UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” din BUCUREŞTI

ŞCOALA DOCTORALĂ FIIR

Nr. Decizie 541 **din** 28.07.2020

TEZĂ DE DOCTORAT
-Rezumat-

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**

BUCUREŞTI 2020

Cuprins

Introducere generală 4
Capitolul 1: Studiu bibliografic 4
1.1 Introducere 4
1.2 Materialele compozite 4
1.3 Fibre de in și aplicațiile structurale 6
1.4 De la planta de in la fibra de in 6
1.4.1 Producerea fibrei 6
1.4.3 Microstructură 7
1.4.3 Proprietățile mecanice 8
1.4.4 Mecanisme legate de comportamentul fibrelor 8
1.5 Rășina epoxidică 8
1.6 1.6 Compozitele fibră de in – rășină epoxy 9
1.7 1.7 Viscoelasticitate 9
1.7.1 Viscoelasticitate liniară 10
1.7.3 Viscoelasticitate neliniară 10
1.7.4 Viscoplasticitate 11
1.8 Concluzii 11
Capitolul 2: Fabricarea și caracterizarea mecanică a compozitului cu fibră de in 12
2.1 Introducere 12
2.2 Fabricarea materialului și a epruvetelor 12
2.3 Încercări de caracterizare mecanică 12
2.4 2.4 Încercări de încărcare-descărcare cu diferite viteze 14
2.5 Încercări de încărcare-descărcare la diferite tensiuni 16
2.6 Concluzii 17
Capitolul 3: Teste de caracterizare visco-elastoplastică 18
3.1 Introducere 18
3.2 Încercări preliminarii 18
3.2.1 Conceperea încercărilor preliminarii 18

3.2.2 Aparatură 18
3.3.3 Rezultatele testelor preliminarii 18
3.3 Teste de fluaj-revenire cu durată de fluaj variabilă 19
3.4 Teste de fluaj – revenire cu tensiune variabilă 20
3.5 Concluzii 21
Capitolul 4: Identificarea legii de comportament visco-elastoplastic 21
4.1 Introducere 21
4.2 Procedura de identificare a parametrilor 21
4.2.1 Modelarea deformației viscoplastice 22
4.2.2. Modelarea deformației viscoelastice liniare 22
4.2.2 Modelarea parametrilor de neliniaritate 23
4.3 Rezultatele identificării parametrilor 23
4.3.1 Parametrii modelului de viscoplasticitate 23
4.3.2 Parametrii modelului de viscoelasticitate liniară 24
4.3.3 Parametrii modelului de viscoelasticitate neliniară 25
4.4 Concluzii 26
Capitolul 5: Formularea incrementală a legii de comportament 26
5.1 Introducere 26
5.2 Formularea incrementală a legii de viscoelasticitate neliniară 26
5.3 Formularea incrementală a legii de viscoplasticitate 27
5.4 Validarea modelului numeric 27
5.5 Simularea unui test de încărcare/descărcare cu viteză variabilă 28
5.6 Simularea unui test de încărcare/descărcare cu tensiune variabilă 28
5.7 Simularea unui test de tracțiune 29
5.8 Concluzii 30
Concluzii generale și perspective 30
Contribuții personale 31
Bibliografie 32

Introducere generală

Prezenta teză țintește a îmbogăți cunoștințele despre materialele compozite cu armare vegetală. În ceea ce le privește, deși studiate temeinic în ultimii 20 de ani, numeroase lacune încetinesc implementarea lor în aplicații structurale. Acestea sunt, în mare parte, legate de comportamentul în timp, sub influența diferiților factori : sarcina aplicată, condiții de mediu, îmbătrânire, oboseală, etc.

Prin intermediul acestui prim capitol de introducere generala sunt exprimate contextul studiului actual, poziționarea materialului studiat in raport cu materialele "clasice", cum ar fi otelul si aluminiu si cu materialele compozite de înaltă performanță, cum sunt cele fibră unidirecțională de carbon sau sticlă în matrice polimerică.

Totodată, este prezentat un rezumat al activităților descrise în fiecare din cele cinci capitole ale tezei. Se începe cu studiul bibliografic, în capitolul 1, pentru a continua cu o serie de experimente de caracterizare mecanică și de tracțiune cu diferite viteze de încărcare, respectiv tensiuni maxime, în capitolul 2. Se continuă cu teste de caracterizare viscoasă, in capitolul 3; și cu identificarea unei legi de comportament și a parametrilor săi, în capitolul 4. Cercetarea se încheie cu diferite modelări numerice, în capitolul 5.

Cuvinte cheie: Fibră de in, Biocompozit, Viscoelasticitate, Viscoplastcitate, Fluaj

Capitolul 1: Studiu bibliografic

1.1 Introducere

Acest capitol este dedicat studiului literaturii de specialitate în vederea stabilirii stadiului actual al cercetării în domeniul materialelor compozite armate cu fibre vegetale și a modelării numerice a comportamentului viscos.

1.2 Materialele compozite

Prezentarea cadrului studiului pornește de la o scrută descriere a termenului de material compozit, atenția fiind concentrata pe cele armate cu fibre unidirecționale, utilizările in aplicații structurale cat si inconvenientele.

Un material compozit este definit ca rezultatul combinării, la scară macroscopică (vizibilă cu ochiul liber) a două sau mai multe materiale, ale cărui proprietăți sunt superioare constituenților săi.

S-a observat, astfel, că principalul avantaj al utilizării materialelor compozite este legat de lejeritatea lor în raport cu materialele metalice, păstrând în același timp, proprietăți mecanice excelente [2, 3].

Cu toate acestea, se constată o problemă importantă a utilizării acestora în masă : au o amprentă ecologică ridicată. Aceasta se face simțită prin costul energetic ridicat [4] dar,

mai important, prin lipsa unui răspuns privitor la sfârșitul vieții [5]; o metodă clară de eliminare a pieselor ce utilizează materiale compozite sintetice nu există, cel mai adesea, ele fiind incinerate.

Drept urmare, se propune ca alternativă, utilizarea unor materiale de origine vegetală care, pe lângă consumul foarte redus de energie necesar pentru fabricare, prin natura lor, sunt ecologice. Sunt vizate acele materiale care pot rivaliza cu materialele sintetice, exemplificate în Tabelul 1.

Tabelul 1 : Proprietăți mecanice ale unor fibre de armare în materiale compozite

Fibră	Limită de rupere	Modulul lui Young	Deformație la rupere	Densitate	Rezistență specifică	Sursa
	$[MPa]$	$[GPa]$	[%]	$[g/cm^3]$	$[kNm/kg]$	
In	345-2000	27,5 - 85	1 - 4	1,54	224-1300	[6]
Iută	393 - 773	10 – 30	1,5 – 1,8	1,44	273-536	[6]
Cânepă	368 – 800	17 – 70	1,6	1,47	250-540	[6]
Kénaf	930	53	1.6	1.45	640	[7]
Bumbac	287 - 597	5,5 – 12,6	7-8	1,5	191 - 398	[8]
Sticlă	2000 – 3500	70	2,5	2,5	800 - 1400	[6]
Carbon	4000	230 – 400	1,4 – 1,8	1,4	2860	[6]

Implicarea lor în materiale compozite reprezintă un pas mare înainte către materiale compozite cu amprentă ecologică redusă și chiar inexistentă.

Ideea utilizării lor în aplicații inginerești este relativ veche, datând de mai bine de 70 de ani, din dorința de a reduce dependența de oțel dar, abia în ultimii ani, interesul a crescut semnificativ. Explicația vine de la apariția diferitor legi europene, dar nu numai, cum ar fi înțelegerea de la Paris [9], bazate pe reducerea poluării, în special în domeniul transporturilor.

Pentru studiul acestei teze a fost ales un material compozit armat cu fibră vegetală de in, unidirecțională, introdusă într-o matrice de epoxy. Motivația alegerii este ține de proprietățile mecanice ridicate ale acestui material, după cum a reieșit din mai multe studii găsite în bibliografie [10]. Materialul, deși conține o fibră vegetală, este doar parțial ecologic din cauza rășinii epoxidice, care este o rășină sintetică.

Din studiul bibliografic a fost remarcat că rășinile verzi sunt în continuare în dezvoltare, proprietățile lor mecanice fiind semnificativ inferioare celor clasice, în stadiul actual al cercetării lor, ceea ce ar produce un material compozit cu proprietăți mecanice reduse [11].

O analiză a utilizării fibrei de in a scos la iveală următoarele avantaje [12–14]:

- Densitate scăzută, ce duce la proprietăți specifice ridicate;
- Fibra de in nu este abrazivă, reducând efectele asupra sculelor de prelucrare;
- Procedura de fabricare este non-toxică;
- Cost redus al materiei prime.

Totodată, o serie de dezavantaje au fost scoase la iveală [6, 15, 16]:

- Temperaturile de lucru sunt reduse, inferioare a 200°C;
- Natura vegetală a fibrei o face hidrofilă;
- Variație importantă a proprietăților mecanice.

Cu toate că primul dezavantaj cu greu poate fi combătut, acesta reduce doar domeniile de utilitate a materialelor armate cu astfel de fibre. Celelalte două, deși importante, au fost abordate în cercetare și soluții au fost propuse, sub forma unor tratamente chimice [17], respectiv a combinării fibrelor din mai multe recolte.

Cercetările actuale se concentrează pe identificarea de aplicații unde materialele compozite armate cu fibre vegetale ar fi optime dar, în mod special, pe înțelegerea proprietăților lor, în special în timp, sub influența a diferiți factori de exploatare, unde datele informațiile sunt extrem de reduse, în momentul de față.

1.3 Fibre de in și aplicațiile structurale

Fibra de in este un material cunoscut din timpuri imemorabile, cele mai vechi dovezi ale utilizării sale de către om datând de 30.000 ani [18]. Aplicațiile au rămas, în mare parte, textile, până în secolul 20, când s-au dezvoltat diferite alte întrebuințări. Printre acestea, fibra de in este utilizată ca armare a materialelor compozite.

Acestea din urmă, deși actualmente rare, sunt de notorietate. Printre exemple de aplicații, se numără, cadre de biciclete de înaltă performanță, echipamente sportive sau muzicale și chiar elemente de caroserie de automobil [19–21]. Studiile arată că, în cazul înlocuirii materialelor tradiționale cu compozite armate cu fibră de in se obțin reduceri energetice semnificative, chiar de 50%, de costuri și de masă [22].

1.4 De la planta de in la fibra de in

1.4.1 Producerea fibrei

Fibra de in, sub formele sale comerciale, este extrasă din tulpina plantei de in, *Linum usitatissimum* (Figura 1). Aceasta este o planta anuală, cultivată în zonele cu climat temperat, ce poate atinge înălțimi de până la 1 m și nu necesită îngrășăminte artificiale. Pe lângă utilizarea ca material textil și cea pentru armarea compozitelor, se exploatează pentru semințele sale, utilizate ca nutrimente și pentru extracția de uleiuri pentru pictură.

Clima temperată face din in o plantă ce poate fi cultivată extensiv pe teritoriul Uniunii Europene iar, la momentul actual, Franța deține dominanța, în special datorită regiunii sale nordice, zonă cu tradiție în culturile de in [23].

Fibra tehnică, cea exploatată propriu-zis, este obținută prin separarea parțială a fibrelor situate la periferia tijei (Figura 1) [24]. Este compusă din mai multe fibre elementare, lipite între ele printr-un strat de pectină. Fibrele elementare, la rândul lor, au o structură complexă, fiind deseori asociate cu un material compozit (Figura 1) [25].

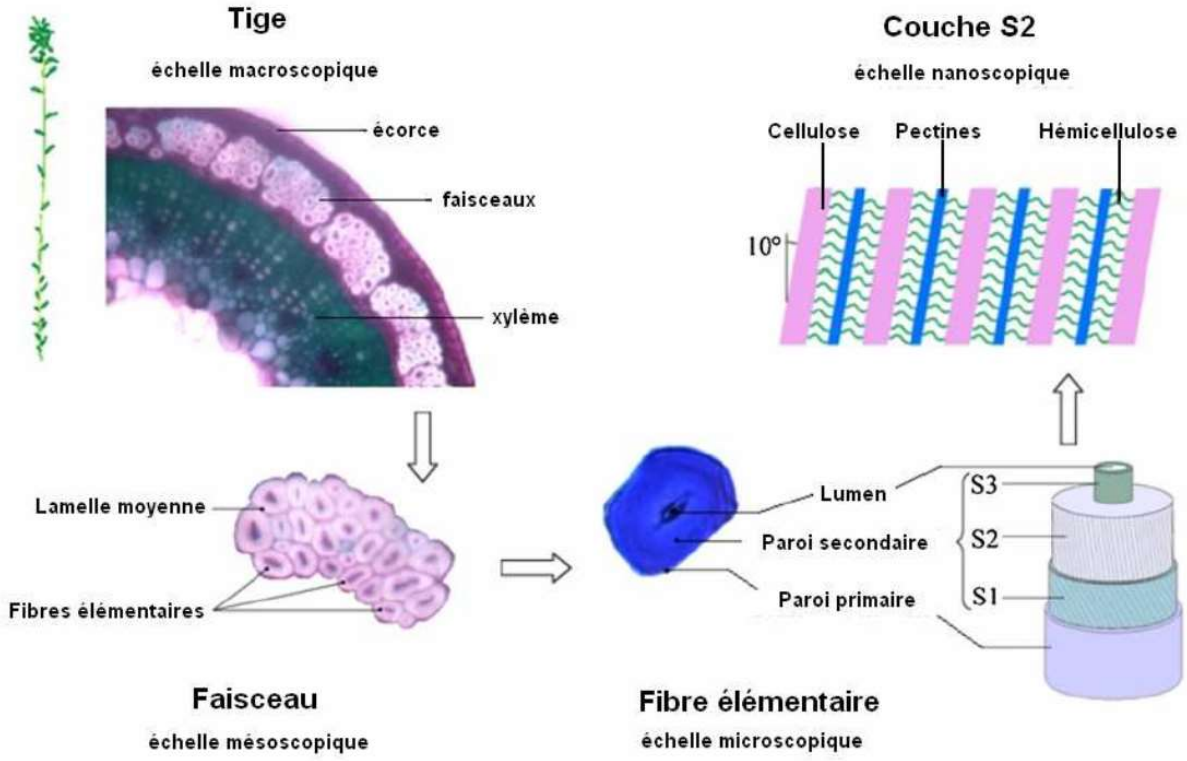


Figura 1 : Fibra de in : de la macro-structură la micro-structură [26]

1.4.3 Microstructură

Fibra elementară are o lungime de 2-5 cm, cu o secțiune poligonală rotunjită, asociată cu o formă circulară, de diametru de 10-20 µm. Are o structură ierarhizată, dispusă pe două straturi : cel primar, cu rol de protecție și cel secundar, cu rol structural. Acesta din urmă conține un amestec de celuloză cristalină, organizată sub formă de micro-fibrile helicoidale, ce armează o matrice de hemiceluloză. În centrul fibrei se află lumenul, un gol, vestigiu al dezvoltării fibrei în perioada de creștere a plantei (Figura 1).

Din punct de vedere conținut biochimic, fibra de in este alcătuită din aproximativ 68% celuloză cristalină, 15% hemiceluloză, 2% pectine, 3% lignină 1,5% ceară, 9 % apă, 1,5% alte substanțe [27–30]. Desigur, conținutul variază semnificativ, în funcție de mai mulți factori, cum ar fi anul culegerii, cantitatea de umiditate/soare din timpul creșterii, procedura de extragere a fibrelor etc [27, 31, 32].

1.4.3 Proprietățile mecanice

Comportamentul fibrelor de in s-a dovedit a fi complex. Acesta este influențat o serie de factori, cum ar fi, compoziția bio-chimică, vârsta fibrei testate, condițiile ambientale de încercare, etc. Curbele caracteristice obținute pe astfel de fibre sunt în general tri-liniare (Figura 2); au fost obținute, în câteva cazuri și curbe liniare sau bi-liniare [33–35].

Consensul general este că prima porțiune este liniar-elastică, a doua prezintă un comportament viscos, elastic și plastic, iar a treia este din nou liniară [33]. Testele de lungă durată au arătat existența acestui comportament viscos al fibrelor elementare (Figura 3) [36].

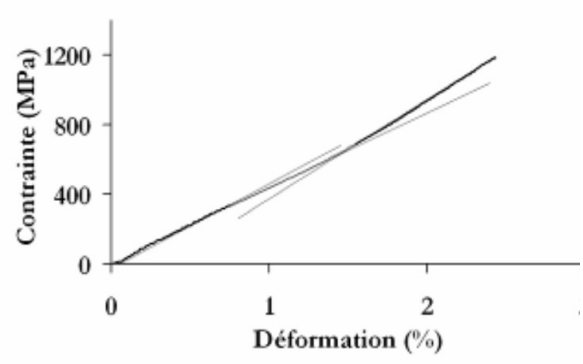


Figura 2 : Curbă caracteristică tri-liniară

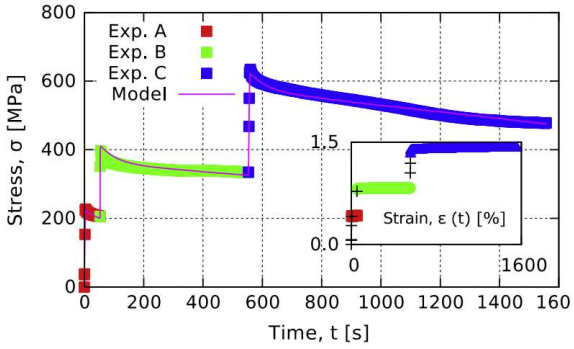


Figura 3 : Test de relaxare pe o fibră de in [36]

1.4.4 Mecanisme legate de comportamentul fibrelor

Explicația completă a acestui tip de răspuns este încă la nivel de studiu. Cu toate acestea, mecanismele principale au fost identificate ca fiind produse de orientarea elicoidală a celulozei [37]. În timpul încărcării, micro-fibrilele tind să se de desfășoare în sensul forței. Urmările sunt, pe de-o parte, o zonă de tranziție, în care rigiditatea fibrei crește, dar și o reorganizare a matricei de hemiceluloză, produsă de mișcările micro-fibrilelor [38].

1.5 Rășina epoxidică

Rășina epoxidică joacă rol de matrice în compozit.

Matricea, în general, asigură coeziunea materialului, transmite eforturile în material și de protejează fibra.

Rășina epoxidică este printre cele mai utilizate matrice ale materialelor armate cu fibre. Este o matrice termorigidă (nu poate fi topită odată reticulată), consacrată în industria materialelor compozite, cu o capacitate de impregnare ridicată, cu înaltă stabilitate mecanică și termică [39].

Este o matrice bi-componentă cu timp de reticulare variabil și temperatură de polimerizare redusă, conform rețetei alese. Deformația la rupere este de aproximativ 3-6%, iar umiditatea de saturație, de aproximativ 4-5% [40].

Aceste calități o fac ideală pentru armarea cu fibre vegetale.

Există tentative de rășini epoxidice 100% naturale, dar acestea au, încă, proprietăți mecanice prea scăzute pentru a fi viabile.

1.6 1.6 Compozitele fibră de in – rășină epoxy

Proprietățile mecanice ale compozitului sunt dictate de materialele constituante, organizarea lor și proporția lor. În cazul compozitelor armate cu fibră de in s-au constat proprietățile cele mai ridicate, in raport cu alte materiale cu armare vegetală, pe o plajă ridicată de procentaj de fibră/matrice.

Curba caracteristică este, în general bi-liniară, cu o zonă numită convențional "cot", unde are loc tranziția modulului de elasticitate (Figura 4). În câteva cazuri a fost constatată și evoluția tri-liniară, similară fibrei, la viteze scăzute de încărcare sau temperaturi ridicate de încercare [41, 42].

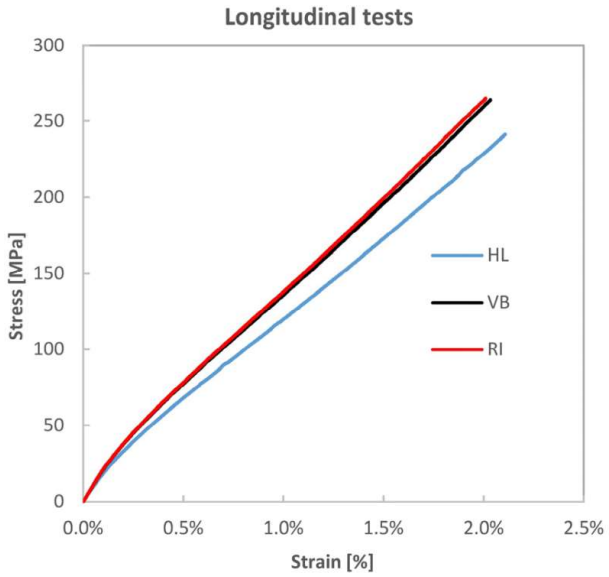


Figura 4 : Curba caracteristică pentru compozite armate cu fibră de in [42]

Similar fibrei, a fost teoretizat că această evoluție bi-liniară este cauzată de un comportament viscos. Puținele teste identificate în literatură cu timpul ca parametru au reușit să întărească această teorie : teste de rupere cu diferite viteze de încărcare, teste ciclice, cu diferite viteze de încărcare [42, 43]. Tot la acest subiect, autorul tezei a efectuat, înainte de studiul actual, o serie de teste de fluaj care au pus în evidență comportamentul viscoelastic și viscoplastic [44].

Răspunsul viscos al materialelor armate cu fibră de in induc și proprietăți ridicate de absorbție a vibrațiilor și sunetelor, superioare compozitelor cu fibre sintetice [45, 46].

1.7 1.7 Viscoelasticitate

De manieră generală, termenul de viscoelasticitate se referă la o deformație variabilă în timp. Spre exemplu, într-o încercare de fluaj, Figura 5, în timpul încărcării și descărcării, considerate bruște, apare un răspuns instantaneu (deformație elastică), dar în perioada

menținerii sarcinii (testul propriu-zis) și după eliminarea sa (perioada de revenire), apare o deformație variabilă în timp. După o perioadă de revenire suficient de lungă, materialul revine la forma sa inițială [47], adică are un răspuns viscoelastic.

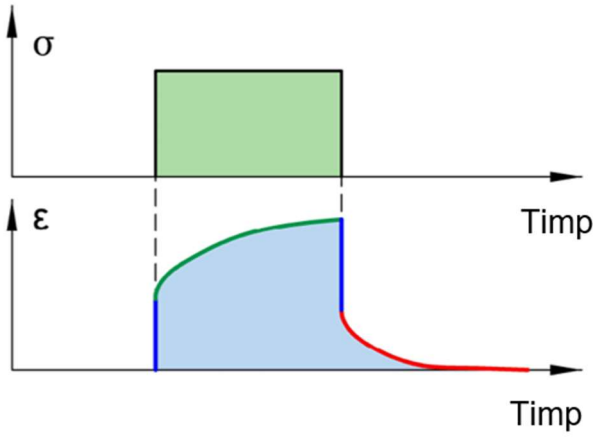


Figura 5 : Schematizarea unei încercări de fluaj-revenire

1.7.1 Viscoelasticitate liniară

În cazul in care deformația viscoelastică este proporțională cu tensiunea aplicată, (1), domeniul se numește liniar, iar factorul de proporționalitate, $D_{(t)}$, se numește complianță tranzitorie. Modelarea se face prin intermediul modelelor reologice, ansambluri echivalente de resorturi și de amortizoare. Astfel, se poate vorbi de modelele de bază, ale lui Maxwell și Kelvin-Voigt, modele mai dezvoltate, cele ale lui Zener și Burger și modelul cel mai general, dezvoltarea in serie Prony, (2). Formele lor sunt, de obicei, adaptate pentru modelarea unor teste de fluaj sau de relaxare, unde fie tensiunea, fie deformația sunt menținute constante.

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

$$D_{(t)} = \sum_{i=1}^{n} D_i\left(1 - \mathrm{e}^{-\lambda_i t}\right) \tag{2}$$

unde λ_i reprezintă inversul timpului de relaxare „i”, iar D_i, complianța corespunzătoare acestui timp.

Aceste modele pot fi implementate în integrala lui Boltzman, (3), forma modelării liniare pentru cicluri de încărcare oarecare.

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

1.7.3 Viscoelasticitate neliniară

În cazul nerespectării proporționalității dintre tensiune și deformația tranzitorie, se poate vorbi de un domeniu neliniar. Modelele sunt, de cele mai multe ori, sub formă integrală. Dintre acestea, cel mai de succes s-a dovedit a fi cel propus de Schapery, (4), care, pentru a trece de la domeniul liniar la neliniar, introduce patru parametri de neliniaritate,

notați aici g_0, g_1, g_2 si a_σ [48]. Ei sunt dependenți de tensiune, dar pot avea și alți factori de influență (umiditate, temperatură, vârsta materialului etc.).

$$\varepsilon_{(t)} = g_0 D_0 \sigma + g_1 \int_0^t \Delta D_{(\psi-\psi')} \frac{d g_2 \sigma}{d\tau} d\tau \quad (4)$$

cu $\psi = \int_0^t \frac{dt}{a_\sigma} d\tau$ reprezentând timpul redus

1.7.4 Viscoplasticitate

Practica a arătat că, în cazul unor materiale, deformațiile tranzitorii nu sunt eliminate după eliminarea sarcinii. Există, așadar, deformații plastice. Studiile experimentale au arătat că acestea pot depinde de timpul de aplicare a sarcinii, fiind, deci, de natură viscoplastică [49, 50].

Modelele capabile să țină cont de acestea nu sunt numeroase, putând fi citate aici, in mod special, două : o particularizare a modelului lui Schapery, în care se consideră că timpul de revenire este infinit [51] și modelul lui Zapas-Crissman, (5) [52, 53].

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

Este de notat că majoritatea materialelor ce prezintă viscoplasticitate prezintă de asemenea si viscoelasticitate, iar modelarea celor două este analizată în paralel, abordare ce va fi urmată și în prezenta teză.

1.8 Concluzii

Prin intermediul capitolului de studiu bibliografic a fost analizat potențialul materialelor compozite cu armare vegetală de a fi utilizate în aplicații structurale, cu înclinare către materialul ales, un compozit fibra de in – rășină epoxidică. A fost prezentată utilizarea acestui material, împreună cu provocările de trecut pentru implementarea sa în aplicații structurale.

Dintre elementele puțin înțelese, se numără comportamentul în timp, sub acțiunea unei sarcini, comportament ce a fost ales spre analiză și modelare.

Deși astfel de modelări nu au fost făcute pentru materialul ales, în bibliografie au fost găsite studii de analiză și modelare a comportamentului pentru alte materiale compozite armate cu fibră, ce prezintă un punct de plecare pentru studiul materialului armat cu fibră de in.

Capitolul 2: Fabricarea și caracterizarea mecanică a compozitului cu fibră de in

2.1 Introducere

În capitol sunt abordate procedura de fabricare a compozitului și a eșantioanelor, caracterizarea mecanică a materialului pe direcția fibrei și o serie de teste de încărcare-descărcare, cu viteză de încărcare și tensiune maximă variabile.

2.2 Fabricarea materialului și a epruvetelor

Materia primă este furnizată sub formă de rulouri de fibră de in unidirecțională, impregnată cu o rășină epoxidică [54].

Procesul de fabricare implică decuparea, din rulouri, a laminelor, aranjarea lor într-o matriță și supunerea la un ciclu de coacere de 130°C și 3 bari, timp de 60 minute. În urma acestui ciclu, plăcile rezultate sunt supuse la o post-coacere la 130°C pentru o oră, în scopul asigurării reticulării complete a rășinii și a eliminării posibilelor tensiuni interne cauzate de coacere.

S-au obținut, astfel, plăci rectangulare, de 280x280 mm, cu 15 lamine, ce asigură o grosime aproximativă de 2 mm. Din ele au fost decupate cu laser epruvetele, de dimensiuni 250x25x2 mm.

Dimensiunile epruvetelor au fost măsurate și un control al compoziției a fost efectuat. S-a obținut că materialul compozit conține 46,6 ± 0,8 % fibră, 42,53 ±1,8 % rășină și 10.81 ±1.3 % goluri.

Eșantioanele au fost echipate cu plăcuțe din aluminiu în zona de prindere în bacuri (Figura 6) și supuse timp de 7 zile la un ciclu de condiționare, la o temperatură de 23°C și umiditate de 50%.



Figura 6 : Epruvetă echipată cu plăcuțe din aluminiu

2.3 Încercări de caracterizare mecanică

Un lot de 5 epruvete decupate din aceeași placă au fost supuse unui test de tracțiune până la rupere.

În acest scop au fost folosite o mașină de încercări universală, Instron 8872, pentru aplicarea sarcinii și mărci tensometrice HBM LY18-6/120 pentru citirea deformației. Mărcile au fost conectate în punte completă Wheatstone, iar semnalul produs a fost înregistrat cu un sistem de achiziții HBM MX840B. Una din epruvete a fost dotată cu un set de mărci transversale, în scopul determinării coeficientului lui Poisson.

Viteza de încărcare a fost aleasă de 10 kN/min, în scopul reducerii efectelor alunecării în bacuri, iar frecvența de eșantionare de 10 Hz.

Cu toate că au fost echipate cu plăcuțe metalice, majoritatea epruvetelor au cedat în zona prinderii, cu rupturile propagându-se pe toată lungimea. Consecința este o subevaluare a tensiunii de rupere, valoare neimportantă pentru studiile ulterioare din această teză.

Se remarcă o curbă caracteristică neliniară, Figura 8, constată des în literatura de specialitate pentru compozitele armate cu fibră de in. Este asociată unei evoluții bi-linare, cu două module de elasticitate, E1 și E2 și un punct de tranziție între cele două, cotul.



Figura 7 : Cedarea unei epruvete

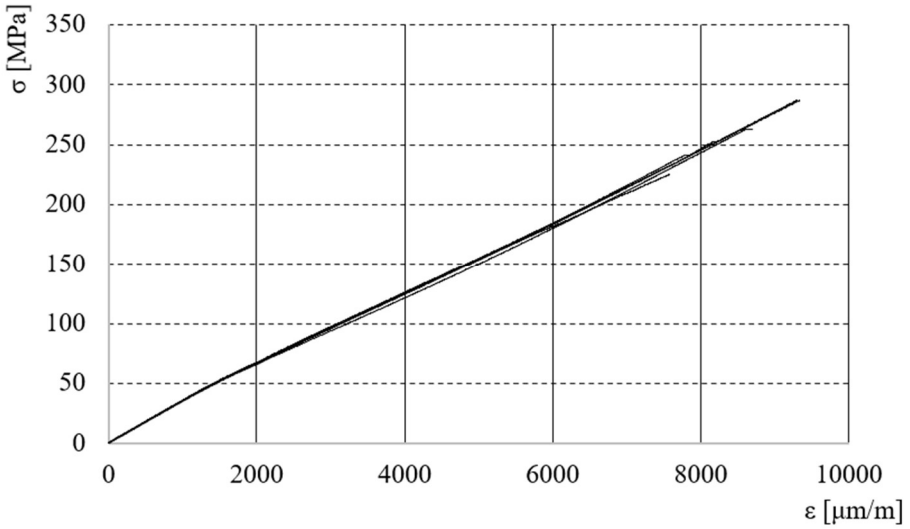


Figura 8 : Curbele caracteristice rezultate în urma testului de tracțiune

Pentru calculul acestor informații a fost aplicată o metodă de regresie liniară pe fiecare din cele două porțiuni, ce au produs două drepte. Panta lor reprezintă cele două module, iar intersecția, coordonatele cotului, Figura 9.

Proprietățile rezultate sunt prezentate în Tabelul 2.

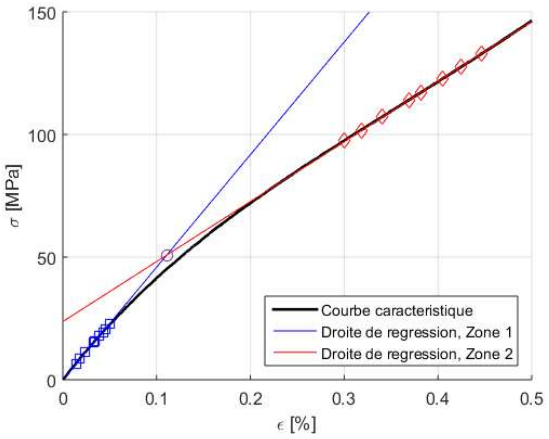


Figura 9 : Schematizare a regresiei liniare

Tabelul 2 : Proprietățile mecanice ale compozitului încercat

Proprietate	Medie	Deviație standard
E1 [GPa]	35.00	0.594
E2 [GPa]	28.72	0.322
v [-]	0,371	-
ε_{cot} *[%]*	0.133	0.032
σ_{cot} *[MPa]*	47.69	10.85
ε_{max} *[%]*	0.852	0.082
σ_{max} *[MPa]*	260.44	27.65

2.4 2.4 Încercări de încărcare-descărcare cu diferite viteze

Un material cu comportament viscos prezintă deformații în timp din momentul încărcării cu o sarcină. Drept urmare, în acest subcapitol, se dorește a se evalua acest comportament în timpul încărcării, prin varierea vitezei cu care sarcina este aplicată.

Astfel, o serie de teste de încărcare cu diferite viteze, urmate de revenire au fost efectuate pe trei epruvete provenite din aceeași placă. Tensiunea a fost aleasă de 80 MPa, deasupra cotului. Între testele propriu-zise au fost introduse cicluri de încărcare la o tensiune sub cot, de 30 MPa, cu scopul evaluării integrității epruvetei, Figura 10 [55].

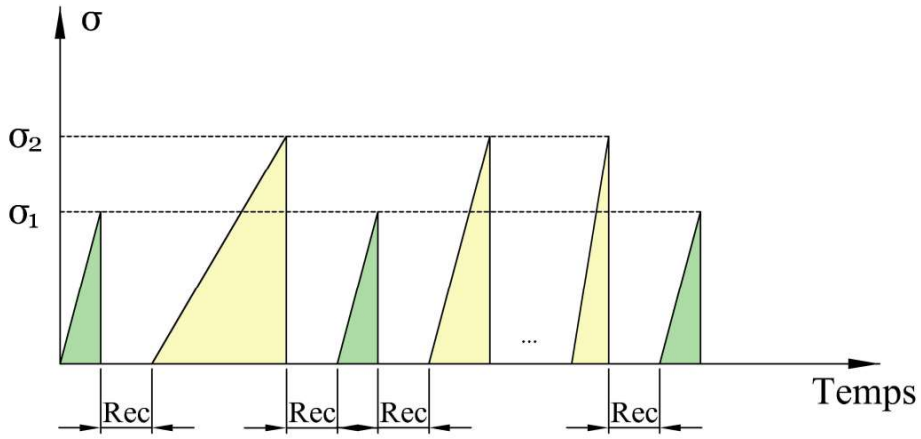


Figura 10 : Schema procedurii de încercare cu diferite viteze de încărcare

Rezultatele obținute pentru una din epruvete, prezentate în Figura 11, arată existența comportamentului viscoelastic, prin variația deformațiilor în perioada revenirii, dar și a unui răspuns plastic la primul ciclu.

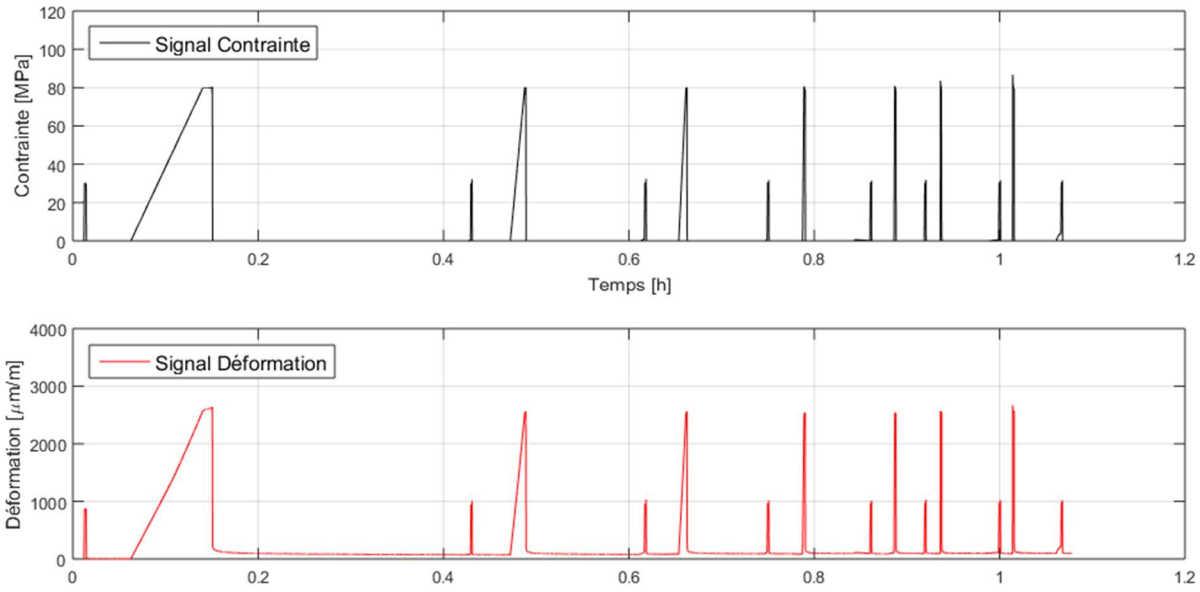


Figura 11 : Rezultatele obținute pentru una din epruvete

Suprapunerea curbelor de încărcare arată tendința de rigidificare a epruvetei, odată cu creșterea vitezei, dar și depășirea tensiunii impuse de la viteza de 100 kN/min, Figura 12.

Calculul modelor secante la 30 MPa și la 80 MPa, Figurile 13 și 14, arată o influență scăzută a vitezei înaintea cotului și importantă după depășirea sa.

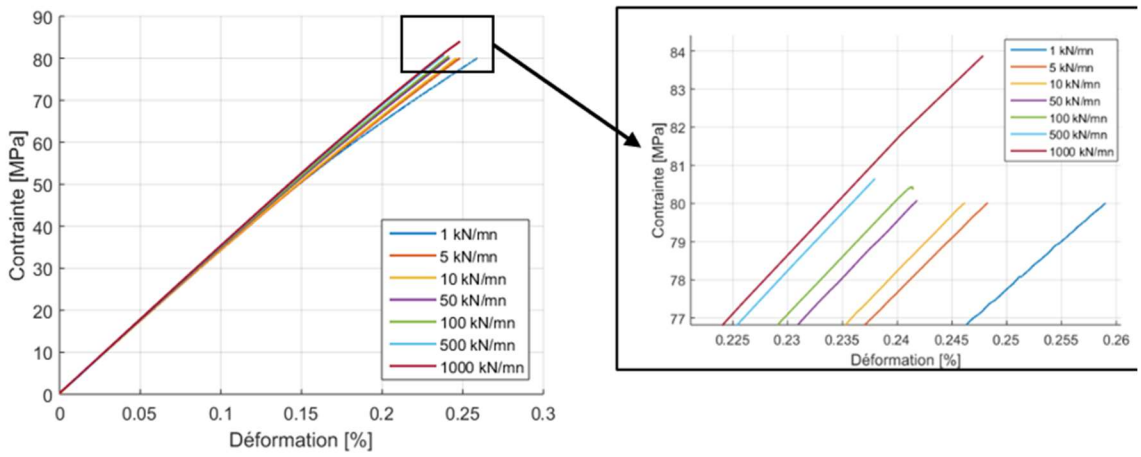


Figura 12 : Suprapunerea fazelor de încărcare cu diferite viteze

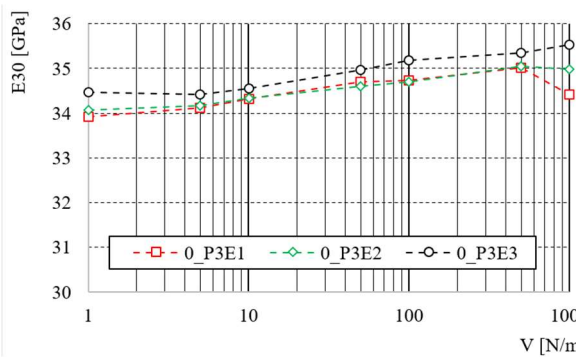


Figura 13 : Modulul secant la 30 MPa

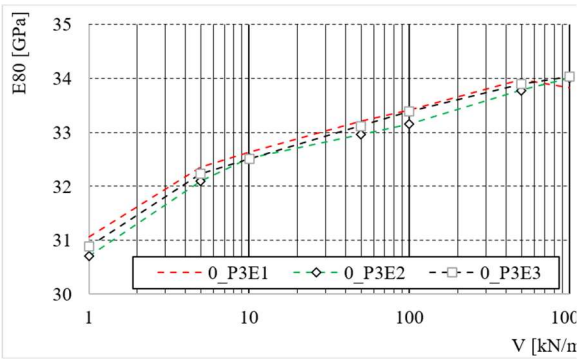


Figura 14 : Modulul secant la 80 MPa

2.5 Încercări de încărcare-descărcare la diferite tensiuni

Ultima serie de experimente prezentată în acest capitol a avut ca obiectiv determinarea influenței tensiunii aplicate asupra degradării materialului la diferite niveluri de tensiune. Testele au fost de încărcare cu tensiune maximă variabilă, urmată de o perioadă de revenire. În urma ciclului, un test de evaluare a fost efectuat, pentru determinarea modulului de elasticitate.

Testul a fost făcut pe cinci epruvete, provenite din aceeași placă.

Rezultatele au arătat că există o degradare a materialului, odată cu atingerea tensiunii de 150 MPa, audibilă în timpul încărcării, dar efectele sale nu se răsfrâng asupra modulului de elasticitate, ci asupra deformațiilor plastice.

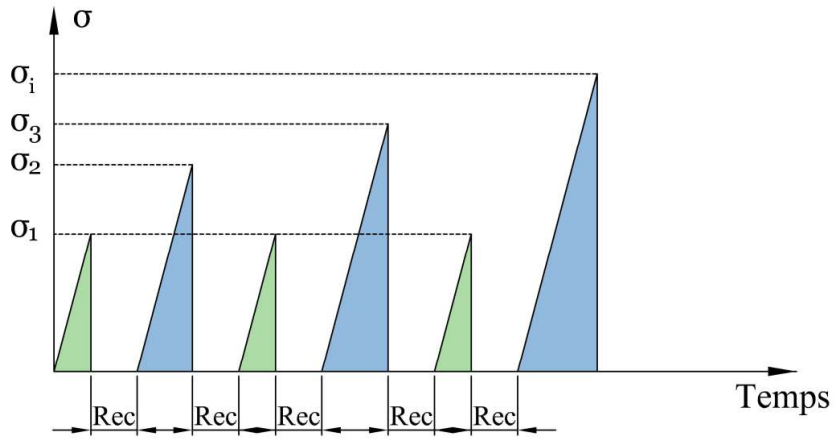


Figura 15 : Schema procedurii de încercare cu diferite viteze de tensiuni maxime

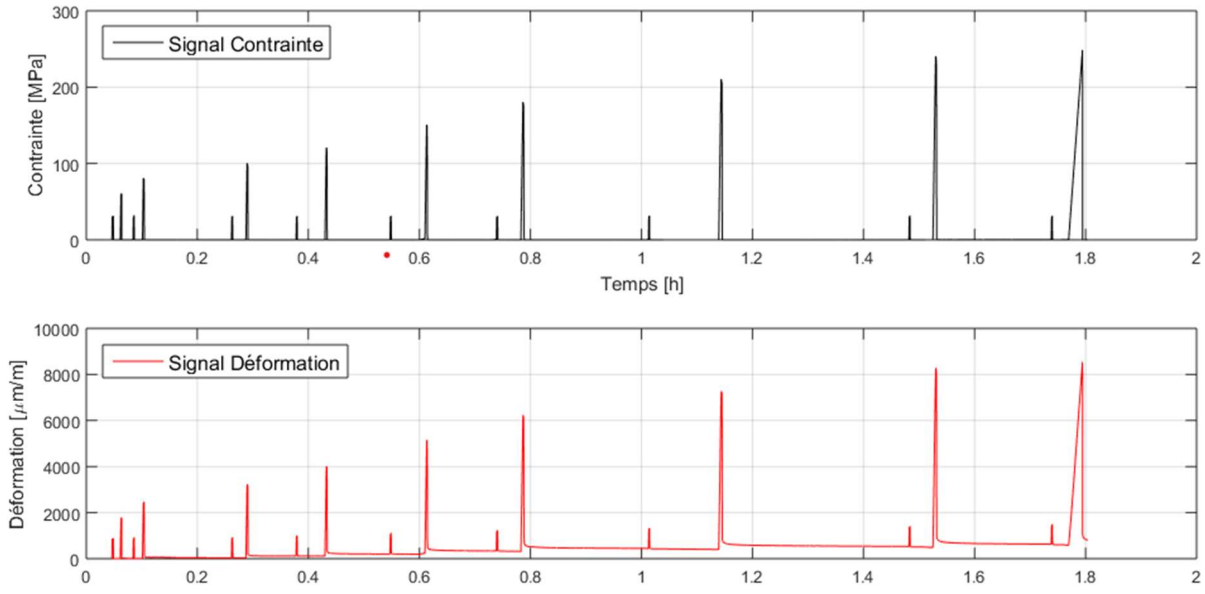


Figura 16 : Rezultatele obținute pentru una din epruvete

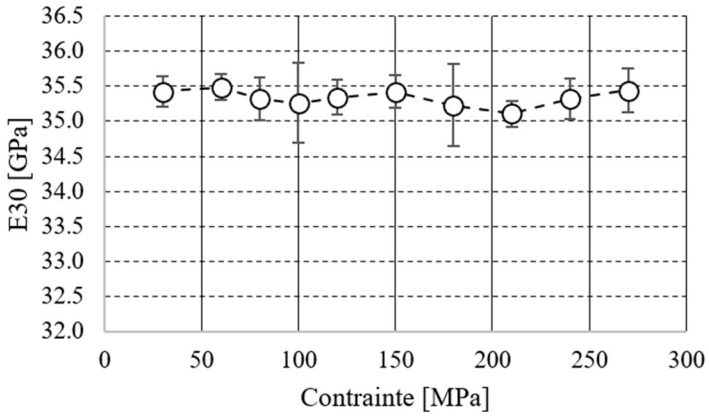


Figura 17 : Modulul secant la 30 MPa în funcție de tensiunea maximă a încercării

2.6 Concluzii

Rezultatele prezentate în acest al doilea capitol au permis identificarea proprietăților mecanice ale materialului, pe direcția de încărcare a fibrei și a unor informații legate de tensiunile și vitezele ce pot fi aplicate în testele de fluaj, teste ce permit cuantificarea deformațiilor viscoase. Astfel, s-a constatat că o viteză de 50 kN/min reprezintă un compromis pentru perioada de încărcare în fluaj și că, pentru evitarea degradării, ar trebui să se păstreze un nivel inferior a 150 MPa.

Capitolul 3: Teste de caracterizare visco-elastoplastică

3.1 Introducere

În acest capitol sunt prezentate experimentele de fluaj – revenire prin intermediul cărora sunt evaluate caracteristicile viscoase ale materialului.

3.2 Încercări preliminarii

3.2.1 Conceperea încercărilor preliminarii

Au fost efectuate, pentru început, trei teste de fluaj – revenire prin intermediul cărora să se poată stabili parametrii necesari în testele de caracterizare. Astfel, au fost alese două niveluri de tensiune, unul înainte de cot, la 30 MPa și altul după, la 100 MPa și durate de timp de fluaj de nivelul orelor.

S-a dorit o durată de timp rezonabilă pentru experimente, mai ales din cauza perioadei de revenire, care s-a dorit a fi inferioară a 48 h.

3.2.2 Aparatură

Încercările au fost făcute pe un dispozitiv cu pârghii (Figura 18), iar citirea deformațiilor cu seturi de mărci tensometrice montate în punte completă Wheatstone, discutate deja în capitolul anterior.

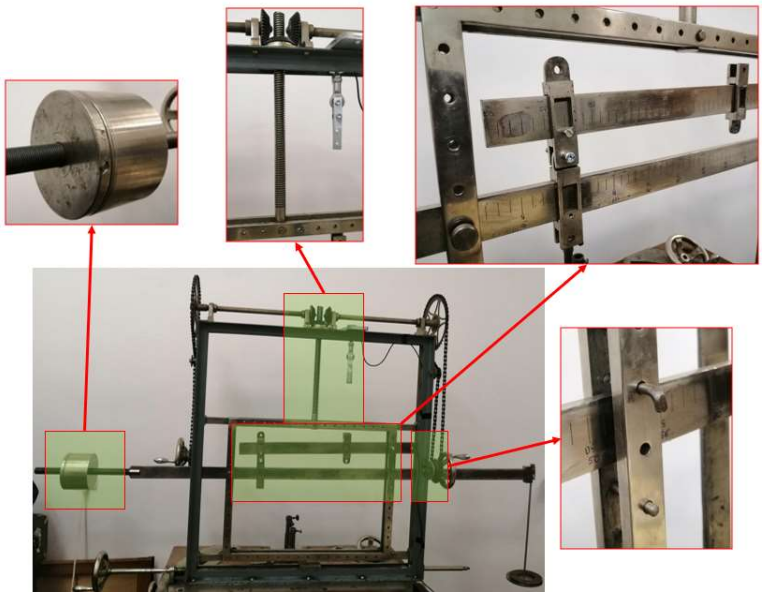


Figura 18 : Dispozitivul de testare cu pârghii utilizat

Sarcina aplicată a fost citită cu un traductor de forță, montat în serie cu epruveta, în bacul superior al dispozitivului de încercare.

3.3.3 Rezultatele testelor preliminarii

S-a constat că la tensiunea de 30 MPa, există doar un răspuns viscoelastic, indiferent de durata de timp de fluaj, iar la nivelul de 100 MPa, răspunsul este viscoelastic și

viscoplastic, iar pentru teste ce depășesc trei ore, revenirea depășește 48 h. S-a decis, drept urmare, ca testele de caracterizare să se facă în înainte și după cot, iar durata de fluaj să fie de o oră, pentru a obține perioade de revenire sub durata impusă.

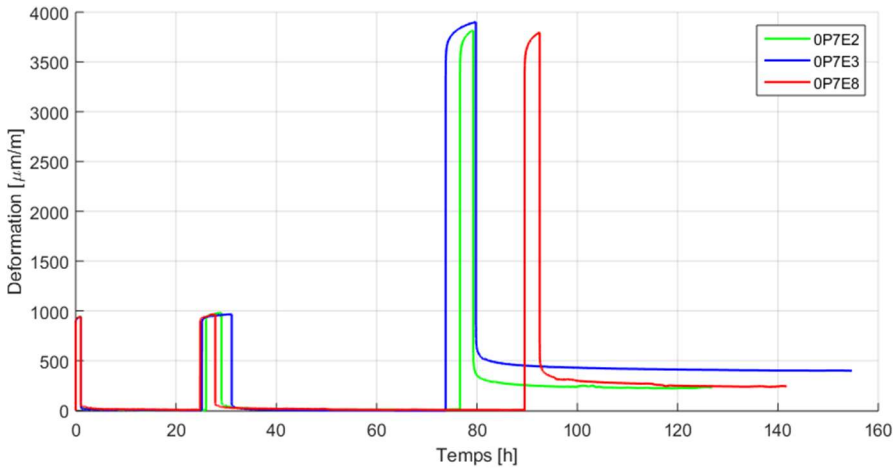


Figura 19 : Rezultatele testelor de fluaj-revenire preliminare

3.3 Teste de fluaj-revenire cu durată de fluaj variabilă

Scopul acestor teste a fost de a evalua influența timpului asupra comportamentului viscoelastic și, în special, a celui viscoplastic. Prin varierea timpului de fluaj, se obține o variație a deformațiilor plastice, măsurate la finalul fazei de revenire.

Cinci epruvete au fost supuse unei proceduri de testare de fluaj-revenire multi-ciclu, în care perioada de fluaj a crescut la fiecare ciclu cu o oră. Patru cicluri de testare au fost aplicate, cu durate de 1, 2, 3, respectiv 4 ore, iar tensiunea a fost de 80 MPa, Figura 20.

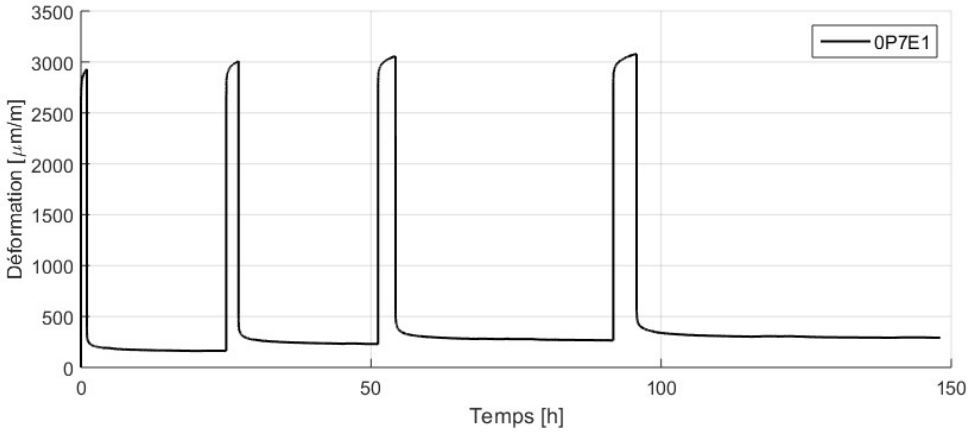
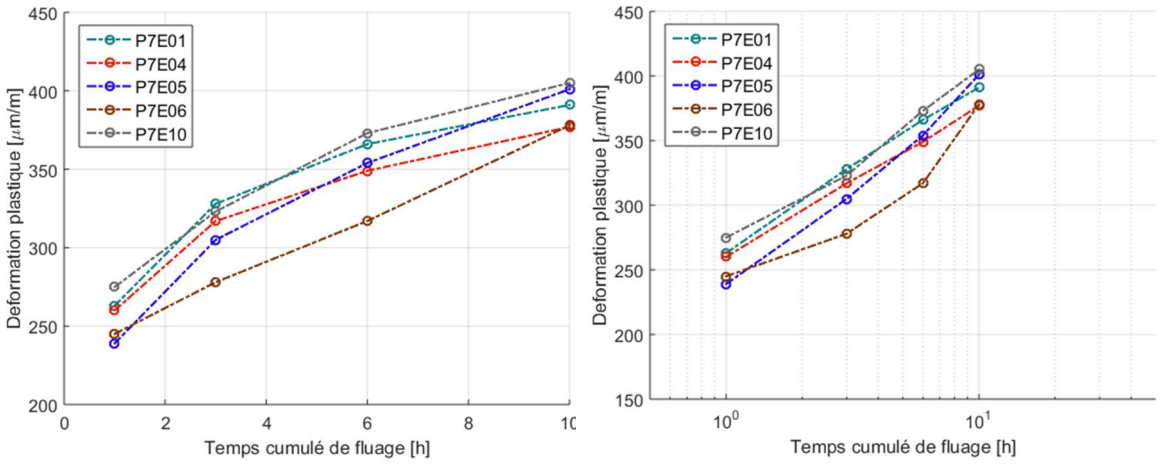


Figura 20 : Rezultatul unui test de fluaj-revenire cu durată de fluaj variabilă

S-a remarcat pentru toate cele cinci epruvete testate, o evoluție a acestor deformații viscoplastice. Mai mult, în scară logaritmică, evoluția în raport cu timpul total de fluaj (timpul cumulat) este liniară, ceea ce denotă o formă exponențială, cu exponent subunitar, Figura 21.



a) *b)*

Figura 21 : Deformațiile plastice în raport cu durata cumulată de fluaj : a) scară liniară ; b) scară logaritmică

3.4 Teste de fluaj – revenire cu tensiune variabilă

Al doilea set de teste de caracterizare viscoasă a avut ca variabilă tensiunea de fluaj, prin intermediul cărora s-a identificat influența nivelului de tensiune.

Cinci epruvete au fost supuse unei proceduri de testare multi-ciclu, cu patru cicluri în total, cu niveluri de tensiune de 30, 60, 80 și 100 MPa. Durata fazelor de fluaj a fost de o oră, cu excepția primei, care a fost de 3 h.

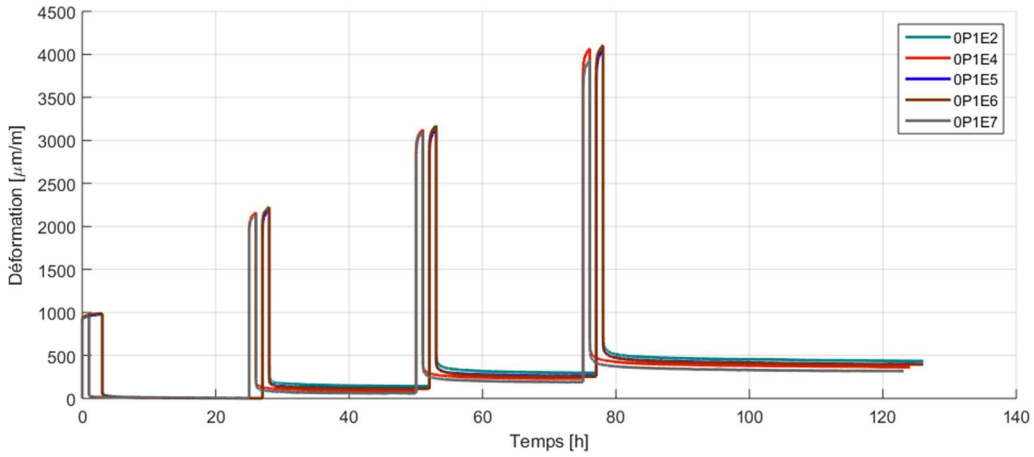


Figura 22 : Rezultatele testelor cu tensiune de fluaj variabilă

Pentru deformațiile viscoplastice, cu excepția primului ciclu, s-a constatat o evoluție liniară în raport cu tensiunea, Figura 23.

Pentru deformațiile viscoelastice, trasarea curbelor izocrone în fluaj și în revenire au scos în evidență variația neliniară în raport cu tensiunea, Figura 24.

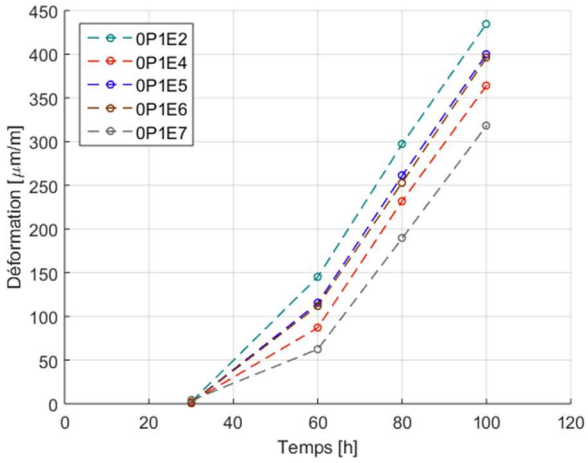


Figura 23 : Deformațiile viscoplastice în raport cu tensiunea de fluaj

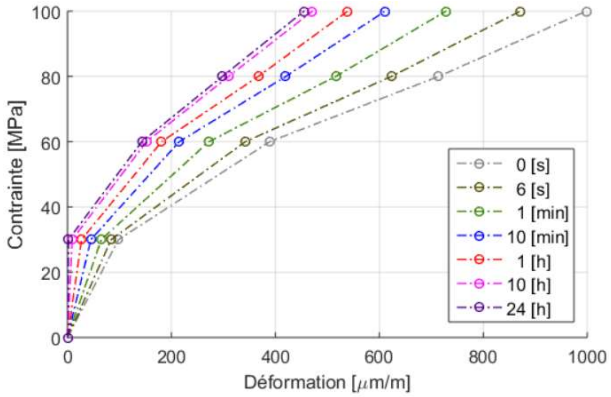


Figura 24 : Curbele izocrone în revenire

3.5 Concluzii

Testele prezentate în acest capitol au evidențiat și permis cuantificarea comportamentului visco-elastoplastic al compozitului cu armare de fibră de in. În continuare, ele servesc drept bază de date pentru identificarea legii de comportament.

Capitolul 4: Identificarea legii de comportament visco-elastoplastic

4.1 Introducere

În acest capitol sunt prezentate demersurile pentru identificarea legii de comportament și a parametrilor săi, pe baza datelor experimentale discutate în capitolul precedent. Având în vedere de comportamentul demonstrat de material, visco-elastoplastic, legea de comportament trebuie să fie capabilă să țină cont de ambele componente ale răspunsului. Astfel, a fost aleasă o combinație între modelul lui Schapery pentru viscoelasticitatea neliniară și al lui Zapas-Crissman, pentru viscoplasticitate.

4.2 Procedura de identificare a parametrilor

Cele două modele se prezintă, sub forma lor generală, ca integrale, care arată dependența deformației viscoase de istoricul de încărcare. Pentru identificarea parametrilor, aceste integrale trebuie rezolvate. Drept urmare, este necesar să se facă apel la cicluri de încărcare particulare.

Testele de fluaj-revenire sunt un ciclu de particularizare potrivit, întru-cât, sarcina este constantă și, deci, și parametrii de neliniaritate sunt constanți, ceea ce simplifică semnificativ integrarea.

4.2.1 Modelarea deformației viscoplastice

Deformația viscoplastică, s-a remarcat, depinde de timpul și de tensiunea din faza de fluaj. Prin variația primului factor și menținerea constantă a celui de-al doilea, integrarea modelului lui Zapas-Crissman duce la :

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

Unde C_{pl}, M și m sunt parametrii de model, iar t_f^i reprezintă durata de fluaj a ciclului „i" și σ – tensiunea de fluaj

În unor tensiuni diferite in perioade de fluaj de aceeași durată, integrarea duce la :

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

unde t_f este durata fazei de fluaj, iar σ_i tensiunea de fluaj a ciclului „i".

Suprapunerea ecuațiilor (6) și (7) cu datele obținute în testele cu durată, respectiv tensiune de fluaj variabilă, produce setul de parametri necesar modelării viscoplasticității. O procedură de optimizare a fost implementată pentru studiul de față.

În plus, pentru materialul studiat, datele experimentale au arătat o dependență liniară cu tensiunea, ceea ce a condus la implementarea unei tensiuni limită de apariție a deformațiilor plastice, σ_{seuil}, extrapolată din curbele experimentale. Astfel, se introduce noțiunea de tensiune echivalentă, σ_{eq} :

$$\sigma_{eq} = \sigma - \sigma_{seuil} \tag{8}$$

4.2.2. Modelarea deformației viscoelastice liniare

S-a discutat în primul capitol că modelul lui Schapery adaptează viscoelasticitatea în domeniul neliniar prin aplicarea a patru parametri de neliniaritate. Urmărind această logică, pentru identificarea parametrilor de viscoelasticitate, este nevoie, ca prim pas, de identificarea parametrilor de viscoelasticitate liniară.

În acest domeniu, parametrii de neliniaritate sunt egali cu 1. Pentru faza de fluaj, modelul devine :

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

iar pentru faza de revenire

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

Aceste două funcții pot fi suprapuse cu datele experimentale, (9) cu datele din fluaj, iar (10) cu datele din revenire, pentru a identifica parametrii de viscoelasticitate liniară.

4.2.2 Modelarea parametrilor de neliniaritate

Cei patru parametri de neliniaritate se determina din date experimentale la tensiuni ridicate. Cum aceștia sunt dependenți de tensiune, se pot identifica funcții de forma $f_{(\sigma)}$ să îi exprime. Trebuie menționat că funcția este valabilă doar în domeniul de tensiune analizat.

Pentru primul parametru, g_0, acesta de identifică din faza de încărcare :

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

Unde ε_0^1 și $\sigma_1$reprezintă deformația instantanee, respectiv tensiunea ciclului în domeniu liniar, iar ε_0^iși σ_i deformația instantanee și tensiunea din domeniul neliniar, la ciclul „i".

Al doilea parametru, g_1 se determină din raportul deformației viscoelastice în fluaj, $\Delta\varepsilon_f^i$, și cea din revenire, $\Delta\varepsilon_r^i$, pentru un ciclu oarecare „i":

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

În final, ultimi doi parametri, g_2 și a_σ, sunt identificați în același timp, prin proceduri de optimizare, a modelului adaptat fie pentru faza de fluaj (13), fie pentru faza de revenire (14).

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

$$\varepsilon_{r(t)}^i = g_1^0\left[g_2^\sigma\sigma\Delta D(\psi) - (g_2^0 0 - g_2^\sigma\sigma)\Delta D(\psi - \psi_f)\right] \qquad (14)$$

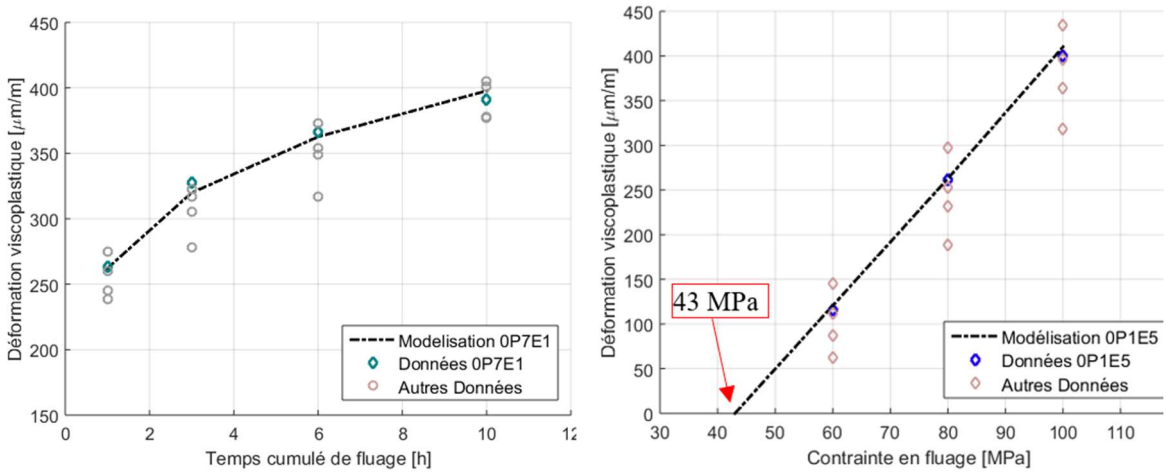
4.3 Rezultatele identificării parametrilor

Procedura de identificare a fost aplicată unui singur set de epruvete, cele medii, obținute din cele două tipuri de teste, cu durată și tensiune de fluaj variabile.

4.3.1 Parametrii modelului de viscoplasticitate

Extrapolarea curbelor experimentale a dus la identificarea unei limite de apariție a deformațiilor plastice de $\sigma_{seuil} = 43\ MPa$.

Procedura de optimizare (Figura 25) a produs parametrii modelului de viscoplasticitate : $C_{pl} = 7{,}13$, $M = 5{,}52$, $m = 0{,}18$.

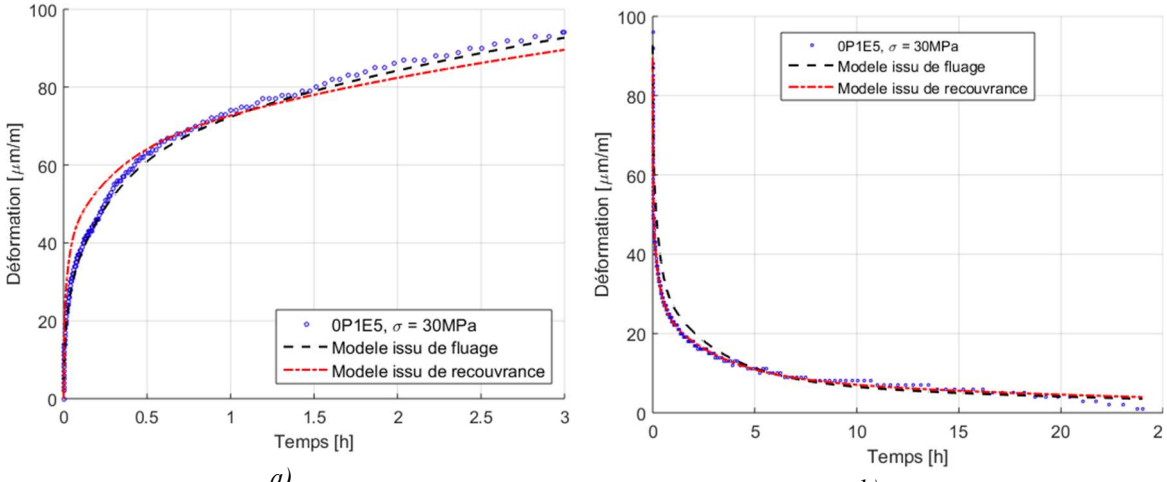


a) *b)*

Figura 25 : Modelarea deformațiilor viscoplastice în raport cu : a) durata cumulată de fluaj; b) tensiunea din fluaj

4.3.2 Parametrii modelului de viscoelasticitate liniară

Identificarea parametrilor din seria Prony a constat, pentru început, în determinarea unui număr optim de termeni. Astfel, a fost determinat că un set de 5 termeni reprezintă cea mai bună alegere pentru modelare, cu timpii de relaxare și, implicit, inversul lor aleși sub formă de multipli de 10. Identificarea a fost făcută, inițial, atât din fluaj, cât și din revenire, pentru comparare. A rezultat că setul de parametri din fluaj produce cele mai bune rezultate. Au fost determinați termenii prezentați în Tabelul 3.



a) *b)*

Figura 26 : Modelarea fazei de: a) fluaj ; b) revenire

Tabelul 3 : Parametrii modelului de viscoelasticitate liniară

D	λ	τ	Complianță
	$[s^{-1}]$	$[h]$	$[Pa^{-1}]$
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 Parametrii modelului de viscoelasticitate neliniară

Calculul parametrilor s-a făcut conform procedurii anterior discutate iar, cu ajutorul valorilor obținute, au fost identificate funcțiile de variație (15)-(18), (Figura 27):

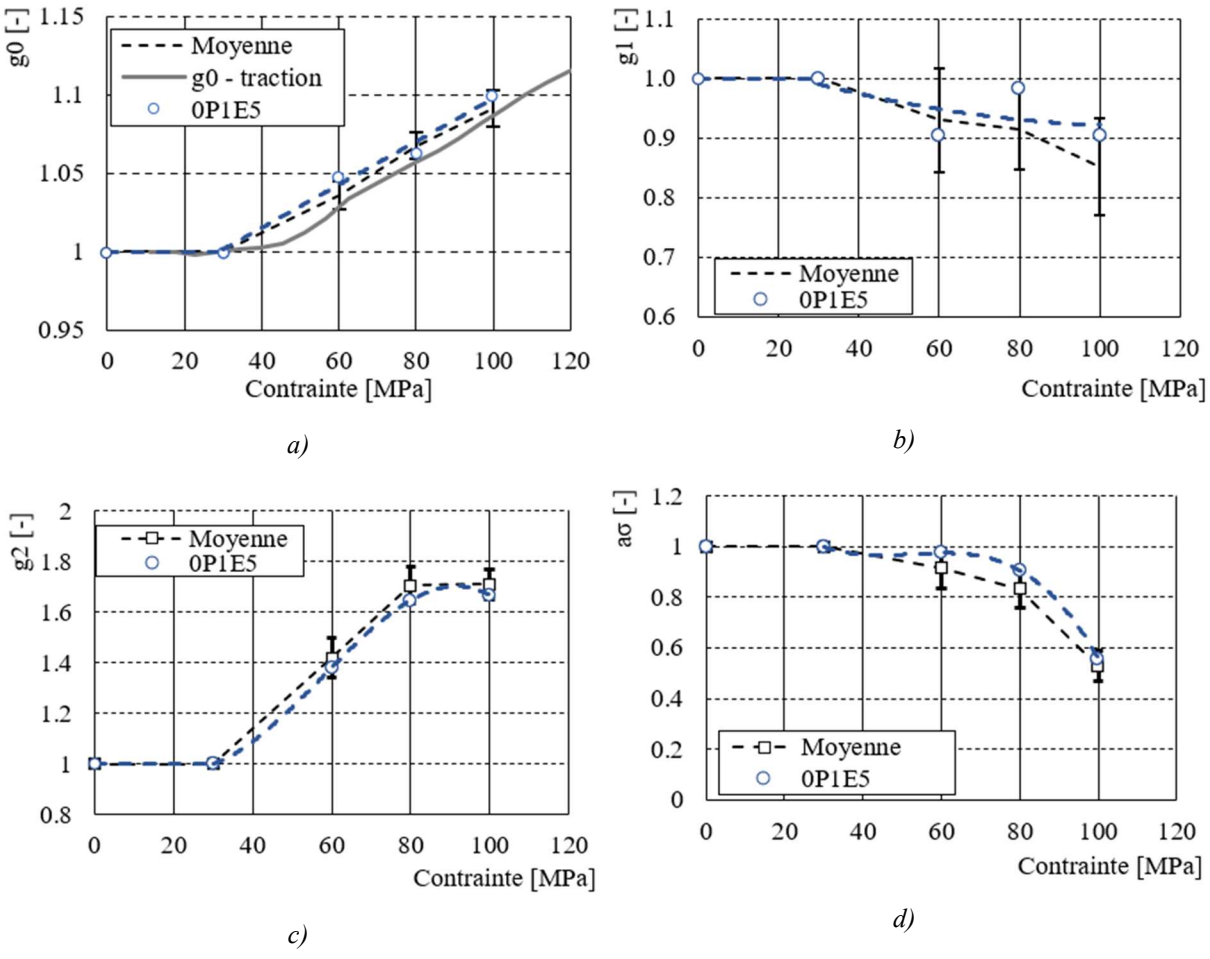


Figura 27 : Parametrii de neliniaritate : a) g_0, b) g_1 ; c) g_2 ; d) a_σ

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

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

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

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

4.4 Concluzii

În acest capitol au fost prezentate demersurile pentru identificarea legii de comportament și a parametrilor săi.

Capitolul 5: Formularea incrementală a legii de comportament

5.1 Introducere

În acest ultim capitol al tezei sunt discutate posibilitățile de modelare pentru alte cicluri de încărcare decât cele de fluaj-revenire.

5.2 Formularea incrementală a legii de viscoelasticitate neliniară

Așa cum a fost explicat în capitolul precedent, parametrii legii de variație au fost identificați pe baza unor cicluri de încărcare particularizate, respectiv cu menținerea constantă a tensiunii pe o durată de timp.

Pentru un ciclu de încărcare oarecare este necesară o nouă formă a modelului. Astfel, integrala din modelul lui Schapery este separată în două, respectiv deformația în timpul unui pas incremental și cea dinaintea pasului respectiv:

$$\varepsilon_{(t)} = g_0^t D_0 \sigma^t + g_1^t \left(\int_o^{t-\Delta t} \sum_{i=1}^{n} D_i (1 - \exp[-\lambda(\psi^t - \psi^\tau]) \frac{d g_2^\tau \sigma^\tau}{d\tau} d\tau + \int_{t-\Delta t}^{t} \sum_{i=1}^{n} D_i (1 - \exp[-\lambda(\psi^t - \psi^\tau]) \frac{d g_2^\tau \sigma^\tau}{d\tau} d\tau \right) \quad (19)$$

Această împărțire duce la o formă incrementală, recursivă, în care deformația la un timp t_i depinde de deformația de la timpul precedent, t_{i-1} și pasul de timp dintre cele două momente :

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

unde termenii cu indicele t se referă la pasul actual, iar cei cu $t - \Delta t$, la pasul precedent.

5.3 Formularea incrementală a legii de viscoplasticitate

Pentru rezolvarea integralei, tot de manieră incrementală, se face aproximarea că tensiunea este constantă în timpul pasului incremental. Se obține, astfel, pentru modelul lui Zapas-Crissman :

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

cu

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

5.4 Validarea modelului numeric

A fost folosit, pentru validare, ciclul de fluaj-revenire cu tensiune variabilă. Rezultatele arată o suprapunere foarte bună, atât a deformațiilor viscoplastice, cât și a cumulului cu cele viscoelastice, Figura 28.

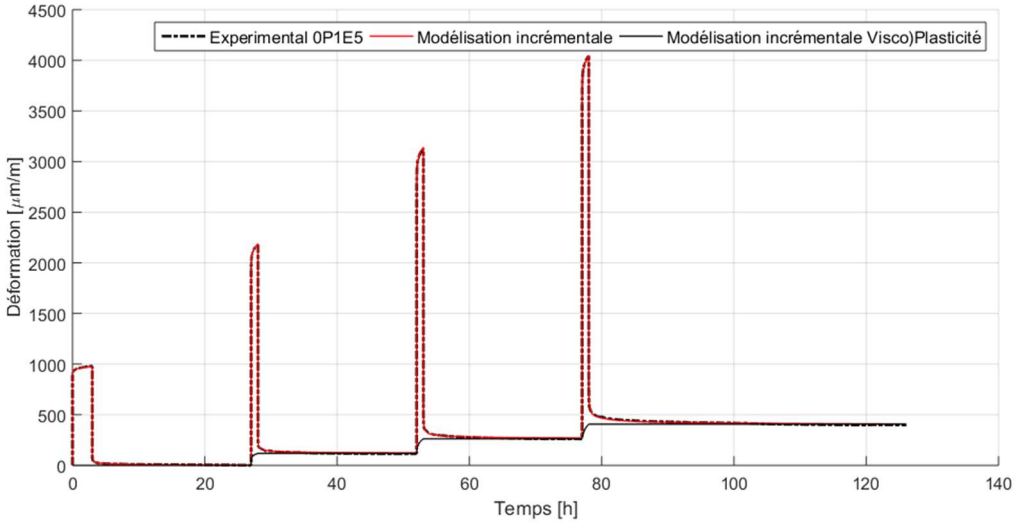


Figura 28 : Rezultatele modelării unui ciclu de fluaj-revenire

5.5 Simularea unui test de încărcare/descărcare cu viteză variabilă

A fost simulat unul din testele prezentate în al doilea capitol, cu viteze diferite de încărcare, în scopul determinării capacităților modelului numeric. Ciclurile de evaluare au fost eliminate din simulare, întru-cât ele nu au produs nici un efect asupra deformațiilor viscoplastice.

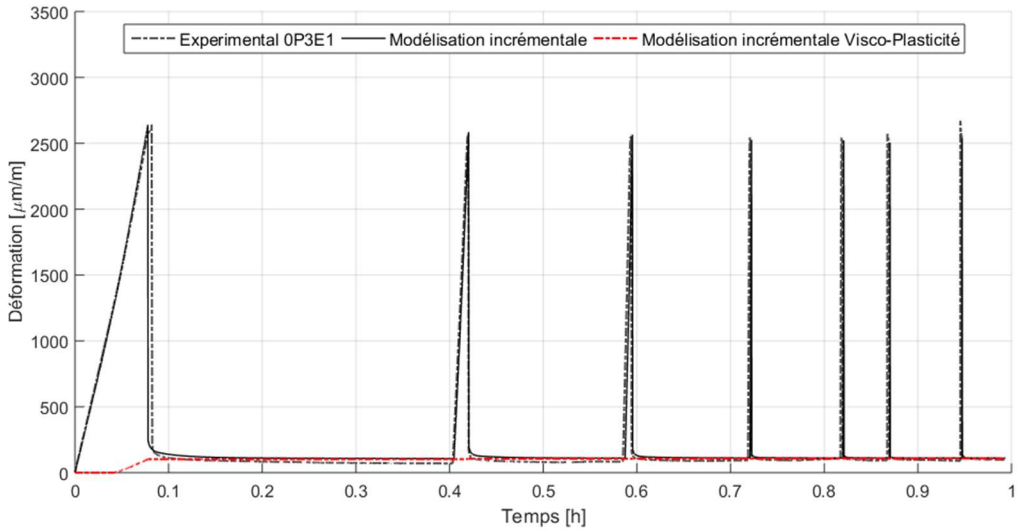
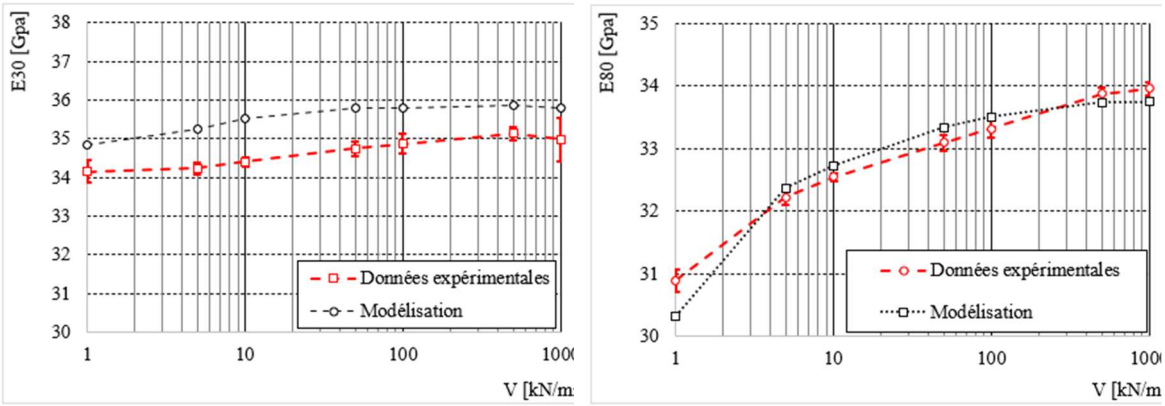


Figura 29 : Rezultatele modelării unui test de încărcare-descărcare cu diferite viteze

Rezultatele arată o suprapunere foarte bună, iar calculul modulelor secante, la 30 MPa și la 80 MPa urmează aceeași tendință, cu o lejeră supraevaluare, constantă, pentru modulul la 30 MPa.



a) *b)*

Figura 30 : Modulele secante de elasticitate la : a) 30 MPa ; b) 80 MPa

5.6 Simularea unui test de încărcare/descărcare cu tensiune variabilă

Un al doilea test prezentat în capitolul doi a fost simulat, cu eliminarea ciclurilor de evaluare și până la tensiunea maximă de 100 MPa, limita domeniului de tensiune analizat.

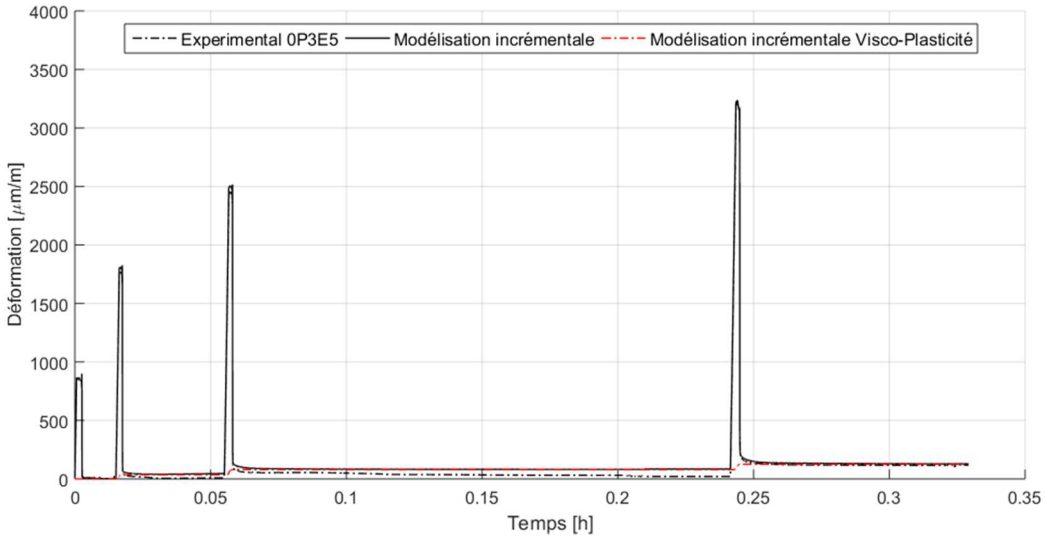
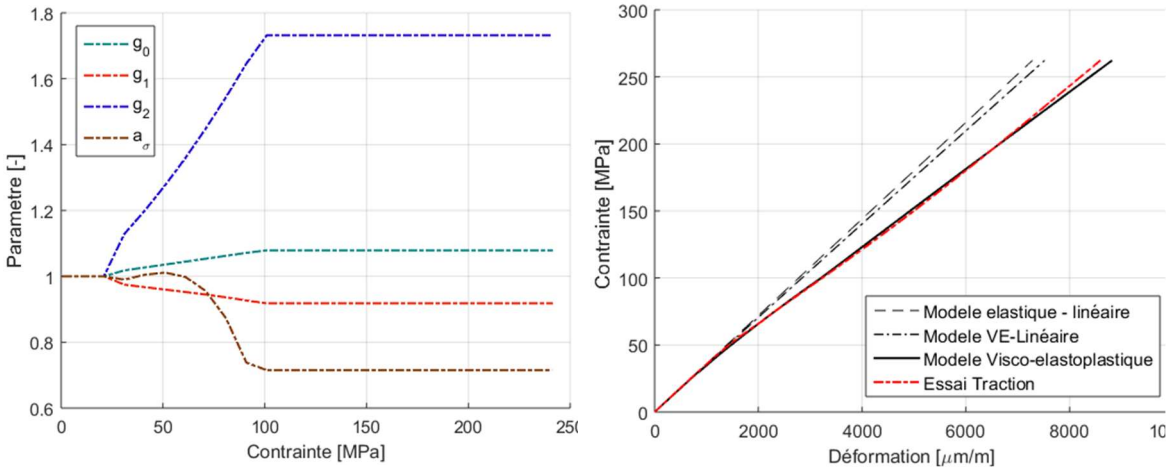


Figura 31 : Modelarea unui test de încărcare – descărcare cu tensiune variabilă

Și de această dată rezultatele numerice sunt foarte apropiate de cele experimentale, cu o lejeră supraestimare a deformației viscoplastice la al treilea ciclu de încărcare.

5.7 Simularea unui test de tracțiune

Cu toate că funcțiile parametrilor de neliniaritate sunt valabili în domeniul de tensiuni 0-100 MPa, o tendință a fost remarcată, de stabilitate la tensiunea superioară. Drept urmare, s-a emis ipoteza că, odată cu depășirea pragului de 100 MPa, parametrii de neliniaritate nu mai variază, ceea ce a permis extinderea domeniului de modelare, Figura 32 a.



b) *b)*

Figura 32 : a) Parametrii de neliniaritate în funcție de nivelul de tensiune ; b) Rezultatele modelării testului de tracțiune

Drept aplicație a fost simulat unul din test de tracțiune până la rupere, prezentat tot în capitolul 2. Au fost adăugate și modelarea liniar elastică și viscoelastică liniar pentru comparație, Figura 32 b.

Rezultatele arată clar că modelarea visco-elastoplastică este capabilă să modeleze cel mai bine curba caracteristică.

5.8 Concluzii

Modelarea numerică incrementală s-a dovedit a fi capabilă să modeleze diferite cicluri de încărcare. Mai mult, extrapolarea funcțiilor parametrilor de neliniaritate a permis o modelare rezonabilă și în afara domeniului de analiză, 0-100 MPa. Este un rezultat încurajator pentru modelări ulterioare în care și alte fenomene pot fi implicate (cum ar fi degradarea) și eventuale criterii de cedare a materialului.

Concluzii generale și perspective

După cum a fost discutat în conținutul tezei, interesul pentru materiale ecologice este în creștere. În domeniul celor compozite, se reflectă prin tentative de implementare a unor soluții vegetale, din care, compozitele armate cu fibră de in sunt cele mai promițătoare.

Cu toate acestea, necunoscutele legate de comportamentul în timp reprezintă o provocare de depășit. Studiul acestei teze s-a interesat, drept urmare, la acest comportament al materialelor compozite armate cu fibră de in, pe direcția de armare a fibrei. A fost studiat efectul sarcinii aplicate și a timpului de aplicare asupra răspunsului în timp al unui material fibră de in – rășină epoxidică.

Pentru a demara studiul, caracteristicile mecanice ale compozitului au fost determinate și o serie de teste de încărcare-descărcare, cu tensiune și viteză de încărcare variabile au scos în evidență caracterul viscos al materialului.

Caracterizarea acestui comportament, prin intermediul unor teste de fluaj-revenire multi-ciclu, a relevat existența atât a deformațiilor viscoelastice cât și viscoplastice, ambele dependente de nivelul de tensiune și de durata aplicării sale.

Aceleași rezultate experimentale au servit la identificarea legii de comportament visco-elastoplastic și a parametrilor săi.

În încheiere, legea a fost validată și utilizată pentru a modela numeric diferite cicluri de încărcare.

Perspectivele studiului sunt axate pe două mari linii, prima din ele, extinderea caracterizării pentru a implica și alte direcții ale laminelor, respectiv alți factori de influență (temperatură, umiditate etc).

Cea de-a doua linie de dezvoltare se referă la utilizarea modelului pentru calculul structurilor ce implică acest material, cum ar fi cele exemplificate în capitolul 1: cadre de bicicletă, elemente de caroserie etc.

Contribuții personale

1. Elaborarea unei analize a stadiului actual al cercetării privind compozitele cu armare „verde” , a comportamentului visco-elastoplastic și a modelării sale.
2. Elaborarea și aplicarea unei proceduri de caracterizare visco-elastoplastică (fabricare, echipare, condiționare a eșantioanelor etc) ;
3. Analiza influenței vitezei de încărcare asupra răspunsului viscos al materialului;
4. Analiza evoluției integrității structurale a epruvetei în raport cu sarcina aplicată;
5. Caracterizarea visco-elastoplastică a compozitului cu fibră de in pe direcția de armare;
6. Conceperea unui algoritm de calcul a parametrilor legii de comportament într-un domeniu sub limita de degradare;
7. Calculul parametrilor cu ajutorul datelor experimentale înregistrate;
8. Implementarea unei forme incrementale a legii de comportament visco-elastoplastică într-un cod numeric, în programul MatLab;
9. Validarea modelului pentru direcția analizată

Bibliografie

[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. Célino, 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, *Composities 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 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. Ramírez, *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, Unversité 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 Superieure de Mecanique et d'Aerotechnique.
[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.