta t)} + \sigma_{eq}^M \Delta t)^m \quad (21)$$

avec

$$p_{(t-\Delta t)} = \int_0^{t-\Delta t} \sigma_{eq}^M d\tau \quad (22)$$

5.4 Validation du modèle numérique

On a utilisé, pour la validation, le cycle de fluage-recouvrance à contrainte variable. On note une très bonne superposition de la courbe numérique à celle expérimentale, ainsi qu'une fidèle reproduction des déformations viscoplastiques, Figure 28.

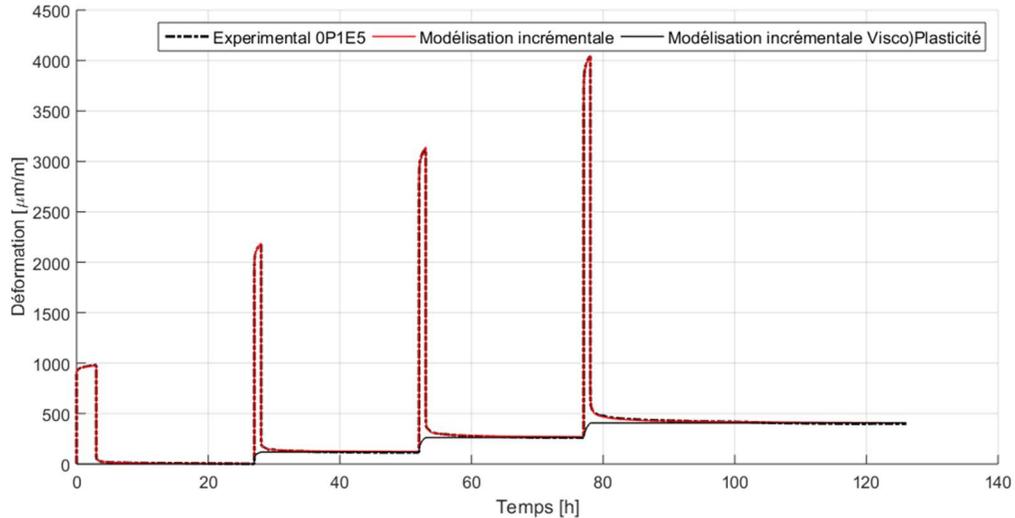


Figure 28 : Rezultatele modelării unui ciclu de fluaj-revenire

5.5 Simulation d'un essai charge/décharge à vitesse variable

On a simulé l'un des essais présentés dans le deuxième chapitre, à différentes vitesses de chargement, afin de déterminer les capacités du modèle numérique. Les cycles d'évaluation ont été éliminés de la simulation, vue qu'elles ne produisent aucun effet sur les déformations viscoplastiques.

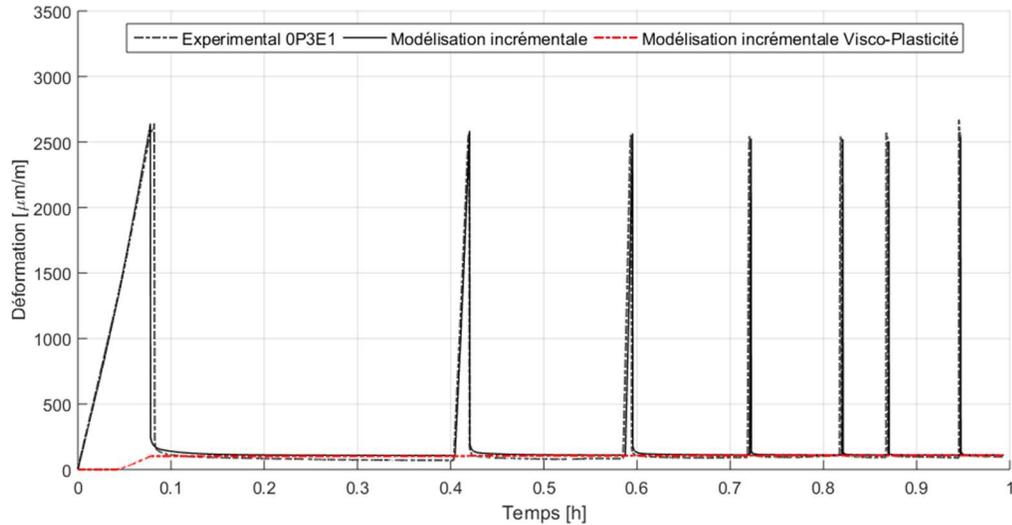


Figure 29 : Résultats de la modélisation d'un essai de charge/décharge à vitesse variable

On note une très bonne superposition. Le calcul des modules sécants à 30 MPa et à 80 MPa suivent la même tendance, avec une légère surévaluation, pour celui à 30 MPa.

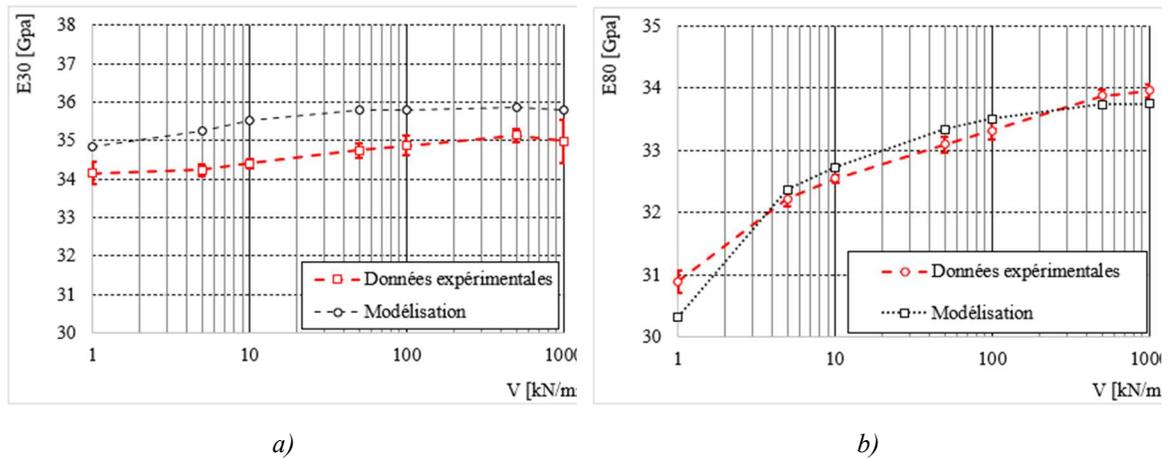


Figure 30 : Modules sécants d'élasticité à : a) 30 MPa ; b) 80 MPa

5.6 Simulation d'un essai de charge-décharge à contrainte variable

Un autre teste, présenté dans le deuxième chapitre, a été simulé. On a, encore une fois, éliminé les cycles d'évaluation. On a aussi limité la modélisation à 100 MPa, la limite du domaine de contraintes analysé.

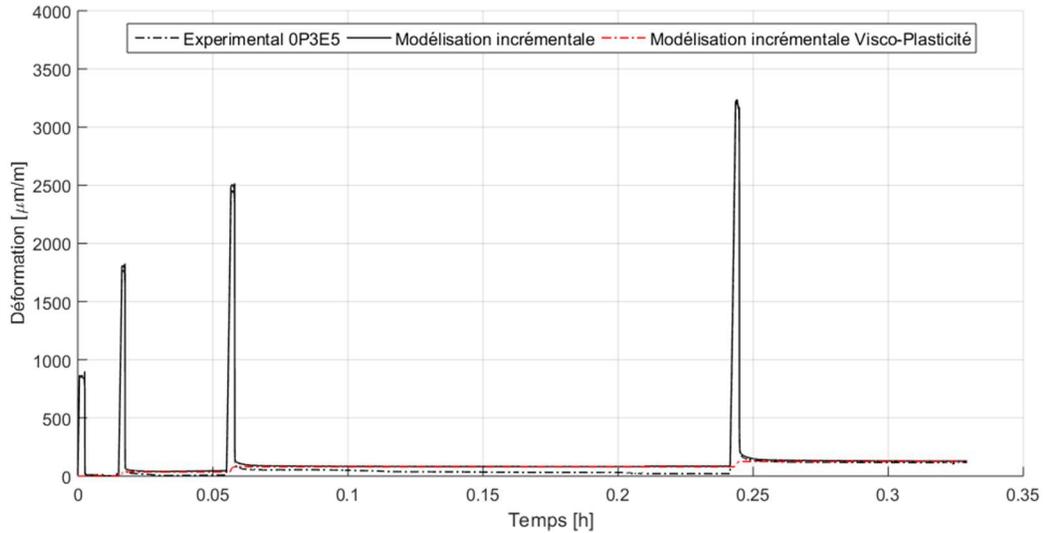


Figure 31 : Modélisation d'un essai de charge-décharge à contrainte variable

On note encore une fois une très fidèle reproduction des données, cette fois avec une légère surestimation de la déformation viscoplastique dans le troisième cycle de chargement.

5.7 Simulation d'un essai de traction

Bien que les paramètres de nonlinéarité soient valables que dans le domaine 0-100 MPa, une tendance a été remarquée, de stabilisation vers les niveaux élevés de contrainte. Par suite, on a émis l'hypothèse que, dès qu'on dépasse le seuil de 100 MPa, les paramètres de nonlinéarité ne varient plus (Figure 32 a), ce qui a permis l'extension du domaine de modélisation.

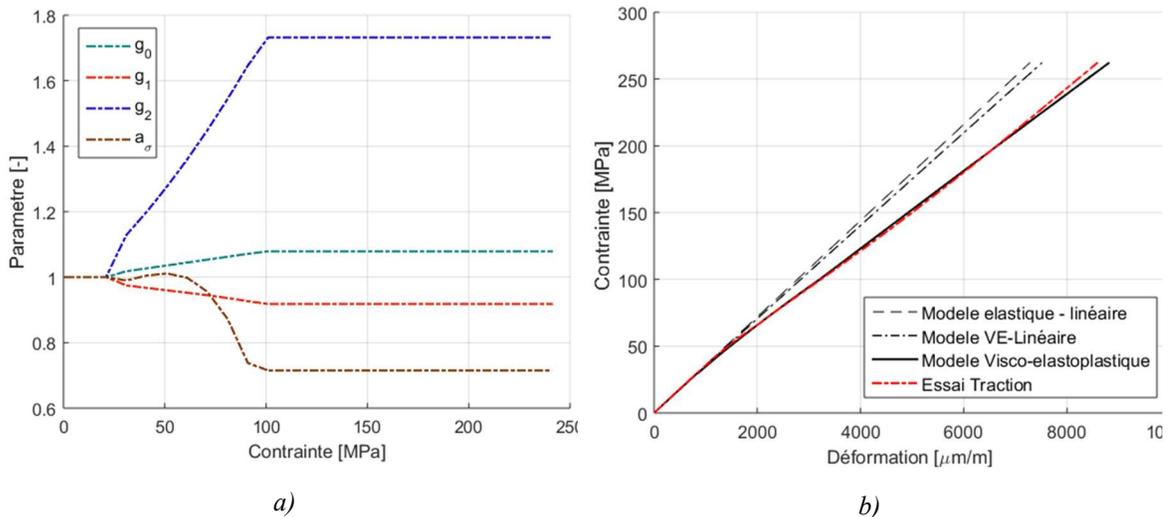


Figure 32 : a) Les paramètres de nonlinéarité par rapport à la contrainte ; b) Les résultats de la modélisation de l'essai de traction

Comme application, on a simulé un essai de traction jusqu'à la rupture, aussi présenté dans le deuxième chapitre. Pour comparaison, on a ajouté la modélisation linéaire élastique et viscoélastique linéaire, Figure 32 b.

Les résultats montrent que la modélisation visco-élastoplastique reproduit le mieux la courbe caractéristique.

5.8 Conclusions

La modélisation numérique incrémentale s'est prouvée d'être capable à modéliser différents cycles de chargement. De plus, l'extrapolation des fonctions des paramètres de nonlinéarité a permis une modélisation raisonnable en dehors du domaine d'analyse, 0-100 MPa. C'est un résultat encourageant pour des modélisations ultérieures, où d'autres phénomènes peuvent être impliqués (tel que l'endommagement) et des critères de défaillance du matériau.

Conclusions générales et perspectives

Tel qu'il a été discuté dans ces chapitres, l'intérêt pour des matériaux écologiques augmente. Dans le domaine des composites, cela se reflète par des tentatives d'implémentation des solutions végétales, parmi lesquels, ceux à renfort de lin sont les plus prometteurs.

Cependant, les inconnues liées au comportement en temps représentent un défi à dépasser. L'étude de cette thèse s'est, donc, intéressée, à ce comportement des matériaux composites à renfort de lin, suivant la direction de la fibre. On a étudié l'effet de la charge appliquée et du temps d'application sur la réponse en temps d'un matériau fibre de lin – résine époxy.

Pour débiter l'étude, les caractéristiques mécaniques du matériau ont été déterminées et une série d'essais de charge-décharge, à contrainte et vitesse variables, ont mis en évidence le caractère visqueux du matériau.

La caractérisation de ce comportement, par voie des essais de fluage-recouvrance multi-cyclés, a révélé l'existence des déformations viscoélastiques et viscoplastiques, les deux dépendantes de la charge et de sa durée d'application.

Ces mêmes résultats ont servi à l'identification de la loi de comportement visco-élastoplastique et de ses paramètres.

Pour achever, la loi a été validée et utilisée pour modéliser des différents cycles de chargement.

Les perspectives de l'étude suivent deux grands axes, le premier étant l'expansion de la caractérisation pour d'autres directions des lamines et d'autres facteurs d'influence (température, humidité ...).

Le deuxième axe de développement est l'utilisation du modèle pour le calcul des structures qui se servent de ce matériau, tel que ceux présentés dans le premier chapitre : cadres de vélo, éléments de carrosserie etc.

Contributions personnelles

1. Elaboration d'une analyse de l'état actuel de la recherche dans les domaines des composites à renfort biosourcé et du comportement visco-élastoplastique et de sa modélisation ;
2. Elaboration et mise en place d'une procédure de caractérisation visco-élastoplastique (fabrication, équipement, conditionnement des échantillons etc.) ;
3. Analyse de l'influence de la vitesse de chargement sur la réponse visqueuse du matériau ;
4. Analyse de l'évolution de l'intégrité structurale du matériau étudié par rapport au chargement imposé ;
5. Caractérisation visco-élastoplastique du composite à renfort de fibre de lin suivant la direction de la fibre ;
6. Conception d'un algorithme de calcul des paramètres de la loi de comportement dans un domaine en dessous du seuil d'endommagement ;
7. Calcul des paramètres du modèle visco-élastoplastique à partir des données expérimentales enregistrées ;
8. Implémentation d'une forme incrémentale de la loi de comportement visco-élastoplastique dans une routine numérique, dans le logiciel MatLab ;
9. Validation du modèle pour la direction analysée.

Bibliographie

- [1] D. Gay, *Composite Materials Design and Applications*. 2016.
- [2] C. Soutis, *Fibre reinforced composites in aircraft construction*, Progress in Aerospace Sciences, 2005, vol. 41, no. 2, pp. 143–151.
- [3] KONE Corporation, *Carbon-Fiber Elevator Rope - Innovation Description*, in *Construction Innovation Forum*, 2014.
- [4] Y. S. Song, J. R. Youn, *et al.*, *Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, vol. 40, no. 8, pp. 1257–1265.
- [5] S. Pimenta and S. T. Pinho, *Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications : Technology review and market outlook*, Waste Management, 2015, vol. 31, no. 2, pp. 378–392.
- [6] A. Céline, S. Fréour, *et al.*, *The hygroscopic behavior of plant fibers: a review*, Frontiers in chemistry, 2013, vol. 1, no. March 2016, p. 43.
- [7] R. Mahjoub, J. M. Yatim, *et al.*, *Tensile properties of kenaf fiber due to various conditions of chemical fiber surface modifications*, Construction and Building Materials, 2014, vol. 55, pp. 103–113.
- [8] A.K. Bledzki and J. Gassan, *Composites Reinforced with Cellulose Based Fibers*, Progress in Polymer Science, 1999, vol. 24, no. 2, pp. 221–274.
- [9] United Nations Framework Convention on Climate Change, *Paris Agreement*, 2015.
- [10] C. Poilâne, A. Vivet, *et al.*, *Propriétés mécaniques de préimprégnés lin/époxyde*, Comptes Rendus des JNC 16, 2009.
- [11] A. Amiri, N. Hosseini, *et al.*, *Advanced Biocomposites Made From Methacrylated Epoxidized Sucrose Soyate Resin Reinforced With Flax*, in *20th International Conference on Composite Materials*, 2015, no. July, pp. 19–24.
- [12] D. U. Shah, *Developing plant fibre composites for structural applications by optimising composite parameters: A critical review*, Journal of Materials Science, 2013, vol. 48, no. 18, pp. 6083–6107.
- [13] J. A. Foulk, D. E. Akin, *et al.*, *New Low Cost Flax Fibers for Composites*, 2000, no. April 2016, pp. 2000-01–1133.
- [14] K. L. Pickering, A. Efendy, *et al.*, *A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, vol. 83, no. April, pp. 98–112.
- [15] V. Sadrmanesh and Y. Chen, *Bast fibres : structure , processing , properties , and applications*, International Materials Reviews, 2018, vol. 0, no. 0, pp. 1–26.
- [16] J. Andersons, E. Sparnins, *et al.*, *Strength distribution of elementary flax fibres*, Composites Science and Technology, Mar. 2005, vol. 65, no. 3–4, pp. 693–702.
- [17] K. Charlet, F. Saulnier, *et al.*, *Fluorination as an Effective Way to Reduce Natural Fibers Hydrophilicity*, Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications, 2016, vol. 12, pp. 211–229.
- [18] E. Kvavadze, O. Bar-Yoset, *et al.*, *30,000-year-old wild flax fibers*, Science, 2010, vol. 328, no. 5986, pp. 0–1.
- [19] *Eco Technilin, Raquette de tennis*. [Online]. Available: <https://eco-technilin.com/fr/raquette-de-tennis/96-raquette-de-tennis-.html>. [Accessed: 09-Jul-2020].
- [20] *Vélo IBNO Ventoux*. [Online]. Available: <https://inbo.fr/fr/velos-bambou/9-le-ventoux.html>. [Accessed: 09-Jul-2020].
- [21] *Tesla Model S P100DL Electric GT race car track-tested by Top Gear veteran*. [Online]. Available: <https://www.teslarati.com/tesla-model-s-p100dl-electric-gt-track-tested/>.

- [Accessed: 09-Jul-2020].
- [22] J. R. Duflou, Y. Deng, *et al.*, *Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle-assessment-based study*, MRS Bulletin, 2012, vol. 37, no. 4, pp. 374–382.
- [23] FAOSTAT Report, *Top 10 producers of flax for 2010-2016*, 2018.
- [24] J. Zhu, H. Zhu, *et al.*, *Recent development of flax fibres and their reinforced composites based on different polymeric matrices*, Materials, 2013, vol. 6, pp. 5171–5198.
- [25] K. Charlet and A. Béakou, *Interfaces within flax fibre bundle: Experimental characterization and numerical modelling*, Journal of Composite Materials, 2014, vol. 48, no. 26, pp. 3263–3269.
- [26] A. Roudier, K. Charlet, *et al.*, *Caractérisation des propriétés biochimiques et hygroscopiques d'une fibre de lin*, in *Materiaux 2010*, 2010.
- [27] S. K. Batra, *Other long vegetable fibres*. Handbook of fiber chemistry, 1998.
- [28] A. Thuault, *Approche multi-échelle de la structure et du comportement mécanique de la fibre de lin*, Thèse de Doctorat, 2011, Université de Basse Normandie.
- [29] A. Bismarck, I. Aranbefwi-Askargorta, *et al.*, *Cellulose Fibers ; Surface Properties and the Water Uptake Behavior*, Polymer Composites, 2002, vol. 23, no. 5, pp. 872–894.
- [30] V. Tserki, N. E. Zafeiropoulos, *et al.*, *A study of the effect of acetylation and propionylation surface treatments on natural fibres*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, vol. 36, no. 8, pp. 1110–1118.
- [31] J. Acera Fernández, N. Le Moigne, *et al.*, *Role of flax cell wall components on the microstructure and transverse mechanical behaviour of flax fabrics reinforced epoxy biocomposites*, Industrial Crops and Products, 2016, vol. 85, pp. 93–108.
- [32] K. Charlet, *Contribution à l'étude de composites unidirectionnels renforcés par des fibres de lin : relation entre la microstructure de la fibre et ses propriétés mécaniques*, Thèse de Doctorat, 2008.
- [33] K. Charlet, S. Eve, *et al.*, *Tensile deformation of a flax fiber*, Procedia Engineering, 2009, vol. 1, no. 1, pp. 233–236.
- [34] A. Lefeuvre, A. Bourmaud, *et al.*, *Elementary flax fibre tensile properties: Correlation between stress-strain behaviour and fibre composition*, Industrial Crops and Products, 2014, vol. 52, pp. 762–769.
- [35] C. Gourier, A. Le Duigou, *et al.*, *Mechanical analysis of elementary flax fibre tensile properties after different thermal cycles*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, vol. 64, pp. 159–166.
- [36] V. Keryvin, M. Lan, *et al.*, *Analysis of flax fibres viscoelastic behaviour at micro and nano scales*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, vol. 68.
- [37] V. Bossuyt, *Etude de la structure et des propriétés mécaniques de la fibre de lin*, Thèse de Doctorat, 1941, Faculté des Sciences de Lille.
- [38] C. Gourier, *Contribution à l'étude de matériaux biocomposites à matrice thermoplastique polyamide-11 et renforcés par des fibres de lin*, Thèse de Doctorat, 2016, Université Bretagne Loire.
- [39] T. Thi Xuan Hang, T. A. Truc, *et al.*, *Corrosion protection of carbon steel by an epoxy resin containing organically modified clay*, Surface and Coatings Technology, 2007, vol. 201, no. 16–17, pp. 7408–7415.
- [40] P. Nogueira, C. Ramirez, *et al.*, *Effect of water sorption on the structure and mechanical properties of an epoxy resin system*, Journal of Applied Polymer Science, 2001, vol. 80, no. 1, pp. 71–80.
- [41] D. Scida, M. Assarar, *et al.*, *Influence of hygrothermal ageing on the damage mechanisms of flax-fibre reinforced epoxy composite*, Composites Part B: Engineering, 2013, vol. 48, pp. 51–58.
- [42] G. Pitarresi, D. Tumino, *et al.*, *Thermo-mechanical behaviour of flax-fibre reinforced epoxy*

- laminates for industrial applications*, *Materials*, 2015, vol. 8, no. 11, pp. 7371–7388.
- [43] C. Poilâne, Z. E. Cherif, *et al.*, *Polymer reinforced by flax fibres as a viscoelastoplastic material*, *Composite Structures*, 2014, vol. 112, no. 1, pp. 100–112.
- [44] C. Stochioiu, *Caractérisation Viscoélastique des matériaux biocomposites à base de fibre de lin*, Thèse de Doctorat, 2015, Université de Bourgogne Franche Compté.
- [45] M. J. Le Guen, R. H. Newman, *et al.*, *Tailoring the vibration damping behaviour of flax fibre-reinforced epoxy composite laminates via polyol additions*, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, vol. 67, pp. 37–43.
- [46] M. Belaïd, S. Fontaine, *et al.*, *Prediction of Dissipative Properties of Flax Fibers Reinforced Laminates by Vibration Analysis*, *Applied Mechanics and Materials*, 2016, vol. 822, pp. 411–417.
- [47] D. W. Saunders, *Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials*, vol. 19, no. 1. 1978.
- [48] R. a Schapery, *Nonlinear Viscoelastic and Viscoplastic Constitutive Equations Based on Thermodynamics*, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 1997, vol. 1, pp. 209–240.
- [49] H. Leaderman, *Elastic and Creep Properties of Filamentous Materials and other high Polymers*. Washington DC: The Textile foundation, 1943.
- [50] Y. Lou and R. A. Schapery, *Viscoelastic Characterization of a Nonlinear Fiber-Reinforced Plastic*, *Journal of Composite Materials*, 1971, vol. 5, no. April, pp. 208–234.
- [51] A. Vinet, *Identification d'une loi de comportement viscoélastique-viscoplastique pour des stratifiés aéronautiques*, Thèse de Doctorat, 1997, L'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique.
- [52] L. J. Zapas and J. M. Crissman, *Creep and recovery behaviour of ultra-high molecular weight polyethylene in the region of small uniaxial deformations*, *Polymer*, 1984, vol. 25, no. 1, pp. 57–62.
- [53] L. O. Nordin and J. Varna, *Nonlinear viscoplastic and nonlinear viscoelastic material model for paper fiber composites in compression*, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, vol. 37, no. 2, pp. 344–355.
- [54] *LINEO - FlaxPreg 110 Technical DataSheet*.
- [55] J. Varna, *Characterization of viscoelasticity, viscoplasticity and damage in composites*, *Creep and fatigue in polymer matrix composites*, 2011, pp. 514–542.