



Thèse de doctorat présentée par

Henri Lansiaux

Pour obtenir le grade de **Docteur** de

L'Université de Lille

Discipline : Mécanique, Énergétique, Matériaux

Élaboration et caractérisation de renforts tissés 3D interlock chaîne en lin pour matériaux composites

École Doctorale des Sciences Pour l'Ingénieur (EDSPI)

Laboratoire de recherche : **Gemtex - Génie des Matériaux Textiles**

Soutenue le 13/11/2020, devant la commission d'examen :

Gilles HIVET	PU	Université d'Orléans	Président du jury
Karine CHARLET	MCF-HDR	Sigma Clermont	Rapporteur
Jean-Yves DREAN	PU	Université de Haute-Alsace	Rapporteur
Antoine BARBULÉE	Dr	DEPESTELE	Invité
Damien SOULAT	PU	ENSAIT	Directeur de thèse
François BOUSSU	PU	ENSAIT	Co-directeur de thèse
Ahmad-Rashed LABANIEH	MCF	ENSAIT	Co-encadrant

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes directeurs et encadrants de thèse : Damien SOULAT, François BOUSSU, Ahmad Rashed LABANIEH. Je souhaite également remercier l'ensemble des membres du jury : Karine CHARLET, Jean-Yves DREAN, Gilles HIVET et Antoine BARBULÉE

Un merci particulier à Lucas PUTIGNY pour ces longues heures à monter les machines et à tisser. Merci aux techniciens et ingénieurs : Sabine CHLEBICKI, Frederik VEYET, Valentin LAURENT, Guillaume LEMORT. Une pensée également aux autres doctorants/docteurs : Anne-Clémence, Anaëlle, Imen, Julie, Charles, Louis, Romain, Vivien et Charles.

Ainsi que les personnes m'ayant assisté dans mes travaux de recherche via les projets Sprint, projets SI et stages : Lisa, Anna, Anaïs, Wai Yee, Pierre et Gauthier.

Merci également aux partenaires du projet **FLAX3D**, à la région Hauts-de-France et à l'ADEME.

Enfin mes parents et grand-parents, ma famille et mes amis.

Table des matières

Introduction	1
1 Étude bibliographique	4
Introduction	5
1.1 Du champ au fil	5
1.1.1 Présentation générale du lin	5
1.1.2 Mise en œuvre des fibres	7
1.1.3 Classification des fibres naturelles	9
1.1.4 Propriétés en traction aux échelles fibres et mèches	9
1.2 Élaboration de matériaux composites à partir de composants biosourcés	12
1.2.1 Composition des matériaux composites	13
1.2.1.1 Structures de renfort textile	13
1.2.1.2 Matrices	15
1.2.2 Mise en œuvre des matériaux composites	18
1.2.2.1 Procédés de mise en œuvre	18
1.2.2.2 Mise en œuvre par thermocompression	20
1.2.2.3 Mise en œuvre des matériaux composites renforcés de fibres naturelles	20
1.2.3 Caractérisation des matériaux composites renforcées de fibre naturelles	21
1.2.4 Applications des matériaux composites renforcées de fibre naturelles	23
1.2.5 Dimensionnement des structures composites	25
1.3 Renforts tissés 3D interlock chaîne	27
1.3.1 Définition	28
1.3.2 Mise en œuvre	31
1.3.3 Caractérisation des renforts 3D interlocks chaînes	33
1.3.3.1 Caractérisation sèche	33
1.3.3.2 Caractérisation des tissus 3D interlock chaîne imprégnés	35
1.3.4 Applications	35
Conclusion	37

2	Étude des paramètres produits des structures 3D interlocks chaines	38
2.1	Matériels et méthodologie	39
2.1.1	Mise en œuvre du tissage	40
2.1.1.1	Ourdissage	40
2.1.1.2	Rentrage, piquage et attachage	41
2.1.1.3	Tissage	42
2.1.1.4	Découpe des éprouvettes	43
2.1.2	Méthodes de caractérisation des structures tissées	44
2.1.2.1	Densité chaîne et trame	44
2.1.2.2	Embuvage et retrait	44
2.1.2.3	Épaisseur et masse surfacique	45
2.1.2.4	Comportement en flexion	45
2.1.2.5	Comportement en traction	46
2.1.2.6	Comportement en compaction dans l'épaisseur	47
2.2	Influence du type de liage	47
2.2.1	Protocole expérimental	48
2.2.1.1	Choix des structures	48
2.2.1.2	Préparation au tissage	49
2.2.2	Résultats expérimentaux	50
2.2.2.1	Densités chaîne et trame	50
2.2.2.2	Embuvage et retrait	50
2.2.2.3	Épaisseur et masse surfacique	51
2.2.2.4	Comportement en flexion	52
2.2.2.5	Comportement en traction	53
2.3	Influence du nombre de couches	58
2.3.1	Protocole expérimental	58
2.3.1.1	Choix des structures	58
2.3.1.2	Préparation au tissage	59
2.3.2	Résultats expérimentaux	61
2.3.2.1	Densités chaîne et trame	61
2.3.2.2	Embuvage et retrait	62
2.3.2.3	Épaisseur et masse surfacique	63
2.3.2.4	Comportement en traction	64
2.4	Influence de la profondeur de liage	69
2.4.1	Protocole expérimental	70
2.4.1.1	Choix des structures	70
2.4.1.2	Préparation au tissage	70
2.4.2	Résultats expérimentaux	71
2.4.2.1	Densité chaîne et trame	71
2.4.2.2	Embuvage et retrait	72

2.4.2.3	Épaisseur et masse surfacique	72
2.4.2.4	Comportement en flexion	73
2.4.2.5	Comportement en traction	74
2.4.2.6	Comportement en compaction dans l'épaisseur	76
2.5	Influence de l'armure	77
2.5.1	Protocole expérimental	78
2.5.2	Résultats expérimentaux	78
2.5.2.1	Densités chaîne et trame	78
2.5.2.2	Embuvage et retrait	79
2.5.2.3	Épaisseur et masse surfacique	80
2.5.2.4	Comportement en flexion	81
2.5.2.5	Comportement en traction	81
2.6	Influence de la disposition des fils de chaîne de renfort	83
2.6.1	Protocole expérimental	83
2.6.2	Résultats expérimentaux	84
	Optimisation des procédés pour la réalisation de structures 3D interlock chaîne	85
3	Analyse multi-échelles associée aux renforts 3D interlocks chaînes	88
3.1	Optimisation des mèches en vue du tissage 3D interlock chaîne	89
3.1.1	Caractérisation des mèches	89
3.1.1.1	Composition chimique	90
3.1.1.2	Régularité et pilosité	90
3.1.1.3	Titrage	91
3.1.1.4	Torsion	91
3.1.1.5	Comportement en traction	92
3.1.1.6	Absorption en eau	93
3.1.2	Résultats de la composition chimique de la fibre de lin	93
3.1.3	Influence de la torsion	94
3.1.4	Influence de la teneur en eau	98
3.2	Détermination des caractéristiques des fibres par le protocole IFBT	102
3.2.1	Méthodologie	102
3.2.2	Réalisation des éprouvettes IFBT	103
3.2.3	Modules des éprouvettes composites	105
3.2.4	Détermination des modules des fibres	105
3.2.4.1	Loi des mélanges classique	106
3.2.4.2	Loi des mélanges incluant la porosité	106
3.2.4.3	Modèle de Madsen, basé sur les caractéristiques de la mèche	107
3.2.4.4	Modèle de Madsen, basé sur les caractéristiques des fibres	109
3.3	Étude des matériaux composites renforcés par des structures 3D interlock chaîne	112
3.3.1	Réalisation des éprouvettes	113

3.3.2	Méthodes de caractérisation	114
3.3.2.1	Fractions volumiques	114
3.3.2.2	Essai de traction	114
3.3.2.3	Essai de flexion trois points	114
3.3.2.4	Essai d'impact Charpy	115
3.3.3	Influence de l'armure de renfort sur les caractéristiques composites	116
3.3.3.1	Épaisseur et masse surfacique	116
3.3.3.2	Fractions volumiques	117
3.3.3.3	Comportement en traction	118
3.3.3.4	Comportement en flexion trois points	122
3.3.3.5	Comportement à l'impact Charpy	124
	Composite Lin/PLA obtenue par thermocompression	125
	Optimisation des procédés pour la réalisation de matériaux composites en lin	127
4	Investigation statistique relative aux tissus 3D interlocks chaines	130
4.1	Présentation des méthodes	131
4.1.1	Analyse en composantes principales	131
4.1.2	Régression des moindres carrés partiels	132
4.1.3	Classement PROMÉTHÉE II	132
4.2	Applications aux structures 3D interlock chaîne sèches	133
4.2.1	Analyse en composantes principales	133
4.2.2	Régression des moindres carrés partiels	135
4.2.3	Classement PROMÉTHÉE II	139
4.3	Applications aux structures résinées	141
4.3.1	Régression des moindres carrés partiels	141
4.3.2	Classement PROMÉTHÉE II	142
4.4	Applications multi-échelles	143
	Conclusions et perspectives	148
	Bibliographie	150
	Listes des conférences et publications	165
	Outils développés	167
	Structures tissées	171

Table des figures

1	Lin en fleur	2
1.1	Le lin, sa culture et son économie	6
1.2	Coupe transversale d'une tige de lin	7
1.3	Nature des renforts pour matériaux composites	10
1.4	Procédés de mise en œuvre des renforts textiles	14
1.5	Classification des matrices	15
1.6	Procédés de mise en œuvre des composites	19
1.7	Exemples de matériaux composites dérivés de la fibre de lin	20
1.8	GreenBoat FLAX27	24
1.9	BLACKBIRD GUITARS en cours de réalisation et après pose des cordes	24
1.10	Planche de surf Notox	25
1.11	Coupe transversale chaîne d'une structure 3D interlock chaîne	29
1.12	Classification des structures 3D interlock chaîne	29
1.13	Coupe schématique d'un métier à tisser	32
1.14	Machine à tisser destinée à la réalisation de structures épaisses	32
2.1	Ourdissoir SUZUKI NAS-5S	40
2.2	Rentrage, piquage et attachage	41
2.3	Échange d'un fil de trame par deux lances au cours du tissage	42
2.4	Ratière rotative permettant la sélection des cadres	43
2.5	Découpe des éprouvettes	43
2.6	Paramètres d'analyse d'un essai de traction tissu	47
2.7	Coupe chaîne des quatre structures étudiées	48
2.8	Lisière réalisée en fil de coton de faible titrage	49
2.9	Embuvage et retrait des quatre structures de la campagne #1	50
2.10	Épaisseur des quatre structures de la campagne #1	51
2.11	Masse surfacique des quatre structures de la campagne #1	51
2.12	Modules de rigidité en flexion des quatre structures de la campagne #1	52
2.13	Essai de traction sens chaîne de la structure AT 5 5-5 Sergé 6	53

2.14	Force à rupture par fils des quatre structures de la campagne #1	54
2.15	Déformation à rupture des quatre structures de la campagne #1	55
2.16	Pente à rupture des quatre structures de la campagne #1	56
2.17	Perte d'ondulation des quatre structures de la campagne #1	57
2.18	Représentation de l'évolution des fils de chaîne des cinq structures tissées.	59
2.19	Machine à tisser TTF	60
2.20	Densité trame des cinq structures de la campagne #2	61
2.21	Embuvement des fils de chaîne de liage en fonction de la densité trame	62
2.22	Épaisseur en fonction de la densité trame	63
2.23	Masse surfacique en fonction de la densité trame	63
2.24	Force à rupture en fonction de la densité trame	64
2.25	Force à rupture, rapporté au nombre de fils	65
2.26	Essai de traction, sens trame de la structure OT 3 1-3 Toile	66
2.27	Essai de traction, sens chaîne de la structure OT 3 1-3 Toile	67
2.28	Travail en sens chaîne de quatre structures de la campagne #2	67
2.29	Déformation à la rupture des structures de la campagne #2	68
2.30	Coupe transversale des trois structures étudiées	70
2.31	Embuvements et retraits des trois structures de la campagne #3	72
2.32	Épaisseur des trois structures de la campagne #3	72
2.33	Masse surfacique des trois structures de la campagne #3	73
2.34	Modules de rigidité en flexion, sens chaîne des trois structures de la campagne #3	73
2.35	Force à rupture des trois structures de la campagne #3	74
2.36	Déformation à rupture des trois structures de la campagne #3	74
2.37	Comportement en compaction des trois structures de la campagne #3	76
2.38	Carton des différents effets de sergé et satin de 4	77
2.39	Coupe transversale et représentation 3D des trois structures étudiées	78
2.40	Embuvement et retrait des quatre structures de la campagne #4	79
2.41	Épaisseur des quatre structures de la campagne #4	80
2.42	Masse surfacique des quatre structures de la campagne #4	80
2.43	Modules de rigidité en flexion, en sens chaîne, des quatre structures de la campagne #4	81
2.44	Force à rupture des quatre structures de la campagne #4	81
2.45	Déformation à rupture des quatre structures de la campagne #4	82
2.46	Différentes dispositions des fils de chaîne de renfort pour la structure OT 23 1-23 Toile	83
3.1	Capteur capacitif de l'Uster Tester 3	91
3.2	Retordeuse à anneaux TWISTEC 3	92
3.3	Paramètres d'analyse d'un essai de traction mèche	93
3.4	Courbe d'analyse thermogravimétrique d'une mèche de lin	94
3.5	Évolution du titre en fonction de la torsion de la mèche Lincore R500 2017	95

3.6	Irrégularité de la mèche en fonction de la torsion	96
3.7	Degré de pilosité de la mèche en fonction du niveau de torsion	96
3.8	Ténacité à rupture de la mèche en fonction du niveau de torsion	97
3.9	Déformation à rupture de la mèche en fonction du niveau de torsion	97
3.10	Pente à rupture de la mèche en fonction du niveau de torsion	98
3.11	Masse relative en fonction du temps d’immersion	99
3.12	Masse relative en fonction de la torsion à saturation	100
3.13	Coefficient de diffusion en fonction de la torsion	100
3.14	Force à rupture de la mèche en fonction du niveau de torsion	101
3.15	Presse chauffante renfermant le moule d’IFBT	103
3.16	Fractions volumiques des sept éprouvettes d’IFBT	104
3.17	Modules en traction des sept éprouvettes d’IFBT	105
3.18	Modules des fibres obtenus via la loi des mélanges classique	106
3.19	Modules des fibres obtenus via la loi des mélanges intégrant la porosité	107
3.20	Coefficient de performance de l’orientation des fibres η_0	108
3.21	Modules des fibres obtenus via le modèle de MADSEN, basé sur les caractéristiques de la mèche	109
3.22	Coefficient de performance de l’orientation des fibres η_0	110
3.23	Modules des fibres obtenus via le modèle de MADSEN, basé sur les caractéristiques des fibres	110
3.24	Comparaison des quatre modèles en fonction de la torsion	111
3.25	Infusion de la structure OL 5 3-4 Sergé 4 par la résine ELIUM 180	113
3.26	Système à choc pendulaire Instron CEAST 9050	115
3.27	Épaisseur sur la structure composite OT 5 3-5 Sergé 4	116
3.28	Épaisseur des six plaques composites	116
3.29	Masse surfacique des six plaques composites	117
3.30	Taux volumiques des six plaques composites	117
3.31	Module en traction des six plaques composites en sens chaîne	118
3.32	Module en traction des six plaques composites en sens trame	119
3.33	Contrainte à rupture en traction des six plaques composites	120
3.34	Déformation à rupture en traction des six plaques composites	121
3.35	Module d’élasticité en flexion des six plaques composites	122
3.36	Contrainte à rupture en flexion des six plaques composites	123
3.37	Déformation à rupture en flexion des six plaques composites	123
3.38	Énergie à rupture des six plaques composites à l’impact	124
3.39	Filage du PLA	125
3.40	Analyse calorimétrique différentielle à balayage du PLA	126
3.41	Pilosité de l’ensouple avant d’entrer dans la machine à tisser	127
4.1	Méthode de calcul de l’indice de performance	132
4.2	Valeurs propres des trois premières composantes principales	133

4.3	Analyse en composantes principales	134
4.4	Analyse en composantes principales selon la troisième composante	134
4.5	Coefficients VIP associés à l'épaisseur (échelle tissu)	135
4.6	Coefficients VIP associés à la masse surfacique (échelle tissu)	135
4.7	Coefficients VIP associés au coefficient de rigidité en flexion, sens chaîne (échelle tissu)	136
4.8	Coefficients VIP associés aux forces à rupture (échelle tissu)	137
4.9	Classement PROMÉTHÉE II des quatre structures de la campagne #1	137
4.10	Classement PROMÉTHÉE II des cinq structures de la campagne #2	138
4.11	Classement PROMÉTHÉE II des huit structures de la campagne #3 et #4	138
4.12	Coupe chaîne et représentation 3D de la structure OT 4 1-4 Toile	139
4.13	Classement Prométhée II des 18 structures tissées	140
4.14	Évolution de l'indice de performance en fonction du poids	140
4.15	Coefficients VIP associés aux modules en traction (échelle composites)	141
4.16	Coefficients VIP associés aux contraintes en traction (échelle composites)	142
4.17	Classement PROMÉTHÉE II des six structures résinées	142
4.18	Coefficients VIP associés aux modules en traction (multi-échelles)	143
4.19	Coefficients VIP associés aux contraintes à rupture en traction (multi-échelles)	144
4.20	Coefficients VIP associés aux modules de rigidité en flexion (multi-échelles)	144
4.21	Coefficients VIP associés aux contraintes à rupture en flexion (multi-échelles)	145
4.22	Coefficients VIP associés aux contraintes à rupture en flexion (multi-échelles)	146

Liste des tableaux

- 1.1 Propriétés en traction des fibres naturelles 9

- 2.1 Ténacité à rupture des trois mèches utilisées 40
- 2.2 Densité chaîne et trame des quatre structures de la campagne #1 50
- 2.3 Longueur de flexion moyenne par face 52
- 2.4 Nombre de fils par motif 59
- 2.5 Paramètres d'ourdissage de la campagne de tissage #3 70
- 2.6 Densités chaîne et trame des trois structures de la campagne #3 71
- 2.7 Densité chaîne et trame des quatre structures de la campagne #4 78
- 2.8 Données mesurées sur les deux structures 84
- 2.9 Données de caractérisation mécanique des deux structures 84

- 3.1 Propriétés textiles des renforts secs 113

Introduction

L'UN des grands objectifs de l'humanité au XXI^e siècle est la réduction des gaz à effet de serre. Depuis la première révolution industrielle et l'invention de la machine à vapeur (au cours de la seconde moitié du XVIII^e siècle), les émissions de gaz à effet de serre ne cessent d'augmenter. Au début du siècle, HALADA [1] estimait à plus de 3 700 m² de surface de disparition des forêts, à 1 600 tonnes de fonte de glace au Groenland et à 720 tonnes de rejets de dioxyde de carbone (CO₂) d'origine fossile, par seconde! En 2013, plus du tiers des rejets mondiaux de CO₂ était dû à la production d'électricité. Le secteur des transports atteignait la seconde position, suivi de près par l'industrie [2].

L'industrie aéronautique et l'industrie automobile conceptualisent actuellement des équipements plus légers et à meilleurs rendements. Le gain de masse permet une diminution de la consommation de carburant et en conséquence une diminution de ces rejets de gaz à effet de serre. L'objectif est de trouver des matériaux plus légers que les métaux, idéalement d'origine naturelle et facilement recyclables [3, 4]. Une des pistes de recherche concerne les matériaux composites renforcés par des fibres naturelles.

Les matériaux composites sont obtenus par l'assemblage d'au moins un renfort et une matrice. Les propriétés des matériaux composites dépendent des propriétés et des proportions volumiques de ces constituants [5, 6]. Les propriétés du renfort dépendent des fils utilisés (qui eux même dépendent de la nature des fibres et des étapes d'élaboration), ainsi que des procédés de mise en œuvre du renfort. Les technologies textiles [7] permettent de transformer successivement des fibres en fil puis en renforts, utilisable par l'industrie composite pour réaliser des matériaux aussi légers que performants. Parmi ces technologies textiles, le tissage permet de réaliser des renforts en entrecroisant des fils dans deux directions.

Malgré de très bonnes propriétés dans le plan, les matériaux composites élaborés à partir d'empilements de renforts présentent de faibles propriétés hors plan, qui conduisent au délaminage de ces structures. Pour pallier à ces faiblesses, des procédés de mise en œuvre de renfort textile tridimensionnel existent [8]. La structure épaisse remplace alors l'empilement d'étoffe 2D. Les matériaux composites renforcés d'une structure 3D interlock chaîne (projection 3D du tissage) présentent un mode de rupture différent des matériaux composites laminaire [9] et un

meilleur comportement au délaminage [10].

Est-il possible de coupler les propriétés des fibres naturelles à celle des renforts textiles tridimensionnels, tel que les structures 3D interlock chaîne, pour réaliser des renforts de matériaux composites innovants ? Quel est l'état actuel de la recherche associée aux fibres naturelles, aux techniques de tissage et aux matériaux composites renforcés d'une structure tridimensionnelle ? Ce type d'étude, qui fait l'objet de ce manuscrit, requiert une démarche multi-échelles pour comprendre le rôle des paramètres associés aux fibres [11] et au renfort dans un matériau composite renforcé d'une structure tridimensionnelle.

Ces travaux ont été financés d'une part dans le cadre du projet **FLAX3D** et par ailleurs par la Région Hauts-de-France.

Le projet **FLAX3D** est un projet financé par l'ADEME, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, de type GRAINE coordonné par le Groupe DEPESTELE. Le projet **FLAX3D** s'inscrit dans le contexte environnemental actuel, et dans le contexte de développement à grande échelle de matériaux composites renforcés par des fibres naturelles. La prise en compte des aspects environnementaux, l'augmentation et la diffusion des connaissances sur des matériaux composites, et l'optimisation des technologies sont les perspectives à long terme de ce genre de projet. Ce projet regroupe des entreprises, en sus du Groupe DEPESTELE, dont CMP COMPOSITES, spécialiste de l'élaboration composites et WERZALIT, entreprise franco-allemande de fabrication de panneaux de tables d'extérieur et le laboratoire de recherche GEMTEX (EA n°2461 ENSAIT, École Nationale Supérieure des Arts et Industries Textile) au sein duquel ces travaux ont été effectués. L'objectif du projet **FLAX3D** est l'élaboration de renforts tissés 3D interlocks chaînes en lin destinés à des applications composites.



Figure 1 – Lin en fleur

Pour démontrer le potentiel de ces renforts tissés 3D interlocks chaînes en lin, le projet **FLAX3D** propose d'élaborer des démonstrateurs au travers de différents secteurs industriels dont un panneau de séparation cabine de vans équin ; un tambour de protection de vans équin ; une coque de siège pour l'aéronautique ; et un plateau de table.

D'un point de vue scientifique, le projet s'articule autour de trois axes de recherche : les fibres naturelles, le développement de préformes épaisses via le procédé de tissage 3D interlock chaîne et l'élaboration de matériaux composites épais.

Ce manuscrit est divisé en quatre chapitres. Le [chapitre 1](#) propose un état de l'art des matériaux composites biosourcés et des technologies associées, et s'attardera particulièrement sur le procédé de tissage 3D interlock chaîne.

Le [chapitre 2](#) décrit les structures 3D Interlock chaîne élaborées en lin ainsi qu'une analyse de l'influence des paramètres associés à ces renforts 3D, sur leurs propriétés textiles et mécaniques avant imprégnation.

Le [chapitre 3](#) concernera les trois autres échelles associées à l'élaboration de matériaux composites renforcés de tissus 3D interlock chaîne en lin. De la mèche aux matériaux composites, en passant par les fibres, ce chapitre sera l'occasion de décliner expérimentalement la démarche multi-échelles préalablement proposée.

Enfin, le [chapitre 4](#) sera l'occasion de proposer des solutions pour réaliser des matériaux composites renforcés d'une structure 3D interlock chaîne en lin aux propriétés définies. Pour ce faire, différents outils seront mis en avant à partir des caractérisations effectuées et présentées au cours des chapitres [2](#) et [3](#).

Associé à ces quatre chapitres, l'Annexe A donne l'ensemble des actions de disséminations entreprises au cours de ces trois années. L'Annexe B illustre les outils numériques développés. Et l'Annexe C donne le nom complet des structures tissées dans le cadre de ces travaux.

Chapitre

1

Étude bibliographique

Ce premier chapitre propose un état de l'art des matériaux composites et des technologies associées. Ce chapitre s'attardera plus particulièrement sur les matériaux composites biosourcés et le procédé de tissage 3D interlock chaîne.

Sommaire

Introduction	5
1.1 Du champ au fil	5
1.1.1 Présentation générale du lin	5
1.1.2 Mise en œuvre des fibres	7
1.1.3 Classification des fibres naturelles	9
1.1.4 Propriétés en traction aux échelles fibres et mèches	9
1.2 Élaboration de matériaux composites à partir de composants biosourcés	12
1.2.1 Composition des matériaux composites	13
1.2.2 Mise en œuvre des matériaux composites	18
1.2.3 Caractérisation des matériaux composites renforcées de fibre naturelles	21
1.2.4 Applications des matériaux composites renforcées de fibre naturelles	23
1.2.5 Dimensionnement des structures composites	25
1.3 Renforts tissés 3D interlock chaîne	27
1.3.1 Définition	28
1.3.2 Mise en œuvre	31
1.3.3 Caractérisation des renforts 3D interlocks chaînes	33
1.3.4 Applications	35
Conclusion	37

Introduction



Dans le contexte environnemental actuel, la recherche de nouveaux matériaux plus respectueux de l'environnement est un enjeu de taille, notamment dans l'industrie des transports. Depuis tout temps, la nature nous fournit les éléments nécessaires à notre développement mais est également source d'inspiration. Par exemple dans le monde végétal, le maintien et la légèreté de certaines plantes sont assurés par leur constitution en couches et leur composition riche en fibres. L'utilisation des fibres de ces plantes et les procédés d'extraction des fibres sont aussi vieilles que l'homme tisse, soit quelques millénaires... Ces technologies, aussi anciennes soient-elles, sont toujours sources d'innovation et permettent aujourd'hui de réaliser des matériaux aussi légers et plus résistants que le bois, les plastiques ou même les métaux. A titre de comparaison, en 2018, 11 Gt (Gigatonnes) de béton, 1,7 Gt de métaux et 0,3 Gt de plastiques (dont 11,4 Mt pour l'industrie des composites) ont été produits [12].

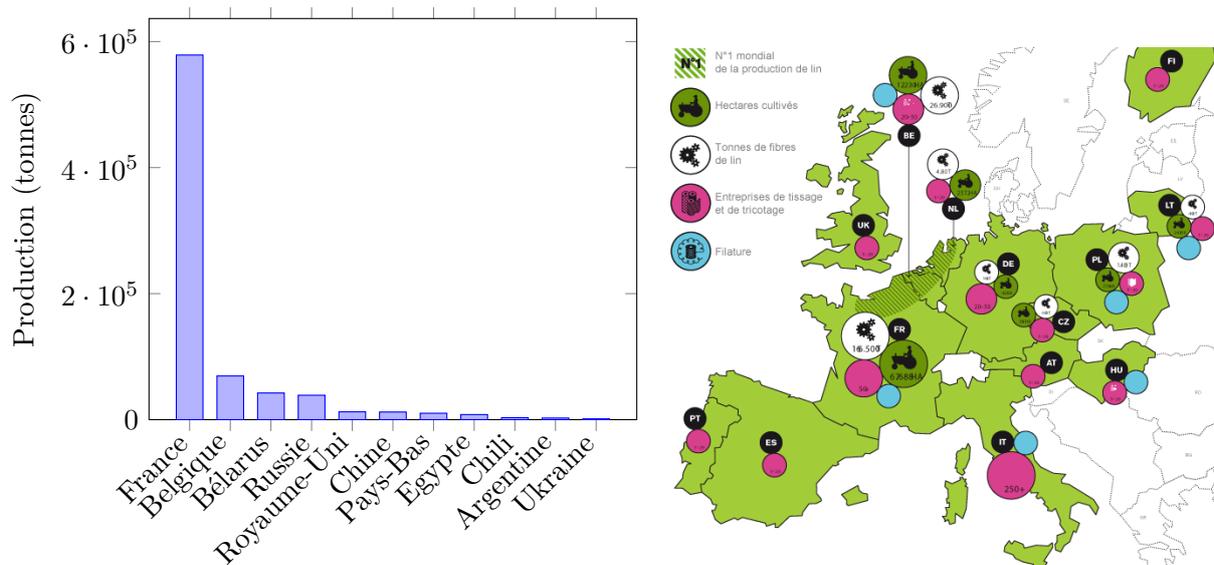
Les fibres végétales, les techniques de tissage, et l'élaboration des matériaux composites sont trois axes de recherche prometteurs du domaine des renforts. L'objectif de ce premier chapitre est de décrire l'ensemble des procédés permettant la réalisation de matériaux composites à base de structures 3D interlock chaîne en lin. En instaurant une démarche multi-échelle, ce chapitre est également le moyen d'essayer de poser les verrous scientifiques et technologiques associés aux matériaux composites biosourcés. L'usage de fibres naturelles instaure de nouvelles problématiques à la réalisation de matériaux composites [13–16]. Quelles sont les propriétés de ces fibres naturelles ? Comment les mettre en œuvre pour former le renfort ? Quels procédés de fabrication privilégier ? Quel est l'influence du taux de porosité dans les matériaux composites ?

Ce premier chapitre s'articule autour de trois axes, associés chacun à une échelle d'étude des matériaux composites. Dans un premier temps, sera présenté de manière spécifique le lin, de sa mise en culture à la réalisation d'un fil. La discussion s'élargira ensuite à l'ensemble des fibres naturelles et des propriétés associées. Dans un deuxième temps, seront présentés les matériaux composites dans leur généralité. Puis les propriétés, les techniques de modélisations et les applications de matériaux composites renforcés de fibres naturelles seront abordés. Dans un troisième temps, une technologie de tissage innovante permettant de réaliser des structures épaisses sera présentée. Leur mise en œuvre, les propriétés structurelles et mécaniques, leur modélisation et leur application seront déclinées.

1.1 Du champ au fil

1.1.1 Présentation générale du lin

Le lin (*Linum usitatissimum*) une plante herbacée qui appartient à la famille des *Linacées* et au genre *Linun*. Le lin est une plante composée d'une tige et de quelques ramifications. La tige mesure environ un mètre de haut et mesure quelques millimètres de circonférence. La fibre de



(a) Production de lin (fibre et étoupe) par pays en 2017 [20]

(b) L'industrie du lin en Europe [21]

Figure 1.1 – Le lin, sa culture et son économie

lin est extraite de la tige et a une longueur comprise entre 6 et 80 mm, pour un diamètre de 12,4 à 23,9 μm [17]. De nombreuses variétés de lin existent (notamment pour la production d'huile à partir des graines [18]), ces travaux se focalisent sur le lin à fibres pour produits textiles.

Le lin, originaire du sud-est de l'Asie, requière un climat océanique pour se développer. Aujourd'hui, la France et les pays du Benelux sont les premiers producteurs de lin. La figure 1.1a illustre la production mondiale de fibres et d'étoupes de lin par pays en 2017 et la figure 1.1b représente l'activité économique liée à la culture du lin en Europe. La production de fibres de lin en Europe avoisine les 209 000 tonnes, soit 76 % de la production mondiale [19]. La zone hachurée sur la figure 1.1b représente la zone de culture privilégiée du lin. L'activité économique liée au lin est très développée en Europe, notamment en termes de culture. Mais une grande partie des fibres est exportée en Asie, et reviennent sous formes de fils ou de tissus. Cependant quelques filateurs, tisserands et tricoteurs poursuivent leurs activités en Europe.

Le lin (*Linum usitatissimum*) possède un patrimoine génétique de plus de 43 000 gènes [22], nombre équivalent au riz ou au soja. La fibre de lin représente environ 5 % de la masse globale de la plante. Le reste est principalement destiné à l'industrie papetière et à l'alimentation animale [23]. La fibre de lin est une fibre libérienne¹ (ie. issue de la tige), comme le chanvre, le kenaf, ou le jute; elle se situe dans la tige des plantes [24]. La longueur de la fibre de lin varie en fonction de sa localisation dans la tige [25]. La figure 1.2 représente une coupe transversale, obtenue par microscopie, d'une tige de lin. Le cercle vert au centre de la figure entoure un faisceau de fibres; le cercle de droite zoome sur une fibre individuelle. La zone sombre à l'intérieur des fibres est le

1. Le liber d'un végétal est la zone où circule la sève élaborée.

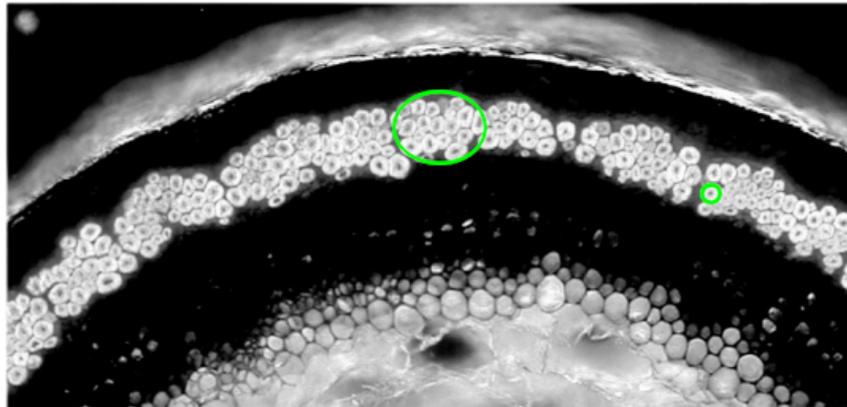


Figure 1.2 – Coupe transversale d'une tige de lin (adaptation [26] - [27, 28])

lumen². La taille du lumen influe sur le taux de porosité de la fibre.

La fibre de lin, comme toutes les fibres naturelles végétales, est principalement composée de cellulose, d'hémi-cellulose et de lignine. La cellulose représente plus de 70 % de la fibre de lin [29], l'un des plus haut taux parmi les fibres naturelles. Les fibres végétales ont une structure similaire à un empilement composite renforcé de fibres unidirectionnelles. La fibre de lin a une forme polygonale et entre 5 à 7 faces [27]. La structure des fibres cellulosiques est composée de deux parois, l'une externe, pauvre en cellulose et une seconde, interne, riche en cellulose. La seconde paroi est composée de trois couches ; la deuxième couche est composée de microfibrilles de cellulose baignant dans un polymère non cellulosique. L'angle microfibrillaire est l'angle formé par les fibrilles de cellulose, dans cette seconde couche, et l'axe longitudinal de la fibre. Plus l'angle formé entre les fibrilles et l'axe de la tige est faible, plus les performances mécaniques sont intéressantes.

1.1.2 Mise en œuvre des fibres

Du semis à la plante Le lin est généralement semé au printemps, courant mars ou avril. La densité de culture optimale est de 1 500 à 1 600 plants/m² [17]. Le lin germe et croît en une centaine de jours. La tige de lin atteint une hauteur de 0,6 à 1,2 m et un diamètre de 1 à 3 mm [28]. Au mois de juin, les fleurs bleues éclosent (cf. figure 1) pour seulement quelques heures et indiquent la fin de la croissance de la plante. La production moyenne de fibre de lin par hectare est de $2\,059 \pm 941$ kg/ha [30].

Rouissage Arrivé à maturité, le lin est arraché et déposé sur le champ en andains³. Soumis aux aléas climatiques, les fibres sont naturellement séparées des autres constituants de la tige par le biais de microorganismes tels que des champignons, des bactéries ou des enzymes. Cette étape, qui conduit à la décomposition partielle de certains constituants des gommages liant les

2. Cavité centrale d'une fibre végétale creuse.

3. Bande continue de plante déposée au sol.

fibres entre-elles, permet la division des faisceaux de fibre et favorise l'extraction des fibres. Par exemple, au cours du rouissage, des enzymes comme les pectinases vont digérer la pectine⁴. L'activité enzymatique conduit à une modification biochimique de la composition de la plante. Cette étape dure de trois semaines à trois mois, en fonction des conditions météorologiques. Un rouissage trop long provoque une dégradation de la cellulose et influe sur la ténacité à rupture de la fibre. Au cours de cette période, le lin est généralement retourné pour assurer une homogénéité du rouissage. A l'issue de cette étape, les tiges de lin sont mises en balles.

Le rouissage est une étape dont la durée est fonction des conditions météorologiques. Par conséquent, la qualité des fibres de lin varie en fonction du lieu et des années. Afin de limiter les défauts et d'homogénéiser les lots, une sélection et un mélange de fibres sont nécessaires [27].

Teillage Le teillage est la première étape du cycle de filature. La filature permet de réaliser une structure homogène continue aux fibres parallélisées et régulières à partir de fibres discontinues.

Une étape de broyage est souvent nécessaire avant le teillage, permettant de fragmenter la tige de lin [28]. Le teillage est, quant à lui, le procédé d'extraction mécanique des fibres. Il ne remplace pas le rouissage, mais le complète. Lors de cette étape, les tiges sont battues mécaniquement pour en éliminer le bois, poussières et anas⁵ et en extraire les fibres longues.

Cardage et peignage Les fibres résultantes du teillage sont peignées pour affiner et aligner les fibres de lin. Le peignage permet également d'épurer, de diviser le faisceau de fibre et d'éliminer les fibres courtes, également appelées étoupes. A l'issue du peignage, 65 % de la matière entrante a été transformée en lin peigné ; le reste est composé d'étoupes à hauteur de 30 % et de poussières. La longueur et le diamètre de la fibre de lin sont désormais compris (après ces étapes) entre respectivement 20 et 100 mm et entre 20 et 40 μm respectivement [17].

A l'issue du peignage, les rubans de mèches peuvent être employés en l'état pour des applications techniques ou filés. Sous forme de mèches, un agent de cohésion est nécessaire pour lier les fibres entre-elles, augmenter la ténacité et permettre ainsi de les utiliser dans les technologies textiles (tissage, tressage, tricotage) [31].

Filature La dernière étape de la filature permet d'étirer et de retordre les rubans de lin pour former des fils. Deux types de filature sont couramment employés : la filature au sec et la filature au mouillé. La première permet d'obtenir des fils fins tandis que la seconde permet d'obtenir des fils de titrages supérieurs à 250 tex. Cette dernière étape du cycle de filature est un procédé plutôt lent, couteux et consommateur d'énergie [23, 32].

4. Colle naturelle permettant le maintien des cellules des tissus végétaux.

5. Bois du centre de la tige de lin.

Matière	Densité	Module (GPa)	Contrainte (MPa)	Déformation (%)
Lin	1,54	12 – 85	600 – 2 000	1 – 4
Chanvre		23 – 90	270 – 900	1 – 3,5
Sisal	1,45	9 – 35	350 – 700	3 – 7
Jute	1,44	26,5	400 – 750	1,5 – 1,8
Ramie	1,51	24,5 – 128	400 – 1 000	1,2 – 4
Coir	1,15	4 – 6	15 – 40	
Ortie		59 – 115	950 – 2 550	1,2 – 3
Coton	1,5	5,5 – 12,6	300 – 600	
Verre	2,5	70 – 90	3 500 – 4 500	2 – 3,5
Carbone	1,7	50 – 500	2 500 – 4 500	0,5 – 1,5

Table 1.1 – Densités et propriétés en traction des fibres végétales [28], de la fibre de verre et de carbone [37]

1.1.3 Classification des fibres naturelles

A la différence des fibres synthétiques, principalement issues de l'industrie pétrolière, les fibres d'origine naturelles peuvent être classées selon leur provenance : animale, minérale ou végétale (cf. figure 1.3). Les fibres animales sont principalement composées de protéines ; la laine est principalement composée de kératine ; la soie est un assemblage d'acides aminés. Les fibres naturelles végétales sont composées d'un mélange de cellulose, d'hémi-cellulose et de pectine [24] et peuvent être répertoriées en fonction des parties de la plante dont elles émergent [33]. Les fibres de lin, de jute, de ramie et du chanvre sont des fibres issues de la tige, et dites fibres libériennes. La fibre de coton est une fibre issue de la graine de la plante éponyme. Les fibres de sisal, d'abaca, d'ananas ou de banane sont issues des feuilles de la plante. La qualité de la fibre va dépendre de la zone d'extraction de la fibre dans la plante. La section des fibres naturelles n'est ni circulaire et ni parfaitement uniforme selon leur longueur principale [34].

1.1.4 Propriétés en traction aux échelles fibres et mèches

Échelle fibres Les fibres naturelles sont légères ; leur densité est souvent inférieure à celle de fibres synthétiques (cf. tableau 1.1). Parmi les fibres naturelles, les fibres végétales présentent les meilleures performances en traction pour de faibles densités [35]. LEFEUVRE et al. [36] ont mesuré une *rigidité spécifique* de la fibre de lin, rapport entre la rigidité et la densité de la fibre, supérieure à la fibre de verre. Le tableau 1.1 donne un aperçu des densités et des propriétés mécaniques de quelques fibres végétales usuelles. Les deux dernières lignes de ce tableau permettent de comparer ces caractéristiques avec celles de fibres fabriquées par l'homme. Les qualités et propriétés des fibres naturelles végétales dépendent de la proportion de cellulose et de son taux de cristallinité. Le module de Young de la cellulose est de 140 GPa [34].

Les propriétés mécaniques des fibres naturelles peuvent être déterminées par traction sur fibre unitaire, ou par traction sur faisceau, mais également par des essais sur éprouvettes composites (

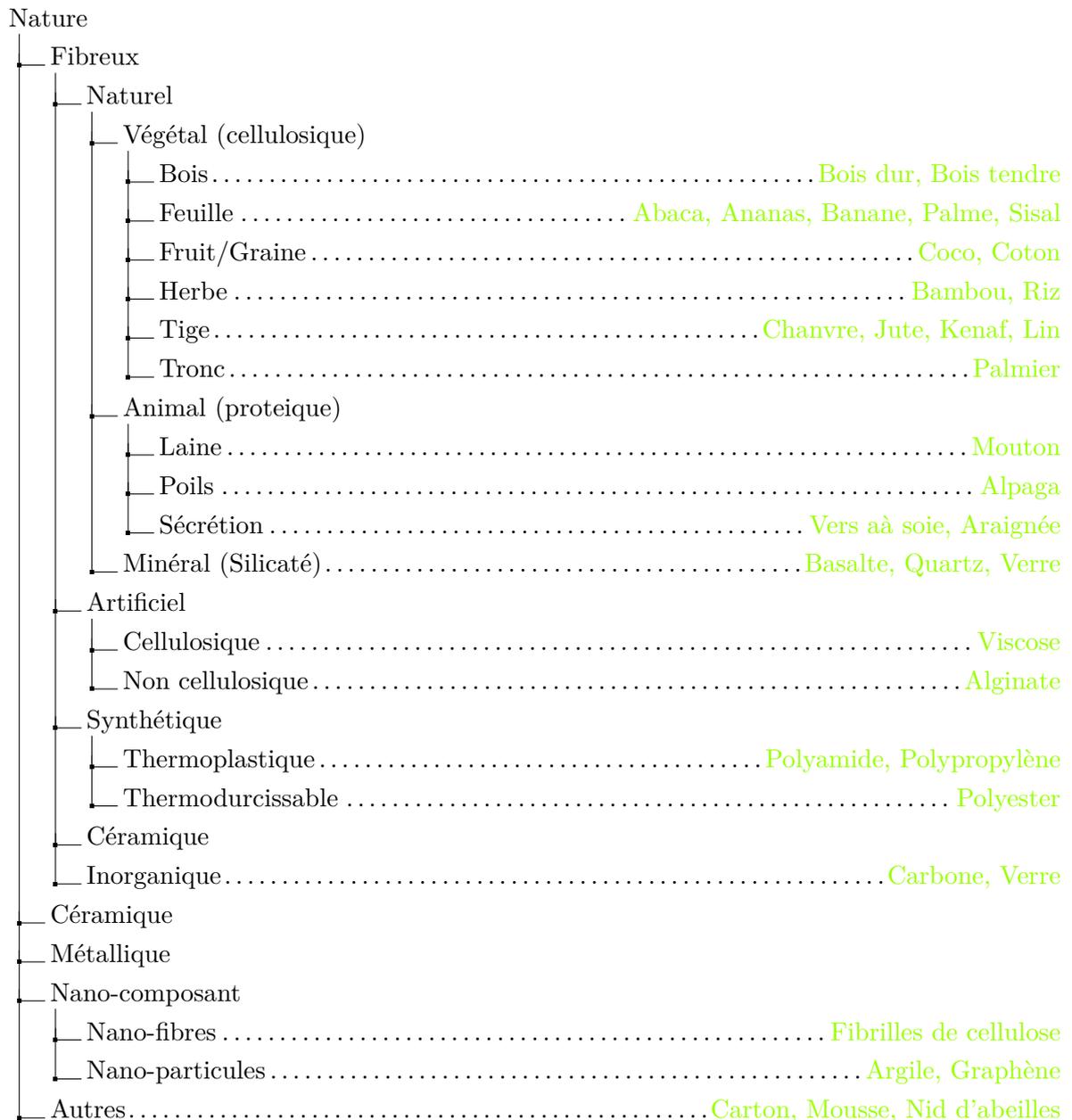


Figure 1.3 – Nature des renforts pour matériaux composites

« Impregnated Fibre Bundle Test »), dits IFBT [38]. Les essais de traction sur fibre et sur faisceau nécessitent de la minutie et des équipements de mesure adaptés à la taille de la fibre. Les résultats issus de caractérisation des fibres unitaires peuvent conduire à des écart-types relativement importants. La méthode de l'IFBT s'appuie sur l'élaboration d'échantillons composites, dont les caractéristiques en traction (modules et contraintes) permettent, par calcul inverse et à l'aide de la loi des mélanges (équation 1.1a) de remonter aux caractéristiques des fibres contenues dans l'éprouvette composite. La méthode de l'IFBT a été employée par BENSADOUN et al. [39] pour déterminer la rigidité⁶ de fibres de lin. Ces auteurs ont mesuré une rigidité de la fibre de lin à $59,8 \pm 2,4$ GPa. Cette méthode est plus simple à mettre en œuvre que les tests de traction de fibres unitaires.

LEFEUVRE et al. [36] ont mesuré les propriétés en traction des fibres de lin de variété *Marylin*, par traction sur fibres élémentaires, sur différents lots répartis sur quatre années successives. Ils démontrent que les propriétés des fibres élémentaires sont équivalentes en fonction des années et des lots. Les résultats obtenus sont cohérents avec les valeurs données en tableau 1.1. Les résultats en traction des fibres de lin dépendent également de la longueur de la fibre, de la maturité de la plante, de la zone d'extraction mais aussi des conditions expérimentales telles que les conditions ambiantes et la vitesse d'essai [28]. La courbe de traction d'une fibre naturelle est divisée en deux parties : une première partie non linéaire qui traduit la réorientation des fibrilles suivie d'une partie linéaire jusqu'à la rupture.

MARTIN et al. [40] ont comparé l'influence du teillage sur les propriétés mécaniques de fibres de lin de variété *Alizée*. Ils ont noté que le teillage apporte de la finesse à la fibre de lin et n'influe pas sur les propriétés mécaniques de la fibre.

De plus, à la différence des fibres inorganiques, telle que le carbone ou le verre, les fibres naturelles sont non abrasives, non irritantes et non toxiques.

Échelle mèches et fils BARBULÉE et GOMINA [41] ont caractérisé en traction des mèches en lin. Les propriétés mécaniques à l'échelle mèche sont moins dispersées que celles à l'échelle fibres. A l'échelle mèche, ils stipulent que la moyenne sur vingt individus est représentative du comportement moyen. Certains de leurs essais ont également été suivis par émission acoustique puis ils ont observé par microscopie les zones de rupture. Trois modes de rupture ont été détectés [42] : du délaminage entre faisceaux adjacent, du délaminage de faisceaux par rupture des films pectidiques et des ruptures successives des faisceaux.

MA et al. [43] ont soumis une mèche de sisal à plusieurs niveaux de torsion. Ils ont constaté dans un premier temps une augmentation de la force à rupture puis au-delà d'une certaine torsion une perte notable de cette résistance. Jusqu'au niveau de torsion optimal, la cohésion entre les fibres augmente et par conséquent la force à rupture également. La torsion crée des forces de frictions entre les fibres. Au-delà de ce niveau de torsion optimal, les fibres ne sont plus alignées au sein du fil, dans la direction de la sollicitation [44]. GOUTIANOS et PEIJS [45] ont

6. Module d'élasticité : rapport de la contrainte de traction et de la déformation

optimisé un roving de lin pour analyser son influence sur les propriétés mécaniques à l'échelle des matériaux composites. Un faible niveau de torsion engendre une faible force à rupture, tandis que l'augmentation du niveau de torsion entraîne une chute des propriétés des fils imprégnés. Avec un haut niveau de torsion, la perméabilité du fil à la matrice diminue. L'imprégnation et les propriétés mécaniques résultantes s'en voient affectées. Un compromis entre procédé de mise en œuvre du renfort et propriétés du matériau composite est à effectuer.

OMRANI et al. [46] ont comparé trois types de fils de même titrage : un non retordu (également appelé roving), un fil légèrement retordu, et un troisième fortement retordu. Les forces et déformations à rupture sont largement influencées par le procédé de mise en œuvre des fibres (et en particulier par la torsion).

Conclusion

Les fibres naturelles sont employées, depuis plusieurs millénaires pour la réalisation de produits textiles, et désormais pour l'élaboration de nouveaux matériaux. À la différence des fibres synthétiques, les fibres naturelles sont discontinues car de longueur finie dans la tige. Les différentes étapes (du rouissage au peignage) permettent d'extraire les fibres et de réaliser une structure continue. Les propriétés mécaniques des fibres naturelles dépendent de la variété, et de nombreux paramètres issus de la culture dont la géométrie de la plante (ie. de l'emplacement de la fibre dans la tige, du type de cellulose et de son degré de cristallinité et de polymérisation, de l'angle micro-fibrillaire, du taux porosité, de la taille du lumen [27], des conditions météorologiques au cours de la croissance et du rouissage), et des conditions d'extraction [33].

Le lin présente de bonnes propriétés mécaniques, [35], concurrençant, à l'échelle de la fibre et en rigidité spécifique, celles de la fibre de verre. La fibre de lin est utilisée par l'industrie textile car elle permet la réalisation d'étoffes légères et résistantes. Les débouchés des fibres de lin sont l'habillement (pour environ 60 %) et le linge de maison (pour environ 30 %). Les 10 % de fibres restants sont destinés à des applications techniques. De par ses propriétés mécaniques, du fait que les procédés d'extraction des fibres sont existants et maîtrisés, et pour leur rapport propriété/prix intéressant [47], l'usage des fibres de lin peut-être privilégié par l'industrie des matériaux composites. La demande en fibres naturelles végétales pour l'industrie des matériaux composites ne cesse de croître. Le marché des fibres naturelles doit atteindre 5,83 milliards de dollars en 2019 (avec une progression annuelle estimée de 12,3 %) [48].

1.2 Élaboration de matériaux composites à partir de composants biosourcés

Les premiers matériaux composites datent de l'antiquité. Le torchis, mélange de fibres naturelles, d'argile et d'eau, peut être considéré comme l'une des méthodes les plus anciennes de fabrication de matériaux composites. Les éléments qui composent un matériau composite, leur

nature et leur mise en œuvre conditionnent les propriétés finales du matériau. Par la grande diversité de propriétés résultantes, les domaines d'application des matériaux composites sont également très diversifiés. Dans un premier temps seront présentés les différents constituants, puis les méthodes de mise en œuvre et enfin les propriétés issues de la littérature de ces composites biosourcés. Les applications des matériaux composites biosourcés seront illustrées en section 1.2.4.

Les matériaux composites étant des structures complexes pouvant être obtenus via une multitude de méthodes d'élaboration, en fonction des constituants choisis, un bref état de l'art des différentes technologies sera présenté. Une revue des différentes méthodes de modélisation analytique de ces structures et des propriétés mécaniques sera également proposée.

1.2.1 Composition des matériaux composites

Selon la définition communément admise, un matériau composite est un assemblage de plusieurs composants non miscibles, de natures différentes et dont les qualités se complètent afin d'obtenir un matériau hétérogène dont les performances sont supérieures à celles de ses constituants [49]. Par extension de cette définition, un matériau composite biosourcé (ou biocomposite) est un matériau composite dont au moins l'un de ses constituants est issu de ressources renouvelables [47].

Un matériau composite est un assemblage de plusieurs éléments dont au moins un renfort et une matrice. Le rôle du renfort au sein d'un matériau composite est de résister aux sollicitations mécaniques. Le rôle de la matrice est de lier la structure de renfort (ie. de maintenir l'alignement du renfort), de transmettre la sollicitation mécanique au renfort et d'apporter au matériau la cohésion nécessaire à sa mise en œuvre.

Les matériaux composites sont souvent employés pour remplacer des structures métalliques. L'assemblage de constituants de densités inférieures aux métaux permet d'obtenir des matériaux plus légers et dont les performances mécaniques spécifiques avoisinent ou surpassent celles des métaux. Le choix de la matrice peut également les rendre plus résistant à la fatigue et à la corrosion [49]. Cependant la nature et la disposition du renfort au sein de ces matériaux conduit à un comportement anisotrope.

Les propriétés mécaniques des matériaux composites dépendent de la nature et de la mise en œuvre de ces composants [50, 51]. Les différentes natures de renfort et de matrices sont données en figures 1.3 et 1.5, respectivement. Dans le cadre du projet FLAX3D et de cette thèse, on s'intéressera particulièrement aux renforts textiles à base de fibres de lin associés à une matrice organique.

1.2.1.1 Structures de renfort textile

La figure 1.4 illustre l'ensemble des procédés textiles de mise en œuvre de fibres ou de fils pour créer un renfort. Ces renforts peuvent être classés en fonction du nombre de dimension

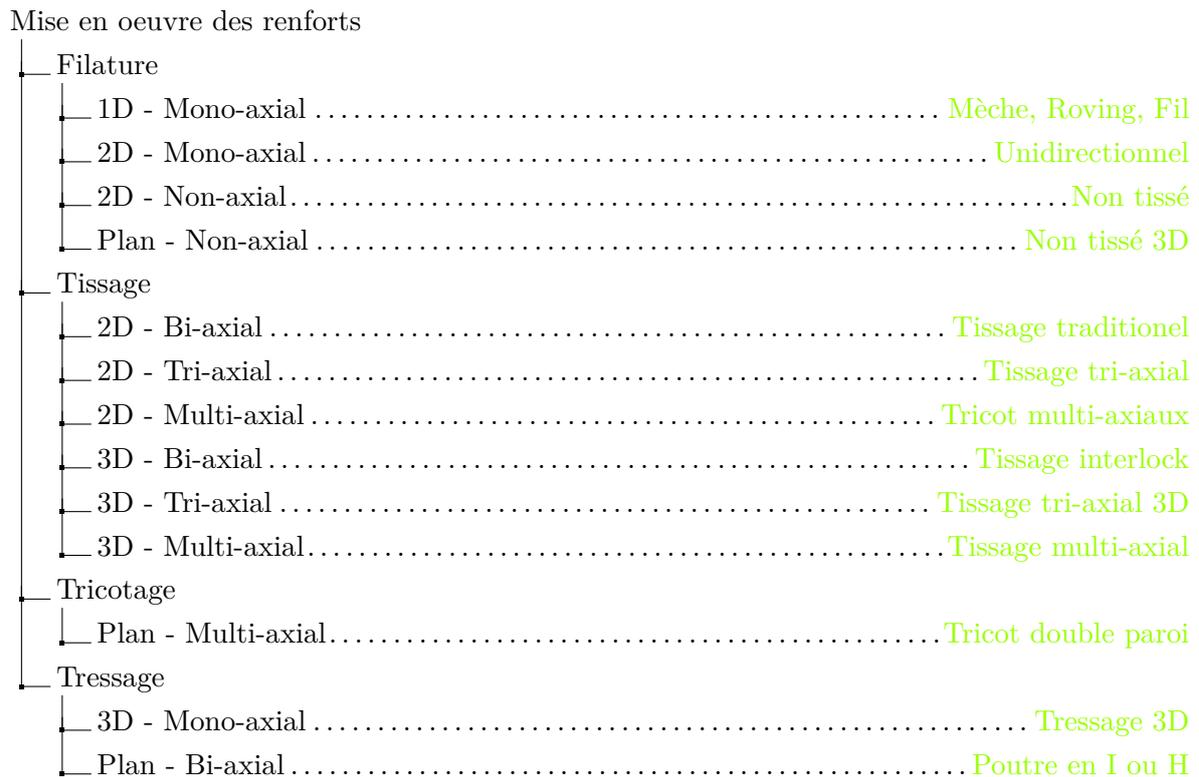


Figure 1.4 – Procédés de mise en œuvre des renforts textiles

majoritaire de la structure. La plupart des procédés de mise en œuvre du renfort sont issus ou adaptés de l'industrie textile. La filature, le tissage, le tricotage et le tressage permettent de mettre en œuvre des fibres et d'obtenir des structures dont deux dimensions sont supérieures à la troisième.

Filature La filature permet de réaliser des mèches, fils (mono-axial, 1D). Une structure non-tissée (non-axial, 2D) est un voile ou une feuille de fibres orientées ou non, lié par friction, cohésion ou adhésion [52, 53]. Les propriétés des matériaux composites à bases de non-tissés dépendent des caractéristiques des fibres, des paramètres de mise en œuvre et des caractéristiques structurales des pièces [52].

Unidirectionnel Un unidirectionnel est un assemblage de filaments ou de fibres orientés majoritairement dans une direction et d'une trame légère dans la direction transversale. La superposition de plusieurs couches d'unidirectionnel forme une étoffe non ondulée dites NCF (*non crimp fabric*).

Tricotage Le tricotage, selon la norme NF G00-001 [7], permet de fabriquer une « étoffe formée d'une matière textile disposée en mailles (...) ». La mise en œuvre de ces tricots est plus simple que celle impliquant du tissage. En tant que renfort, ces structures sont caractérisées

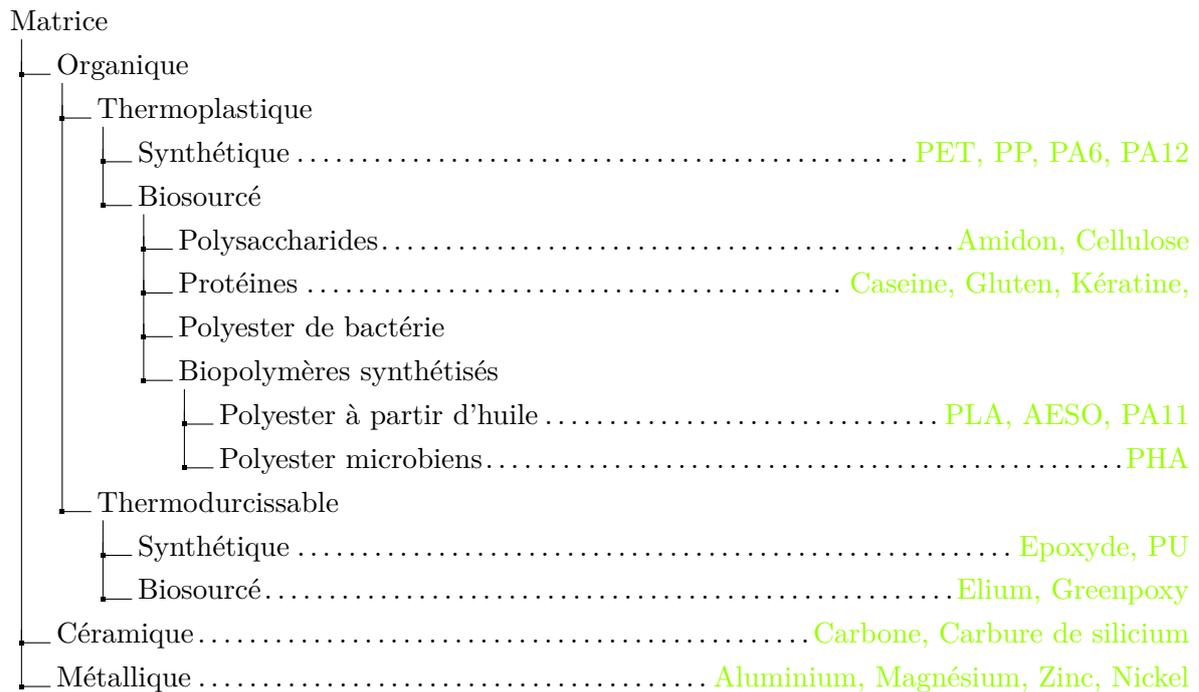


Figure 1.5 – Classification des matrices

par une extensibilité importante et peuvent par conséquent se draper sur des formes complexes [54]. La déformabilité du renfort est une problématique récurrente de l'industrie composite, et la bonne déformabilité des tricots peut permettre de mouler des formes plus complexes.

Tissage Le tissage permet d'obtenir une étoffe en entrecroisant deux nappes de fils, généralement perpendiculaires. Les matériaux composites obtenus par empilement de couches de tissus présentent des propriétés mécaniques telles que de hautes résistances et raideurs en traction mais sont fortement sensibles au délaminage. Les tissus se catégorisent en trois grandes familles : sergé, satin et taffetas.

Tressage Le tressage est un procédé permettant l'entrecroisement d'au moins trois fils en formant un angle variable. Ces angles sont compris entre 15 et 75° [55, 56]. Les matériaux composites renforcés de structures tressées sont moins sensibles au délaminage, à l'impact, à la fatigue et à la torsion. Le tressage permet également de sur-tresser une forme complexe.

① La définition de tricots, tissus et tresses peut être étendue pour former des structures 3D [55–57]. A titre d'exemple, les structures 3D interlock chaîne sont élaborées par une extension 3D du tissage traditionnel (cf. section 1.3.1).

1.2.1.2 Matrices

Différents types de matrices sont donnés en figure 1.5. Les matrices peuvent être classées en fonction de la nature de leurs constituants. Les matrices organiques sont constituées de longues

molécules à motif répété. Les matrices organiques (plastiques) résistent bien mieux à la corrosion que les matrices métalliques [37]. Les matrices organiques se distinguent en deux catégories : les polymères thermoplastiques d'un côté et les polymères thermodurcissables de l'autre. Chacune de ces deux familles de polymère est décrite ci-après.

Polymères thermoplastiques Issus de la polymérisation de monomères bivalents⁷, la structure monodimensionnelle des polymères thermoplastiques permet de rendre le procédé de mise en œuvre réversible. Cette propriété intéressante est à la base de tout mélange de fibre de renfort et de fibre thermoplastique pour la production de matériaux composites par chauffage de la structure hybride. Cependant la faible température de transition vitreuse des polymères thermoplastiques limite l'usage du matériau final à des températures souvent inférieures à 100°C. Les propriétés remarquables de quelques polymères thermoplastiques communs sont données ci-après mais la plupart des matrices thermoplastiques présentent une bonne tenue au choc et une bonne résistance.

PET Le polyéthylène téréphtalate est obtenu par polycondensation^a. Le motif de base de ce polymère est une fonction éthylène $(-\text{OCO} - \square - \text{OCO}-)_n$. Le polyéthylène téréphtalate présente une bonne adhérence avec les fibres de verre, et sa mise en œuvre est simple ;

PP Le polypropylène est obtenu par polymérisation coordinative^b. Le motif élémentaire de ce polymère est une fonction propylène de type $(-\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CH}_2-)_n$. Le polypropylène présente une tenue correcte à la chaleur. Son indice de fluidité à chaud est de 0,3 – 40 g/10 min [58].

PPS Le motif élémentaire du polysulfure de phénylène est un cycle aromatique $(-\text{C}_6\text{H}_4 - \text{S}-)_n$. Le cycle aromatique apporte au polymère une bonne résistance chimique et thermique.

PA Le polyamide est obtenu par polycondensation. Le motif élémentaire de ce polymère est une fonction amide $(-\text{C}(=\text{O}) - \text{NH}-)_n$. Le polyamide présente une bonne tenue au choc, et est résistant à la fatigue.

^a. Polymérisation par étape dans laquelle la croissance des chaînes polymères résulte de réactions de condensation entre molécules de tous degrés de polymérisation.

^b. Type de polymérisation en chaîne.

Parmi les autres avantages de ces polymères, on peut citer leur faible masse volumique, et le stockage aisé. La mise en œuvre des résines thermoplastiques n'engendre pas de réaction chimique à l'origine de dégagement gazeux. La facilité de mise en œuvre de la résine thermoplastique est liée à l'indice de fluidité à chaud.

Polymères thermodurcissables A la différence des molécules bivalentes des polymères thermoplastiques, les matrices thermodurcissables forment un réseau réticulaire tridimensionnel

7. Molécule chimique possédant deux liaisons covalentes.

(grâce à des molécules formant au moins trois liaisons covalentes) lorsque que la résine est mélangée à son durcisseur. Cette structure empêche la réversibilité du procédé de mise en œuvre. Cependant, la température de transition vitreuse de ces polymères, souvent supérieure à 100°C [59], permet un usage plus large du matériau final. De plus, les procédés de mise en œuvre de ces polymères thermodurcissables sont plus simples et moins coûteux que ceux des polymères thermoplastiques. Les propriétés de quelques polymères thermodurcissables, couramment utilisés par l'industrie, sont données ci-après :

Époxyde Les résines époxydes sont probablement les résines les plus employées par l'industrie des matériaux composites. Elles présentent de très bonnes caractéristiques mécaniques, thermiques et chimiques et sont également très résistantes en fatigue. Leur mise en œuvre semble plutôt simple et leur adhérence avec la plupart des renforts synthétiques et inorganiques semble également renforcée.

PU Les résines polyuréthanes présentent une bonne tenue chimique.

Phénol Les résines phénoliques présentent une bonne tenue thermique et chimique.

Les réactifs à l'origine des polymères thermodurcissables étant liquide à température ambiante, la viscosité du mélange est un paramètre à ne pas négliger pour assurer une bonne diffusion de la résine au travers du renfort.

Cas des polymères biosourcés Les polymères biosourcés sont issus de ressources agricoles, contrairement aux polymères de synthèse issus de l'industrie pétrolière. Un polymère biosourcé n'est pas forcément un polymère biodégradable. Les notions de recyclabilité et de biodégradabilité des polymères biosourcés sont fonction de la nature du polymère, et non de son origine. L'usage de ressources naturelles réduit la consommation de ressources pétrolifères et réduit les gaz à effet de serre rejetés [60]. De plus l'usage de tels polymères dégage moins de gaz nocif lors de la mise en œuvre de la matrice.

① L'acide polylactique ou polylactide (PLA) est un polymère issu de la transformation de l'amidon du maïs. Il a un bon rapport performance/prix mais a cependant une faible tenue thermique [61]. Son indice de fluidité à chaud est de 10 – 40 g/10 min [58]. L'ajout d'additifs permet d'adapter les propriétés mécaniques du polymère. Il est également possible de coupler le PLA avec un autre polymère pour améliorer sa tenue thermique.

Les huiles de nombreuses plantes (plus précisément des graines) telles que du lin, du soja, de cacahuète, de tournesol ou encore de karanj, peuvent être utilisées en tant que bio-polymère. Les huiles végétales sont abordables, abondantes et renouvelables [62]. Elles sont naturellement riches en précurseur de polymère. Cependant, la double liaison carbone peu réactive (de ces huiles) doit être fonctionnalisée pour former un polymère aux propriétés structurales intéressantes [63]. TEMMINK et al. [64] ont réalisé des matériaux composites à base de chute de jean et de différentes résines (dont des résines biosourcés). Leurs travaux montrent qu'il est possible d'utiliser la

structure sergé du jeans en coton et des résines bio-époxy et AESO⁸ pour réaliser des matériaux adaptés à des applications structurales. La résine bio-époxy présente de meilleurs résultats que la résine AESO ; la viscosité de la résine AESO la rendant difficile à mettre en œuvre. La copolymérisation de la résine AESO avec un styrène (adjonction de cycles aromatiques) peut améliorer les propriétés mécaniques et la température de transition vitreuse de ce polymère thermodurcissable [62]. WILLIAMS et WOOL [65] ont réalisé des matériaux composites à base de résine AESO et de lin. Les propriétés mécaniques obtenues les rendent utilisables pour une large gamme d'applications dont la production de pièces pour l'automobile.

TransFurans Chemicals a développé une résine thermodurcissable biosourcée à base de furane (1,4-époxy butadiène-1,3) [66]. La série BioRez permet la production de composites à haute cadence. TransFuran Chemicals met en avant des cycles de cuisson inférieurs à la minute à haute pression et à des températures supérieures à 150°C. Les recherches sur le développement de polymères est toujours en cours dans les objectifs de fournir des polymères toujours plus verts, simple à mettre en œuvre, proposant une bonne adhésion avec les fibres (naturelles ou non) et avec de bonnes propriétés mécaniques.

① La nature du renfort peut être non fibreuse et également apporter d'intéressantes propriétés. L'addition de nanoparticules à la matrice, par leur petite taille crée des surfaces de contact extrêmement grandes et ajoute une nouvelle propriété à la matrice. Par exemple, l'ajout de nanoparticules d'argiles à la matrice permet d'améliorer les propriétés thermiques du matériau composite. LEBRUN et al. [67] ont ajouté des nanofibres de cellulose à la résine de leur matériau composite renforcée d'un unidirectionnel en lin. Ils ont constaté une augmentation des contraintes à rupture d'un facteur de 2,5. Une autre solution, non fibreuse, pour épaissir un matériau est l'usage de structure en nid d'abeille ou de mousses (cf. figure 1.7).

1.2.2 Mise en œuvre des matériaux composites

1.2.2.1 Procédés de mise en œuvre

Les procédés de mise en œuvre des matériaux composites sont nombreux et quelques-uns sont présentés en figure 1.6. Certaines de ces techniques couramment employées pour la réalisation de matériaux composites renforcés de fibres naturelles ou de structures 3D interlock chaîne seront détaillées par la suite. Cependant, le choix du procédé de mise en œuvre dépend de la nature des constituants, de l'architecture du renfort mais également de la forme finale du matériau et des propriétés désirées.

Moulage au contact L'une des méthodes les plus simples est le moulage au contact. Le renfort, préalablement placé dans un moule ouvert, est imprégné à la main par une résine liquide. La polymérisation de la résine (thermodurcissable) s'effectue à température ambiante.

8. Acrylated Epoxidized Soybean Oil : résine époxy à base d'huile de soja.

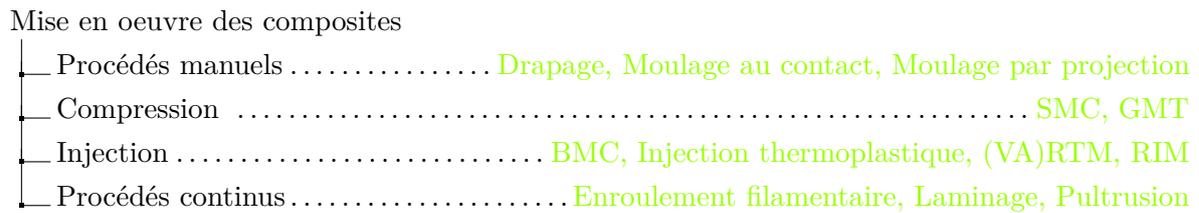


Figure 1.6 – Procédés de mise en œuvre des composites

Le matériau composite final présente une face lisse. Ce procédé est rapide [68], économique et permet de réaliser des formes aussi complexes que grandes. A la fin de la polymérisation, une étape d'ébarbage est souvent nécessaire à la sortie du moule.

Moulage par projection Pour le moulage par projection, la fibre est coupée à une longueur prédéterminée puis projetée sur un moule avec de la résine. Un polymère thermoplastique de type polyester est souvent employé pour cette méthode.

Pré-imprégnés Les pré-imprégnés sont des structures de renfort préalablement imprégnées de résine et conservées à faible de température pour empêcher la polymérisation. La dépose peut s'effectuer manuellement ou être assisté d'outils de dépose, pilotés par ordinateur. La mise en œuvre des pré-imprégnés est plutôt facile et donne des matériaux composites avec de bonnes propriétés mécaniques.

Pultrusion La pultrusion est un procédé de fabrication en continu de profilé en plastique armé de fibres. La fibre de verre renforce couramment une matrice thermodurcissable, mais la fibre de lin peut également se prêter à la pultrusion [28].

(VA)RTM La technique (VA)RTM (pour *Vaccum Assisted Resin Transfert Molding*) est largement employée par l'industrie pour réaliser des matériaux composites, car elle permet de réaliser des matériaux à des taux de fibres élevés [69]. Le renfort est placé dans un moule fermé. L'imprégnation du renfort par la résine s'effectue sous vide et sous pression. L'usage d'un moule fermé permet d'obtenir des matériaux aux faces lisses avec de hauts taux de fibres élevés. La réalisation d'un moule sur mesure, souvent cher, rend ce procédé très coûteux.

ADANUR et al. [70] recommandent la technique RTM pour imprégner les structures 3D interlock chaîne. Le RTM permet une meilleure cohésion des fibres avec la matrice et une meilleure imprégnation de cette dernière. CADU et al. [13] ont réalisé un ensemble d'essais de mise en œuvre d'un composite époxy renforcée de lin pour optimiser les propriétés mécaniques et réduire les temps de mise en œuvre. Les températures de cuisson et de post-cuisson, ainsi que la vitesse de refroidissement ont peu d'influence sur la rigidité du matériau contrairement à la pression. La pression optimale relevée est entre 3 et 5 bars. Ces auteurs recommandent également un refroidissement lent.

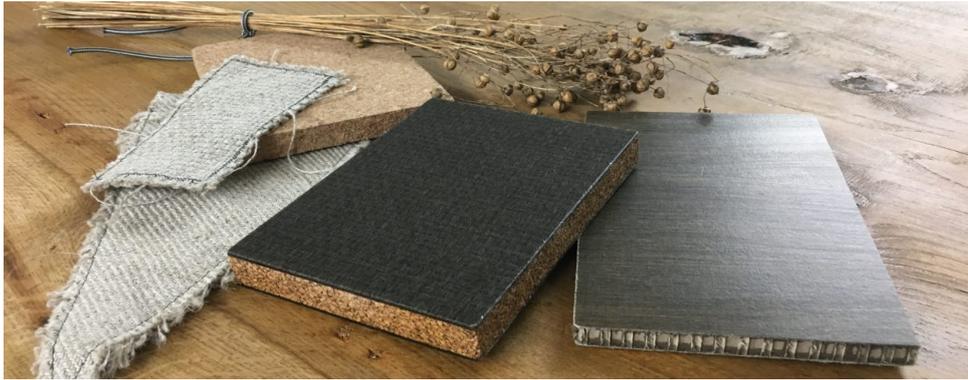


Figure 1.7 – Exemples de matériaux composites dérivés de la fibre de lin [71]

1.2.2.2 Mise en œuvre par thermocompression

L'insertion des fibres thermoplastiques au cours du processus de filature, permet d'obtenir des mèches ou fils bicomposants (hybrides ou comelés) en mélange intime. Dans le but d'élaborer des matériaux composites mis en forme, une cuisson permet de faire fondre le polymère thermoplastique et d'obtenir un matériau composite.

L'usage d'une fibre comelée, ou d'un mélange de fibre permet l'obtention de matériaux composites à grande vitesse, grâce à un calandrage ou un passage au four.

1.2.2.3 Mise en œuvre des matériaux composites renforcés de fibres naturelles

Les renforts d'origine naturelle permettent la réalisation de matériaux composites à faible densité et faible cout. Les matériaux composites renforcés de lin et de chanvre proposent à leur concepteur une grande gamme de propriétés pour différents secteurs ; la diversité des couleurs, textures, et l'environnement créé par ces matériaux biosourcés offrent de nouvelles perspectives [72].

Les propriétés des fibres naturelles ont tendance à rendre l'élaboration du matériau composite difficile. Parmi celles ci, le caractère hydrophile et leur haut taux d'absorption d'humidité (de 20 à 95 % selon LE DUIGOU [73]) a tendance à réduire leurs propriétés mécaniques [24, 33]. Le taux d'humidité dans les fibres conditionne le module du matériau composite [13]. L'eau est un plastifiant des parois cellulaires des fibres végétales. Des traitements chimiques [33, 74] et physiques (traitement plasma) existent pour réduire le taux d'absorption et ainsi améliorer l'interface fibre-matrice lors de la mise en œuvre du composite. Pour son bas cout, sa facilité d'usage et son efficacité, le traitement alcalin⁹ est le plus employé pour modifier la surface des fibres. Mais ce traitement alcalin a tendance à diminuer le module et force à la rupture des fibres de lin [54]. ALAVUDEEN et al. [75] ont constaté que le traitement alcalin et SLS (laurylsulfate de sodium) permet d'obtenir des matériaux composites avec de meilleures performances. Un autre traitement, le traitement Duralin, rendant la fibre hydrophobe en modifiant sa surface,

9. Traitement chimique à base de soude (NaOH), également employé pour merceriser le coton

conserve les propriétés de la fibre et limite le taux d'absorption d'eau [76]. GEORGIPOULOS et al. [74] ont élaboré des matériaux composites à base de différentes matrices biodégradables (dont deux matrices biosourcées) et renforcés de fibre naturelles. Ils ont également regardé l'influence de trois traitements de surface des fibres (silianisation, plastilisation et un traitement à base d'anhydride maléique). Sans traitement, la faible adhésion des fibres avec la résine conduit à des propriétés mécaniques les plus faibles. Les fibres traitées adhèrent mieux à la matrice et conduit à de meilleurs résultats mécaniques. L'ajout de fibres naturelles au sein d'une matrice biodégradable accroît les propriétés mécaniques du polymère, mais la faible adhésion entre les fibres et la matrice conduit à des caractéristiques inférieures à celles des fibres préalablement traitées.

Les fibres naturelles présentent également une faible résistance à haute température et au feu. La température de dégradation de la fibre de lin est d'environ 200°C. La dégradation de la cellulose intervient aux alentours de 230°C. Cette température restreint le choix de la matrice. En effet, au-delà de cette température, il y a un risque de dégradation de la fibre et donc des propriétés mécaniques du matériau.

BENSADOUN et al. [77] ont comparé les performances mécaniques à l'impact de matériaux composites renforcés de lin. La structure de renfort et la ductilité de la matrice sont les paramètres majeurs sur la résistance à l'impact. Le type de fibre, leurs orientations, l'épaisseur du matériau et l'état de l'interface renfort-matrice sont également des paramètres influençant la résistance à l'impact du matériau. Les réponses du matériau à l'impact dépendent de la nature thermomécanique de la matrice (thermoplastique ou thermodurcissable). Ces auteurs ont obtenu des valeurs d'énergies d'absorption avec une matrice thermoplastique (MAPP) 50% supérieures à celles avec une matrice thermodurcissable (époxy).

1.2.3 Caractérisation des matériaux composites renforcés de fibre naturelles

WAMBUA et al. [78] ont utilisé plusieurs fibres naturelles pour réaliser des matériaux composites. En ajustant le taux volumique de fibres, les matériaux composites renforcés de fibres naturelles peuvent remplacer ceux renforcés de verre. ÅKESSON et al. [62] ont comparé des biocomposites à base de non-tissés de fibres naturelles/AESO et un composite non-tissé verre. L'imprégnation correcte des fibres naturelles a été vérifiée par microscopie électronique à balayage. Le taux volumique de fibre influe sur la contrainte et le module du matériau composite. Les propriétés mécaniques en traction et en flexion des biocomposites renforcés de lin sont meilleures que ceux renforcés de chanvre. ATHIJAYAMANI et al. [79] ont étudié l'influence de l'immersion de composites sisal-polyester et roselle/polyester (*Hibiscus sabdariffa*). Les propriétés en flexion et en traction sont proportionnelles au taux volumique de fibres. L'humidité entraîne une chute des propriétés mécaniques suite à la dégradation de l'interface fibre-matrice. MARTIN et al. [40] ont réalisé des matériaux composites renforcés de fibres de lin teillées et non teillées. Ces auteurs ont atteint un taux volumique de fibre supérieur avec le matériau composite renforcé de fibre de lin teillé et par conséquent obtenus de meilleures propriétés mécaniques en termes de rigidités

et contraintes à rupture.

Les matériaux composites renforcés de fibres naturelles ont tendance à absorber une plus grande quantité d'eau que ceux renforcés de fibres synthétiques. ALAMRI et LOW [80] ont étudié l'influence de l'immersion sur des composites à base de cellulose/epoxy en faisant varier les fractions volumiques. Le taux d'absorption en eau est proportionnel au taux de fibre. Les propriétés mécaniques en traction, en flexion, à l'impact, et à la rupture évoluent de manière conjointe au taux volumique de fibres. Cependant, après immersion, seules les propriétés à l'impact continuent de croître. PERON et al. [81] ont soumis des biocomposites à cinq niveaux d'humidité relatif. Ils ont relevé les meilleures contraintes à rupture à faible humidité relative. Les contraintes à rupture diminuent ensuite avec le taux d'humidité. BERGES et al. [82] ont étudié l'influence de l'humidité de composites lin-époxy au cours de plusieurs essais mécaniques et ont constaté que la diffusion de l'eau au sein d'un biocomposite suit une diffusion Fickienne. La loi de Fick est donnée en équation (3.3). MALINGAM et al. [83] ont caractérisé un tissu de kenaf et ont noté une augmentation de la déformation à rupture du tissu après immersion dans l'eau.

BLANCHARD et al. [84] ont également investigué les propriétés du lin à plusieurs échelles. Entre les échelles (fils vers renforts et renforts vers composite), ils notent une diminution notable des écarts-types des valeurs identifiées. Ils concluent que la fibre de lin permet de réaliser des matériaux composites avec une variabilité dans les résultats similaires à celle obtenue sur des composites à base de verre. LEMMI et al. [5] ont comparé les propriétés mécaniques de deux matériaux composites en époxy, l'un renforcé d'un unidirectionnel, l'autre d'un tissu satin. DUC et al. [85] ont comparé les propriétés mécaniques de plusieurs matériaux composites. Composés de différentes natures de fibre (carbone, verre et lin), sous plusieurs formes (unidirectionnel et tissu), résinés par plusieurs types de résine (époxy, polypropylène et acide polylactique), ces matériaux sont mis en œuvre par différentes méthodes (RTM et compression molding). Les meilleures propriétés mécaniques ont été mesurées sur les matériaux renforcés de carbone. Cependant les matériaux composites en lin montrent une elongation à rupture bien plus importante que les autres structures et ces matériaux renforcés par des fibres naturelles présentent de meilleures propriétés d'amortissement que ceux renforcés par des fibres synthétiques.

ARUMUGAM et al. [86] ont comparé les propriétés mécaniques de plusieurs structures de renfort tissé (toile, sergé et interlock) de plusieurs natures (verre, lin et jute). L'imprégnation par une matrice époxy biosourcée est effectuée par moulage au contact. Les propriétés thermiques des matériaux composites sont inversement proportionnelles au taux volumique de fibre. Le matériau renforcé de verre présente les meilleures propriétés. Concernant la résistance à l'impact, les matériaux renforcés de fibres de lin présentent une meilleure résistance à l'impact que ceux renforcés de jute. L'ensemble des matériaux voient leur module d'Young diminuer avec la température. ALAVUDEEN et al. [75] ont réalisé des matériaux composites à base de polyester renforcé de fibres de banane et de kénaf. Ils ont également étudié l'influence de l'architecture de liage.

Des fils avec différents niveaux de torsion ont été imprégnés et caractérisés en traction par MA et al. [43]. Ces auteurs notent une diminution des propriétés mécaniques à rupture avec la

torsion des fils. Cette perte de propriétés est due à la torsion qui rend la structure de plus en plus perméable à la résine. OMRANI et al. [46] ont conduit une analyse multi-échelles sur trois natures de fils différents avec des niveaux de torsion différents. Au cours du tissage, les fils sont dégradés et la torsion des fils peut permettre de réduire cette dégradation, en augmentant leur résistance. Le comportement d'un matériau composite peut être déduit du comportement à l'échelle du renfort [46]. Selon OMRANI et al. [46], la torsion du fil est un paramètre textile qui influe sur les propriétés mécaniques aux échelles fils, renfort et composites.

D'autres auteurs se sont intéressés au comportement en traction [65], en compaction [87], en flexion [88–90], en fatigue [16, 90], ou à l'impact [91] de matériaux composites renforcés de fibres naturelles. Par exemple, PARK et al. [91] ont élaboré une structure en vinyle renforcé de fibres de lin pouvant concurrencer les métaux à l'impact.

ALAMRI et LOW [80] ont réalisé des matériaux composites à partir de cellulose recyclée et d'une résine époxyde. TEMMINK et al. [64] ont développé des matériaux composites à base d'une matrice biosourcée et renforcé de chute de jeans. NUEZ et al. [92] ont utilisé des anas de fibre de lin, habituellement considérés comme des déchets, comme renfort de matériau composite.

1.2.4 Applications des matériaux composites renforcées de fibre naturelles

Mobilité La mobilité est un domaine où les matériaux composites commencent à s'imposer et où l'innovation est nécessaire pour rendre les matériaux plus performant, plus léger et moins cher. Les composites à base de fibres naturelles sont utilisées dans l'industrie automobile pour réaliser des joints d'étanchéité de portière automobile ou encore des panneaux de portière [28], ou sous forme de matériaux non tissés à base de fibre naturelle et de polymères thermoplastiques pour obtenir des matériaux légers, produit à haute cadence [28]. En 2018, TEMMINK et al. [64] ont développé des matériaux composites à base de différentes résines biosourcés, selon quatre méthodes et affirment que certaines résines biosourcées sont adaptées aux applications structurales. ÅKESSON et al. [62] conseillent cependant d'utiliser les matériaux composites biosourcés pour des applications d'intérieurs, faute aux propriétés hydrophiles des fibres naturelles.

Dans le cadre du projet européen SSUCHY [93], l'objectif est de réaliser des matériaux composites biosourcés pour élaborer des parties de scooter, d'automobile et d'avion. Plus récemment, l'entreprise allemande GreenBoat a présenté un bateau nommé FLAX27 (figure 1.8) dont la coque est constituée d'un matériau composite renforcé de lin [71]. Selon CASTEGNARO et al. [94] un choix de résine approprié permet de réaliser des matériaux composites destinés à un usage maritime.

Santé Dans le domaine médical, les matériaux composites peuvent servir de prothèses. Les matériaux composites biosourcés sont compatibles avec l'organisme. Leur porosité et leur haut taux d'absorption d'eau les rend bio-compatible [24].



Figure 1.8 – GreenBoat FLAX27 [71]



Figure 1.9 – BLACKBIRD GUITARS en cours de réalisation et après pose des cordes

Décoration, mobilier d'intérieur et acoustique Les matériaux composites peuvent prendre des formes variées. Quelques exemples d'application des composites renforcés sont donnés par PIL et al. [72] comme des chaises, des cendriers, ou des lampes. Les fibres naturelles sont appréciées dans les matériaux composites pour leur capacité à absorber les vibrations. Ainsi certains revêtements de sol peuvent être fabriqués à partir de ces matériaux [47].

Les matériaux composites peuvent également être utilisés pour former des caisses de résonance et permettre la diffusion de son. DAMODARAN et al. [95] ont comparé deux tambours ; l'un traditionnel en bois, le second en matériau composite carbone/époxy. Outre le gain de masse important (environ 40), les réponses en fréquences, basées sur un test d'amortissement, des deux tambours sont comparables, dès lors que la peau utilisée est de même nature et que la tension appliquée est identique. BLACKBIRD GUITARS fabrique des guitares à base de résine biosourcées et de fibres de lin [96]. De même TIM DUERINCK [97] a développé des violons en matériaux composites renforcés de carbone puis de lin, par procédé RTM. PHILLIPS et LESSARD [98] ont développé deux guitares en matériau composite, l'une renforcée de fibres de verre, l'autre de lin.

Équipements sportifs Les matériaux composites à base de fibres naturelles sont couramment employés pour la réalisation d'équipements sportifs. Les raquettes de tennis intègrent un mélange



Figure 1.10 – Planche de surf Notox [99]

de fibre de carbone et de lin. Le carbone assure la rigidité de la raquette et permet l'absorption des vibrations. De même, les matériaux composites sont présents dans de nombreux accessoires tels que des skis, des cadres de vélos de course ou encore dans des clubs de golf [72].

Les planches de surf Notox (cf. figure 1.10) sont composés d'un raidisseur central lin/bio-époxy et de polystyrène et de liège pour le cœur de la planche [99].

1.2.5 Dimensionnement des structures composites

Il existe principalement deux méthodes de dimensionnement des structures composites : une méthode analytique (via une loi des mélanges ou la théorie des laminés), mais également des méthodes numériques de simulation par éléments finis [100]. Dans le cadre de ces travaux, nous nous limiterons aux méthodes analytiques.

La loi des mélanges est un modèle de dimensionnement qui permet, à partir des caractéristiques des constituants et des taux de fibres et de résine, de prédire les propriétés du composite. La loi des mélanges en module est donnée par l'équation 1.1a [101, 102].

$$E_C = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (1.1a)$$

Avec E , module de Young, V , la fraction volumique et les indices c , f et m pour respectivement le composite, le renfort fibreux et la matrice. L'application de la loi des mélanges est soumise à des hypothèses (élasticité linéaire, liaison fibre/matrice parfaite), limitant l'analyse au module d'élasticité et excluant les dans la majorité des cas l'analyse des phénomènes à ruptures. Dans ce dernier cas, la loi des mélanges s'écrit en fonction de la contrainte à rupture, en traction, à l'aide de l'équation (1.1b).

$$\sigma_C = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m \quad (1.1b)$$

La loi des mélanges s'applique principalement pour un renfort unidirectionnel dans le sens de la sollicitation (direction longitudinale). Dans cette direction il est supposé que toutes les fibres, alignées, reprennent de la même manière la sollicitation appliquée. En direction transverse la loi des mélanges est donnée par l'équation (1.2).

$$E_c = \frac{E_m \cdot E_f}{E_m \cdot V_f + E_f \cdot V_m} \quad (1.2)$$

Le modèle de HIRSCH [103, 104] est une combinaison de la loi des mélanges dans le sens longitudinal et dans le sens transversal, et est donné en équation (1.3). Ce modèle incorpore un paramètre x variant entre 0 et 1, simulant l'efficacité du transfert de charge entre la matrice et le renfort.

$$E_c = x \cdot (E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m) + (1 - x) \cdot \frac{E_m \cdot E_f}{E_m \cdot V_f + E_f \cdot V_m} \quad (1.3)$$

Suite à une étude de composites sisal-polyester et roselle-polyester, ATHIJAYAMANI et al. [79] propose une version modifiée du modèle de HIRSH pour modéliser des matériaux composites renforcés de fibres naturelles, orientées aléatoirement. Ce modèle présente une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux. HALPIN-TSAI [104, 105] ont développé un modèle (donné en module par l'équation (1.4)) qui prend en compte la longueur et le diamètre de la fibre. Le modèle de HALPIN-TSAI permet de définir aussi bien le module de Young que la contrainte à rupture.

$$E_c = E_m \cdot \left(\frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \right) \quad (1.4)$$

avec $\xi = \frac{2l}{d}$ et $\eta = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \xi}$

Le modèle développé par COX et complété par KERNCHHEL [104, 106] comprend un coefficient pondérateur pour l'orientation des fibres (équation (1.5)). Ce coefficient modélise l'angle des fibres, au sein de la structure de renfort utilisées pour l'élaboration des composites. L'objectif de COX et KERNCHHEL est de modéliser cette désorientation relativement à l'axe de sollicitation, issue, par exemple de la torsion appliquée lors de l'élaboration d'un fil.

$$E_c = E_f V_f \eta \left(1 - \frac{\tanh\left(\frac{\beta l}{2}\right)}{\frac{\beta l}{2}} \right) + E_m V_m \quad (1.5)$$

avec $\beta = \sqrt{\frac{2\pi G}{E_f A_f \ln(R/r)}}$

Dans le cas des matériaux composites renforcés de fibres naturelles, SHAH et al. [44] ont développé un modèle, basé sur la loi des mélanges, prenant en compte la modification de la

structure induite par la torsion des fils. MADSEN et al. [102] ont complété la loi des mélanges classique en y incorporant l'orientation des fibres (via le paramètre η_0 , appelé coefficient de performance lié à l'orientation des fibres), la longueur des fibres (via le paramètre η_1 , appelé coefficient de performance lié à la longueur des fibres), ainsi que le taux de porosité (via le paramètre n). La loi des mélanges qui en découle est donnée par l'équation 1.6 [102].

$$E_c = (\eta_0 \eta_1 E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m) (1 - V_p)^n \quad (1.6)$$

Le coefficient de performance de l'orientation des fibres η_0 peut être exprimé en fonction de la torsion de la mèche (équation (3.9)) ou de son titrage et sa densité (équation (3.10a)) [44].

EFENDY et PICKERING [104] ont comparé des éprouvettes de PLA renforcées de lin et de chanvre avec plusieurs modèles théoriques. La loi des mélanges (non modifiée), le modèle d'HIRSCH et le modèle de KELLY-TYSON n'ont pas retenu leur attention. La loi des mélanges modifiée et le modèle de COX modifié présentent les meilleurs résultats en contrainte tandis que le modèle de HALPIN-TSAI modifié et le modèle de COX (non modifié) donnent les meilleurs résultats en module (par rapport aux essais expérimentaux). Les propriétés des matériaux composites à base de fibres discontinues dépendent de la longueur et de l'orientation des fibres et également du transfert de charge entre la matrice et le renfort. SALEH et al. [107] ont réalisé des matériaux composites renforcés de fibres de datte et analysé leur comportement en fatigue. Ils ont comparé leurs résultats avec ceux fournis par le modèle de D'AMORE et al. [108]. Les résultats expérimentaux sont bien corrélés avec ceux issus de la simulation.

1.3 Renforts tissés 3D interlock chaine

Le rôle du renfort au sein d'un matériau composite est de résister aux sollicitations mécaniques. Le renfort est obtenu par tissage, tricotage, tressage, etc... Ces renforts sont ensuite empilés, pour satisfaire le cahier des charges relativement aux orientations fibreuses souhaitées mais également pour obtenir les taux de fibres ciblés. Cependant, l'absence de liage entre les différentes couches provoque une faiblesse dans l'épaisseur, notamment pour les structures de fortes épaisseurs (à grand nombre de couches). Pour pallier à ce manque de liens entre les plis, plusieurs technologies, comme détaillées précédemment (cf. section 1.2.1.1), existent dont le tissage 3D interlock chaine. Ce type de tissage innovant permet de lier plusieurs couches de tissus en une seule étape et de disposer les fils dans trois directions, et notamment dans l'épaisseur.

- ① Le tissage 3D interlock chaîne n'est pas la seule technologie permettant d'assembler plusieurs couches de tissus pour obtenir des renforts épais. La couture est le moyen d'assembler plusieurs couches de renfort. De même, le piquage [109] et le z-pinning [110] permettent cette liaison entre les couches. Les fils, ou pins, insérés servent de renfort dans l'épaisseur. Dans tous ces cas, une étape d'assemblage post-tissage qui permet de lier entre elles les différentes couches de renfort est nécessaire. Cependant, cet ajout de fils, principalement effectué par l'insertion d'une aiguille au travers de l'assemblage, peut dégrader localement le renfort.
- D'autres technologies de mise œuvre du fil tel que le tricotage 3D et le tressage 3D [55, 56] permettent également de réaliser des assemblages de plusieurs couches d'étoffes.

De plus, le tissage 3D interlock chaîne permet de réaliser une structure multicouche, facilement manipulable et prête à être mise en œuvre comme renfort au sein d'un matériau composite. En conséquence, le tissage 3D interlock chaîne est une technologie associée à de nombreux brevets [111–113]. Dans le cadre du projet **FLAX3D** et de ces travaux de recherche, nous nous intéresserons uniquement au tissage 3D interlock chaîne.

1.3.1 Définition

Le tissage est un procédé permettant la création d'étoffe par l'entrecroisement, généralement perpendiculaire, de fils de chaîne et de fils de trame [7]. Le tissage permet d'obtenir des structures textiles dont deux dimensions sont supérieures à la troisième. Il existe trois grandes familles d'architectures tissées : les taffetas (dont la toile et ses dérivés : les nattés, reps et cannelés), les sergés (dont les croisés) et les satins.

Par projection de la définition du tissage 2D, un tissu 3D interlock chaîne est un assemblage de plusieurs couches de tissu liées dans l'épaisseur par des fils de liage [51]. Ces fils de liage sont insérés au cours du tissage, en sens chaîne pour les tissus 3D interlock chaîne.

Il faut différencier les techniques de tissage en fonction du nombre d'axes par lesquels sont introduits les fils (cf. figure 1.4). Dans le cas du tissage 3D interlock chaîne, deux axes sont utilisés pour former la structure : la chaîne et la trame. Le tissage 3D interlock chaîne est le seul réalisable sur une machine à tisser traditionnelle. Dans le cas du tissage tri-axial 3D, les fils sont introduits selon trois axes ou plus.

Dans la composition des structures 3D interlock chaîne les fils peuvent être divisés en quatre groupes. Les fils de chaînes de liage (en bleu clair, figure 1.11) assurent le lien entre les couches de tissus et contribuent aux propriétés mécaniques dans la direction de l'épaisseur et/ou en cisaillement transverse. Les fils de chaîne de renfort (en bleu foncé, figure 1.11) apportent les propriétés mécaniques membranaires dans le sens longitudinal de la structure. Ces fils de chaîne de renfort sont droits dans la structure, et toujours placés entre deux couches de fils de trame. Les fils de trame (en rouge, figure 1.11) contribuent aux propriétés membranaires mais dans le sens transverse de la structure et dont le nombre définit le nombre de couches de la structure.

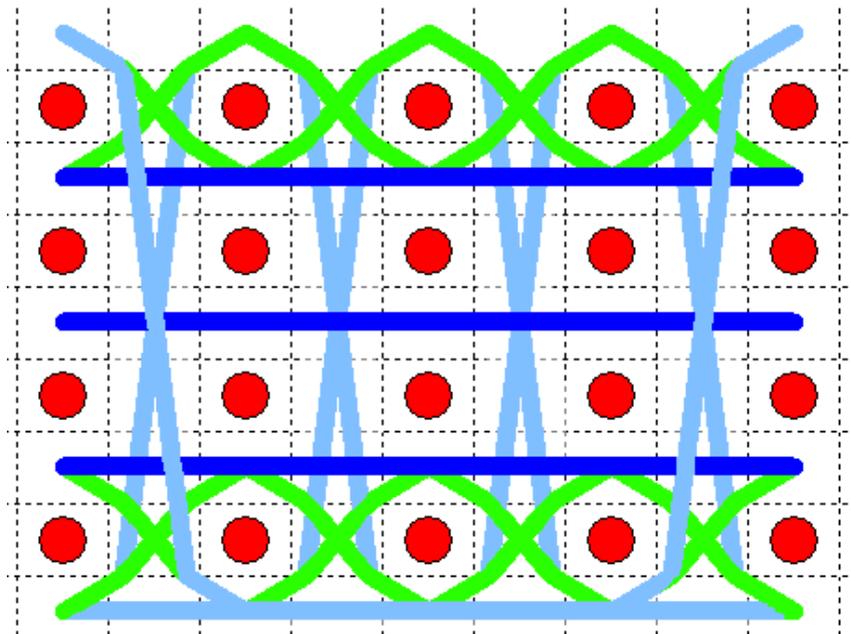


Figure 1.11 – Coupe transversale chaîne d’une structure 3D interlock chaîne (OT 4 3-4 Sergé 4 effet chaîne - fils de chaîne de liage en bleu clair, fils de chaîne de renfort en bleu foncé, fils de chaîne de surface en vert, fils de trame en rouge)

Les fils de chaîne de surface (en vert, figure 1.11) définissent un état de surface mais n’apporte pas de propriétés mécaniques.

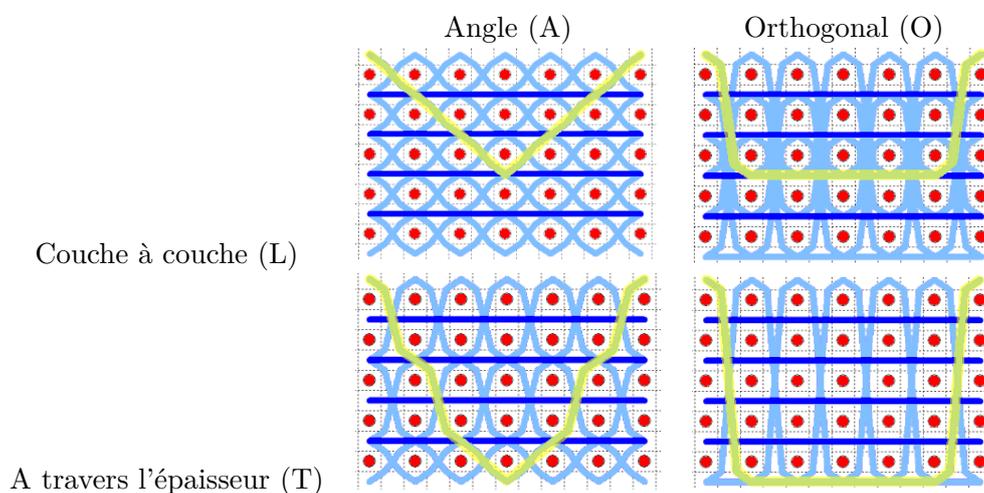


Figure 1.12 – Classification des structures 3D interlock chaîne

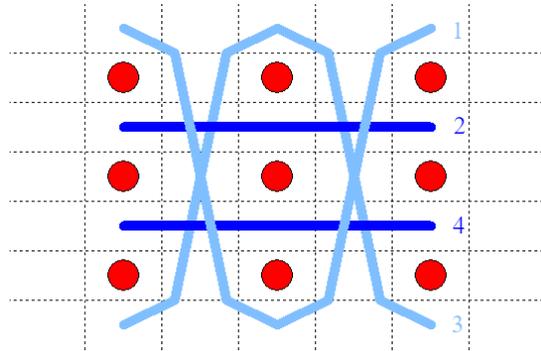
L’assemblage, par tissage, de ces différents fils nécessite une classification. BOUSSU et al. [51] ont classé les tissus 3D interlocks chaînes en quatre familles, en fonction du parcours effectué par le fil de chaîne de liage. La figure 1.12 illustre ces quatre types de liage. Les tissus 3D interlocks chaînes sont caractérisés par le type d’angle effectué par le fil de liage en entrant dans la structure : A (*Angle*) ou O (*Orthogonal*). Ils sont également caractérisés par la profondeur de liage : L (*Layer to layer* - couche à couche) ou T (*Through the thickness* - à travers l’épaisseur).

Dans le cas des structures liées à travers l'épaisseur, le rôle des fils de chaîne de renforts est toujours d'apporter les propriétés mécaniques membranaires de la structure mais également d'entrelacer les fils de trame en colonne (l'un au-dessus de l'autre).

Les dispositions longitudinales et transversales des fils de liage sont définies par l'armure de tissage. La nomenclature des structures 3D interlock chaîne est donnée ci-après ainsi qu'un exemple :

$$\begin{array}{rcl}
 X_1 X_2 N Y_1 - Y_2 & \text{Liage} & \{Armure\} \{ \# \} \\
 & \text{Renfort} & \{ \# \} \\
 & \text{Surface} & \{ \# \}
 \end{array}$$

où X_1 désigne le type d'angle formé par les fils de chaîne de liage, X_2 désigne le type de profondeur formé par les fils de chaîne de liage, N donne le nombre de couches de la structure 3D interlock chaîne, Y_1 le pas de liage et Y_2 le nombre de couches traversées par les fils de chaîne de liage.

Exemple 1.1

OT 3 1-3 Liage {Toile} {1 3 - # - # - #}
 Renfort {# - 2 - 4 - #}

L'architecture de l'exemple 1.1 est composée de 4 fils de chaîne ; les fils de chaîne de liage étant numérotés 1 et 3, et les fils de chaîne de renfort étant numérotés 2 et 4. Les fils de chaîne de liage forment une toile ($Y_1 = 1$), en liant la structure au travers de l'épaisseur ($X_2 = T$). En conséquence la profondeur de liage est égale au nombre de couche ($Y_2 = N = 3$). Le liage est orthogonal, car le fil entre dans la structure perpendiculairement aux fils de trame ($X_1 = O$). Les numéros des fils de chaîne sont répétés dans la nomenclature de l'architecture. La structure ne présentant pas de fils de chaîne de surface, la partie de la définition concernant ces fils est omise. Enfin, la position des fils de chaîne est indiquée en fonction de la *profondeur minimale*. La profondeur minimale des fils de chaîne de liage 1 et 3 est l'intercouches 0. La profondeur minimale du fil de chaîne de renfort 2 est l'intercouches 1. De même, pour le fil de chaîne de renfort 4 qui est positionné sur l'intercouches 2. Les intercouches vides sont marquées par un dièse (#).

Le carton de la structure est donné sur le « plan de tissage » en Annexe B.1. La fiche technique de cette structure, collectant l'ensemble des données de caractérisation y est également donnée.

Pour simplifier l'écriture de ces structures dans la suite de ce manuscrit, les positions des fils de chaînes seront omises. Ainsi les noms employés pour les structures seront du type $X_1 X_2 N Y_1 - Y_2$ Armure.

1.3.2 Mise en œuvre

Le tissage des structures 3D interlock chaîne est plus complexe que le tissage d'une structure 2D. Le tissage 3D interlock chaîne reste comme même réalisable sur une machine à tisser traditionnelle [70]. Une coupe schématique d'une machine à tisser à cadre réalisant une structure 3D interlock chaîne est donnée en figure 1.13. EL-DESSOUKY et al. [114] ont été capable de tisser un panneau 3D interlock chaîne pour un plancher automobile sur une machine à tisser à cadre légèrement adaptée. Par l'utilisation d'un nombre précis de cadres, ils ont noté une limitation dans le choix des architectures réalisables. Le tissage des structures 3D interlock chaîne implique

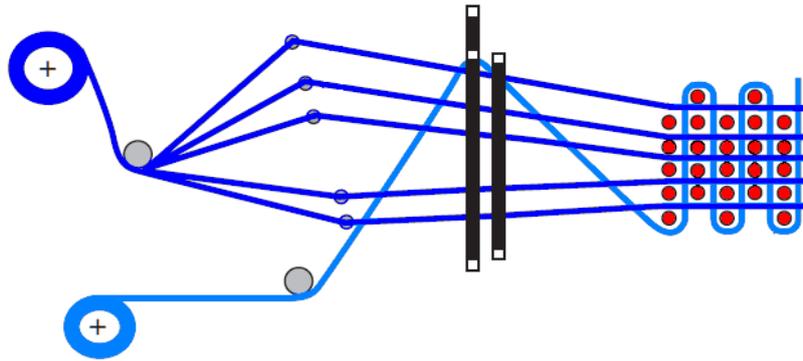


Figure 1.13 – Coupe schématique d'un métier à tisser à cadre pour réaliser une structure 3D interlock chaîne (adaptation [68])



Figure 1.14 – Machine à tisser LINDAUER DORNIER destinée à la réalisation de structures épaisses [120]

une adaptation des machines à tisser [114–118].

La consommation des fils de chaîne dépend du type de fils. Un fil de chaîne de liage va être consommé plus rapidement qu'un fil de chaîne de surface ou un fil de chaîne de renfort. Or, pour assurer la tension nécessaire aux fils de chaîne, l'usage d'une seule ensouple n'est pas à privilégier. Un système de plusieurs ensouples est nécessaire au tissage de structures 3D interlock chaîne [119]. L'utilisation d'un cantre est à privilégier car la tension de chaque fil est contrôlée de manière indépendante.

Au cours du tissage, les fils de chaîne sont soumis à plus de frottement. Dans une structure 3D interlock chaîne, les fils de chaîne sont davantage sollicités pour tisser la même longueur de tissus. De plus, pour tisser les couches les unes à la suite des autres, des fils de chaîne doivent rester en position. De par leur épaisseur, les structures 3D interlocks chaînes ne peuvent être enroulées sur des rouleaux d'appels à la sortie de la machine à tisser [114]. Des déformations

de structures et de fibres sont à prévoir si un système de traction horizontal n'est pas utilisé. LINDAUER DORNIER GMBH a développé une machine à tisser adaptée au tissage des structures épaisses équipée d'une seule lance pour insérer le fil de trame (système monorapier) et d'un système de tirage horizontal du tissu (take-up horizontal) [121]. La figure 1.14 illustre la machine à tisser développée par LINDAUER DORNIER GMBH pour tisser des structures épaisses.

La technologie Jacquard permet la sélection de chaque fil de chaîne de manière individuelle. Cette technologie adaptée du tissage 2D traditionnel est particulièrement appréciée pour sa polyvalence. La technologie UNIVAL développée par STÄUBLI permet de définir de nombreux paramètres liés à la forme de la foule et ainsi limiter les frottements entre les fils [122–124].

BOUSSU et al. [111] ont développé une machine à tisser permettant de tisser à plat des structures épaisses. YING et al. [125] ont développé une machine à insertion multiple leur permettant de tisser des architectures trois couches. Leur machine à tisser équipée de deux cadres permet de tisser des architectures telles que OT 3 1-3 Toile. Les fils de trames sont retenus par un fil de couture (et par conséquent doublés).

Le tissage 3D interlock chaîne permet également de réaliser des structures aux formes plus complexes [49, 126, 127]. En considérant les dimensions des fils, il est possible d'obtenir une préforme aux dimensions prédéfinies [128].

1.3.3 Caractérisation des renforts 3D interlocks chaînes

Les caractérisations des renforts 3D interlock chaîne secs se dissocient en deux types : les propriétés textiles (incluant la masse surfacique, l'épaisseur, les embuvages et retrait, et les densités dans les différentes directions), et les propriétés mécaniques identifiées avant imprégnation (entre autre traction, flexion, compaction dans l'épaisseur).

1.3.3.1 Caractérisation sèche

Le tissage 3D interlock chaîne est plus complexe que le tissage 2D traditionnel. La différence de consommation en longueur des différents fils de chaîne (de liage, de renfort et de surface) implique un contrôle minutieux de la tension et de l'état de chaque fil de chaîne. DECRETTE et al. [123] ont étudié l'influence des paramètres de foule¹⁰ pour tenter de réduire la fibrillation occasionnée par le tissage 3D interlock chaîne. À l'aide d'une tête Jacquard UNIVAL, ils ont étudié différentes géométries de foule et déterminé le meilleur profil de foule, ainsi que la manière et l'ordre optimal de déplacement des fils au cours du tissage. Un choix adéquat de géométrie de foule permet de réduire les dommages des fils de chaîne [129]. BESETTE et al. [124] ont mesuré les tensions électriques des moteurs commandant les lices¹¹, nécessaires aux déplacements des fils de chaîne. Les tensions électriques sont fonction de la tension des fils de chaîne et des forces de frottement induites au cours du tissage. BESETTE et al. utilisent cette technique innovante pour surveiller le bon déroulé du tissage.

10. Ouverture des fils de chaîne pour permettre l'insertion du fil de trame.

11. Partie mécanique d'un métier à tisser dans lequel passe le fil de chaîne, permettant sa sélection

Le tissage 3D interlock chaîne est devenu depuis une dizaine d'années un domaine de recherche associé à celui des matériaux composites [70, 130–140]. BANDARU et al. [141] ont comparé des tissus 2D et 3D en kevlar et basalte. Ils notent une amélioration des propriétés mécaniques en traction et à l'impact en passant d'une toile 2D à une structure 3D interlock chaîne. La structure 3D est plus homogène et permet par conséquent de meilleures propriétés dans le plan, de meilleures tolérances à l'endommagement, et une meilleure absorption d'énergie suite à un impact. Le mélange intime des fibres de basalte avec des fibres de kevlar, au sein d'une structure hybride est avantageux, du point de vue des propriétés mécaniques.

Les densités atteintes, au cours du tissage 3D interlock chaîne, sont supérieures à celles du tissage traditionnel. NASRUN et al. [142] ont réalisé une même structure 3D interlock chaîne avec quatre valeurs de densité de fils de trame différentes, variant du simple au double. Ces auteurs ont constaté que la variation de la densité trame implique une variation de masse surfacique et des propriétés mécaniques en traction dans les deux directions. CORBIN et al. [115, 143] ont caractérisé mécaniquement une vingtaine de structures interlock. Les structures tissées ont été réalisées à partir de mèches de lin légèrement retordues, de différents titrages. Ces auteurs concluent que l'ajout de fil de chaîne de renfort augmente la masse surfacique et l'épaisseur de la structure tissée, et que la masse surfacique et la force à rupture de l'éprouvette en sens trame sont fonction de la densité trame. BANDARU et al. [141] ainsi que CORBIN et al. [115, 143] ont mis en avant une reprise de force sur certaines structures en sens chaîne. Cette reprise d'efforts proviendrait de la rupture des fils de chaîne de liage, qui plus ondulés dans la structure, ne cèdent pas en même temps que les fils de chaîne de renfort. KASHIF et al. [144] ont réalisé des structures 3D interlock chaîne et trame en jute pour étudier l'influence du motif formé par les fils de liage (chaîne et trame) sur les propriétés mécaniques. L'architecture du renfort a selon eux, une forte influence sur les propriétés structurelles et mécaniques de la structure sèche. KORKMAZ et al. [145] ont tissé plusieurs structures 3D interlock chaîne en carbone et les ont caractérisés en termes de consommation de fils, d'épaisseur, de masse surfacique, de rigidité en flexion et de caractéristiques en traction. Les résultats obtenus par BANDARU, CORBIN, NASRUN, KASHIF et KORKMAZ, seront mis au regard des résultats de caractérisation dans le chapitre suivant.

Mise en forme des tissus 3D interlock chaîne Aux deux types de caractérisation des tissus 3D interlock chaîne (textiles et mécaniques), s'ajoute les analyses de déformabilité de ces structures lors de l'étape de préformage. L'étude de la mise en forme et de la déformabilité de ces structures est nécessaire dès lors que la géométrie de la pièce finale composite n'est pas simplement plane.

Les structures 3D interlock chaîne sont principalement utilisées comme renfort de matériaux composites. Au cours de leur élaboration, le renfort doit être mis en forme et est assujéti à des contraintes. VERNET et al. [146] ont soumis des tissus 3D interlock chaîne à des essais de compaction. PAZMINO et al. [137] ont mis en forme une structure 3D interlock chaîne quatre couches développée par 3TEX INC. Ils ont dans un premier temps observé le comportement de la structure en flexion sous son propre poids puis testé le drapage de la structure sous différentes

formes. Ils concluent que la structure est adaptée à des mises en forme complexes. DUFOUR et al. [147, 148] ont développé des structures 3D interlock chaîne hybride verre/polypropylène et les ont soumis à des essais d'emboutissage. Ils ont remarqué que les structures liées couche à couche sont les plus aptes à se déformer et présentent le meilleur comportement à l'emboutissage (ie. sans générer de défauts à la surface du tissu). NAWAB et al. [149] ont soumis des structures 3D interlock chaînes de cinq et treize couches à différents états de plissement. Ils ont relevé d'important changement d'épaisseurs, des glissements entre les couches, des changements dans les proportions de fibres et ont essayé de les modéliser. DE LUYCKER et al. [150] ont réalisé des simulations numériques d'emboutissage sur un poinçon hémisphérique et les ont comparés à leurs résultats expérimentaux. Les résultats obtenus numériquement sont proches de ceux obtenus expérimentalement.

1.3.3.2 Caractérisation des tissus 3D interlock chaîne imprégnés

DAHALLÉ et al. [131] affirment que les meilleures performances mécaniques sont obtenues avec des structures présentant peu d'embuvage et les plus forts taux volumiques de fibre. WARREN et al. [151] ont comparé le comportement en traction, en compression et en cisaillement de matériaux composites renforcés d'un empilement de huit couches de structure 2D et d'une structure 3D interlock chaîne cinq couches. ADANUR et al. [70] ont réalisé des structures tissées interlock comme renfort pour matériau composite. Par la présence de fils de liage dans l'épaisseur, la résistance au délaminage et la quantité d'énergie absorbée lors d'un impact sont augmentées par rapport à une structure stratifiée (non renforcée au travers de l'épaisseur). JABBAR et al. [133] ont réalisé quatre panneaux renforcés par une structure 3D interlock chaîne en lin et étudié l'influence du nombre de points de liage.

MA et al. [152] ont décrit l'allure de courbes de traction d'un composite renforcé d'un tissu 3D interlock chaîne par émission acoustique. Ils la divisent en trois zones : la première zone dont la signature acoustique caractérise la rupture de la matrice ; la seconde zone la rupture de l'adhésion fibre matrice ; la troisième zone la rupture des fibres de renfort (ici de verre). TSAI et al. [140] ont soumis des matériaux composites, renforcés d'une structure 3D interlock chaîne, à des essais de fatigue en traction. Ils ont détecté cinq étapes avant la rupture du matériau. Au cours des premières étapes, les premières ruptures dues aux imperfections de surface, se propagent. Puis les fibres et la résine perdent leur adhérence au cours des deux étapes suivantes. Enfin le matériau rompt où les défauts et les contraintes s'accumulent.

1.3.4 Applications

Les matériaux composites renforcés par des structures tridimensionnelles ont déjà fait leurs preuves auprès de l'industrie et ont déjà trouvé quelques applications. La plus connue est probablement les aubes de réacteur du moteur LEAP développées par SAFRAN [9, 124, 126]. Les matériaux composites renforcés d'une structure 3D sont déjà utilisés pour des applications automobile et aérospatiale pour leur capacité à épouser les formes et permettre une haute intégrité

structurale [151, 153, 154]. De plus, ces matériaux présentent une plus grande tolérance aux endommagements, une meilleure performance intralaminare et une plus grande résistance aux chocs.

Les applications des structures 3D sont nombreuses. Les structures 3D sont couramment utilisées dans les équipements sportifs et plus particulièrement dans les chaussures de sport, sous forme de tricots tridimensionnels [155]. Des structures 3D sont également employées en médecine pour former des vaisseaux artificiels.

Les matériaux composites renforcés d'une structure 3D interlock chaîne sont actuellement utilisés comme équipement de protection ou comme matériau destiné à remplacer des métaux dans l'industrie automobile ou aérospatiale.

Mobilité L'industrie automobile et l'industrie aéronautique sont les pionniers des matériaux composites. Les structures 3D sont utilisées par l'industrie automobile [156] et aéronautique [124, 126] pour fabriquer des matériaux composites aux propriétés optimisées. Dans le cadre du projet MAPPIC3D, plusieurs matériaux composites démonstrateurs renforcés d'une structure 3D interlock chaîne en fibre de verre (type E) ont été réalisés pour démontrer la faisabilité de pièces pour l'industrie automobile, ferroviaire et aéronautique.

Défense et sécurité En termes d'équipement destiné à des fins militaires, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) a développé des structures tissées 3D en carbone pour réaliser les pointes avant des têtes de rentrée de missiles stratégiques, des cols de tuyères et des divergents de moteur à carburant solide [8]. Le centre de recherche de l'université de Sheffield a mis au point récemment un matériau composite renforcé d'une structure tissée 3D destiné au cœur de réacteur nucléaire [157]

Les matériaux composites renforcés de structures tridimensionnelles sont également utilisés comme matériaux pare-balles. HA-MINH et al. [158, 159] ont réalisé des matériaux composites renforcés d'un tissu 3D interlock chaîne en para-aramide pour la protection balistique. PROVOST et al. [118] ont réalisé des matériaux composites renforcés d'un tissu 3D interlock chaîne pour la protection balistique de véhicule.

① Les tissus 3D interlock chaîne peuvent également être employés non résiné pour leur épaisseur et leur déformabilité. ABTEW et al. [160] ont développé des structures 3D interlock chaîne avec différentes densités pour des structures pare-balles. Leur objectif est d'utiliser cette structure complexe pour réaliser des gilets pare-balles adaptés à la morphologie féminine. Des structures 3D interlock ont également été intégrées dans certains vêtements d'astronautes [155] et dans un tout autre domaine, une équipe américaine a spécialement développé et breveté une structure 3D interlock pour stabiliser le sol et permettre le développement des plantes [155].

Conclusion

Les fibres naturelles sont des structures complexes dont les propriétés sont fonction de nombreux paramètres. Les conditions environnementales au cours de la croissance de la plante (et lors du rouissage), les procédés d'extraction des fibres et les conditions de tests de ces fibres influent sur les propriétés mécaniques. Le lin est une plante, dont sont extraites les fibres aux propriétés comparables à celles de la fibre de verre, créée par l'homme (notamment en termes de rigidité spécifique). La demande en fibres naturelles par l'industrie des matériaux composites ne cesse de croître. Mais son usage reste limité à certaines applications de par la nature même de ces fibres : leur haut taux d'absorption humidité, leur faible tenue thermique, ou encore le manque d'adhésion avec les matrices. Même si la culture et les procédés d'extraction des fibres de lin sont désormais bien maîtrisés, les fibres de lin comme toutes les autres fibres naturelles restent l'objet de nombreuses études. De plus, avec l'augmentation des prix du pétrole et l'amélioration des méthodes de production des bio-polymères, l'attrait des matériaux composites biosourcés ne cesse de grandir.

Le tissage 3D interlock chaîne est un procédé conduisant à l'élaboration d'un renfort épais et prêt à résiner ; éliminant des étapes de manipulations et de consolidation du renfort. L'élaboration des préformes est certes plus complexe que le tissage traditionnel 2D mais requière le même système de sélection de fils de chaîne et le même système d'insertion de fils de trame. De la géométrie et des paramètres de tissage vont dépendre les propriétés structurelles et mécaniques de ces structures. Les matériaux composites renforcés d'une structure 3D interlock chaîne présentent d'excellentes propriétés mécaniques et ont été adoptés par l'industrie automobile et aéronautique. La possibilité de disposer des fils dans l'épaisseur de la structure lui confère une bonne intégrité qui se traduit par une bonne résistance dans l'épaisseur, un délaminage réduit ou par une faible propagation des fissures.

Le couplage des fibres naturelles et de la technologie de tissage 3D interlock chaîne est encore très peu étudié dans la littérature. Les structures 3D interlock chaîne pourraient être une solution à l'utilisation des fibres naturelles dans les matériaux composites, en compensant certains de leurs inconvénients. Dans quelles mesures les fibres naturelles se prêtent-elles à l'élaboration de renfort 3D interlock chaîne ? L'usage des fibres naturelles dans des structures aussi complexes, ne multiplie-t-il pas les difficultés liées à l'élaboration de matériaux composites ? Quelles sont les propriétés des tissus 3D interlock chaîne en lin et des matériaux composites associés ? Pour répondre à l'ensemble de ces questions, une analyse du comportement de structures 3D interlock chaîne à base de fibres naturelles non imprégnées, est proposée dans le cadre de ces travaux. Associée à cette analyse, une démarche multi-échelles doit être mise en place, pour déterminer l'influence des fibres naturelles, des paramètres et de l'architecture de tissage sur de tels matériaux composites.

Chapitre 2

Étude de l'influence des paramètres produits sur le comportement mécanique des structures 3D interlocks chaines non résinées

Ce chapitre propose une analyse des structures 3D interlock chaîne sèches. Après une présentation de la méthodologie du tissage et des protocoles de caractérisation sèche de ces structures, les influences des paramètres sur le comportement seront développées.

Sommaire

2.1	Matériels et méthodologie	39
2.1.1	Mise en œuvre du tissage	40
2.1.2	Méthodes de caractérisation des structures tissées	44
2.2	Influence du type de liage	47
2.2.1	Protocole expérimental	48
2.2.2	Résultats expérimentaux	50
2.3	Influence du nombre de couches	58
2.3.1	Protocole expérimental	58
2.3.2	Résultats expérimentaux	61
2.4	Influence de la profondeur de liage	69
2.4.1	Protocole expérimental	70
2.4.2	Résultats expérimentaux	71
2.5	Influence de l'armure	77
2.5.1	Protocole expérimental	78
2.5.2	Résultats expérimentaux	78
2.6	Influence de la disposition des fils de chaîne de renfort	83
2.6.1	Protocole expérimental	83
2.6.2	Résultats expérimentaux	84
	Optimisation des procédés pour la réalisation de structures 3D interlock chaîne	85

Introduction

LES tissus 3D interlocks chaines sont des structures multicouches obtenues en liant dans l'épaisseur plus de deux couches et selon la direction des fils de chaîne. Si les structures 3D interlock chaîne paraissent complexes, un moyen d'appréhender ces structures est de les définir le plus en détail possible. Les outils de modélisation géométrique ainsi que les outils de tomographies permettent désormais de représenter et visualiser ces structures. En 2015, BOUSSU et al. [51] ont établi une définition des structures 3D interlock chaîne à partir du parcours des fils de chaîne de liage au travers de la structure. Ces auteurs ont défini quatre principaux types de liage et classifié les fils en fonction de leur rôle dans la structure. Cette définition a été présentée au cours du chapitre précédent (cf. section 1.3.1) et servira de base à celui-ci.

Le tissage 3D interlock chaîne est équivalent en termes d'équipement au tissage 2D traditionnel. Sa technologie permet, dans le même temps, de tisser plusieurs couches de tissus tout en les liant dans l'épaisseur. Mais comment choisir une structure 3D interlock chaîne adaptée ? Pour répondre à cette problématique, une démarche multi-échelles sera détaillée dans le troisième chapitre, mais dont la première étape est de comprendre les propriétés de ces renforts.

L'objectif de ce deuxième chapitre est de mettre en évidence l'influence des paramètres structuraux des tissus 3D interlock chaîne sur les propriétés physiques et mécaniques. Pour ce faire, trois campagnes de tissage ont été réalisées. Chaque campagne de tissage a pour objectif de définir l'influence d'un ou plusieurs paramètres des structures 3D interlock chaîne tout en fixant les autres. L'ordre de présentation des résultats suit celui de la définition. Les résultats de caractérisation sont précédés d'une section de méthodologie au sein de laquelle sont présentées les différentes étapes d'une campagne de tissage et les méthodes de caractérisation des tissus 3D interlock chaîne.

2.1 Matériels et méthodologie

Pour chacune de ces campagnes de tissage, le choix des architectures sera expliqué, et les résultats de caractérisation seront analysés. Au cours de ces études, différentes mèches de lin sont utilisées. Les mèches sont initialement plates. La cohésion des fibres est assurée par un agent de liaison. Le tableau 2.1 donne les ténacités à rupture des trois mèches employées, égales à au moins 15 cN/tex, valeur suffisante au tissage 3D interlock chaîne ; CORBIN et al. [115] ayant réussi à tisser ce type de matière avec une ténacité de 10 cN/tex. LINCORE est le nom commercial de la mèche de lin, fournie par le groupe DEPESTELE. La lettre R signifie roving et est suivie du titre de la mèche (exprimé en tex). Les quatre derniers chiffres se réfèrent à l'année de production de la mèche.

Nom	Torsion (tpm)	Ténacité (cN/tex)
LINCORE R1000 2016	30	15,0 ± 2,2
LINCORE R1000 2017	45	16,2 ± 1,4
LINCORE R1000 2018	40	18,2 ± 2,3

Table 2.1 – Ténacité à rupture des trois mèches utilisées

Pour simplifier la lecture, les noms des tissus 3D interlock chaîne présentés dans ce chapitre, ont été raccourcis. Les noms complets de ces structures, incluant la position des fils de chaîne au travers de l'épaisseur, sont donnés en Annexe C.

2.1.1 Mise en œuvre du tissage

Les mèches mises en œuvre lors du tissage sont préalablement retordues, à des niveaux de torsion précisés dans le tableau 2.1, sur une retordeuse à anneaux TWISTEC 3 (cf. section 3.1.1.4, figure 3.2). La torsion modifie la géométrie de la section de la mèche pour faciliter son passage au travers des lices et permet d'apporter les propriétés nécessaires, en termes de ténacité, pour le tissage. Le tissage est précédé de plusieurs étapes de préparation, présentées ci-après.

2.1.1.1 Ourdissage



Figure 2.1 – Ourdissoir SUZUKI NAS-5S

L'ourdissage est la première étape du tissage ; il permet de créer des nappes de fils parallèles qui seront les fils de chaîne de la structure tissée.

L'ourdissoir employé pour réaliser les ensouples dans le cadre de ces travaux est un ourdissoir SUZUKI dit "fil à fil" ou d'échantillonnage NAS-5S (figure 2.1). Dans un premier temps, le fil est enroulé sur un tambour de cinq mètres de circonférence. Trois barres horizontales permettent de réaliser la croisure et de déterminer la longueur de chaque fil. La croisure permet de séparer les fils pairs des fils impairs. Cette croisure est indispensable à l'étape de rentrage. Dans un

deuxième temps, les fils sont coupés et leurs extrémités sont collées sur une ensouple. Le tambour principal et l'ensouple sont mis en rotation pour transférer la nappe de fils parallèles du tambour à l'ensouple.

Alors qu'une seule ensouple est suffisante pour réaliser des tissus 2D, plusieurs ensouples sont nécessaires pour réaliser des tissus 3D interlock chaîne. La consommation des fils de chaîne de liage, de surface et de renfort variant en fonction de l'architecture, il est préférable de séparer chaque type de fils sur des ensouples différentes. La densité chaîne finale de la structure 3D interlock chaîne est alors la somme des densités de chaque ensouple.

2.1.1.2 Rentrage, piquage et attachage



Figure 2.2 – Rentrage, piquage et attachage

Qu'ils proviennent de l'ensouple ou d'un cantre, les fils de chaîne sont individuellement équipés d'un lamelle qui détecte par contact électrique une importante baisse de tension ou une casse de fil, puis passent dans les lices des cadres de la machine à tisser et finalement entre les dents du peigne.

Les lices sont des éléments métalliques qui guident et permettent la sélection des fils de chaîne. Sur une machine à tisser à cadre, les lices sont associées à un cadre qui se déplace verticalement (partie supérieure de la figure 2.2). Sur une machine à tisser Jacquard, les lices sont associées à des arcades, reliées à des crochets de la mécanique Jacquard, qui permettent la sélection individuelle d'un fil de chaîne. Le rentrage consiste à faire passer chaque fil de chaîne dans une lice. La manière dont les lices sont positionnés, en ordre croissant des fils de chaîne, au sein des cadres définit un type de rentrage. Le type de rentrage le plus simple est le rentrage suivi au cours duquel le fil noté i est inséré dans le cadre noté i , modulo le nombre de cadres. Il existe d'autres types de rentrage tel que le rentrage sauté, le rentrage à pointe et retour, etc... La manière dont sont rentrés les fils de chaîne conditionne l'architecture de la structure tissée. Le choix du rentrage permet de limiter les mouvements de cadres et ainsi limiter les frottements

entre les fils de chaîne. Le rentrage est une étape complexe et chronophage ; d'autant plus que le nombre d'ensouples est important. Les moyens d'accès à l'arrière de la machine n'étant pas toujours simple, insérer un fil spécifique au milieu de la machine est parfois difficile, malgré l'aide apportée par la croisure.

Le peigne est un élément mobile de la machine à tisser permettant de compacter la structure (au centre de la figure 2.2). Sa densité et le nombre de fils par broche définissent la densité chaîne du tissu. Les fils de chaîne sont ensuite attachés à un morceau de tissu pour les maintenir en tension, et les faire passer dans les rouleaux d'appel de la machine à tisser.

① On parle de nouage, lorsqu'une nouvelle chaîne est nouée à la précédente pour poursuivre une production.

2.1.1.3 Tissage



Figure 2.3 – Échange d'un fil de trame par deux lances au cours du tissage

Au cours du tissage, les fils de trame sont insérés perpendiculairement au travers de la nappe de fils de chaîne. La position des cadres permet de définir la position des fils de chaîne et ainsi former le motif de tissage par changement successif de position. La position des cadres sur une machine à tisser traditionnelle est gérée par une ratière rotative (figure 2.4). L'insertion du fil de trame peut s'effectuer grâce à une navette, par une ou plusieurs lances ou par jet d'air. Après insertion du fil de trame, le peigne rabat le fil inséré et compacte la structure. La densité trame est définie au cours du tissage grâce au déplacement du tissu.

Plusieurs machines à tisser ont été utilisées pour réaliser l'ensemble des structures présentées dans ce manuscrit. Une machine à tisser DORNIER HTVS 4/S, une machine semi-automatique développée au sein du laboratoire [111] et des machines à insertion manuelle des fils de trame ont permis la réalisation de pas moins de 50 structures.

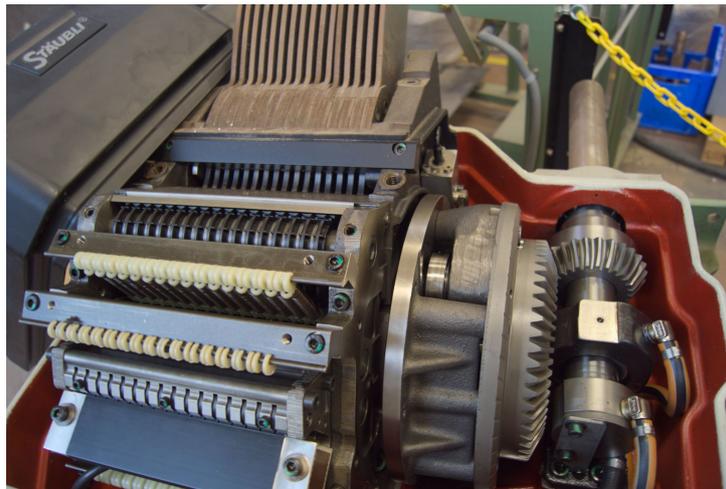


Figure 2.4 – Ratière rotative permettant la sélection des cadres

2.1.1.4 Découpe des éprouvettes

Après l'étape de tissage, des échantillons sont découpés pour les étapes de caractérisation. Cette étape de découpe des éprouvettes pour de faibles nombres de couches est possible avec des ciseaux. Cependant, pour les structures plus épaisses, la découpe manuelle devient difficile, dans ce cas. Les éprouvettes ont été découpées à l'aide d'un emporte-pièce sous presse hydraulique (cf. figure 2.5a). La dimension de l'emporte-pièce est de $300 \times 50 \text{ mm}^2$. Les réglages de la pression sont fonction du nombre de couches et des densités. La figure 2.5b illustre la précision de la découpe au travers d'un nombre important de couches.



(a) Presse hydraulique et emporte-pièce



(b) Structure OT 23 1-23 Toile après découpe

Figure 2.5 – Découpe des éprouvettes

Conclusion

Le tissage est un procédé complexe qui nécessite plusieurs étapes de préparation. Ces étapes nécessitent une présence humaine, pour veiller à leurs bons déroulés et sont plus ou moins

chronophages. La première étape est l'ourdissage, permettant la préparation de la nappe de fils de chaîne. Puis des étapes de rentrage des fils de chaîne dans la machine à tisser, de piquage dans le peigne et de nouage des fils de chaîne sur le rouleau d'appel de la machine à tisser.

2.1.2 Méthodes de caractérisation des structures tissées

L'ensemble des tests de caractérisation est effectué sous atmosphère contrôlée. La norme ISO 139 impose une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative de $65,0 \pm 4,0\%$. Les résultats présentés sont des moyennes d'au moins 10 mesures (sauf dans le cas de l'essai de traction, où cinq éprouvettes ont été soumises au test dans chaque direction). Un écart-type associé à chaque valeur moyenne est également calculé.

2.1.2.1 Densité chaîne et trame

La densité est le nombre de fils par unité de longueur dans une structure tissée. Ce test est défini par la norme NF ISO 4602. L'insertion de fils traceurs au sein de la structure permet de déterminer facilement le nombre de motifs, et d'en déduire la densité. En sens chaîne, les fils traceurs sont insérés sur l'ensouple. En sens trame, ils sont insérés au cours du tissage. Les fils traceurs sont des fils de couleurs de faible titrage n'influençant pas les propriétés de la structure 3D interlock chaîne.

2.1.2.2 Embuvage et retrait

L'embuvage et le retrait caractérisent la longueur des fils consommés liée à l'entrelacement dans un tissu. L'embuvage est mesuré pour chaque type de fils de chaîne (de liage comme de renfort) et le retrait pour chaque fil de trame du motif élémentaire. La détermination de la longueur apparente, notée L_a , est effectuée à l'aide d'une règle graduée. La détermination de la longueur réelle, notée L_r , est effectuée sur un dispositif horizontal de mise sous tension et de mesure des fils, communément appelé *maillemètre*. La précharge appliquée sur le fil pour le tendre dépend de son titre. Les valeurs d'embuvage et de retrait sont déterminées via les équations 2.1a et 2.1b, issues de la norme ISO 7211-3. L'embuvage et le retrait sont également déterminés en fonction de la profondeur des fils dans la structure. Les valeurs présentées sont des moyennes au travers de l'épaisseur.

$$\text{Emb} = \frac{L_r - L_a}{L_r} \times 100 \quad (2.1a)$$

$$\text{Ret} = \frac{L_r - L_a}{L_r} \times 100 \quad (2.1b)$$

2.1.2.3 Épaisseur et masse surfacique

La mesure de l'épaisseur est effectuée selon la norme NF ISO 4603. Le test est réalisé sur les éprouvettes destinées à la traction, issues de la découpe à l'emporte-pièce. Les éprouvettes sont placées sous un pied presseur équipé d'un extensomètre pour déterminer leur épaisseur. La pression nominale de mesure du pied presseur est de 2 kPa.

La mesure de la masse surfacique est effectuée selon la norme NF 12 127. Le test est effectué sur les éprouvettes destinées à la traction. L'échantillon d'aire, notée A , est placé sur une balance pour déterminer sa masse, notée m . Le calcul de la masse surfacique, notée M_s , s'effectue selon l'équation 2.2.

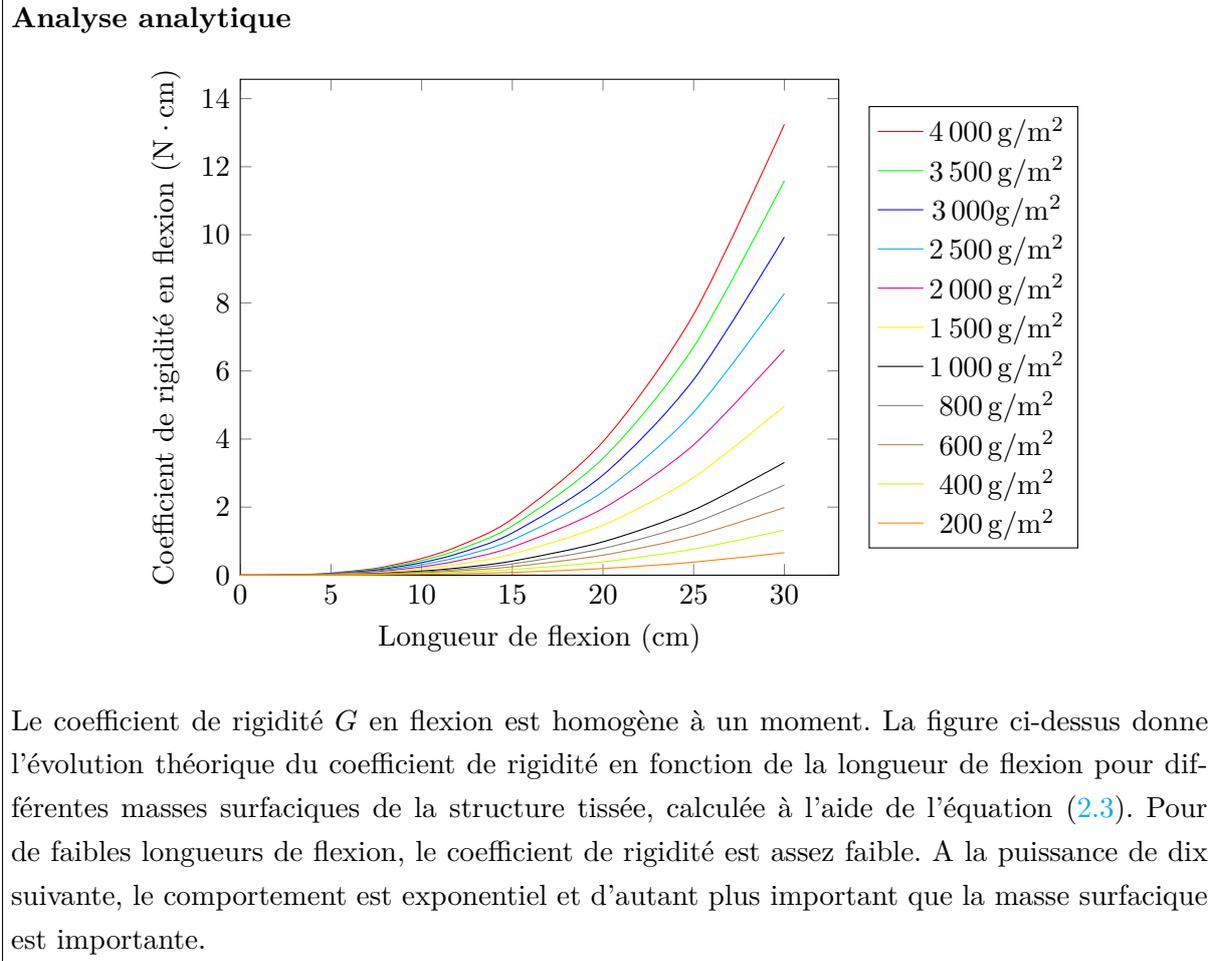
$$M_s = \frac{m}{A} \quad (2.2)$$

2.1.2.4 Comportement en flexion

Le comportement en flexion est mesuré en sens chaîne et trame du tissu, sur les éprouvettes de traction. Le protocole expérimental mis en place est adapté de la norme ISO 9073-7. La largeur de l'éprouvette est supérieure à celle recommandée par la norme. Ce choix permet de conserver au moins deux motifs élémentaires dans la direction testée. Au cours du test, l'éprouvette est glissée le long de deux plans, l'un horizontal, l'autre incliné à $41,5^\circ$. Le test se termine quand l'éprouvette, fléchissant sous son propre poids, touche le plan incliné. La longueur de flexion mesurée, correspond à la longueur de déplacement de l'éprouvette sur le plan horizontal. Le coefficient de rigidité en flexion est défini à partir de la longueur de flexion selon l'équation (2.3). La longueur de flexion est mesurée quatre fois sur chaque éprouvette destinée à la traction.

$$G = M_s \cdot g \cdot C^3 \quad (2.3)$$

avec G , coefficient de rigidité en flexion en $\text{N} \cdot \text{m}$, g , l'accélération de pesanteur ($9,81 \text{ m/s}^2$) M_s , masse surfacique de l'échantillon en kg/m^2 et C , la longueur de flexion en m.



Le module de rigidité en flexion F est ensuite déterminé à partir du coefficient de rigidité G et de l'épaisseur e selon l'équation (2.4) [161]. Le module de rigidité en flexion permet de comparer le comportement en flexion de structures de différentes épaisseurs.

$$F = \frac{12}{e^3} \cdot G \quad (2.4)$$

2.1.2.5 Comportement en traction

Les échantillons de structures 3D interlock chaîne sont caractérisés en traction uniaxiale dans les directions chaîne et trame. L'essai est effectué selon la norme ISO 13 934 sur un banc de traction INSTRON 5980. La dimension de l'éprouvette est de $300 \times 50 \text{ mm}^2$ avec un entre-mors de 200 mm. Une précharge de 10 N est appliquée avant le début du test. La vitesse de l'essai est de 100 mm/min. Afin d'éviter la rupture du tissu 3D interlock chaîne et les phénomènes de glissement dans les mors du banc de traction, des talons, constitués de couches de NCF de verre, sont imprégnés avec les extrémités de l'échantillon par une résine époxyde SR8200/SD7204 de Sicomin [162].

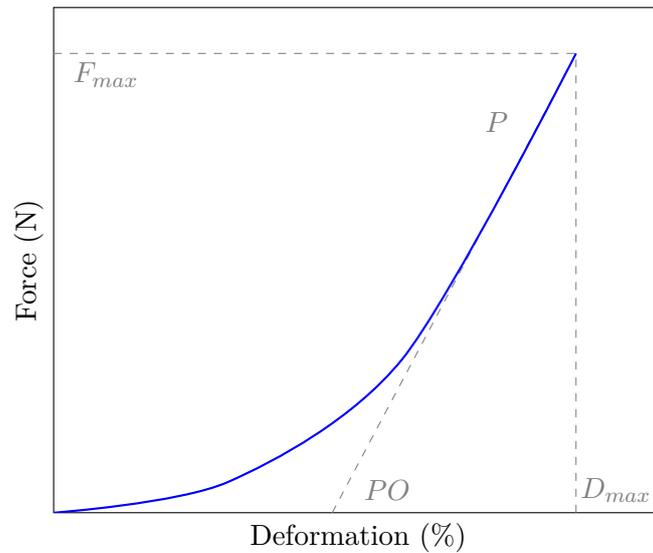


Figure 2.6 – Paramètres d'analyse d'un essai de traction tissu

Outre la force F_{max} et la déformation à la rupture D_{max} , la pente P et la perte d'ondulation PO sont estimées. Cette pente (exprimée en N) est calculée à partir du maximum local et peut s'associer à une rigidité lorsque les fils sont tendus. La perte d'ondulation, intersection entre la pente et l'axe des abscisses, correspond à la déformation de mise sous tension des fils. La figure 2.6 représente ces quatre paramètres.

2.1.2.6 Comportement en compaction dans l'épaisseur

Le comportement en compaction est analysé sur un banc de traction MTS. Un pli de structure 3D interlock chaine est placé entre deux plaques. La taille des éprouvettes est de $12 \times 12 \text{ cm}^2$. L'objectif est de mesurer l'évolution du taux volumique de fibre en fonction de la pression exercée sur le tissu 3D interlock chaine. La pression est calculée à partir de la force mesurée. Le taux volumique de fibre T est déterminé en fonction de l'épaisseur e (mesurée à partir du déplacement de la traverse du banc de traction), de la masse surfacique M_s , de la surface des plateaux A et de la densité de la fibre de lin ρ_{lin} selon l'équation (2.5) [163].

$$T = \frac{V_{fibre}}{V_{totale}} = \frac{m_{fibre}}{\rho_{lin} \times A \times e} = \frac{M_s}{\rho_{lin} \times A \times e^2} \quad (2.5)$$

2.2 Influence du type de liage sur les propriétés structurelles et mécaniques

$X_1 X_2$ N $Y_1 - Y_2$ Liage{Liage}{#} Renfort{#}

Le rôle des fils de chaine de liage est primordial au sein d'une structure 3D interlock chaine

car il assure les propriétés au travers de l'épaisseur. Dans la classification, le type de liage est défini par deux lettres. La première lettre définit l'angle avec lequel le fil de chaîne de liage entre dans la structure (A ou O) ; et la seconde lettre définit le nombre de couches traversées par les fils de chaîne de liage (L ou T). Les paramètres étudiés dans chaque section, issus de la définition des structures 3D interlock chaîne sont spécifiés en couleur en début de chaque section. Si le fil de chaîne de liage entre dans la structure en faisant un angle, le liage est dit à angle ($X_1 = A$). Si le fil lie perpendiculairement dans la structure, le liage est dit orthogonal ($X_1 = O$). Si le fil de chaîne de liage lie l'ensemble des couches de la structure 3D interlock chaîne, le liage est dit au travers de l'épaisseur ($X_2 = T$). Si le liage lie une partie des couches de la structure, le liage est dit couche à couche ($X_2 = L$). L'association de ces deux paramètres peut donner lieu à quatre types de liage notés AL, AT, OL et OT.

L'objectif de cette première campagne de tissage est de déterminer l'influence du type de liage sur les propriétés des structures tissées 3D interlock chaîne.

2.2.1 Protocole expérimental

2.2.1.1 Choix des structures

Quatre structures, associées aux quatre types de liage, ont été tissées à partir de mèches LINCORE R1000 2016. Le nombre de couches de l'ensemble des structures est de 5. Les coupes chaînes et les représentations 3D sont données en figure 2.7. Ces illustrations, comme toutes les représentations 3D des structures tissées de ce manuscrit, ont été réalisées avec le logiciel WiseTex®. L'armure choisie pour les fils de chaîne de liage est un sergé de 6, effet trame, cordon à gauche. Les quatre structures ne sont pas symétriques au travers de l'épaisseur (car le sergé possède un effet).

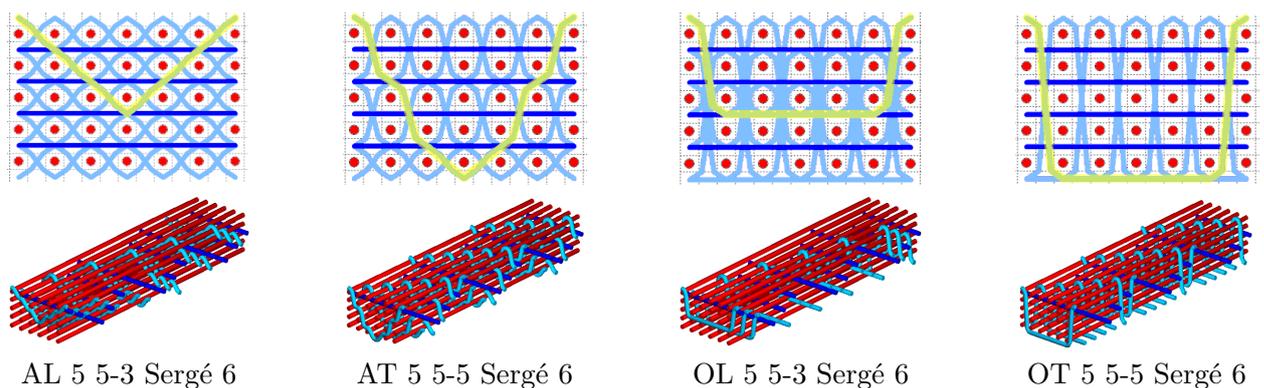


Figure 2.7 – Coupe chaîne des quatre structures étudiées

L'utilisation des 18 cadres pour réaliser les quatre structures est nécessaire pour placer correctement l'ensemble des fils de chaîne de liage des structures liées couche à couche ($X_2 = L$). En conséquence, le motif élémentaire des structures AL et OL est plus large que le motif élémentaire des structures AT et OT. Pour compenser cette différence, le motif des structures liées

au travers de l'épaisseur est répété trois fois là où le motif des structures liées couche à couche n'est présent qu'une fois. L'intersection entre les points de croisement des fils de chaîne de liage et fils de trame, dit point de liage, est plus distante dans les structures en L que pour celles en T.

- ① A la vue des coupes des tissus montrant l'évolution des fils de chaîne, on peut déjà supposer que les fils de chaîne de liage des structures liées à angle seront plus courts que ceux des structures liées orthogonalement. De même, les fils de chaîne de liage des structures liées couche à couche seront probablement plus courts que ceux des structures liées au travers de l'épaisseur.

2.2.1.2 Préparation au tissage

La mèche Lincore R1000 2016 employée lors de cette campagne de tissage est préalablement retordue. La torsion de 30 tr/m conduit à une ténacité à rupture de $15,0 \pm 2,2$ cN/tex (cf. tableau 2.1). Deux ensouples de 225 fils et de largeurs de 90 cm, ont été réalisées. L'ensouple de fils de chaîne de liage est rentrée sur 18 des 24 cadres selon un rentrage suivi. Les fils de chaîne de renfort sont quant à eux rentrés sur quatre cadres selon un rentrage à pointe et retour. La densité chaîne finale est de 5 fils/cm. Les deux cadres restant travaillent en toile pour former une lisière sur les bords du tissu (figure 2.8). Les structures sont tissées sur une machine à cadres DORNIER HTVS 4/S (cf. figures 2.2, 2.3 et 2.4). La densité trame de consigne est de 13 fils/cm.



Figure 2.8 – Lisière réalisée en fil de coton de faible titrage

2.2.2 Résultats expérimentaux

2.2.2.1 Densités chaîne et trame

	Sens chaîne (fils/cm)	Sens trame (fils/cm)
AL 5 5-3 Sergé 6	5,1	13,2 ± 0,2
AT 5 5-5 Sergé 6	5,1	12,5 ± 0,1
OL 5 5-3 Sergé 6	5,1	13,0 ± 0,1
OT 5 5-5 Sergé 6	5,1	12,8 ± 0,1

Table 2.2 – Densité chaîne et trame des quatre structures de la campagne #1

La densité chaîne est fonction de la largeur utile de la machine à tisser et de la densité et du piquage du peigne. Les valeurs mesurées de densité sont présentées en tableau 2.2. Les densités chaîne mesurées des quatre structures sont légèrement supérieures à la consigne de 5 fils/cm. Cette différence est due au retrait du tissu à la sortie de la machine à tisser. La densité trame est définie par la machine à tisser grâce aux valeurs constantes des vitesses des rouleaux d'appel. Les densités trame mesurées des quatre structures sont légèrement inférieures à la consigne de 13 fils/cm. Les fils de chaîne de liage étant plus longs dans les structures liées au travers de l'épaisseur, la structure est moins bien compactée que dans le cas des structures liées couche à couche.

2.2.2.2 Embuvage et retrait

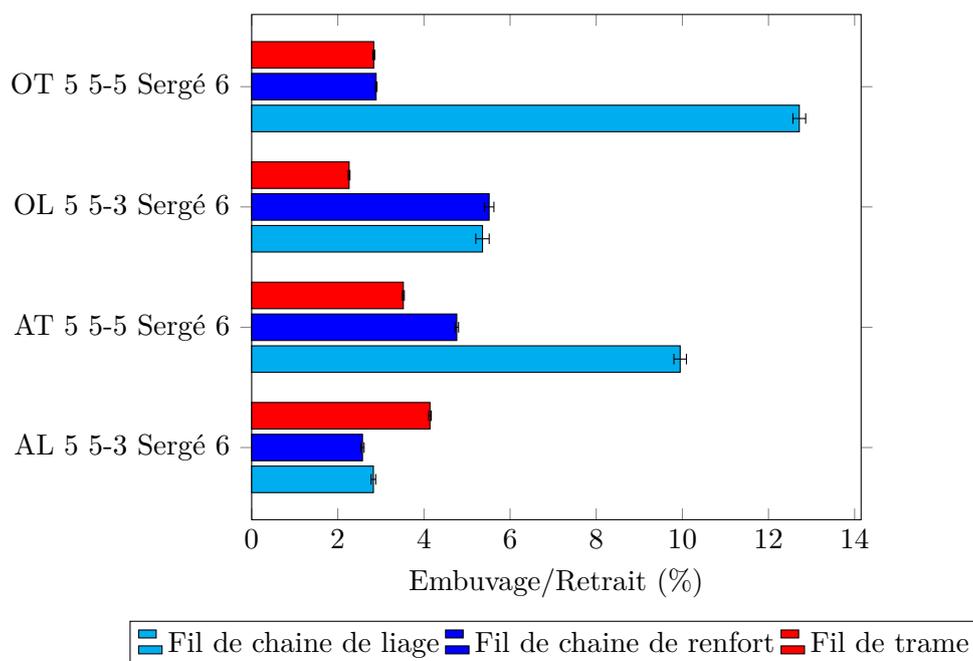


Figure 2.9 – Embuvage et retrait des quatre structures de la campagne #1

La figure 2.9 illustre les embuvages et retraits mesurés des trois types de fils des quatre structures tissées. L'embuvage des fils de chaîne de liage est fonction du type de liage. L'embuvage des fils de chaîne de liage des structures liées à angle ($X_1 = A$) est toujours inférieur à celui des structures liées orthogonalement ($X_1 = O$). De même les structures liées couches à couches ($X_2 = L$) présentent des embuvages de fils de chaîne de liage plus faibles que les structures liées au travers de l'épaisseur ($X_2 = T$). L'hypothèse émise concernant la longueur des fils de chaîne de liage en fonction du type de liage se vérifie ici.

L'embuvage des fils de chaîne de renfort et le retrait des fils de trame évoluent moins avec les types de liage. Les valeurs d'embuvage des fils de chaîne de renfort et le retrait des fils de trame évoluent pour équilibrer la structure.

2.2.2.3 Épaisseur et masse surfacique

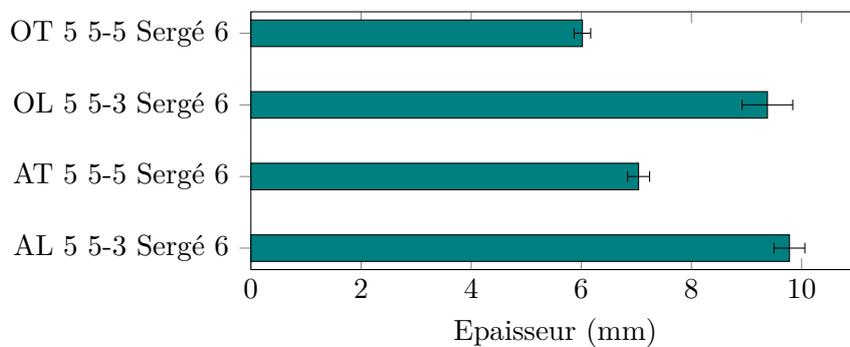


Figure 2.10 – Épaisseur des quatre structures de la campagne #1

La figure 2.10 donne les épaisseurs mesurées des quatre structures. Les structures liées couche à couche ($X_2 = L$) ont une épaisseur supérieure à celle des structures liées au travers de l'épaisseur ($X_2 = T$). Le passage du fil de chaîne de liage entre les couches des structures liées couche à couche implique une augmentation d'épaisseur.

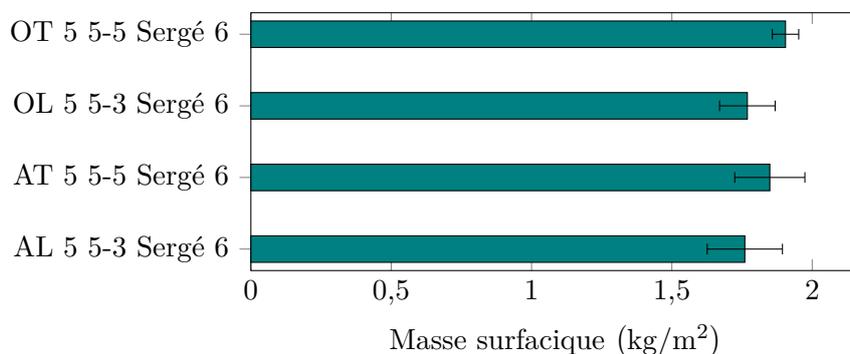


Figure 2.11 – Masse surfacique des quatre structures de la campagne #1

Les consignes de densité chaîne et de densité trame, sélectionnées au cours du tissage sont identiques pour les quatre tissus. A partir des mèches de 1 000 tex et à raison de 5 fils/cm en

sens chaîne et 13 fils/cm en sens trame, la masse surfacique théorique du tissu (hors embuvage et retrait) est de $1,8 \text{ kg/m}^2$. Les mesures effectuées, données en figure 2.11, sont proches de cette valeur théorique. En considérant l'embuvage des fils de chaîne de liage et la densité trame, les structures liées au travers de l'épaisseur ($X_2 = T$) présentent une masse surfacique légèrement plus importante que les structures liées couche à couche ($X_2 = L$). Cette masse surfacique est liée à la densification plus importante de ces structures.

2.2.2.4 Comportement en flexion

Au cours des essais, la longueur de flexion varie fortement en fonction de la disposition de l'éprouvette (notamment pour les structures liées au travers de l'épaisseur, d'une face à l'autre). Les structures n'étant pas symétriques dans l'épaisseur, les longueurs de flexion varient fortement lorsque les tissus sont retournés. Le tableau 2.3 donne les longueurs de flexion (en centimètre) des quatre tissus soumis au test. Les différences de longueur de flexion sont causées par les flottés du sergé de 6.

Longueur de flexion (cm)	Recto	Verso
AL 5 5-3 Sergé 6	$15,8 \pm 0,4$	$17,2 \pm 0,3$
AT 5 5-5 Sergé 6	$15,0 \pm 0$	$17,8 \pm 0,9$
OL 5 5-3 Sergé 6	$24,0 \pm 0,7$	$25,5 \pm 0,5$
OT 5 5-5 Sergé 6	$29,5 \pm 0,5$	/

Table 2.3 – Longueur de flexion moyenne par face

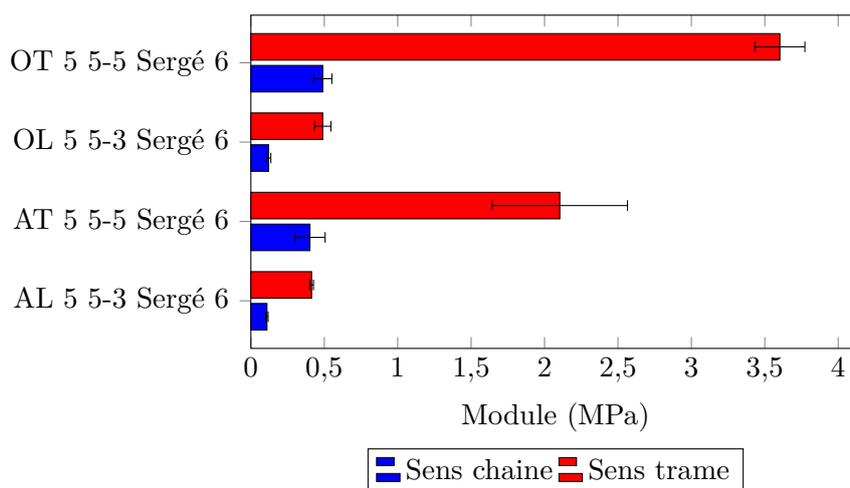


Figure 2.12 – Modules de rigidité en flexion des quatre structures de la campagne #1

Les modules de rigidité en flexion, calculés selon l'équation (2.4) sont donnés en figure 2.12. Le module de rigidité en flexion sens trame est toujours supérieur à celui sens chaîne. Cette

différence est liée aux densités de la structure. La densité de fils de chaîne est d'environ 5 fils/cm, alors que celle des fils de trame est de 13 fils/cm. Les modules, en sens trame, des structures AT et OT n'ont pas pu être déterminés à partir des éprouvettes destinées à la traction et ont nécessité l'emploi d'éprouvettes plus longues (mais de même largeur). Le module de rigidité en flexion des structures liées au travers de l'épaisseur ($X_2 = T$) est supérieur à celui des structures liées couche à couche ($X_2 = L$).

2.2.2.5 Comportement en traction

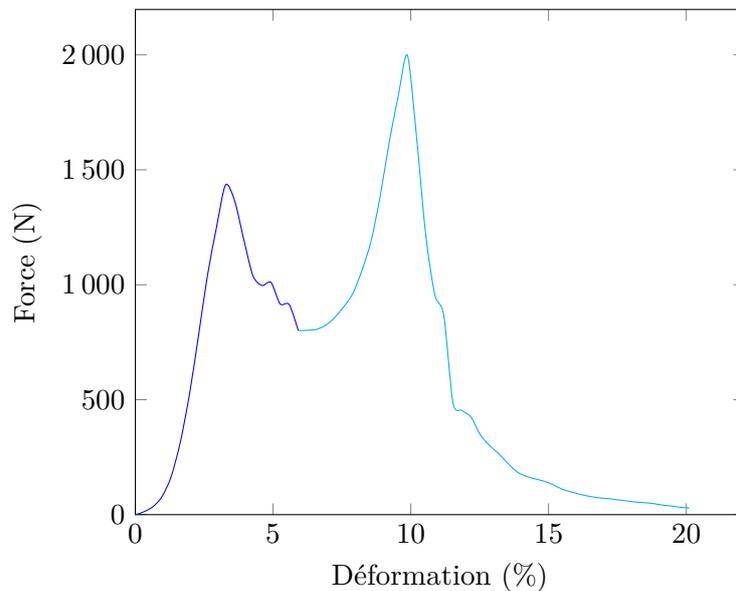


Figure 2.13 – Essai de traction sans chaîne de la structure AT 5 5-5 Sergé 6

La figure 2.13 représente un essai de traction sans chaîne de la structure AT 5 5-5 Sergé 6. Une reprise d'effort est constatée après le premier pic, ce même phénomène est identifié pour la structure OT. Le premier pic correspond à la rupture des fils de chaîne de renfort. Le second pic correspond à la rupture des fils de chaîne de liage au travers de l'épaisseur [128, 143, 164–166]. Ce deuxième pic n'est pas observé dans les structures liées couche à couche (AL et OL) car la différence de longueur entre les fils de chaîne de renfort et de liage est insuffisante (cf. figure 2.9). Pour ces architectures, sans double-pic en traction les fils de chaîne de liage et les fils de chaîne de renfort cèdent au même moment.

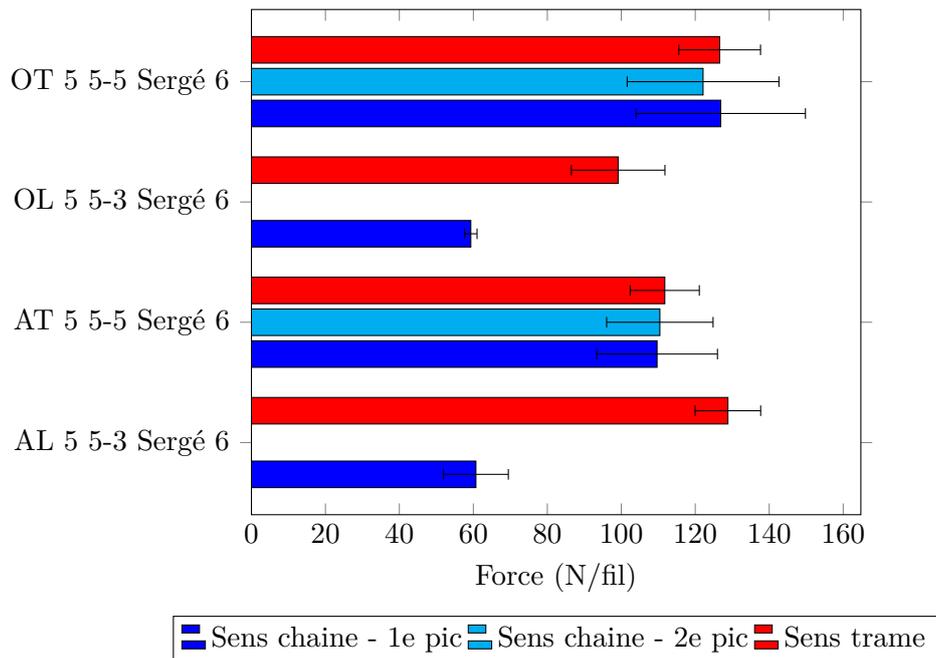


Figure 2.14 – Force à rupture par fils des quatre structures de la campagne #1

La figure 2.14 présente les valeurs des efforts à rupture, ramenés au nombre de fils pour s'extraire des phénomènes de densités, et extraites des essais de traction. Dans le cas des structures liées orthogonalement ($X_2 = T$), la force atteinte à chaque pic est divisée par le nombre de fils de chaîne de renfort dans l'éprouvette pour le premier pic, et par le nombre de fils de chaîne de liage pour le second pic. Ainsi rapportée aux nombre de fils, la force de rupture en sens chaîne est du même ordre de grandeur pour les deux structures liées au travers de l'épaisseur ($X_2 = T$). Il en est de même pour les deux structures liées couche à couche ($X_2 = L$). La force à rupture des structures liées couche à couche, en sens chaîne, est cependant plus faible que celle des structures liées au travers de l'épaisseur. Dans le dessin des architectures, la largeur des structures liées couche à couche est trois fois plus grande que celle des structures liées au travers de l'épaisseur. Cette largeur éloigne les points de liage entre les fils de chaîne de liage et les fils de trame, diminuant l'effort à rupture en sens chaîne. En sens trame, la force à rupture est du même ordre de grandeur pour les quatre structures, la densité trame étant équivalente.

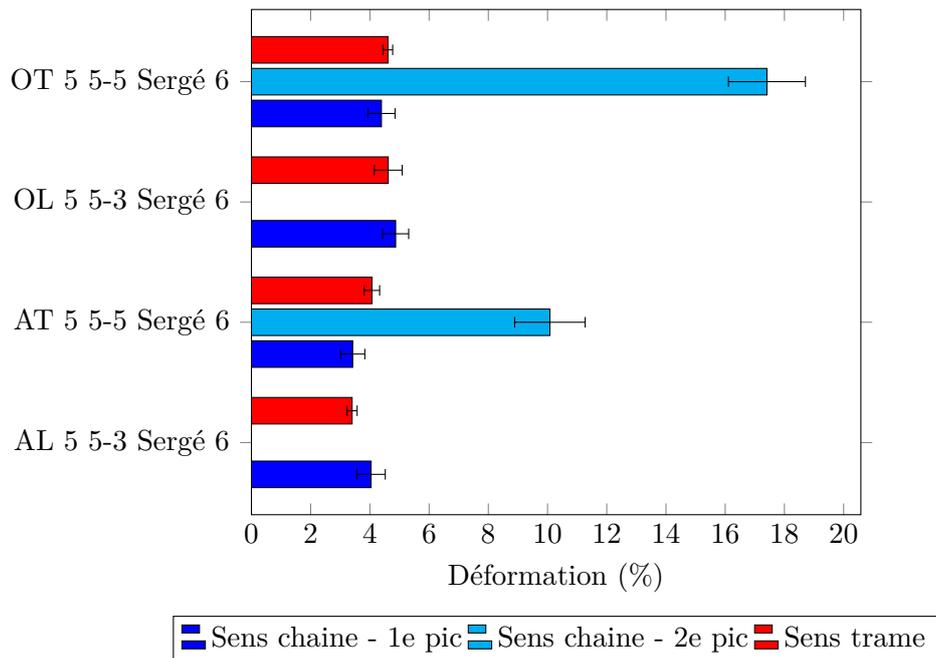


Figure 2.15 – Déformation à rupture des quatre structures de la campagne #1

La figure 2.15 précise les valeurs des déformations à rupture des trois types de fils qui composent les structures étudiées. La déformation à rupture des fils de chaîne de renfort et des fils de trame est la même pour les quatre structures. Dans les structures 3D interlock chaîne, les fils de chaîne de renfort et les fils de trame sont peu ondulés (cf. figure 2.9) ; la déformation à rupture de ces deux types de fils est faible au regard de celle des fils de chaîne de liage. Les structures AL et OL ne présentent pas de deuxième pic, car tous les fils de chaîne (de renfort comme de liage) cèdent au même moment. La déformation à rupture des fils de chaîne de liage des structures AT et OT respecte les valeurs d’embuvage (cf. section 2.2.2.2). Les fils de chaîne de liage des structures liées au travers de l’épaisseur ($X_1 = O$) sont plus embuvés (plus long) et cèdent à une valeur de déformation à rupture supérieure que celle des structures liées couche à couche ($X_1 = A$).

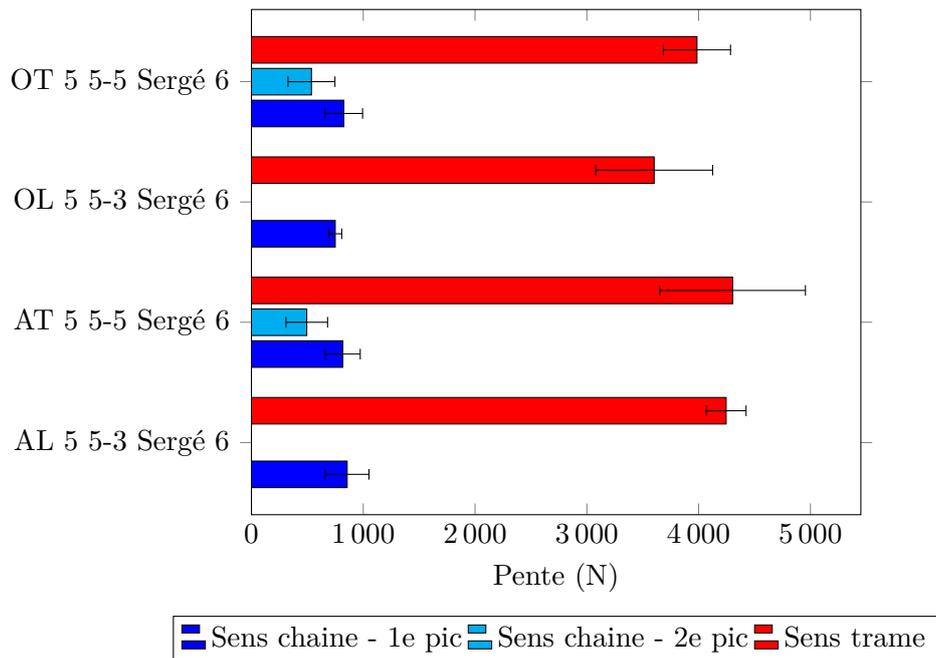


Figure 2.16 – Pente à rupture des quatre structures de la campagne #1

La figure 2.16 donne la pente des quatre structures. Pour toutes les structures, la pente relevée en sens trame est plus élevée qu'en sens chaîne. L'ondulation plus faible des fils de trame rigidifie la structure dans cette direction. La pente en sens chaîne des quatre structures est du même ordre de grandeur. CORBIN et al. [115] ont également constaté que le liage n'influe pas sur la pente. Dans le cas des structures liées dans l'épaisseur, la pente du second pic est inférieure à celle du premier. A l'issue du premier pic, les fils de chaîne de renfort ont cédé et seuls les fils de chaîne de liage contribuent à la rigidité.

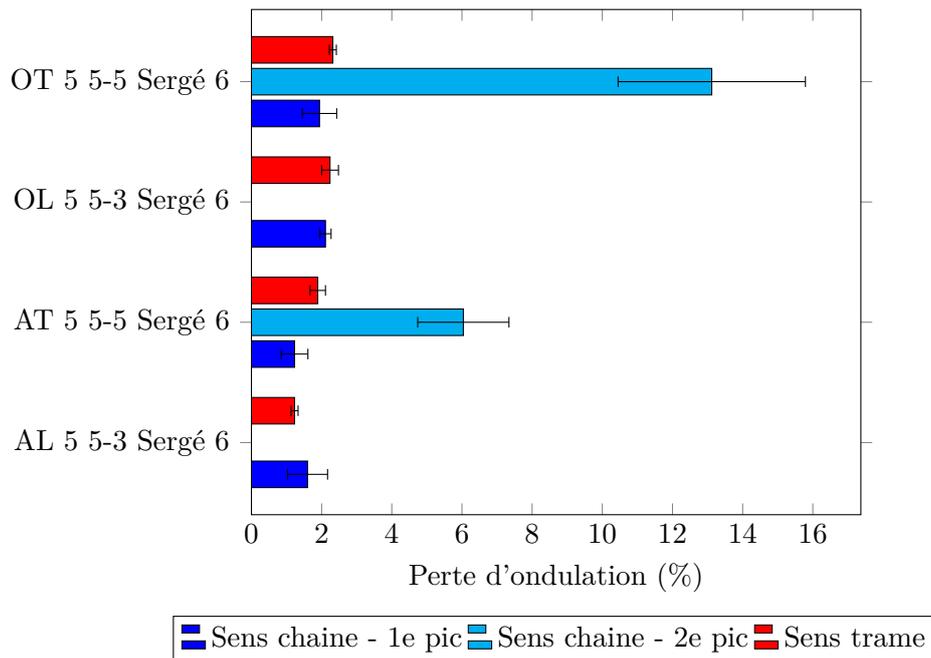


Figure 2.17 – Perte d’ondulation des quatre structures de la campagne #1

La perte d’ondulation, donnée en figure 2.17, correspond à la déformation de mise sous tension des fils de chaîne. Dans les deux directions, la différence entre la perte d’ondulation et la déformation à la rupture est légèrement supérieure à la déformation à la rupture de la mèche. Le procédé de tissage est la cause de cette différence, qui allonge la longueur de la mèche. En effet, lors du tissage et de ses efforts à répétition la mèche s’allonge légèrement. La déformation à rupture des mèches dans le tissu se trouve ainsi légèrement augmentée.

Conclusion

L’influence du type de liage sur le comportement structurel (masse surfacique, épaisseur, etc..) et mécanique a été investigué à partir de quatre structures 3D interlock chaîne. Le type de liage a une forte influence sur l’épaisseur, le comportement en flexion et les propriétés en traction sens chaîne. A iso-nombre de couches, les structures liées couche à couche ($X_2 = L$) sont plus épaisses que les structures liées au travers de l’épaisseur ($X_2 = T$). Ces dernières structures sont également plus rigides en flexion sens trame que les structures liées couche à couche. Les résultats obtenus lors de cette première campagne de tissage, sont cohérents avec la bibliographie, au sens que les structures présentant les plus faibles embuvages (AL et OL) se déforment le plus en flexion que les structures à embuvage plus élevé.

Le comportement mécanique en traction dépend fortement des densités. La force à rupture des éprouvettes en sens trame est largement supérieure à celle en sens chaîne et ceci car la densité trame est plus de deux fois plus importante que la densité chaîne. Enfin le comportement en traction est fortement lié aux embuvages et aux retraits. Le faible retrait des fils de trame conduit à une rupture rapide de la structure. En sens chaîne, le fort embuvage des fils de chaîne

de liage modifie le comportement mécanique de la structure. Pour les structures présentant les plus faibles embuvages des fils de chaîne de liage (AL et OL), un seul pic est mesuré. Pour les structures présentant un plus grand embuvage des fils de chaîne de liage (AT et OT), une reprise d'effort est mesurée après le premier pic. Ces résultats rejoignent ceux de la bibliographie [115, 141, 143].

2.3 Influence du nombre de couches sur les propriétés structurales et mécaniques

$$X_1 X_2 \ N \ Y_1 - Y_2 \ \text{Liage}\{Liage\}\{\#\} \ \text{Renfort}\{\#\}$$

Le rôle des fils de trame est primordial car il assure, au sein d'une structure 3D interlock chaîne, les propriétés transversales de la structure. L'objectif de cette campagne est de déterminer l'influence du nombre de couches sur les propriétés mécaniques des structures tissées 3D interlock chaîne.

2.3.1 Protocole expérimental

2.3.1.1 Choix des structures

Le type de liage a été investigué lors de la campagne de tissage précédente et les meilleurs résultats en traction, en termes de résistance plus élevée et plus grande déformation avant rupture, ont été obtenus avec un liage orthogonal au travers de l'épaisseur. Ce type de liage sera donc utilisé pour cette nouvelle campagne de tissage.

L'objectif est de réaliser plusieurs structures 3D interlock chaîne avec des nombres de couches différents. Selon EL-DESSOUKY et al. [114], le nombre de cadres de la machine à tisser conditionne le nombre de couches de la structure. La machine employée au cours de cette campagne de tissage est une machine à tisser prototype développée au sein du laboratoire GEMTEX [111] et donnée en figure 2.19. Cette machine est équipée d'une tête de sélection ARM permettant le déplacement vertical de 24 cadres. Le choix ne s'est pas porté sur la même machine que la campagne précédente de par les épaisseurs considérées.

Le choix de l'armure de liage des fils de chaîne de liage conditionne également le nombre de couches réalisable. Pour limiter le nombre de cadres nécessaire à la réalisation du motif, une armure toile a été choisie. Le pas des fils de chaîne de liage est ainsi défini à $Y_1 = 1$. Si deux cadres sont utilisés pour former une toile, vingt deux cadres peuvent être utilisés pour placer des fils de chaîne de renfort. Dans ce cas, la structure tissée possède 23 couches, soit une couche de plus que des fils de chaîne de renfort. Si quatre fils sont utilisés comme fils de chaîne de liage et vingt fils comme fils de chaîne de renfort, une architecture à onze couches dérivée de la toile peut être tissée. La largeur du motif est alors de 12 fils et répété deux fois dans le sens trame. De la même manière ont été élaborées des structures de 7, 5 et 3 couches. La représentation par

coupe des fils de trame et montrant l'évolution des fils de chaîne dans la structure de ces cinq structures tissées est donnée en figure 2.18. Les cinq structures sont symétriques au travers de l'épaisseur.

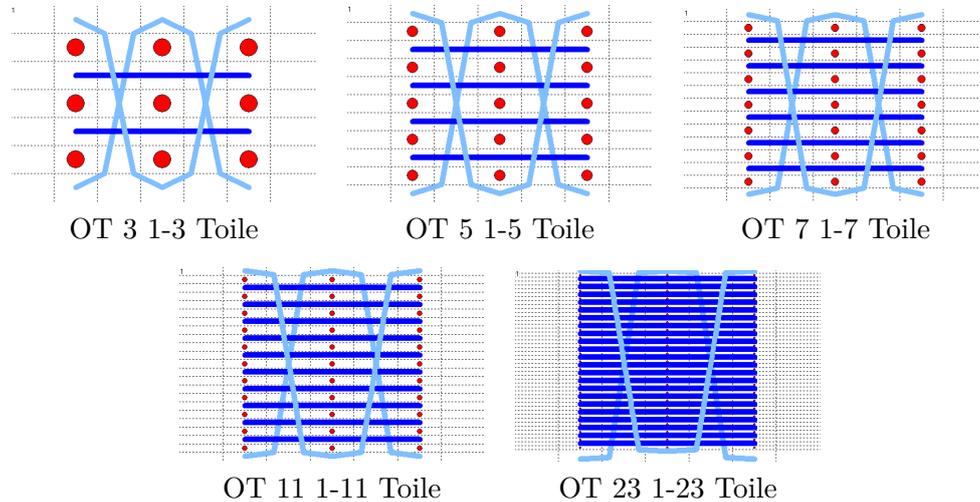


Figure 2.18 – Représentation de l'évolution des fils de chaîne des cinq structures tissées.

En conséquence, le nombre de fils de chaîne n'est pas identique pour toutes les architectures et la largeur du motif élémentaire des cinq structures diffère. Le tableau 2.4 précise les différents nombres de fils nécessaires à la réalisation des cinq structures. La dernière colonne donne le nombre de fois que le motif est répété pour utiliser les 24 cadres. Cependant, ce choix de structures permet de réaliser une étude sur l'influence du nombre de couches sans modification du rentrage.

Architecture	Nombre de fil par motif			Répétition
	Liage	Renfort	Trame	
OT 23 1-23 Toile	2	22	46	×1
OT 11 1-11 Toile	2	10	22	×2
OT 7 1-7 Toile	2	6	14	×3
OT 5 1-5 Toile	2	4	10	×4
OT 3 1-3 Toile	2	2	6	×6

Table 2.4 – Nombre de fils par motif

2.3.1.2 Préparation au tissage

Pour réaliser les cinq structures, la mèche employée est le LINCORE R1000 2017 (cf. tableau 2.1). Une torsion de 45 tpm est appliquée sur les mèches avant de procéder aux différentes étapes du tissage. Le support de la machine à tisser dispose d'autant d'emplacements pour les ensouples que de cadres sur la machine à tisser. En conséquence 24 ensouples de 11 fils, d'une largeur de 50 cm et d'une longueur de 30 m, ont été réalisées. La quantité de mèches de lin, préalablement retordues, nécessaire à la réalisation de la chaîne est de 7,92 km. Une 25^e ensouple a

été réalisée avec des fils traceurs de faible titrage.

Le rentrage des 275 fils de chaîne est effectué à la main. La densité du peigne sélectionné est de 3 dents/cm. Le piquage du peigne est de 2 fils/dent. La densité chaîne est ainsi définie à 6 fils/cm. La nappe des fils de chaîne traceur est superposée à une nappe de fils de chaîne et est entrée en même temps dans un des cadres. La densité trame de consigne est de 2 colonnes/cm. Les structures sont tissées sur une machine à tisser équipée d'un système d'insertion automatisée et d'un système de tirage à plat (cf. figure 2.19).



Figure 2.19 – Machine à tisser TTF

Le faible nombre de fils sur les ensouples, a rendu difficile l'opération de transfert des fils du tambour de l'ourdissioir à l'ensouple. Le tissage des cinq structures a été effectué à la suite sans modification du rentrage. Cependant, chacune des 24 nappes de fils a nécessité une gestion indépendante de la tension. La tension des ensouples s'est effectuée par un système de contre-poids. La découpe des fils de trame, entre deux insertions, a été effectuée à la main. Une grande quantité de matière fut également perdue en sens trame, et est visible sur la figure 2.19.

2.3.2 Résultats expérimentaux

2.3.2.1 Densités chaîne et trame

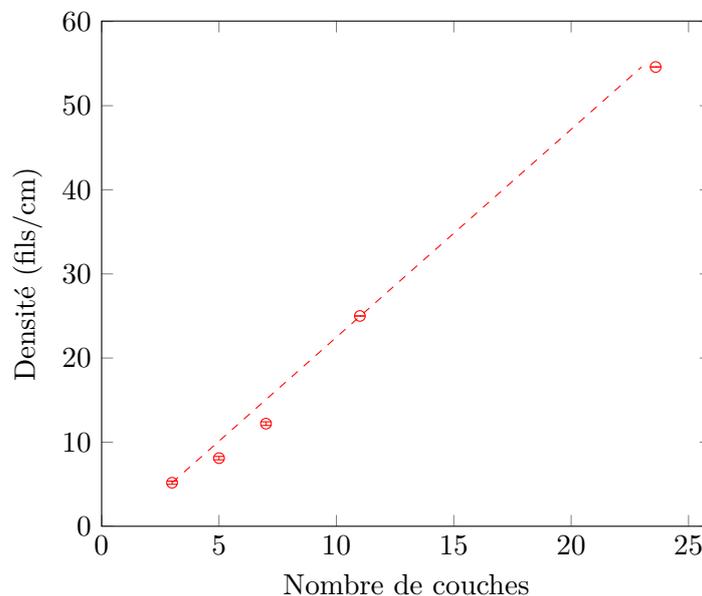


Figure 2.20 – Densité trame des cinq structures de la campagne #2

On reporte sur la figure 2.20, les évolutions de la densité trame en fonction du nombre de couches. Cependant, rapportée aux nombres de couches, la densité trame est d'environ 2 colonnes/cm. Ce nombre de colonnes par centimètre est identique pour toutes les architectures tissées ; il dépend principalement du type de liage (ici OT) et du titrage des fils de chaîne et de trame. En conséquence la densité trame mesurée est proportionnelle au nombre de couches et évolue linéairement. Les densités chaîne relevées sont proches de la densité définie lors du piquage, soit 6 fils/cm.

2.3.2.2 Embuvage et retrait

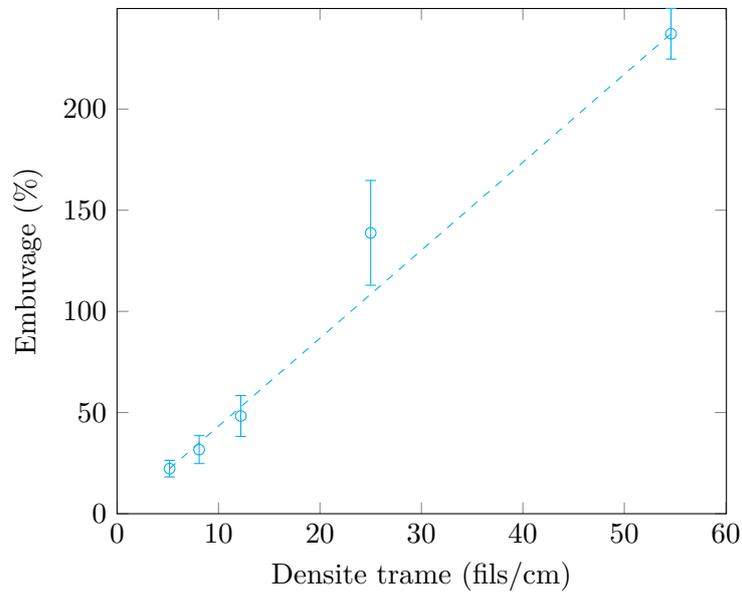


Figure 2.21 – Embuvage des fils de chaîne de liage en fonction de la densité trame

La figure 2.21 illustre l'évolution de l'embuvage des fils de chaîne de liage en fonction de la densité trame. Une tendance linéaire se dégage de ce graphique. En effet, dans le cas des structures au liage au travers de l'épaisseur, la longueur de fil utile au liage dépend du nombre de couches. La variabilité des valeurs d'embuvage entre les différents fils de chaîne de renfort est principalement due au fait que chaque fil de chaîne est issu d'une ensouple différente avec des tensions différentes. Les écarts-types mesurés associés aux valeurs d'embuvage des fils de chaîne de liage (comme pour les fils de chaîne de renfort) sont très grands. Issues de différentes ensouples, dont les tensions sont réglées indépendamment, les valeurs d'embuvage varient beaucoup.

Comparativement à ces valeurs pour ces fils de chaîne de liage, les valeurs moyennes d'embuvage des fils de chaîne de renfort pour les structures à 3, 5, 7, 11 et 23 couches sont respectivement égales à 2,1; 1,4; 0,5; 2,2 et 2,2%. Les valeurs moyennes de retrait des fils de trame sont respectivement égales à 2,7; 1,0; 1,3; 3,3 et 2,3%. Ces valeurs d'embuvage des fils de chaîne de renfort et de retrait des fils de trame sont très faibles, comparativement aux valeurs d'embuvage atteintes pour les fils de chaîne de liage (figure 2.21).

2.3.2.3 Épaisseur et masse surfacique

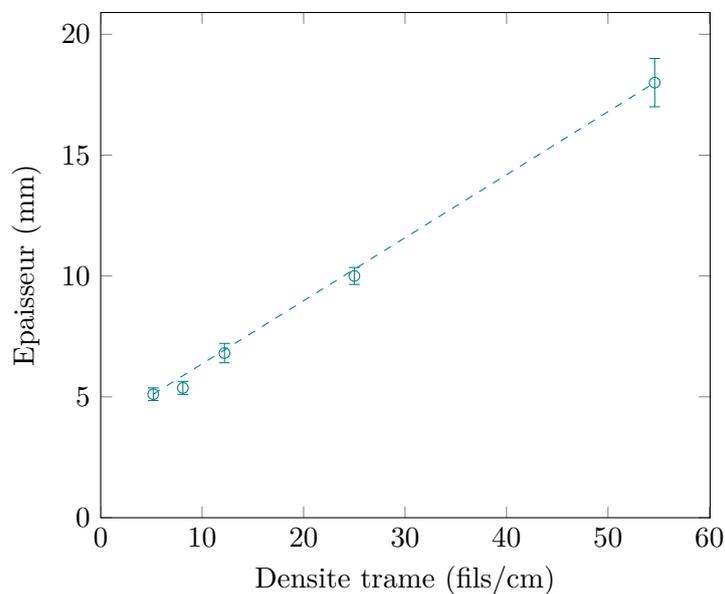


Figure 2.22 – Épaisseur en fonction de la densité trame

Les épaisseurs des cinq structures sont représentées en figure 2.22, en fonction des densités trame. Avec l'ajout de couches, les fils de trame se superposent et incrémentent l'épaisseur de la structure. Plus le nombre de couches est important plus l'épaisseur de la structure augmente linéairement. L'épaisseur est fonction du nombre de couches et par conséquent de la densité trame.

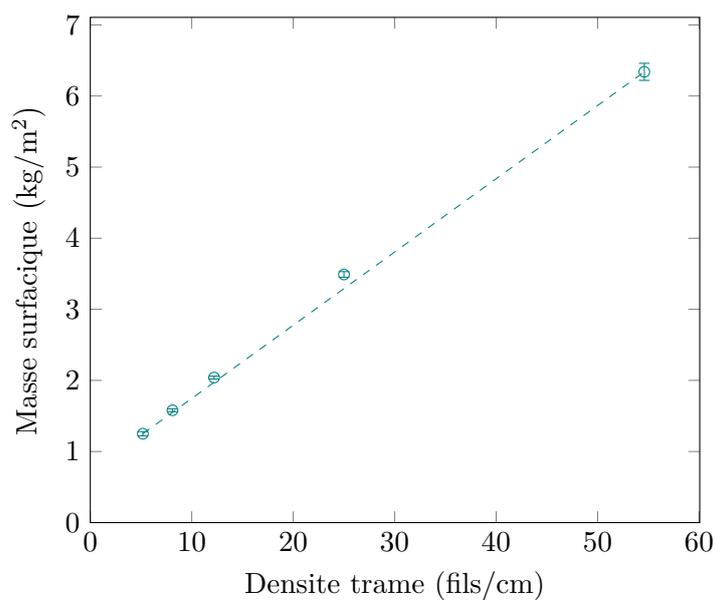


Figure 2.23 – Masse surfacique en fonction de la densité trame

La figure 2.23 illustre l'évolution de la masse surfacique des cinq structures en fonction de la densité trame. La densité chaîne étant identique pour les cinq tissus, la masse surfacique est fonction du nombre de fils de trame insérés, soit du nombre de couches de la structure tissée interlock. La différence de masse est due à l'embuvage des fils de chaîne et au retrait des fils de trame lors du tissage, et notamment l'embuvage des fils de liage. NASRUN et al. [142] ont également constaté une augmentation de la masse surfacique avec l'augmentation de la densité trame de quatre structures 3D interlock chaîne.

2.3.2.4 Comportement en traction

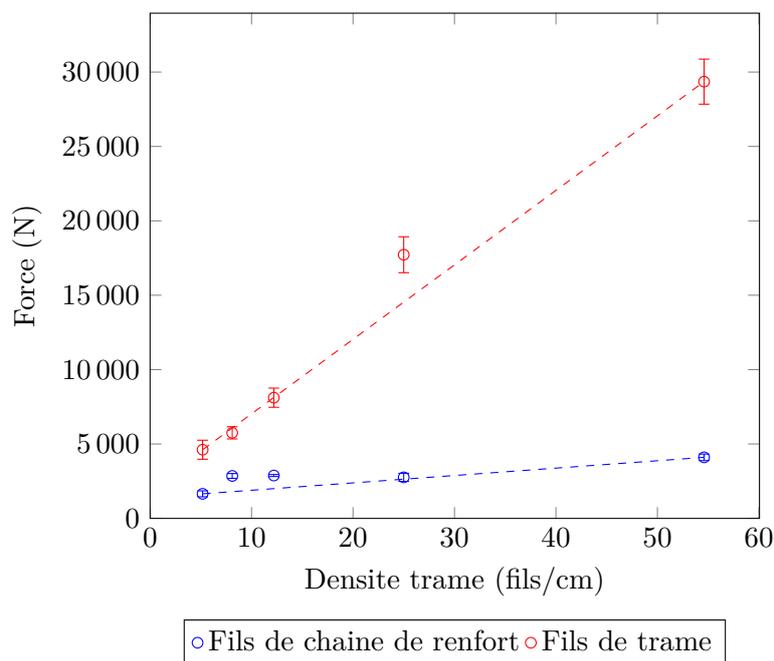


Figure 2.24 – Force à rupture en fonction de la densité trame

La figure 2.24 illustre la relation entre la densité trame et la force à rupture (1^{er} pic en sens chaîne et sens trame) dans les deux directions. Comme vu précédemment, plus le nombre de couches est important, plus la densité trame augmente. En conséquence, la force à rupture en direction trame augmente proportionnellement au nombre de couches. Malgré, une densité chaîne constante, on constate que les valeurs des efforts à rupture dans cette direction augmente également avec la densité trame. Dans ce graphique les efforts n'ont pas été ramenés au nombre de fils concernés. La force à la rupture des éprouvettes en sens trame est toujours nettement supérieure à la force à la rupture des éprouvettes en sens chaîne car la densité trame est supérieure à la densité chaîne.

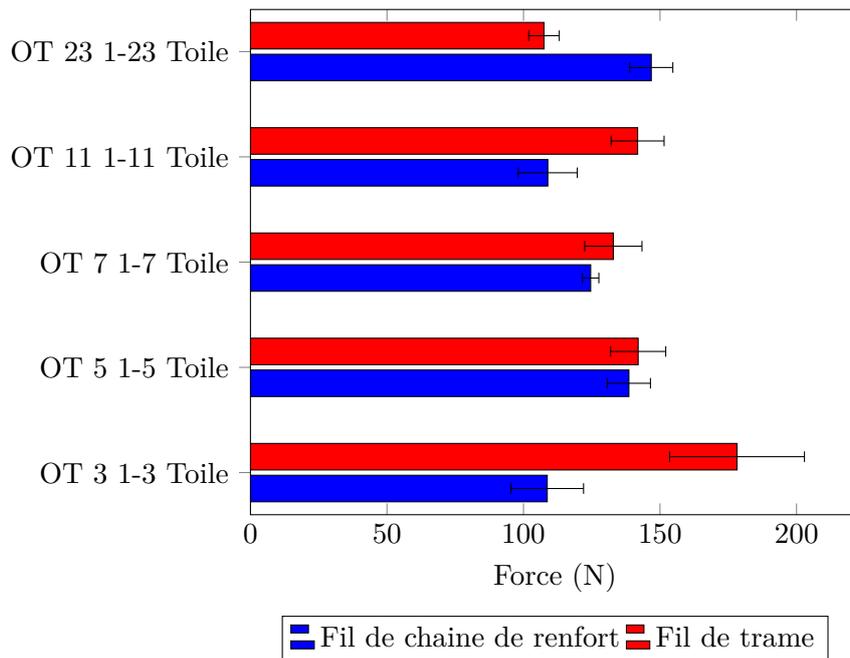


Figure 2.25 – Force à rupture, rapporté au nombre de fils

La figure 2.25 donne les forces, ramenées au nombre de fils des cinq structures et ceci par type de fils. En sens chaîne, la force à rupture du premier pic est divisée par le nombre de fils de chaîne de renfort dans l'éprouvette. En sens trame, la force à rupture est divisée par le nombre de fils de trame dans l'éprouvette. Malgré l'augmentation de l'effort global en sens chaîne avec le nombre de couche, la force par fil de trame diminue avec le nombre de couches. En sens chaîne, les cinq structures présentent une ou des reprises d'efforts. La structure OT 3 1-3 Toile est la seule à réellement présenter un deuxième pic avec une force à rupture légèrement supérieure pour le deuxième pic (132 N/fil contre 108 N/fil pour le premier pic). Les structures à 5, 7, 11 et 23 couches ne présentent pas de réel deuxième pic mais plusieurs reprises de forces minimales conduisant à la rupture progressive des fils. Avec l'augmentation du nombre de couches (et par conséquent de l'embuvage des fils de chaîne de liage), les reprises de forces se produisent à des valeurs de déformations de plus en plus grandes. De plus, l'utilisation des 24 ensouples ne simplifie pas le comportement en traction, sens chaîne : les différentes tensions impliquent des ruptures de fils à différentes valeurs de déformations (et ceux pour le même parcours de fils de chaîne).

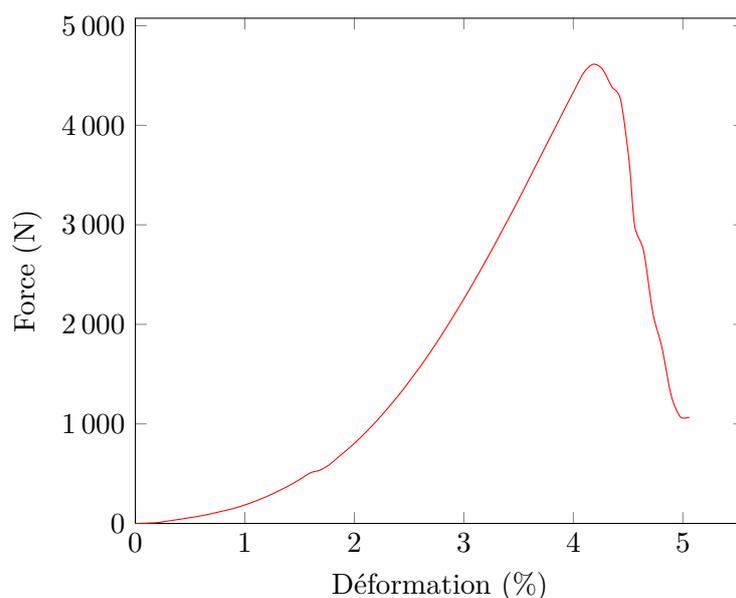


Figure 2.26 – Essai de traction, sens trame de la structure OT 3 1-3 Toile

Une courbe de traction de la structure OT 3 1-3 Toile est donnée en figure 2.27 pour le sens chaîne, et en figure 2.26 pour le sens trame. L'annexe B comporte l'ensemble des courbes dans les deux directions de la structure OT 3 1-3 Toile. En sens trame (figure 2.26), la courbe associée à cette structure, comme pour les autres structures, se caractérise par une première zone non-linéaire fonction du retrait et du temps d'alignement des fils de trame dans la direction de sollicitation. Cette zone est identique pour les cinq structures, ce qui montre que les valeurs de retrait ne sont pas affectées par l'augmentation du nombre de couches, comme détaillé en section 2.3.2.2. Dans une seconde partie, l'effort augmente linéairement en fonction de la déformation jusqu'à un effort maximal dont la valeur dépend de la densité trame. Au-delà de cette valeur à rupture, les courbes ne montrent pas de fluctuations importantes ce qui signifie que tous les fils de trame cassent majoritairement en même temps.

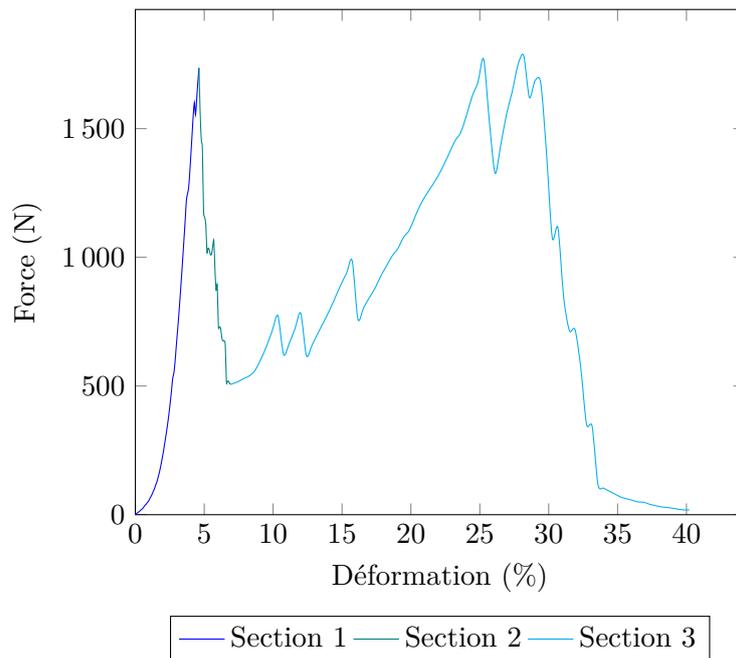


Figure 2.27 – Essai de traction, sens chaine de la structure OT 3 1-3 Toile

En sens chaine (figure 2.27), les fils de chaine de renfort (au premier pic) cèdent tous à la même valeur. Cependant le nombre de fils de chaine de renfort augmentant avec le nombre de couches, la force à rupture du premier pic augmente avec le nombre de couches. En conséquence, le nombre de fils de chaine de liage diminue avec le nombre de couches. Cette diminution de force à rupture n'est pas visible sur les courbes de traction sens chaine. Si sur la courbe de traction sens chaine de la structure trois couches, deux pics sont bien visibles, il n'en est pas de même sur les courbes de traction en sens chaine des structures avec un grand nombre de couches. De par la différence de tension entre les différentes ensouples, conduisant à de fortes différences d'embuvage, les fils de chaine de liage cèdent progressivement, à plusieurs états de déformation.

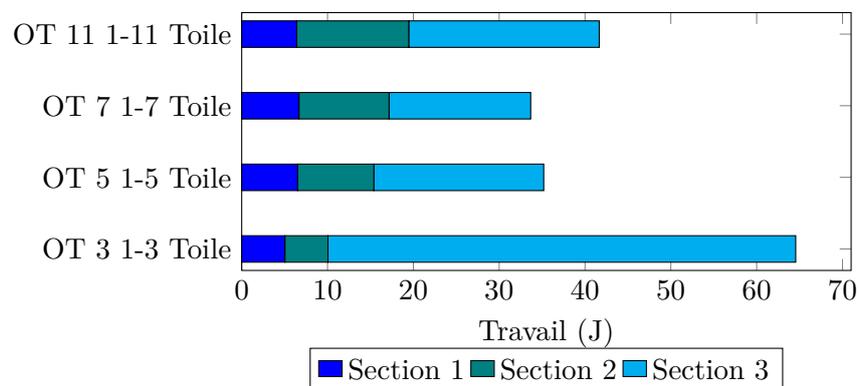


Figure 2.28 – Travail en sens chaine de quatre structures de la campagne #2

Pour lever le verrou concernant la force à rupture des fils de chaine de liage, le travail associé à l'essai de traction est calculé (figure 2.28). Le travail correspond à l'aire sous la courbe

force-déplacement et s'exprime en joules. La courbe de traction, sens chaîne doit être divisée en plusieurs sections, illustrées sur la figure 2.27. La section 1 correspond à la première partie de la courbe de traction jusqu'au 1er pic. La section 2 correspond à la partie suivante de la courbe de traction où la force diminue jusqu'à atteindre un minimum avant la reprise d'efforts. Enfin, la troisième section correspond à la partie de la courbe de traction durant laquelle les fils de liage cèdent progressivement, avec éventuellement les reprises d'efforts

La valeur du travail associée à la première partie de la courbe (figure 2.28) est équivalente pour les cinq structures. Dans cette partie du comportement, les fils de chaîne de renfort étant peu ondulés, les valeurs du travail en traction sont équivalentes. La valeur du travail associée à la deuxième partie de la courbe augmente avec le nombre de couches. L'embuvage des fils de chaîne de liage évoluant avec le nombre de couches, le déplacement nécessaire pour absorber cet embuvage augmente. Enfin la valeur du travail associée à la troisième partie diminue avec le nombre de couches, car le nombre de fils de chaîne de liage diminue.

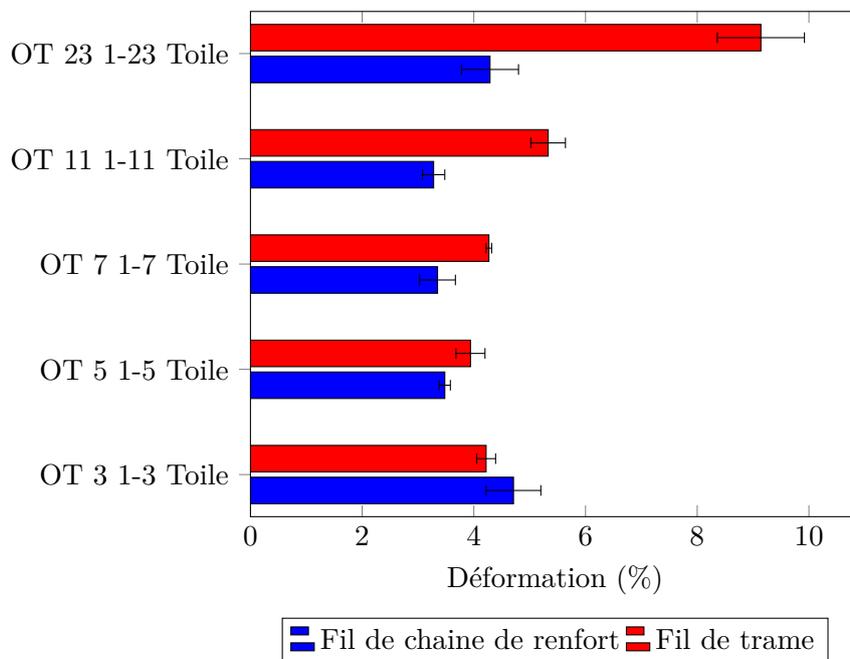


Figure 2.29 – Déformation à la rupture des structures de la campagne #2

La déformation à la rupture des cinq structures est donnée en figure 2.29. La valeur de déformation à rupture du deuxième pic de la structure OT 3 1-3 Toile est de $27,7 \pm 0,5\%$. En sens trame, les valeurs ont tendance à légèrement augmenter avec le nombre de couches. Le fort embuvage des fils de chaîne de liage (cf. figure 2.21) implique un retrait plus important des fils de trame pour les structures à grand nombre de couches. Ce plus grand retrait se traduit, lors de l'essai de traction en sens trame, par une plus grande déformation à rupture. En sens chaîne, les valeurs de déformation à rupture suivent les valeurs d'embuvage des fils de chaîne de renfort (cf. section 2.3.2.2).

Conclusion

L'association d'une ensouple à chaque cadre de la machine à tisser a permis de tisser les cinq structures grâce à un seul et unique rentrage tout en faisant varier le nombre de couches. A iso-densité chaîne, de nombreux paramètres évoluent proportionnellement au nombre de couches de la structure 3D interlock chaîne. Un autre paramètre non évoqué et pourtant bien relatif au nombre de couche est le temps de tissage. Le tissage 3D interlock chaîne est plus lent que le tissage 2D traditionnel et sa durée est fonction de la densité trame. Un compromis entre propriétés mécaniques, et temps de mise en œuvre reste à définir.

ⓐ La structure OT 23 1-23 Toile est impressionnante par ses propriétés :son épaisseur est légèrement inférieure à 2 cm et sa masse surfacique dépasse les 6 kg/m². Avec ces 54,6 fils/cm en sens trame, la force à rupture de la structure dépasse les 29 000 N, en sens trame (l'équivalent d'une masse de 2,9 t sur une largeur de 5 cm). Cette étude a également permis de démontrer la faisabilité de réaliser des architectures à grand nombre de couches avec des fibres naturelles.

Les résultats obtenus sont cohérents et complémentaires à la première campagne de tissage. Le type de liage modifie l'épaisseur sans changer la masse surfacique de la structure, et l'évolution du nombre de couche modifie l'épaisseur et la masse surfacique. Cette deuxième campagne de tissage a aussi mis en avant le fait que la force à rupture en traction est fonction de la densité dans la direction de sollicitation. L'augmentation du nombre de fils est une solution envisageable pour accroître les propriétés en traction. Les niveaux atteints en termes de densité trame ont également permis de définir un niveau de densification de la structure 3D interlock chaîne en lin à 2 000 tex/cm et par couche. Ce résultat, homogène à une masse surfacique, rapporté à la ténacité de la mèche peut permettre d'anticiper la démarche de caractérisation.

2.4 Influence de la profondeur de liage sur les propriétés structurelles et mécaniques

$$X_1 X_2 N Y_1 - Y_2 \text{ Liage}\{Liage\}\{\#\} \text{ Renfort}\{\#\}$$

L'objectif de cette troisième campagne de tissage est de déterminer l'influence de la profondeur du fil de liage et de l'architecture formée par ces mêmes fils sur les propriétés structurelles et mécaniques des structures 3D interlock chaîne. Pour ce faire 21 architectures avec des fils de chaîne de renfort et 8 sans fils de chaîne de renfort ont été tissées. Ces 21 architectures sont données en Annexe C. Une sélection parmi les premières architectures réalisées sera effectuée pour étudier l'influence de ces deux paramètres relatifs aux fils de chaîne de liage.

2.4.1 Protocole expérimental

2.4.1.1 Choix des structures

Afin d'étudier l'effet de la profondeur de liage, les autres paramètres de la structure 3D interlock chaîne doivent rester constants. Pour ce faire, une structure à cinq couches, liées par un sergé de 4 a été sélectionnée. Le liage de la structure fait écho aux six structures en sergé de 6 de la première campagne de tissage. Cependant les proportions entre les fils de chaîne de liage et de renfort se rapprochent de celles de la structure à cinq couches de la seconde campagne de tissage (OT 5 1-5 Toile). La figure 2.30 donne les coupes transversales des trois structures étudiées. La profondeur de liage est le troisième chiffre dans la définition des tissus 3D interlock chaîne.

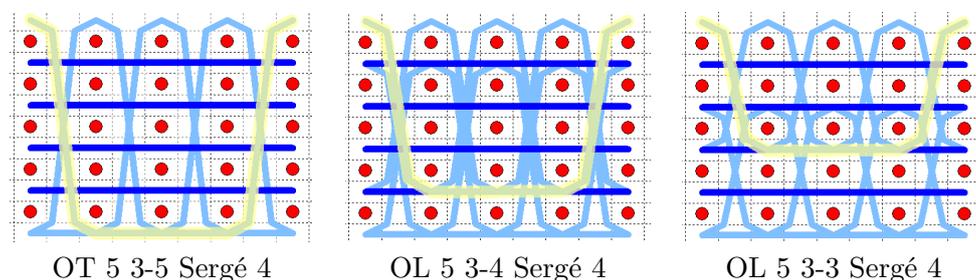


Figure 2.30 – Coupe transversale des trois structures étudiées

2.4.1.2 Préparation au tissage

La mèche utilisée lors de cette campagne de tissage est le LINCORE R1000 2018 (cf. tableau 2.1). Le titre de la mèche non retordue est de 1041,5 tex. Une torsion de 40 tpm est appliquée préalablement à l'ourdissage. Près de 17 km de fils ont été préalablement retordus pour servir de chaîne, et plus de 15 km l'ont été pour les fils de trame.

Ensemble	Longueur (m)	Largeur (cm)	Densité (fils/cm)
Fils de chaîne de renfort	15	140	4
Fils de chaîne de liage	30	140	2

Table 2.5 – Paramètres d'ourdissage de la campagne de tissage #3

Afin de réaliser les trois architectures, deux ensouples de fils de chaîne ont été réalisées. Les paramètres d'ourdissages sont donnés en tableau 2.5.

La machine employée pour cette campagne de tissage est la même que celle utilisée lors de la première campagne de tissage, à savoir une machine à cadres DORNIER HTVS 4/S (cf. figure 2.2, 2.3 et 2.4). La laize¹ de la structure est de 140 cm, correspondant à la largeur maximale de la machine. L'ensouple des fils de chaîne de renfort est ensuite montée sur la machine car sa vitesse de rotation doit être relative à la vitesse de tissage. L'ensouple des fils de chaîne de liage est

1. largeur du tissu

montée sur un support additionnel pour apporter la quantité de fils nécessaire au liage au travers de l'épaisseur. Comme décrit dans le tableau 2.5, les proportions de fils de chaîne de renfort et de liage ne sont pas égales. Au cours du rentrage, un fil de chaîne de liage est suivi de deux fils de chaîne de renfort. Les fils sont ensuite piqués dans un peigne de 3 dents/cm à raison de 2 fils/dent. Des fils de coton sont insérés sur les deux côtés du tissu comme lors de la première campagne de tissage (cf. figure 2.8) pour former la lisière du tissu. La densité trame est définie à 10 fils/cm. Cette valeur permet de respecter le niveau de densification de la campagne de tissage précédente (soit 2 colonnes/cm pour un fil de lin de 1 000 tex).

2.4.2 Résultats expérimentaux

2.4.2.1 Densité chaîne et trame

	Densité chaîne (fils/cm)	Densité trame (fils/cm)
OT 5 3-5 Sergé 4	6, 2	11, 2
OL 5 3-4 Sergé 4	6, 5	11, 4
OL 5 3-3 Sergé 4	6, 3	11, 6

Table 2.6 – Densités chaîne et trame des trois structures de la campagne #3

Le tableau 2.6 donne les densités chaîne et trame mesurées des tissus. La densité chaîne est définie au cours de l'ourdissage et du piquage. Avec les deux ensouples, la densité chaîne théorique est de 6 fils/cm. Expérimentalement, les densités chaîne mesurées sont proches de cette valeur. La légère différence est issue du retrait des structures sorties de la machine à tisser. En direction trame, la densité de consigne a été déterminée à 10 fils/cm. La différence entre la valeur de consigne et la densité réelle est supérieure en sens chaîne de celle en sens trame. En effet, lors de la réalisation du tissage, la machine présentait quelques difficultés à tracter les tissus à cause de leur épaisseur.

2.4.2.2 Embuvage et retrait

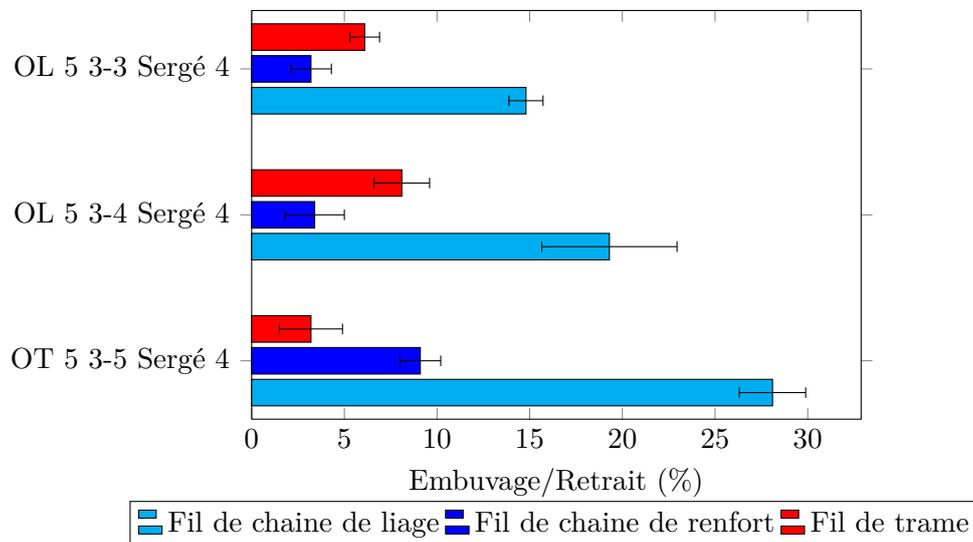


Figure 2.31 – Embuvages et retraits des trois structures de la campagne #3

La figure 2.31 illustre les embuvages et retraits des trois structures étudiées pour les différents types de fils. L'embuvage des fils de chaîne de liage augmente avec la profondeur de liage. Ces résultats sont cohérents avec la première étude concernant le type de liage. L'embuvage des fils de chaîne de renfort et le retrait des fils de trame évoluent pour assurer l'équilibre de la structure tissée.

2.4.2.3 Épaisseur et masse surfacique

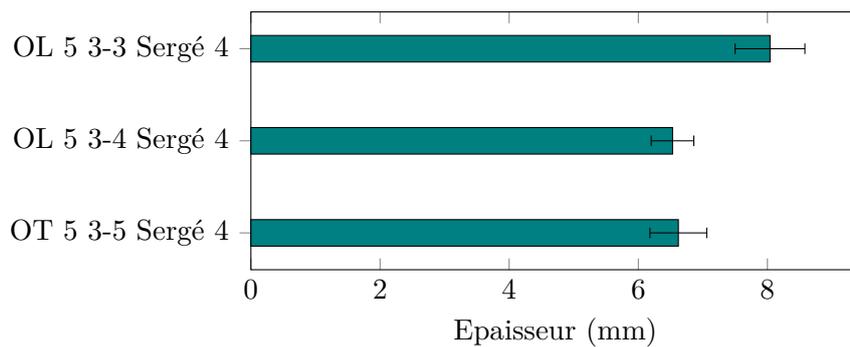


Figure 2.32 – Épaisseur des trois structures de la campagne #3

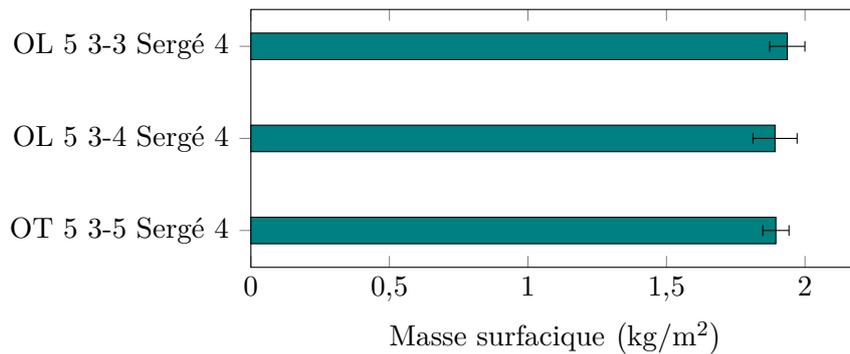


Figure 2.33 – Masse surfacique des trois structures de la campagne #3

La figure 2.32 détaille les épaisseurs des trois structures étudiées. L'épaisseur de la structure liée au travers de l'épaisseur (OT 5 3-5 Sergé 4) est la plus faible. Pour une profondeur de liage de trois couches (OL 5 3-3 Sergé 4), une seule couche de fils de trame est maintenue par des fils de liage. Cette couche rigidifie la structure, en bloquant le retrait des fils de trame. L'épaisseur plus importante de cette structure est créée par cet empilement de nappes liage/renfort/liage. Pour une profondeur de liage de quatre couches (OL 5 3-4 Sergé 4), les trois couches de fils de trame sont moins maintenues ; le retrait des fils de trame peut être plus important. L'empilement de nappes est différent de celui de la structure liée avec une profondeur de trois couches et l'épaisseur est nettement plus faible. Ces résultats sont cohérents avec la première étude concernant le type de liage, au cours de laquelle seule une profondeur de liage de trois couches avait été étudiée.

La masse surfacique des trois structures est donnée en figure 2.33. Les masses surfaciques sont équivalentes pour les trois structures. Comme dans la première étude, l'embuvage et le retrait ne sont pas suffisants pour modifier la masse surfacique entre ces structures 3D interlock chaîne.

2.4.2.4 Comportement en flexion

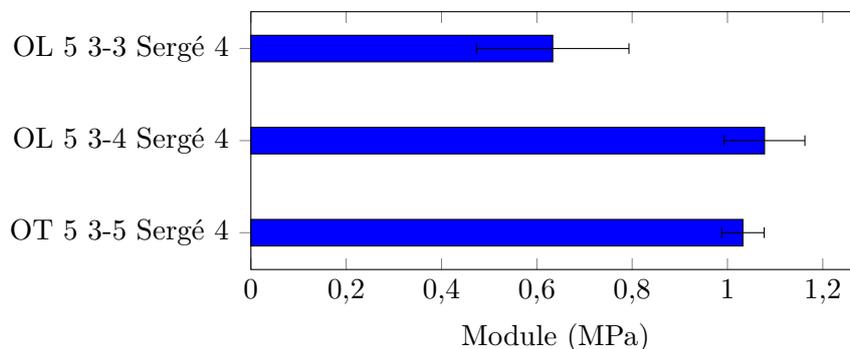


Figure 2.34 – Modules de rigidité en flexion, sens chaîne des trois structures de la campagne #3

La figure 2.34 donne le module en flexion des trois structures en sens chaîne. Les coefficients de rigidité en flexion des trois structures sont quasi-identiques (environ 2,6 N · cm). Les épaisseurs

des structures variant (cf. figure 2.32), les modules de rigidité en flexion, ne sont pas constants. L'épaisseur supérieure de la structure liée avec une profondeur de 3, réduit drastiquement son module de rigidité en flexion. Le comportement en flexion, n'est pas influencé par la profondeur de liage mais principalement par l'épaisseur. La rigidité en sens trame n'a pas pu être mesurée par manque de quantité suffisante de matière. Comme pour la première campagne, les éprouvettes de traction habituellement utilisées pour faire le test en sens trame sont trop courtes.

2.4.2.5 Comportement en traction

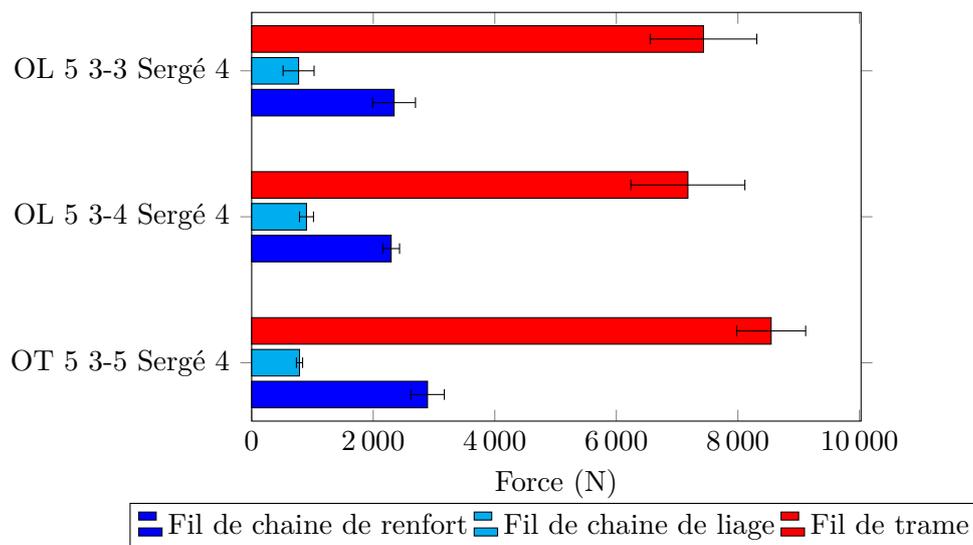


Figure 2.35 – Force à rupture des trois structures de la campagne #3

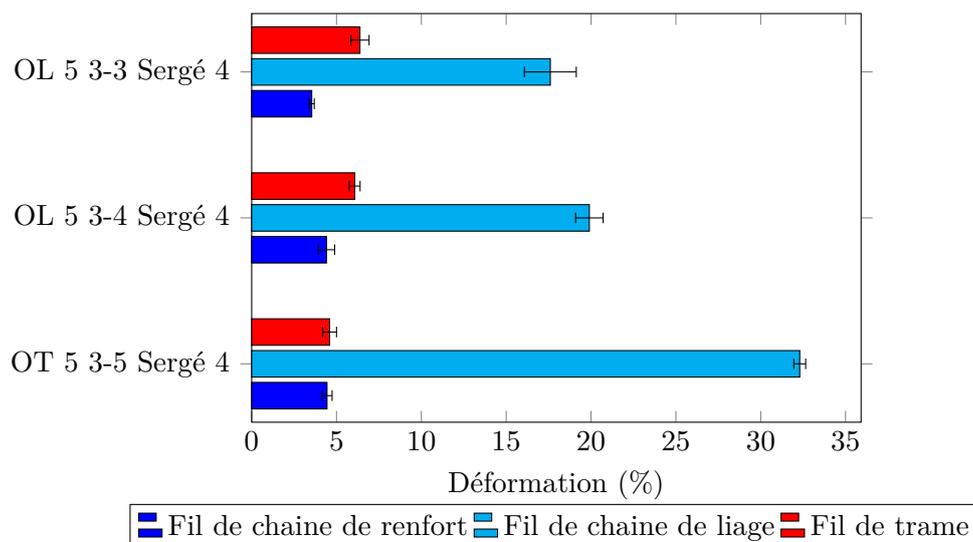


Figure 2.36 – Déformation à rupture des trois structures de la campagne #3

Le comportement en traction de ces trois structures est plus simple que celui des tissus des deux campagnes précédentes. En sens chaîne, le pic lié à la rupture des fils de chaîne de renfort est suivi d'un second pic lié à la rupture des fils de chaîne de liage. En sens trame, un seul pic est mesuré correspondant à la rupture de l'ensemble des fils de trame.

La figure 2.35 reporte les forces à ruptures de chaque nappe de fils lors d'essais de traction. Ces valeurs ne sont pas rapportées au nombre de fils pour distinguer le comportement des différentes nappes de fils de chaîne de renfort et de liage. La force en sens trame est toujours supérieure aux valeurs relevées en sens chaîne. En sens chaîne, le ratio entre le nombre de fils de chaîne de renfort et de liage est illustré dans ces résultats. La force à rupture des fils de chaîne de renfort et des fils de trame augmente avec la profondeur de liage. Le liage au travers de l'épaisseur accroît la cohésion dans cette dimension. Ces résultats sont cohérents avec la première campagne et valide le choix de structures liées au travers de l'épaisseur issues de la deuxième campagne de tissage.

La déformation des fils de chaîne de renfort, reportée en figure 2.36, est approximativement la même pour les trois structures. Ces valeurs dépendent de l'embuvage des fils de chaîne de renfort (cf. figure 2.31) qui est également et approximativement identique pour les deux structures liées couche à couche ($X_2 = L$). Pour la structure liée au travers de l'épaisseur ($X_2 = T$), la déformation à rupture est inférieure à l'embuvage mesuré. Les fils de chaîne de renfort et les fils de trame contraignent la structure à conserver sa disposition et la déformation à rupture a lieu à la même valeur de déformation que les deux autres structures. L'augmentation de la profondeur de liage est synonyme d'augmentation de l'embuvage des fils de chaîne de liage, et par conséquent à l'augmentation des valeurs de déformation.

2.4.2.6 Comportement en compaction dans l'épaisseur

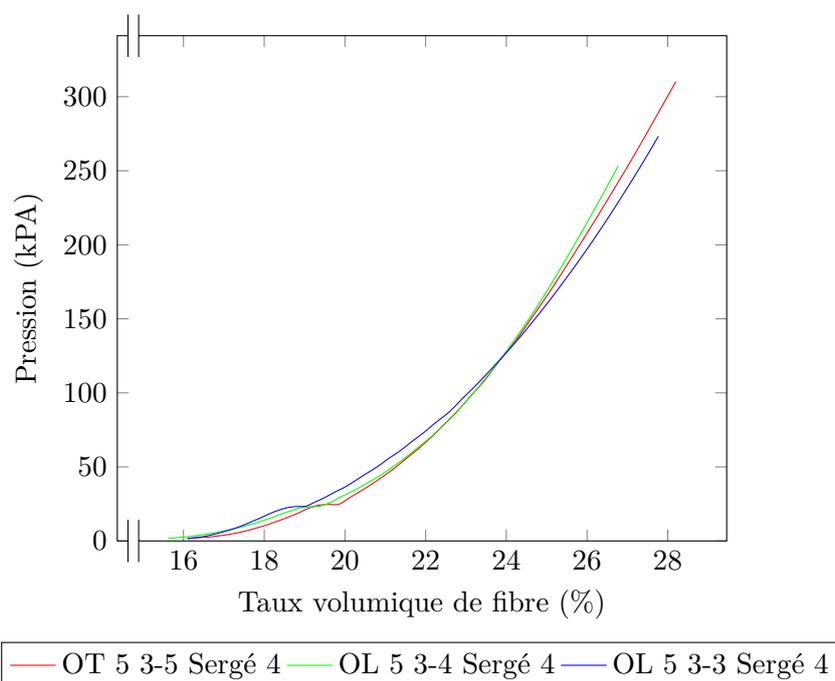


Figure 2.37 – Comportement en compaction des trois structures de la campagne #3

Le comportement en compaction dans l'épaisseur a été mesuré sur les trois structures, selon le protocole énoncé en section 2.1.2.6 et est traduit par l'évolution de la fraction volumique en fonction de la pression. La figure 2.37 illustre le comportement en compression des trois structures.

La profondeur de liage n'a pas d'influence sur le comportement en compaction dans l'épaisseur. Les courbes obtenues des trois structures sont similaires. Cependant un palier a été relevé aux alentours de 30 kPa pour les trois structures. Une réorganisation de la structure doit se produire : les colonnes de fils de trame, qui se compactaient sous pression, doivent glisser.

Conclusion

L'étude de ces trois structures a permis de comprendre l'influence de la profondeur de liage sur les propriétés textiles et mécaniques des tissus 3D interlock chaîne. L'augmentation de l'embuvage avec la profondeur de liage est cohérente avec les résultats obtenus lors de la première campagne de tissage. Cependant, une évolution non linéaire de l'épaisseur a été remarquée, néanmoins cohérente avec les résultats précédemment énoncés. La profondeur de liage, comme le type de liage, n'implique pas de modification notable de la masse surfacique. En traction, le comportement en sens chaîne n'est modifié que par la largeur du motif, ce qui n'évolue pas dans cette campagne. En sens trame, la force à rupture croît avec la profondeur de liage. La structure liée au travers de l'épaisseur, étant plus homogène, présente les meilleures propriétés.

2.5 Influence de l'armure formée par les fils de chaîne de liage sur les propriétés structurales et mécaniques

$$X_1 X_2 N Y_1 - Y_2 \text{ Liage}\{\text{Liage}\}\{\#\} \text{ Renfort}\{\#\}$$

L'objectif de cette campagne est de déterminer l'influence de l'armure de liage sur les propriétés des structures tissées interlock chaîne. Il est nécessaire de définir au préalable différents types d'armure issus du tissage traditionnel 2D. L'armure de tissage décrit l'évolution et la position des fils de chaîne par rapport aux fils de trame.

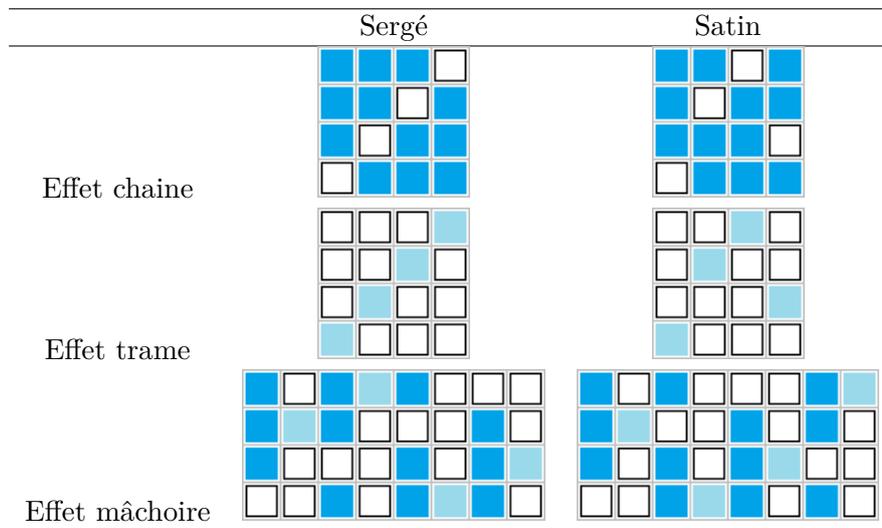


Figure 2.38 – Carton des différents effets de sergé et satin de 4

Le sergé est une manière d'entrecroiser les fils de chaîne de liage avec les fils de trame, en créant une diagonale de points de liage. Le satin est une manière d'entrecroiser les fils de chaîne de liage avec les fils de trame, en créant un maillage régulier de points de liage. Cette diagonale et ce maillage sont schématisés sur la figure 2.38. Aux armures sergé et satin sont associées un effet qui caractérise la surface supérieure du tissu. L'effet chaîne est obtenu lorsque les flottés les plus longs, visibles en surface, sont orientés en sens chaîne. L'effet trame est obtenu lorsque les flottés les plus longs et visibles en surface, sont orientés en sens trame. Les effets chaîne et trame ne seront pas investigués ici, car le verso d'un effet chaîne est un effet trame. Le couplage de ces deux effets crée un enfermement des fils de trame et est appelé effet mâchoire.

La notion d'armure, étendue aux tissus 3D interlock chaîne, décrit l'évolution et la position des fils de chaîne de liage par rapport aux fils de trame. La profondeur de liage étant définie par le paramètre Y_2 . Les fils de chaîne de renfort, dont la profondeur n'évolue pas, ne sont pas pris en compte dans la définition de l'armure.

2.5.1 Protocole expérimental

Deux armures à effet sont étudiées au cours dans cette campagne de tissage. La diagonale du sergé et le maillage du satin sont visibles sur la partie supérieure de la représentation 3D de la structure interlock (figure 2.39). Le second paramètre concerné est l'effet de liage. Le couplage d'un effet chaîne et d'un effet trame sera alors étudié dans cette section. Ce couplage des deux effets est également bien visible sur la partie supérieure de la représentation 3D. La figure 2.39 donne la coupe transversale et la représentation 3D des quatre structures étudiées.

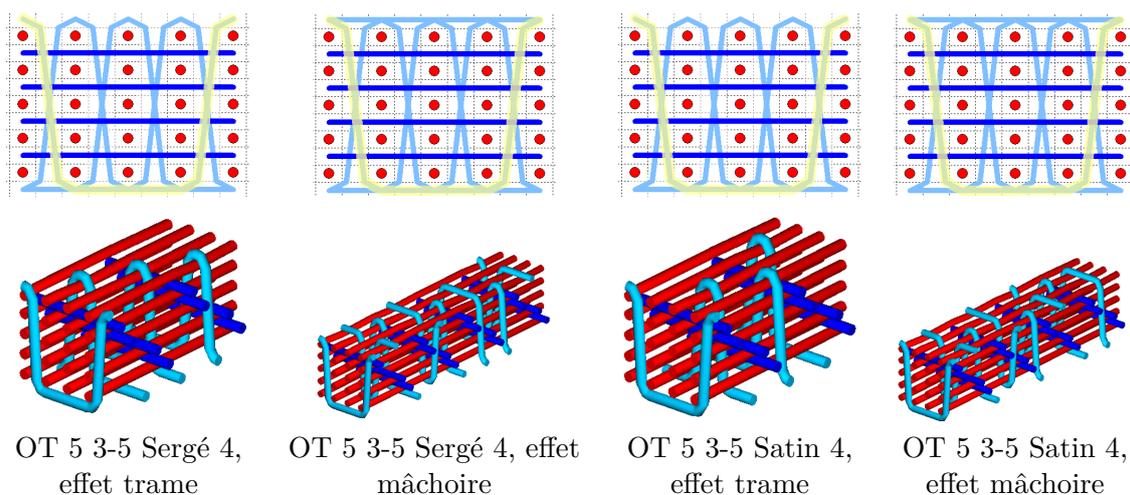


Figure 2.39 – Coupe transversale et représentation 3D des trois structures étudiées

La réalisation de cette quatrième campagne de tissage est en tout point similaire à la précédente. L'ensemble des étapes de préparation et de tissage est donné en section 2.4.1.2. La densité chaîne est définie à 6 fils/cm et la valeur de consigne de densité trame est conservée à 10 fils/cm, soit 2 colonnes/cm.

2.5.2 Résultats expérimentaux

2.5.2.1 Densités chaîne et trame

	Densité chaîne (fils/cm)	Densité trame (fils/cm)
OT 5 3-5 Satin 4, effet mâchoire	6,1	14,3
OT 5 3-5 Satin 4, effet trame	6,6	11,8
OT 5 3-5 Sergé 4, effet mâchoire	6,3	11,5
OT 5 3-5 Sergé 4, effet trame	6,2	11,2

Table 2.7 – Densité chaîne et trame des quatre structures de la campagne #4

Les densités des quatre structures sont données en tableau 2.7. En sens chaîne, la densité est proche de la valeur définie au cours de l'ourdissage et du piquage. Dans l'autre direction, les valeurs de densités sont supérieures à celles en chaîne, mais également supérieures à la

consigne. La structure OT 5 3-5 Satin 4, effet mâchoire a été tissé en premier et a présenté quelques difficultés de tissage, notamment en termes de tirage. En conséquence, la densité trame moyenne est largement supérieure à celle des autres structures.

2.5.2.2 Embuvage et retrait

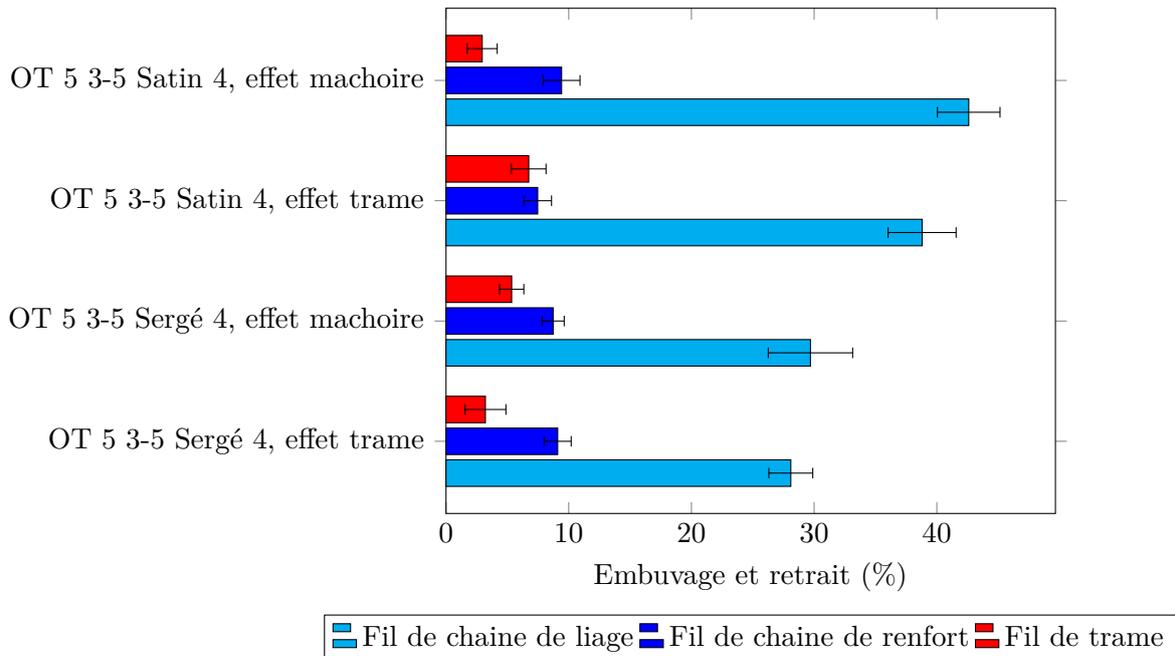


Figure 2.40 – Embuvage et retrait des quatre structures de la campagne #4

Les embuvages et retraits des structures sont donnés en figure 2.40. On note une diminution de l'embuvage des fils de chaîne de liage en passant d'un effet mâchoire à un effet trame et en passant d'un liage satin à un liage sergé. L'effet mâchoire contraint les fils de trame à rester les uns au-dessus des autres. Une longueur supérieure des fils de chaîne de liage est alors nécessaire pour lier les fils de trame forcés à rester en position. L'embuvage des fils de chaîne de renfort augmente légèrement avec l'effet mâchoire. Comme les fils de chaîne de liage contraignent les fils de trame, les fils de chaîne de renfort sont obligés d'onduler un peu plus et l'embuvage augmente. Le retrait des fils de trame évolue pour équilibrer les structures (et assurer leur homogénéité).

2.5.2.3 Épaisseur et masse surfacique

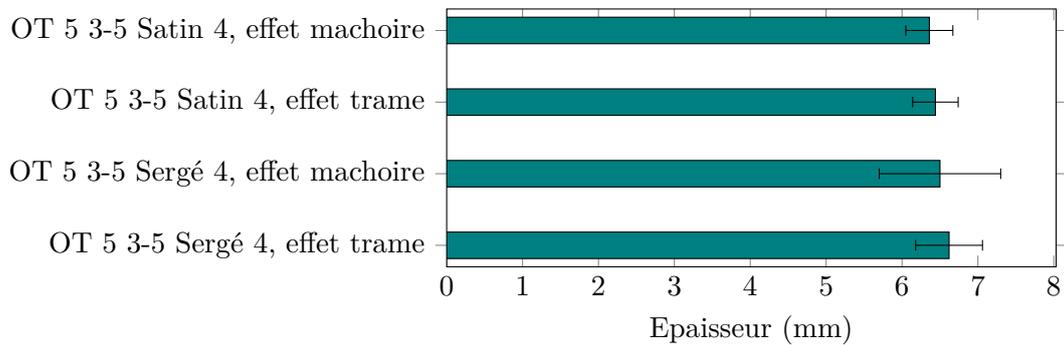


Figure 2.41 – Épaisseur des quatre structures de la campagne #4

L'épaisseur des quatre structures est donnée en figure 2.41. L'effet mâchoire et l'architecture de liage formée par les fils de chaîne de liage n'entraînent pas de modification notable de l'épaisseur de ces structures.

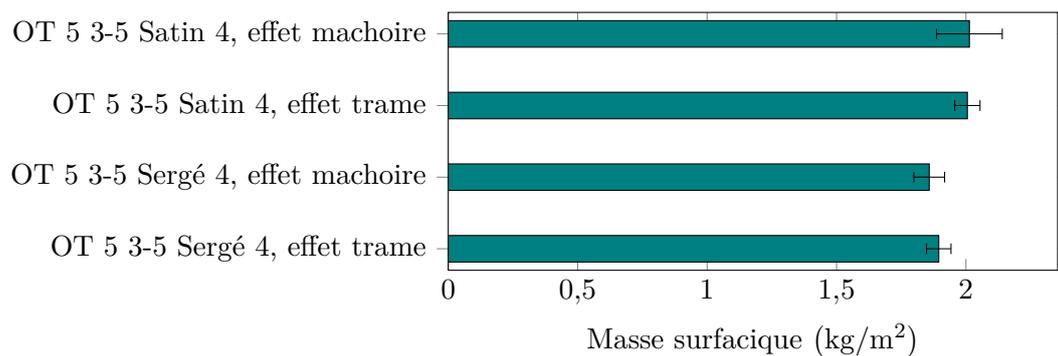


Figure 2.42 – Masse surfacique des quatre structures de la campagne #4

La figure 2.42 représente la masse surfacique des quatre tissus. On note une baisse minime de la masse surfacique au passage d'un liage satin au liage sergé. La haute valeur de densité trame de la structure liée par un satin avec un effet mâchoire et ces valeurs de masse surfacique, confirment que les structures liées par un sergé sont moins compactes que les structures liées par un satin.

2.5.2.4 Comportement en flexion

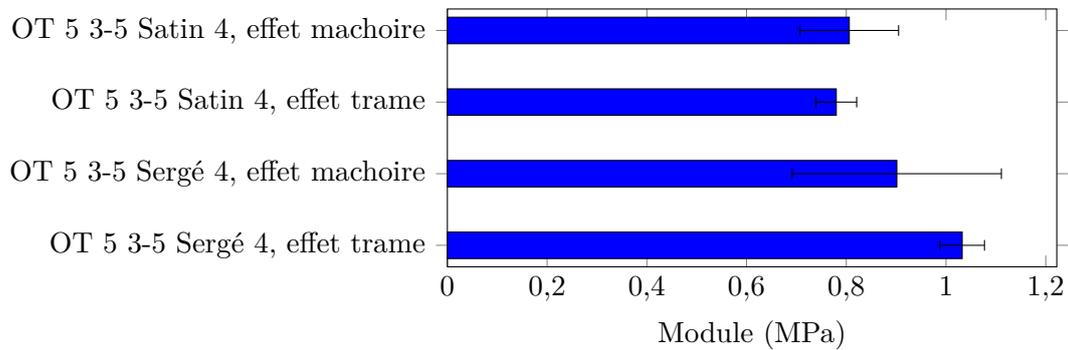


Figure 2.43 – Modules de rigidité en flexion, en sens chaine, des quatre structures de la campagne #4

Les valeurs du module de rigidité en flexion, en sens chaine, sont illustrées en figure 2.43 pour les quatre structures. Quelque soit l'effet de liage (trame ou mâchoire), on note une diminution du module de rigidité en flexion au passage d'un liage en sergé vers un liage en satin. Le choix des structures n'a pas permis de détecter l'influence de l'effet sur les modules de rigidité en flexion. La rigidité des éprouvettes en sens trame, n'a pas permis de mesurer la longueur de flexion dans cette direction.

2.5.2.5 Comportement en traction

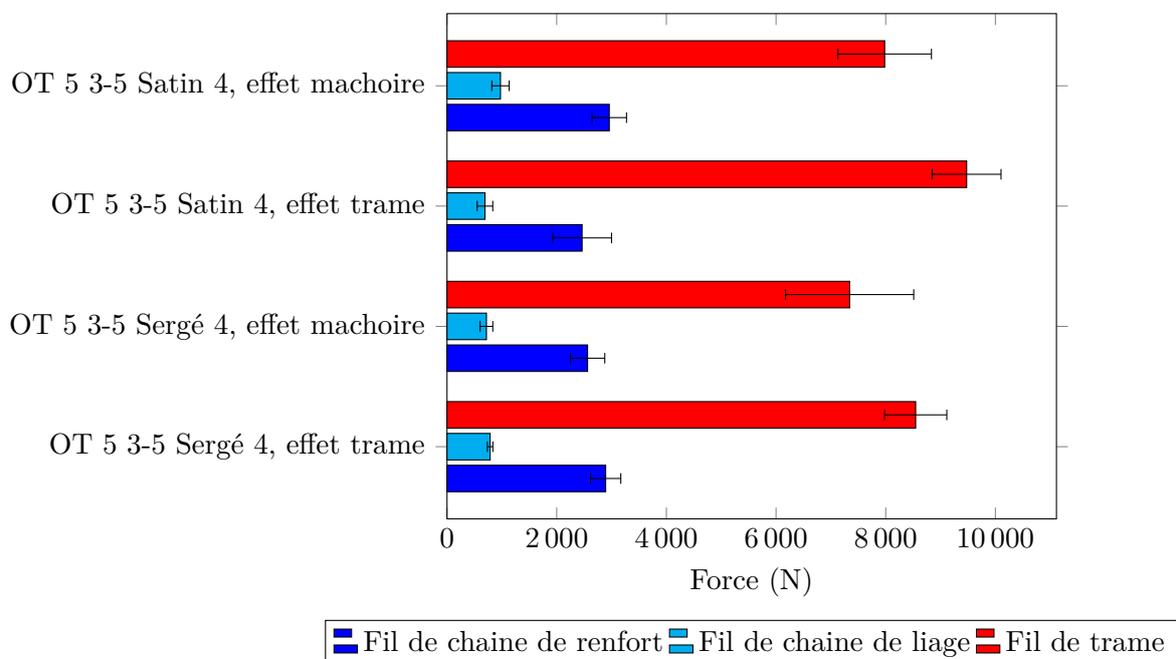


Figure 2.44 – Force à rupture des quatre structures de la campagne #4

La figure 2.44 donne les valeurs des efforts à rupture de chaque type de fils pour les quatre structures 3D interlock chaîne étudiées. En sens chaîne, le premier pic, lié à la rupture des fils de chaîne de renfort, est suivi d'un second associé à la rupture des fils de chaîne de liage. Le ratio entre fils de chaîne de liage et de renfort est toujours bien marqué. Les valeurs des efforts à rupture des fils de chaîne de liage sont équivalentes pour les quatre tissus. Le nombre de fils de chaîne de liage étant le même pour toutes les éprouvettes testées. La force à rupture des fils de chaîne de renfort est dans le même ordre de grandeur pour les quatre tissus et pour les mêmes raisons. En sens trame, un seul pic est mesuré correspondant à la rupture de l'ensemble des fils de trame. Cependant les forces à rupture évoluent nettement plus en fonction de l'architecture de liage. L'effet mâchoire, en élargissant le motif, diminue la résistance à rupture en sens trame. Et comme pour la masse surfacique, la plus haute densification des structures liées par un satin, est visible en sens trame.

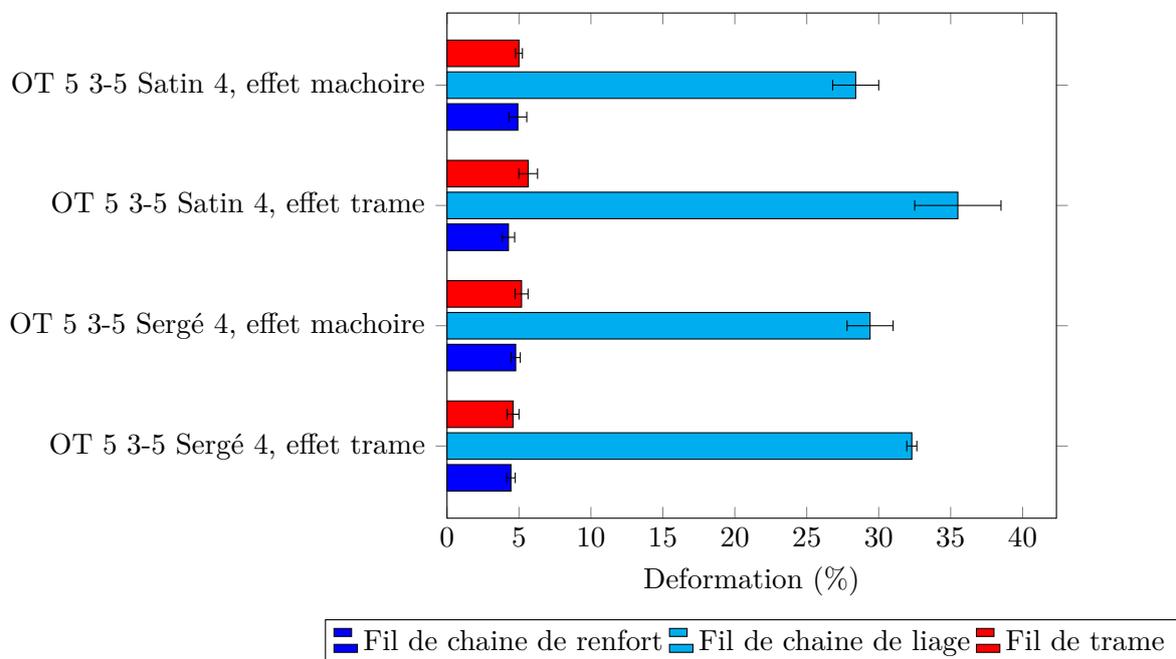


Figure 2.45 – Déformation à rupture des quatre structures de la campagne #4

Les déformations à rupture sont données par groupe de fils (figure 2.45). La déformation à rupture des fils de chaîne de renfort comme des fils de trame est faible pour les quatre structures 3D interlock chaîne. La déformation à rupture des fils de chaîne de liage est plus importante pour des structures avec un simple effet trame et avec un liage en satin.

Conclusion

L'étude de ces quatre structures a permis de comprendre l'influence de l'armure formée par les fils de chaîne de liage sur les propriétés des tissus 3D interlock chaîne. L'embuvage des fils de chaîne de liage dépend de l'architecture de l'armure et de son effet. La masse surfacique des tissus 3D interlock chaîne en satin est supérieure car le niveau de densification de la structure est plus

important. Comme pour la campagne de tissage précédente, les propriétés mécaniques en sens chaîne évoluent nettement moins qu'en sens trame, et ce pour la même raison. En sens trame, l'élargissement du motif, conséquence de l'effet mâchoire conduit à une perte des propriétés dans la direction trame.

- ① Le nombre d'architectures de liage est très grand. Le sergé et le satin de quatre ne sont que deux exemples d'armures de liage. Si le choix de l'architecture n'est pas forcément représentatif de tous les liages possibles, la valeur du pas de liage ($Y_1 = 4$) a été définie pour obtenir des largeurs de motif les plus petites possibles et un nombre de points de liage maximal sur la largeur des éprouvettes de traction, au détriment de l'identification des propriétés en flexion.

2.6 Influence de la disposition des fils de chaîne de renfort

$$X_1 X_2 N Y_1 - Y_2 \text{ Liage}\{Liage\}\{\#\} \text{ Renfort}\{\#\}$$

Les quatre premières campagnes ont porté sur l'influence de paramètres relatifs aux fils de chaîne de liage et aux fils de trame. Le rôle des fils de chaîne de renfort est pourtant primordial car il assure, au sein d'une structure 3D interlock chaîne, les propriétés longitudinales de la structure. L'objectif de cette campagne est de déterminer l'influence de la disposition des fils de chaîne de renfort au travers de l'épaisseur sur les propriétés mécaniques.

2.6.1 Protocole expérimental

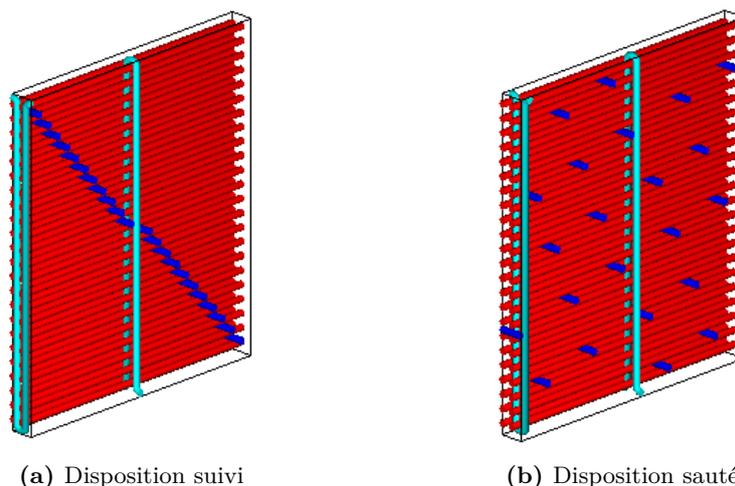


Figure 2.46 – Différentes dispositions des fils de chaîne de renfort pour la structure OT 23 1-23 Toile

Au cours de la campagne de tissage #2, la structure à 23 couches a révélé des performances importantes en traction dans les deux directions du tissu. Suite à la caractérisation de cette

structure, une seconde structure à 23 couches a été élaborée avec une disposition différente des fils de chaîne de renfort. Le nom des différentes dispositions de fils de chaîne de renfort s'inspire du type de rentrage. En effet, pour passer d'un type de renfort à l'autre, il est possible soit de modifier le rentrage et de conserver l'ordre de levée des cadres, soit de modifier l'ordre de levée des cadres sans modifier le rentrage. La deuxième solution a été mise en place. La figure 2.46 illustre deux possibilités de disposition des fils de chaîne de renfort au travers de l'épaisseur. La structure à disposition de fils de chaîne de renfort dite suivi fut la première tissée et ses résultats ont été présentés dans la campagne #2. La structure à disposition de fils de chaîne de renfort dite sauté a été tissée pour réaliser cette nouvelle campagne.

2.6.2 Résultats expérimentaux

	OT 23 1 -23 Toile	
	Disposition suivi	Disposition sauté
Densité chaîne (fils/cm)	6,1	6,0
Densité trame (fils/cm)	54,6	49,9
Embuvaage liage (%)	237 ± 13	301 ± 26
Embuvaage renfort (%)	2,2 ± 0,5	1,1 ± 0,9
Retrait (%)	2,3 ± 1,2	1,8 ± 0,8
Épaisseur (mm)	18,0 ± 1,0	18,9 ± 0,9
Masse surfacique (kg/m ²)	6,345 ± 0,122	6,392 ± 0,087

Table 2.8 – Données mesurées sur les deux structures

Le tableau 2.8 précise les résultats de caractérisation des deux structures à 23 couches. La disposition des fils de liage au travers de l'épaisseur influe sur la densité trame et sur l'embuvaage des fils de chaîne de liage. La structure dont la disposition des fils de renfort est de type suivi, présente une plus grande densité trame que la structure à la disposition des fils de renfort de type sauté. L'embuvaage des fils de liage de la structure à disposition suivi est inférieur à celui de la structure à disposition sauté car l'épaisseur de la structure est plus grande. La répartition homogène des fils de trame au travers de l'épaisseur des structures renforcées par des fils de chaîne de liage selon une disposition de type sauté explique cette différence d'épaisseur.

	OT 23 1 -23 Toile	
	Disposition suivi	Disposition sauté
Force à rupture, sens chaîne, 1e pic (N)	4 103 ± 221	4 214 ± 339
Déformation à rupture, sens chaîne, 1e pic (%)	4,29 ± 0,51	3,94 ± 0,36
Force à rupture, sens trame (N)	29 355 ± 1 514	34 854 ± 917
Déformation à rupture, sens trame (%)	9,14 ± 0,78	7,02 ± 0,84

Table 2.9 – Données de caractérisation mécanique des deux structures

Le tableau 2.9 donne les résultats de caractérisation mécanique de ces deux structures à 23 couches. La force à rupture en sens chaîne est du même ordre de grandeur pour les deux

structures (environ 140 N/fil). Un gain de 18 %, en termes de force à rupture en sens trame, est obtenu sans modification du rentrage, juste en modifiant l'ordre de sélection des cadres. La déformation à la rupture en sens chaîne est identique pour les deux structures. En sens trame, la force à rupture de la structure à disposition de type sauté est supérieure à celle de la structure à disposition de type suivi (et malgré une densité trame inférieure). La disposition des fils de chaîne de renfort de type suivi crée un axe de rupture, non présent sur la disposition sauté, qui peut influencer sur les résultats en traction trame. La déformation à la rupture, en sens trame, de la structure à disposition de type suivi est supérieure à celle de la structure à disposition de type sauté, comme en atteste les valeurs de retrait.

Optimisation des procédés pour la réalisation des structures 3D interlock chaîne

La caractérisation de ces structures 3D interlock chaîne a permis de mieux comprendre les propriétés métrologiques et mécaniques de ces structures épaisses. Mais la mise en œuvre de ces structures a également conduit à acquérir des connaissances en termes de tissabilité de ces structures.

Préparation au tissage La tension appliquée au cours de l'ourdissage est essentielle à la réalisation d'ensouples homogènes et permet d'assurer une ouverture correcte de la foule pour insérer les fils de trame. La machine à tisser utilisée lors de la deuxième campagne de tissage permettait de tisser des architectures avec différents ratio fils de chaîne de liage / fils de chaîne de renfort grâce à un système de plusieurs ensouples. Comme sur la machine à tisser TTF (cf. figure 2.19), l'association d'une ensouple à un cadre de la machine à tisser est pertinente lorsqu'il n'est pas possible d'utiliser un cantre. Sur un cantre, la tension de chaque fil de chaîne (de liage comme de renfort) est contrôlée individuellement.

- | |
|---|
| <p>① Il est possible de tisser des architectures 3D interlock chaîne à partir d'une seule ensouple. Seules des architectures sans fils de chaîne de renfort peuvent alors être mises en œuvre. Par exemple, les structures AL et OL de la première campagne de tissage (cf. figure 2.18) peuvent être tissées sans fils de chaîne de renfort. Ces derniers étant nécessaires dans les structures AT et OT pour séparer les nappes de fils de trame.</p> |
|---|

Une difficulté du tissage 3D interlock est le frottement et par conséquent la fibrillation occasionnée. Toutes les machines utilisées lors de ces travaux sont équipées d'une technologie de sélection des fils à cadre. Le nombre de cadres limite la largeur des motifs, et par conséquent les géométries des tissus 3D interlock chaîne, comme confirmé par EL-DESSOUKY et al. [114]. La technologie Jacquard permet de sélectionner de manière individuelle la position de chaque fil de chaîne à chaque insertion. En contrôlant la position de chaque fil de chaîne, il est possible de déterminer leur rôle de chaque fil de chaîne (renfort ou liage ; quitte à changer au cours du

tissage) et dans des structures qui possèdent des points de liage à des positions préalablement définies. Dans la préparation des cartons de tissage, il peut être également important de réfléchir au rentrage des fils de chaîne (et les proportions) pour limiter les mouvements des cadres, et ainsi réduire les frottements entre les fils. Il en est de même lors du tissage, de l'ordre d'insertion des fils de trame qui conditionne le déplacement des cadres.

Tissage Le système de sélection des cadres de la TTF (cf. figure 2.19) est différent de celui de la machine à tisser Dornier. La machine à tisser TTF est équipée d'une tête de sélection ARM. Ce système de sélection referme la foule à chaque battement de peigne même si la position d'un fil est le même d'une insertion à l'autre. Ce type de sélection démultiplie le nombre de frottements inter-fils et entre les fils et les éléments de la machine. Le système de ratière rotative STAUBLI (cf. figure 2.4) permet de conserver la position d'un cadre si celui-ci ne bouge pas au cours de deux insertions successives. Comme les ratières rotatives à cadres, le système de sélection Jacquard (magnétique ou à moteur) permet de conserver cette position [123, 167]. Pour les structures les plus épaisses, un système d'insertion piloté en hauteur peut également être nécessaire. Enfin le tirage à plat est à privilégier tant les déformations engendrées par les rouleaux d'appels peuvent déformer les structures 3D interlock chaîne après leur tissage.

Conclusion

Le tissage 3D interlock chaîne est un procédé permettant de réaliser des structures de renfort épaisses destinées à l'industrie des matériaux composites. BOUSSU et al. [51] ont établi une classification des structures 3D interlock chaîne à l'origine de la démarche entreprise et présentée dans ce chapitre. Au cours de quatre campagnes de tissage et en considérant un titrage et une matière de fil donnés, les résultats suivants ont pu être révélés :

- L'épaisseur des tissus 3D interlock chaîne est fonction du type de liage et de la profondeur de liage ;
- Le comportement en flexion est fonction du type de liage et de la profondeur de liage, mais également de la direction et donc de l'ondulation des fils ;
- Le comportement en traction sens chaîne est fonction de la densité chaîne. Un second pic apparaît dès que la différence d'embuvage entre les fils de chaîne de liage et les fils de chaîne de renfort augmente ;
- Le comportement en traction sens trame est fonction de la densité trame, du type et de la profondeur de liage et de la largeur du motif en sens chaîne ;

Chacune de ces quatre campagnes de tissage a permis de mieux comprendre les structures 3D interlock chaîne à base de fils de lin. Pas moins d'une soixantaine de structures ont été réalisées au cours de ces campagnes et la sélection de dix-sept d'entre-elles ont permis d'extraire les résultats présentés.

Les valeurs obtenues au cours des essais de caractérisation ont permis d'obtenir des premières tendances relatives à ces structures en les comparant les unes aux autres. Dans le cadre de la

démarche multi-échelles mise en place dans cette thèse seule l'échelle macroscopique des renforts a été étudiée dans ce chapitre. Pour compléter cette démarche multi-échelles, l'objectif est de définir les propriétés des fibres qui composent la mèche, le rôle de la torsion sur les propriétés de la mèche, et les propriétés d'un matériau composite renforcé d'une structure 3D interlock chaîne à base de fils de lin.

Chapitre 3

Analyse multi-échelles associée aux renforts 3D interlocks chaines

Ce chapitre concerne les trois échelles associées à l'élaboration de matériaux composites renforcés de tissus 3D interlock chaîne en lin. De la mèche aux matériaux composites, en passant par les fibres, ce chapitre permet de comprendre les performances des structures tissées 3D interlock chaîne.

Sommaire

3.1 Optimisation des mèches en vue du tissage 3D interlock chaîne . . .	89
3.1.1 Caractérisation des mèches	89
3.1.2 Résultats de la composition chimique de la fibre de lin	93
3.1.3 Influence de la torsion	94
3.1.4 Influence de la teneur en eau	98
3.2 Détermination des caractéristiques des fibres par le protocole IFBT	102
3.2.1 Méthodologie	102
3.2.2 Réalisation des éprouvettes IFBT	103
3.2.3 Modules des éprouvettes composites	105
3.2.4 Détermination des modules des fibres	105
3.3 Étude des matériaux composites renforcés par des structures 3D interlock chaîne	112
3.3.1 Réalisation des éprouvettes	113
3.3.2 Méthodes de caractérisation	114
3.3.3 Influence de l'armure de renfort sur les caractéristiques composites	116
Composite Lin/PLA obtenue par thermocompression	125
Optimisation des procédés pour la réalisation de matériaux composites en lin	127

Introduction

LA démarche multi-échelles a pour objectif de déterminer l'influence des paramètres à une échelle sur les caractéristiques des matériaux aux autres échelles [46] et de suivre l'évolution des propriétés des différents constituants [168, 169]. Dans le cadre de l'élaboration de matériaux composites bio-sourcés, quatre échelles peuvent être étudiées : (1) l'échelle microscopique des fibres et faisceaux de fibres, (2) l'échelle mésoscopique des rubans et mèches, (3) l'échelle macroscopique des renforts et (4) l'échelle macroscopique des matériaux composites élaborés à partir de ces renforts. Le [chapitre 2](#) a présenté l'échelle associée à l'élaboration de renfort 3D interlock chaîne ; les trois autres échelles, relatives aux fibres, mèches et matériaux composites seront développées dans la suite de ce chapitre.

Le tissage 3D interlock chaîne est un procédé qui nécessite un choix rigoureux de la matière entrante pour faciliter le tissage et la mise en œuvre des matériaux composites associés. La matière, le titre, la torsion, le degré de pilosité, ou encore les propriétés mécaniques sont des informations essentielles pour la mise en œuvre du tissage et obtenir des renforts aux propriétés maîtrisées. Les propriétés des matériaux composites dépendent des performances mécaniques du renfort et du procédé de mise en œuvre. Comme détaillé dans le [chapitre 2](#), les propriétés des renforts dépendent des armures de tissage et des densités. Les propriétés de la mèche dépendent quant-à-elles des propriétés des fibres. Enfin les propriétés des fibres dépendent des différentes étapes, détaillées en [chapitre 1](#), de récolte et de transformation du lin.

3.1 Optimisation des mèches en vue du tissage 3D interlock chaîne

Les mèches de lin utilisées lors des différentes campagnes de tissage, et présentées au [chapitre 2](#) (tableau 2.1) sont issues de plantes récoltées en Normandie. Une légère torsion est appliquée à la mèche pour faciliter son passage dans les lices. La torsion, en modifiant sa géométrie, implique également un changement de comportement physique et mécanique [44]. L'humidification de l'atelier de tissage est par ailleurs une technique permettant de faciliter le tissage. L'ensemble de ces paramètres est considéré dans cette première partie du chapitre.

3.1.1 Caractérisation des mèches

Les mèches employées dans ce chapitre sont des mèches de lin possédant deux valeurs de titrage différentes et dont les fibres ont été produites courant 2017. Dans le cadre du projet [FLAX3D](#), les mèches sont fournies par le groupe DEPESTELE. Les mèches étudiées ont pour titrage théorique 500 et 1 000 tex. Ni la variété, ni la longueur des fibres élémentaires, constituant la mèche n'ont été fournies. Dans le cadre des différentes campagnes de tissage, seules des mèches de 1 000 tex ont été employées.

L'ensemble des tests de caractérisation de la mèche est réalisé sous atmosphère standard définie par la norme ISO 139, soit à une température de $20,0 \pm 2,0$ °C et une humidité relative de $65,0 \pm 4,0$ %. Chaque essai conduit à une valeur moyenne des quantités et à un écart type sur la base du nombre d'échantillons testés.

3.1.1.1 Composition chimique

La composition de la mèche est déterminée à partir d'une analyse infrarouge (IR). L'analyse infrarouge permet de déterminer la nature des composants. Un laser de longueur d'onde variable excite des assemblages atomiques qui entrent en résonance. Les courbes obtenues sont comparées à une base de données, permettant de définir la nature des composants. La mèche de lin est immergée dans l'eau pendant 24 h. Le substrat est filtré, déshydraté et soumis à un essai IR.

Les analyses thermogravimétriques (ATG) sont effectuées sur un spectroscope de masse, sous azote (pour éviter toute oxydation). Au cours de l'essai, la masse de l'éprouvette est suivie en fonction de la température. Les essais d'ATG permettent de définir la plage de stabilité thermique d'un matériau et en conséquence de déterminer les températures maximales de mise en œuvre de ce matériau, sans dégradation.

Certaines fibres thermoplastiques utilisées pour la mise en œuvre des matériaux composites sont également soumises à un essai de calorimétrie différentielle à balayage (DSC). Les essais de DSC permettent de déterminer les températures de transition vitreuse¹ et de fusion indispensable à la mise en œuvre du matériau composite.

3.1.1.2 Régularité et pilosité

La variation de masse et le degré de pilosité sont mesurés via un Uster Tester 3. La mesure de variation de masse le long de la mèche est effectuée par un capteur capacitif², illustré en figure 3.1. La mesure du degré de pilosité est quant à elle effectuée par un capteur optique. Selon Uster, « *le degré de pilosité correspond à la longueur additionnée de toutes les fibres protubérantes à l'intérieur de la zone de mesure* ». Les tests ne sont pas normés mais se rapprochent de la norme ISO 16549 [170]. La durée du test est de 30 secondes à une vitesse de 0,25 m/s. Ces caractérisations sont réalisées à différents endroits de la bobine.

1. Température de changement d'état de la matière passant d'un état vitreux solide à un état caoutchouteux.

2. Un capteur capacitif détecte les variations de champ magnétique.



Figure 3.1 – Capteur capacitif de l'Uster Tester 3

3.1.1.3 Titrage

Le titre correspond à la masse linéique d'un fil. La détermination du titre de la mèche s'effectue par pesée d'une longueur déterminée de fil. Le calcul du titre est donné par l'équation 3.1. Dans la pratique, une vingtaine de mètres est généralement utilisé pour déterminer le titre même si la norme NF G07-316 recommande une cinquantaine de mètres.

$$T = 1000 \times \frac{m}{l} \quad (3.1)$$

avec T , le titre en tex, m , la masse en gramme et l la longueur de mèche en mètre.

3.1.1.4 Torsion

La torsion est appliquée sur la mèche par une retordeuse à anneaux TWISTEC 3 illustrée en figure 3.2. Le niveau de torsion est défini par le rapport de la vitesse de rotation entre les cylindres d'alimentation et celle de la broche. Un curseur (en vert sur la figure) de masse choisie se déplace librement sur l'anneau pour enrouler la mèche autour d'un cône (en jaune sur la figure). Le sens de torsion de la mèche (S ou Z) est défini par le sens de rotation de la broche. La vitesse du chariot et le pas d'incrémentations définissent la forme et l'épaisseur de la bobine.



Figure 3.2 – Retordeuse à anneaux TWISTEC 3

La détermination de la torsion de la mèche s'effectue ensuite sur un torsiomètre selon la norme NF ISO 2061 [171]. La méthode de *détorsion-retorsion* est employée. Au cours de l'essai la mèche se détord et sa longueur augmente. La longueur des éprouvettes est de 50 cm. Le test s'arrête dès lors que la longueur redevient identique à celle du début de l'essai (la torsion est alors de sens contraire). Le nombre de tours effectué par le moteur correspond à la torsion de la mèche. Un minimum de 10 mesures a été effectué par échantillon.

3.1.1.5 Comportement en traction

Le comportement mécanique de la mèche est évalué via un test de traction, réalisé selon la norme NF 2062 [172]. Le banc de traction MTS Criteron employé est équipé d'une cellule de force de 10 kN. La longueur de jauge sélectionnée est de 200 mm. Les mors sont spécifiquement adaptés pour ces tests sur fils. Une précharge de 2 N est appliquée avant le début du test. La vitesse de l'essai est de 100 mm/min. Un total de 20 mesures par échantillon a permis d'obtenir des résultats moyennés. Selon BARBULEE et al. [41] pour les mèches de lin, une vingtaine d'essais suffit à obtenir une moyenne représentative d'une propriété.

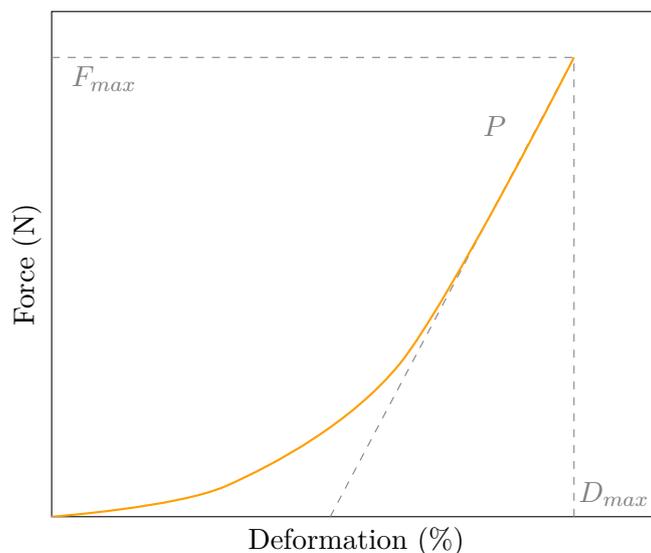


Figure 3.3 – Paramètres d'analyse d'un essai de traction mèche

Outre la force F_{max} et la déformation à rupture D_{max} , la pente P est estimée. Cette pente (exprimée en N) est calculée à partir du point maximal dans la zone où la courbe est linéaire, comme précisé figure 3.3. La ténacité, rapport entre la force à rupture et le titre de la mèche, permet de comparer des structures de titrages différents et s'exprime en cN/tex.

3.1.1.6 Absorption en eau

Les éprouvettes de mèches sont immergées dans de l'eau épurée à température ambiante. L'évolution de la masse est suivie par des pesées régulières. L'allure des courbes obtenues suit une loi de Fick [80, 81] comme introduit dans le chapitre d'état de l'art (cf. 1.2.3). La prise de masse relative à l'instant t est calculée via l'équation 3.2.

$$M_t = \left(\frac{W_t - W_0}{W_0} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

avec W_0 et W_t , respectivement la masse initiale (avant immersion) et la masse à l'instant t . Le coefficient de diffusion D est alors déterminé à partir de l'équation 3.3.

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 4 \cdot \sqrt{\frac{D \cdot t}{\pi r^2}} \quad (3.3)$$

avec D , le coefficient de diffusion, M_∞ , la prise de masse relative à l'asymptote, t , le temps et r , le rayon de la mèche.

3.1.2 Résultats de la composition chimique de la fibre de lin

Analyse infrarouge L'analyse infrarouge a permis de détecter l'utilisation d'un agent de cohésion chimique parmi les constituants de la mèche. La mèche étant plate, la cohésion de la

structure est assurée par un agent de liaison qui lie parallèlement les filés de fibres les uns à côté des autres. Cet agent permet de faciliter et d'assurer la résistance aux sollicitations mécaniques des mèches de lin au cours du tissage. Pour des raisons de confidentialité, le nom de cet agent ne peut être communiqué, mais il est biosourcé et soluble dans l'eau.

Analyse thermogravimétrique L'ensemble des mèches a été soumis à un essai d'analyse thermogravimétrique pour déterminer leur composition et la proportion des constituants dont cet agent qui assure la cohésion des fibres de lin entre-elles.

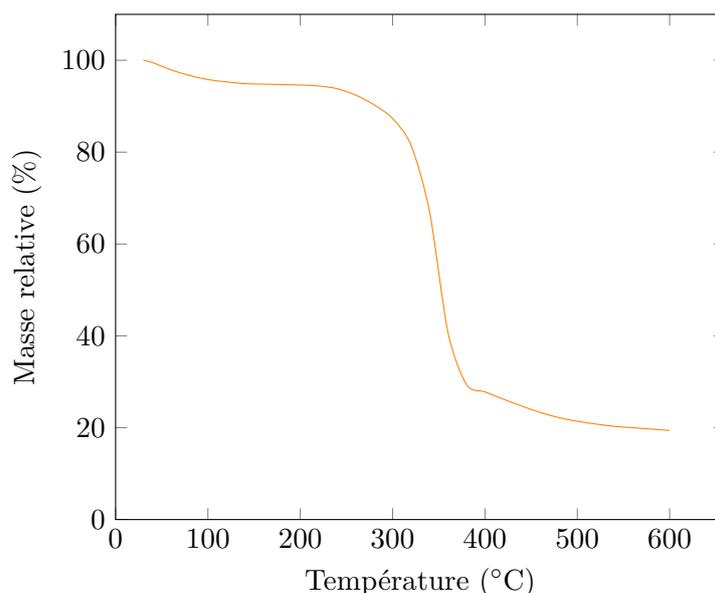


Figure 3.4 – Courbe d'analyse thermogravimétrique d'une mèche de lin

La figure 3.4 reporte la courbe ATG de la mèche de lin. On constate sur ce graphique trois principales températures de dégradation. La perte de masse avoisinant les 100°C est due à l'évaporation de l'eau contenue dans la fibre. La fibre de lin se dégrade ensuite dès 210°C. Et enfin l'agent de liaison se dégrade à son tour aux alentours de 380°C. L'agent de cohésion avoisine les 10% en masse de la mèche.

La mèche de lin peut être mise en œuvre pour la réalisation de matériaux composites à une température inférieure à 200°C. Il est néanmoins préférable d'étuver le lin préalablement à sa mise en œuvre à une température supérieure ou égale à 60°C, pour évaporer l'eau contenue dans la fibre.

3.1.3 Influence de la torsion

Les mèches utilisées pour cette étude sont le Lincore R500 2017 et le Lincore R1000 2017. Six niveaux de torsion ont été testés sur ces deux titrages de mèches. Les valeurs de torsion choisies sont 40, 70, 100, 140, 170 et 200 tpm. Les essais de caractérisation sont également effectués sur les mèches non retordues (pour lesquelles les résultats associés sont présentés sous la valeur de

torsion 0). Le titrage, la régularité, la pilosité et le comportement en traction sont évalués pour les sept mèches (retordues ou non). Une vingtaine d'essais de traction a été effectuée pour chaque valeur de torsion.

Titre La figure 3.5 donne l'évolution du titre de la mèche Lincore R500 2017, en fonction des différents niveaux de torsion appliqués. Les valeurs de torsion mesurées sont légèrement inférieures aux valeurs de consigne. On constate une augmentation quasi-linéaire du titre avec la torsion. En la retordant sur elle-même, la longueur relative de la mèche diminue et son titre augmente.

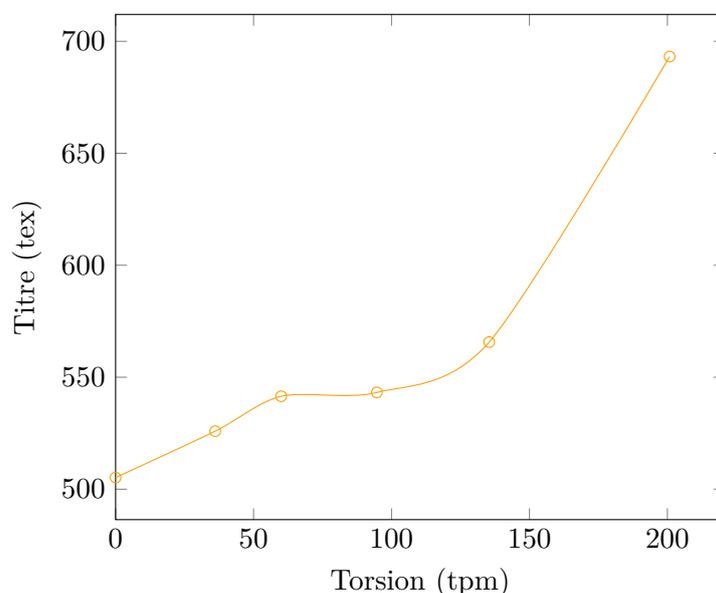


Figure 3.5 – Évolution du titre en fonction de la torsion de la mèche Lincore R500 2017

Le titre est calculé à partir de la masse de vingt mètres de mèche. Les irrégularités de la mèche sont prises en compte dans la valeur moyenne du titrage de la mèche.

Régularité et pilosité La figure 3.6 donne la variation de masse de la mèche Lincore R500 2017 en fonction de la torsion. La mèche est d'autant plus régulière que la torsion est importante. Dans un premier temps, la torsion n'est pas suffisante pour absorber les irrégularités de la mèche. Au-delà de 100 tpm, l'irrégularité diminue.

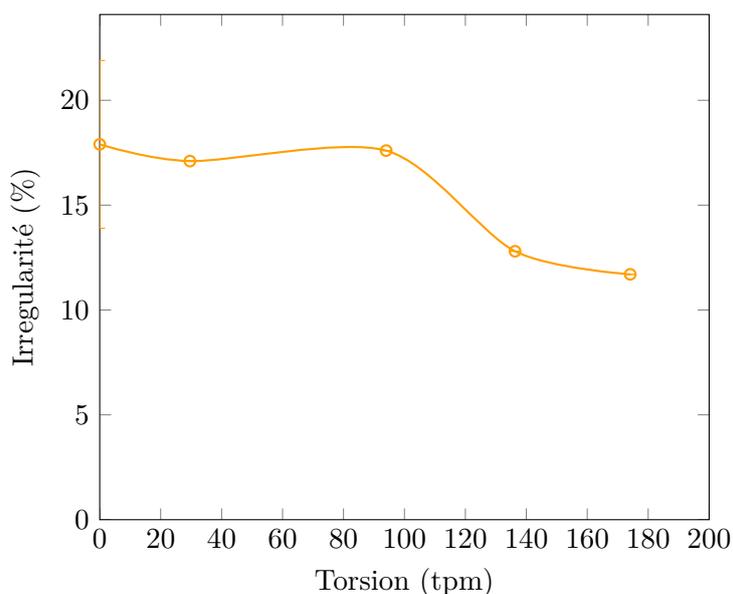


Figure 3.6 – Irrégularité de la mèche en fonction de la torsion

La figure 3.7 donne le degré de pilosité de la mèche en fonction de la torsion de la mèche Lincore R500 2017. Par ajout de torsion, les fibrilles sont retenues dans la mèche et le degré de pilosité diminue. La torsion permet de rendre la mèche plus régulière, de contenir les variations de masse et de réduire le degré de pilosité de la mèche.

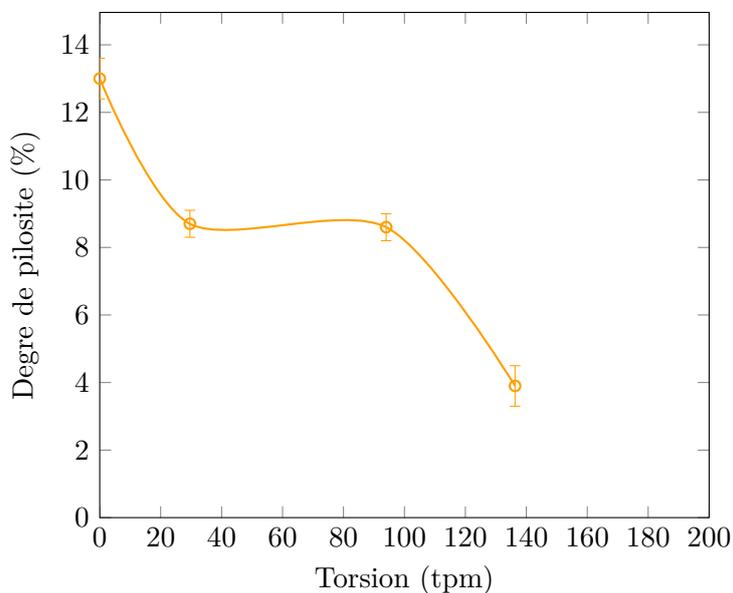


Figure 3.7 – Degré de pilosité de la mèche en fonction du niveau de torsion

Comportement en traction On reporte sur la figure 3.8 l'évolution de la ténacité à rupture des deux mèches en fonction des différents niveaux de torsion. La ténacité augmente jusqu'à un maximum puis décroît. Des résultats similaires ont été relevés dans la littérature [31, 45].

Selon SHAH et al. [44] avec la torsion, la cohésion entre les fibres augmente et par conséquent la résistance de la mèche augmente. Mais à partir d'un certain niveau de torsion, les fibres se désalignent et entraînent une baisse de la résistance de la mèche. La ténacité maximale n'est cependant pas relevée au même niveau de torsion pour les deux mèches suivant le titrage.

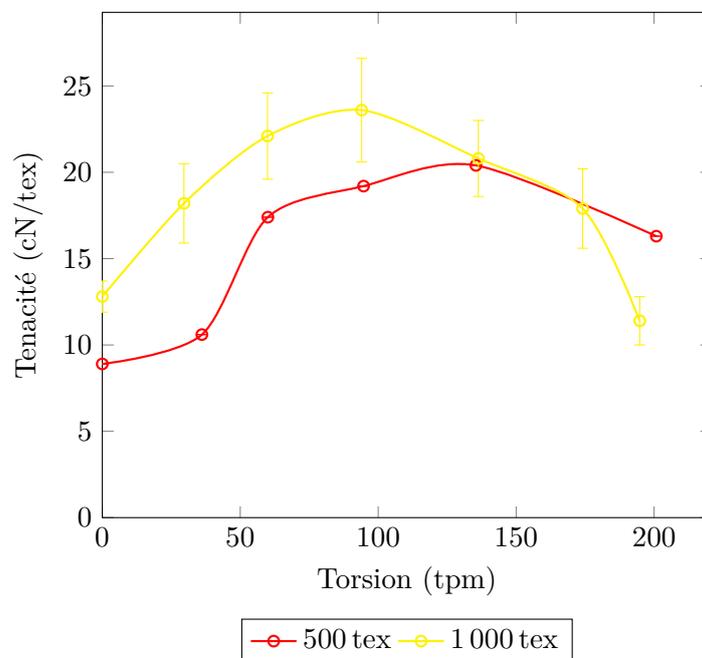


Figure 3.8 – Ténacité à rupture de la mèche en fonction du niveau de torsion

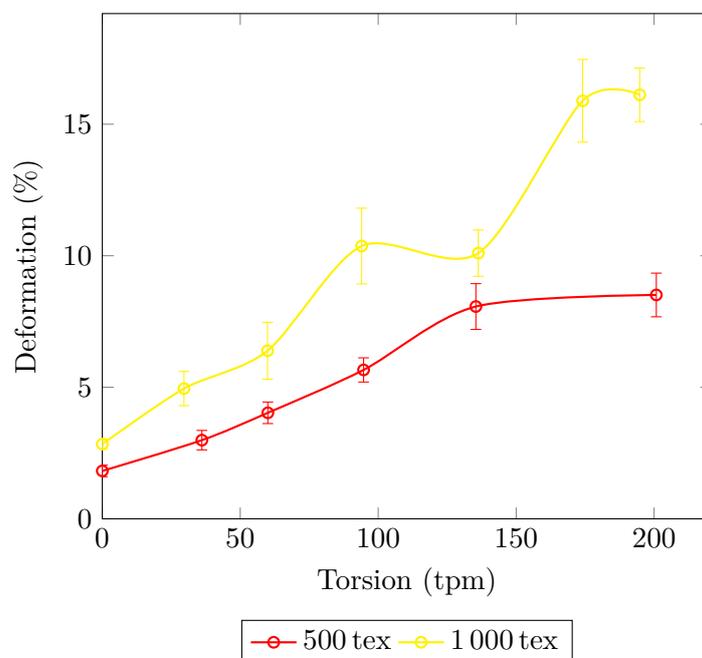


Figure 3.9 – Déformation à rupture de la mèche en fonction du niveau de torsion

L'évolution de la déformation à rupture est donnée en figure 3.9, pour les deux mèches.

Notons que peu d'études dans la littérature ont porté sur l'influence du niveau de torsion sur la valeur de la déformation à rupture. La déformation est proportionnelle au niveau de torsion avec un coefficient de détermination³ supérieur à 0,95 pour les deux titrages de mèche.

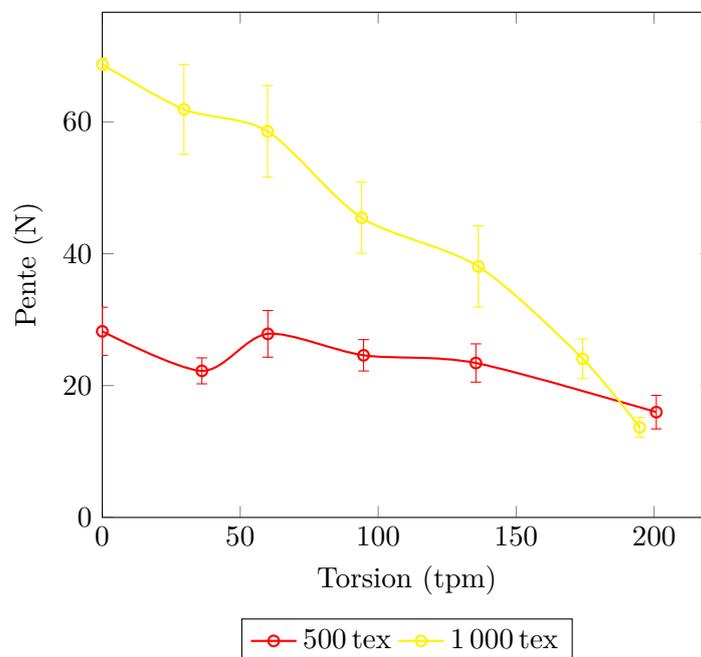


Figure 3.10 – Pente à rupture de la mèche en fonction du niveau de torsion

La figure 3.10 donne l'évolution de la pente des deux mèches de titrages différents en fonction des différents niveaux de torsion. Pour les deux titrages de mèches testés, la pente à rupture diminue avec l'ajout de torsion.

Conclusion La torsion modifie les propriétés structurales et mécaniques. Le titre et la déformation à rupture évoluent proportionnellement à la torsion. L'irrégularité et la pilosité diminuent lorsque la torsion augmente. La force à rupture augmente jusqu'à un niveau maximal puis décroît, par le désalignement des fibres par rapport à l'axe de sollicitation. Au regard des résultats obtenus, la torsion est un paramètre permettant d'accroître les performances des mèches de lin jusqu'à une certaine valeur pour la ténacité. Le taux de torsion adéquat nécessite l'étude complète sur toute la gamme des niveaux de torsion. Cette identification est essentielle pour déterminer la ténacité minimale à atteindre pour le tissage.

3.1.4 Influence de la teneur en eau

Le taux d'humidité relative d'un atelier de tissage est souvent maintenu au-delà de 50%, pour faciliter le tissage des fibres naturelles. L'objectif est de déterminer l'influence sur les

3. Le coefficient de détermination, souvent noté R^2 , permet de juger la qualité de la prédiction d'une régression linéaire.

propriétés de la mèche lorsque celle-ci est saturée en eau. Pour ce faire, les mèches Lincore R500 2017, préalablement retordues, ont été immergées dans l'eau épurée à 20°C, jusqu'à atteindre un équilibre hydrique. L'immersion des mèches dans l'eau est un environnement sévère qui n'est pas forcément représentatif des conditions d'humidité dans l'atelier de tissage [81]. L'immersion permet cependant d'éliminer une partie de l'agent de liage et de tester l'assemblage des fibres.

Détermination du coefficient de diffusion Vingt mètres de mèche avec ou sans torsion ont été immergées dans l'eau, jusqu'à atteindre l'équilibre hydrique avant d'être testées mécaniquement. L'évolution des masses est suivie par pesée régulière.

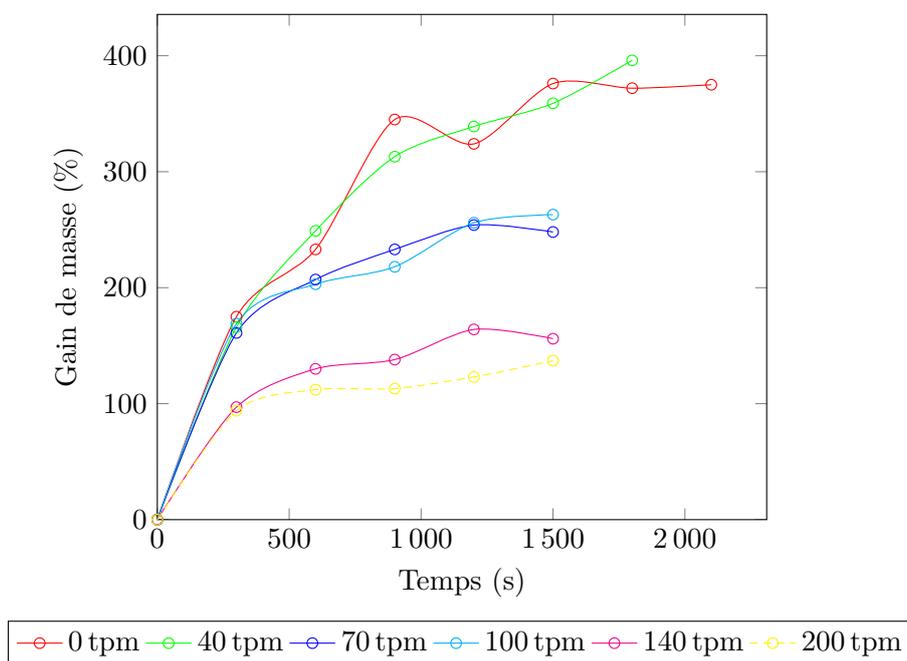


Figure 3.11 – Masse relative en fonction du temps d'immersion

La figure 3.11 donne l'évolution du gain de masse, défini dans l'équation 3.2, en fonction du temps d'immersion pour les différents niveaux de torsion de la mèche. Les mèches sont saturées en eau en une vingtaine de minutes (1 200 s). L'allure des courbes de prise de masse respecte une loi de Fick (cf. équation (3.3)). Moins les mèches sont retordues et plus le gain en masse est important. La torsion compacte les fibres et semble limiter le gonflement et la prise en eau de la mèche.

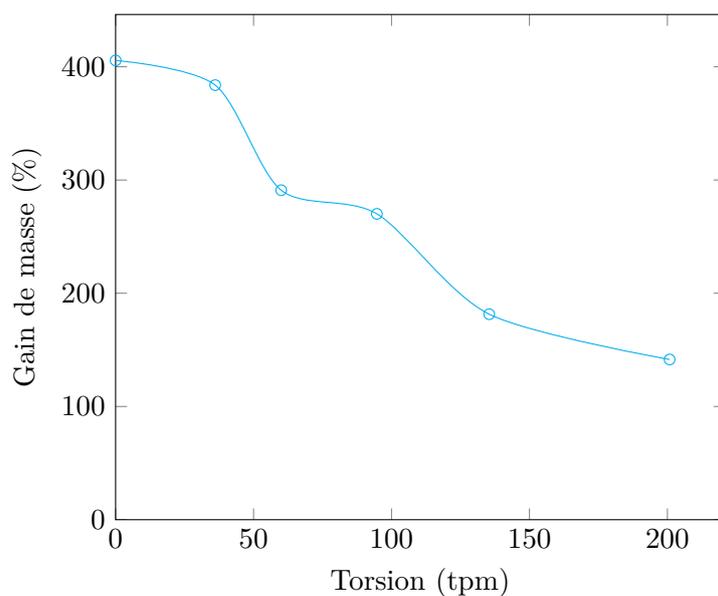


Figure 3.12 – Masse relative en fonction de la torsion à saturation

Les mèches sont toutefois laissées dans l'eau pendant une nuit avant de procéder à la caractérisation mécanique. Le lendemain, après 17h d'immersion, les éprouvettes sont pesées à nouveau. La figure 3.12 donne les masses relatives des échantillons au bout de 17h d'immersion. A saturation, le gain de masse est inversement proportionnel au niveau de torsion.

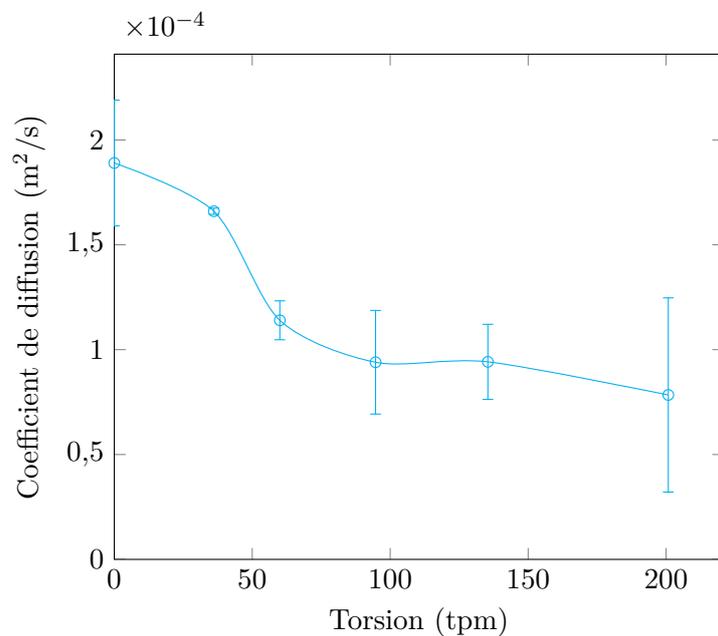


Figure 3.13 – Coefficient de diffusion en fonction de la torsion

Les coefficients de diffusion en eau ont été déterminés via l'équation (3.3) et sont donnés en figure 3.13 pour les différents niveaux de torsion. Les résultats indiquent que les valeurs du

coefficient de diffusion en eau, comme pour les masses à saturation, au sein de la mèche sont inversement proportionnelles au niveau de torsion.

Comportement en traction La figure 3.14 reporte les valeurs des efforts à rupture mesurées en fonction de la torsion appliquée, pour la mèche Lincore R500 2017 saturée en eau. Le comportement à sec a été rajouté de la figure 3.8 à titre de comparaison.

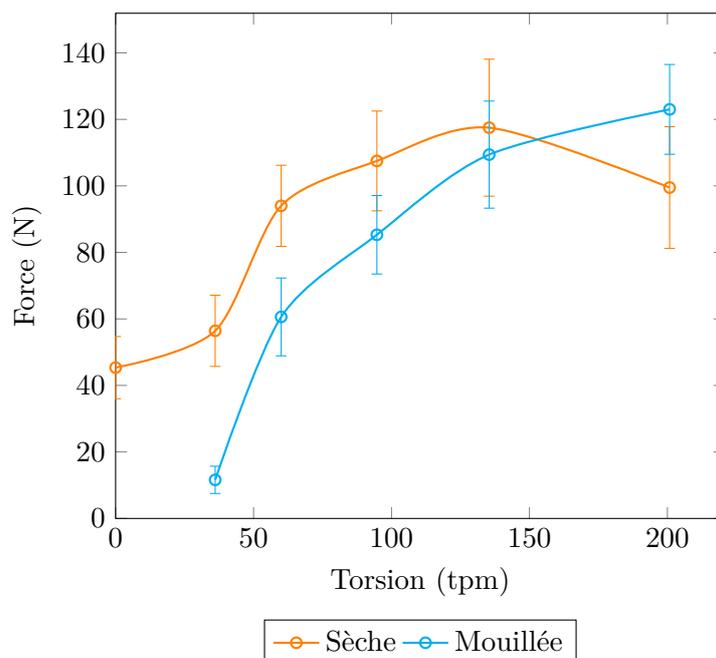


Figure 3.14 – Force à rupture de la mèche en fonction du niveau de torsion

Mouillée, la mèche sans torsion n'a pas de tenue mécanique et la simple manipulation de la mèche pour la sortir de son bain suffit à la rompre. En conséquence, la mèche sans torsion n'a pas pu être testée en traction. L'agent de cohésion, hydrophile, se dissout dans l'eau et sa concentration dans la fibre diminue. Sans cet agent de cohésion, la mèche n'a plus de tenue et par conséquent les propriétés mécaniques de la mèche mouillée ne sont assurées plus que par la torsion. L'effort à rupture de la mèche saturée en eau ne cesse de croître avec l'augmentation de la torsion, contrairement à la mèche sèche.

Conclusion

Le titre, la déformation à rupture et le coefficient de diffusion en eau de la mèche Lincore ont été identifiés en fonction des niveaux de torsion. En traction, la force à rupture dépend du titre et de la torsion. Plus le titre est important, plus il y a de fibres dans la mèche et plus la force à rupture augmente. Rapporté au titrage, la ténacité des deux mèches est entre 10 et 25 cN/tex en fonction du niveau de torsion. L'immersion des mèches dans l'eau implique une augmentation du titre de la mèche par gain de masse. Ce gain de masse est inversement proportionnel au niveau

de torsion appliqué, tout comme le coefficient de diffusion en eau.

3.2 Détermination des caractéristiques des fibres par le protocole IFBT

Dans la continuité des essais effectués à l'échelle des mèches, l'évolution des propriétés des fibres en fonction de la torsion appliquée aux mèches est l'objet de ce paragraphe. Les résultats seront limités aux modules de traction au travers des différents modèles de la loi des mélanges. Comme abordé dans le chapitre de l'état de l'art, différents protocoles permettent de déterminer les propriétés des fibres naturelles (cf. section 1.1.4). Contrairement aux essais de traction sur fibre et sur faisceau, la méthodologie de l'IFBT (*Impregnated Fiber Bundle Test*) permet d'obtenir les caractéristiques des fibres sans avoir à individualiser les fibres des faisceaux. Par contre la méthode de l'IFBT ne permet pas d'identifier les caractéristiques géométriques (diamètre, longueur), et les résultats qui en découlent dépendent de la qualité de l'imprégnation des fibres par la résine.

3.2.1 Méthodologie

La détermination des propriétés des fibres par l'IFBT est basée sur la norme NF ISO 10 618, relative à la détermination des propriétés en traction sur fils imprégnés de résine. Le protocole mis en place est celui préconisé par la CELC [38]. L'objectif de ces essais est de déterminer par calcul inverse à l'aide de lois des mélanges, les propriétés en traction des fibres élémentaires de la mèche, à partir de celles des éprouvettes résinées. Pour ce faire, les mèches sont placées dans un moule de dimension rectangulaire ($250 \times 10 \text{ mm}^2$).

Le nombre de mèche dans l'éprouvette est déterminé à partir du titre de la mèche, pour obtenir un taux volumique de fibre voisin de 50 %. L'ensemble des mèches est imprégné de résine de type époxyde Sicomin SR8200/SD7204, puis placé sous presse chauffante à 80°C , pendant huit heures, durant lesquelles la résine polymérise. La température a été définie en fonction de la fiche technique du système époxyde. La pression est choisie au cours de l'essai pour atteindre une épaisseur des éprouvettes de 2 mm.

Les éprouvettes sont ensuite entreposées à température ambiante, jusqu'à atteindre un équilibre hydrique. Les taux volumiques de fibre et de matrice sont calculés à partir de leur volume respectif et de leur densité, comme précisé dans l'équation (3.4).

$$M_c = M_m + M_f \Leftrightarrow \rho_c \cdot V_c = \rho_m \cdot V_m + \rho_f \cdot V_f \quad (3.4)$$

où M , ρ et V sont les masses, masses volumiques et volumes; et où les indices c , m et f font référence au composite, à la matrice, et aux fibres. La densité du lin est de $1,54 \text{ g/cm}^3$ [17] et celle de la résine est de $1,127 \text{ g/cm}^3$. Le taux volumique de porosité est donné par l'équation 3.5.

$$V_p = 1 - (V_m + V_f) \quad (3.5)$$

avec V_p ; V_m ; V_f le volume de porosité, de matrice et de fibre. Les éprouvettes composites sont sollicitées en traction, selon la norme NF ISO 527-4. L'entre-mors est de 150 mm et la vitesse d'essai est de 2 mm/min. Les propriétés des fibres sont calculées à partir des propriétés des éprouvettes d'IFBT.

3.2.2 Réalisation des éprouvettes IFBT

La mèche utilisée est le LINCORE R500 2017. Le nombre de mèches de lin a été préalablement déterminé à partir du titre de la mèche retordue pour obtenir un taux volumique de fibre voisin de 50%. Les mèches de lin sont placées dans un moule rectangulaire ($10 \times 250 \times 2 \text{ mm}^3$) puis imprégnées manuellement de résine. Le moule est ensuite fermé puis placé sous presse chauffante (illustrée en figure 3.15) pour accélérer la polymérisation de la résine. Quatre éprouvettes de chaque niveau de torsion sont réalisées.



Figure 3.15 – Presse chauffante renfermant le moule d'IFBT

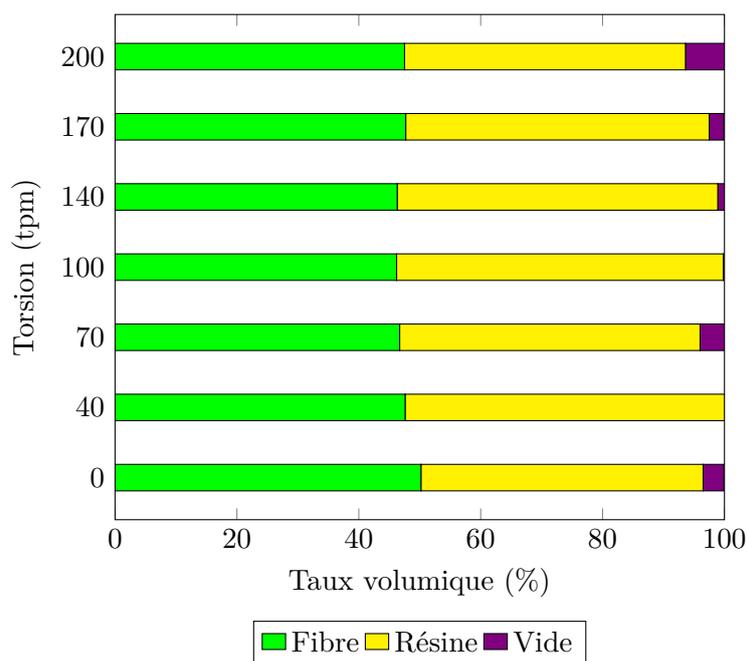


Figure 3.16 – Fractions volumiques des sept éprouvettes d’IFBT

La figure 3.16 donne les différentes fractions volumiques des différents lots d’éprouvettes d’IFBT réalisées à partir de ces mèches avec différents niveaux de torsion (de 0 à 200 tpm). Ces taux volumiques sont déduits des pesées et des équations 3.4 et 3.5. Les taux volumiques de résine et de porosité sont fonction de la quantité de résine déposée et de la pression exercée par la presse chauffante au cours du procédé. Le taux volumique de fibre varie de 46,2 à 56,8 % pour un taux volumique de vide de 0,1 à 6,4 %. Le taux de porosité dépend du nombre de mèches dans l’éprouvette. A titre d’exemple, pour les torsions de 70 et 100 tpm ainsi que pour les torsions de 140 et 170 tpm, le nombre de mèches à insérer dans les éprouvettes est le même (à savoir 29 et 28 respectivement). En conséquence le taux volumique de résine et de vide, varient davantage pour ces niveaux de torsion.

Les éprouvettes sont stockées dans le laboratoire de caractérisation jusqu’à atteindre un équilibre hydrique. Les éprouvettes sont ensuite soumises aux essais de traction uniaxiaux dans le sens des fibres.

3.2.3 Modules des éprouvettes composites

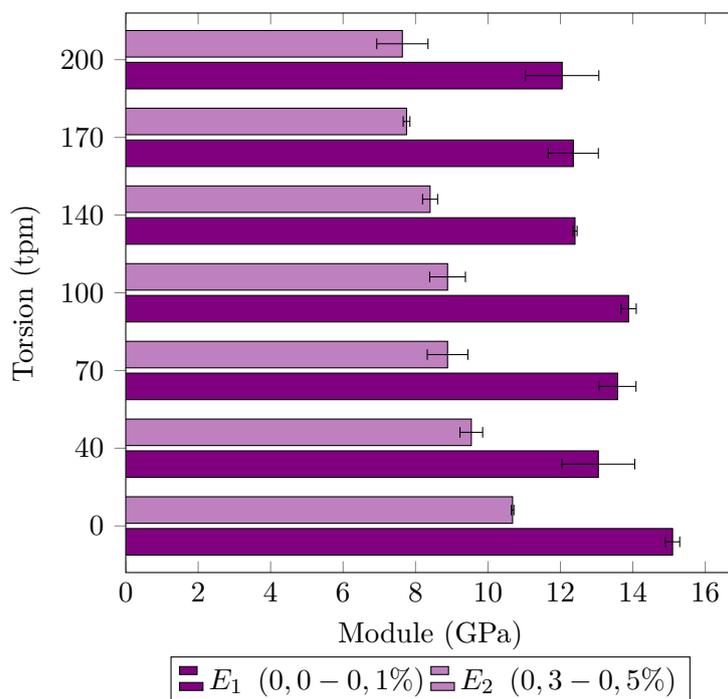


Figure 3.17 – Modules en traction des sept éprouvettes d’IFBT

A partir des données de déplacement et de force, les modules E_1 et E_2 des sept éprouvettes à l’échelle des composites sont reportés en figure 3.17. Le module E_1 est relevé entre 0 et 0,1% de déformation, tandis que le module E_2 est relevé entre 0,3 et 0,5% de déformation. L’infériorité du module E_2 par rapport à E_1 traduit un adoucissement dans la courbe de traction des éprouvettes. Ce phénomène a déjà été relevé dans la littérature à propos de matériaux composites renforcés de fibres naturelles. MA et al. [43] ont obtenu des résultats comparables.

Les modules des éprouvettes diminuent avec le niveau de torsion. Cette diminution de la rigidité serait liée au désalignement des fibres avec le niveau de torsion conduisant à la réduction de l’adhésion de surface entre la matrice et les mèches. En conséquence, la rigidité en traction diminue. A l’échelle des mèches (figure 3.10), l’évolution de la pente en fonction du niveau de torsion avait montré le même phénomène de décroissance avec l’augmentation du niveau de torsion.

3.2.4 Détermination des modules des fibres

Les modules des fibres sont déterminés à partir des modules composites par application des différents modèle de la loi des mélanges qui permettent de prendre en compte (ou non) les taux de porosité et la torsion.

3.2.4.1 Loi des mélanges classique

Dans un premier temps, les propriétés fibres sont déterminées à partir de la loi des mélanges classique (rappelée en équation (3.6) où E et V désignent respectivement les modules et fractions volumiques; et les indices c , f et m font référence au composite, aux fibres et à la matrice).

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \Leftrightarrow E_f = \frac{E_c - E_m V_m}{V_f} \quad (3.6)$$

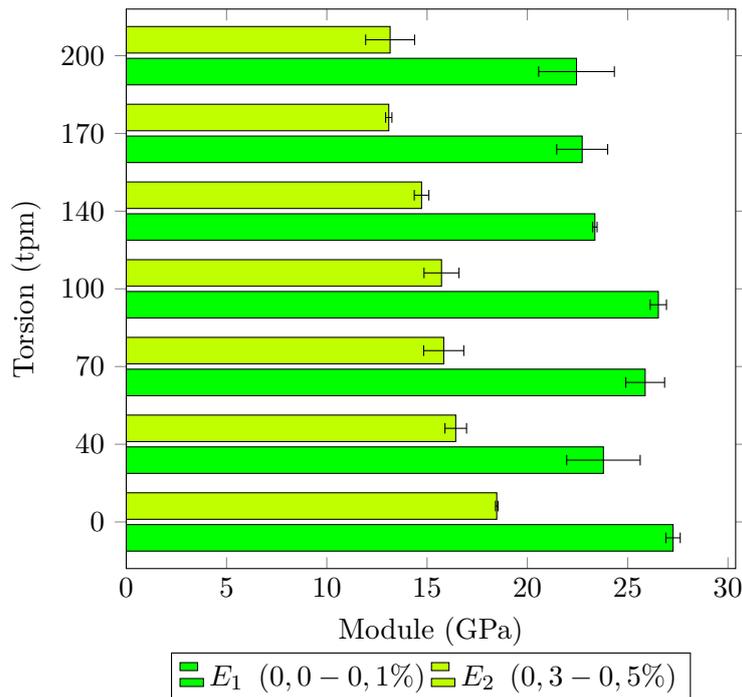


Figure 3.18 – Modules des fibres obtenus via la loi des mélanges classique

La figure 3.18 donne les modules E_1 et E_2 des fibres de lin issus des sept éprouvettes. L'influence de la torsion et des taux de porosités n'étant pas pris en compte dans cette loi des mélanges, les modules des fibres suivent la même évolution que ceux des éprouvettes composites d'IFBT (cf. figure 3.17) pour le module E_1 ou E_2 . On note une légère diminution de la rigidité avec l'augmentation de la torsion, notamment pour le module E_1 . Ces valeurs de modules restent cohérentes avec les valeurs de la littérature pour des fibres naturelles [173].

3.2.4.2 Loi des mélanges incluant la porosité

Un terme peut être ajouté à la loi des mélanges classique afin de considérer l'influence de la porosité (cf. équation (3.7)). Selon MADSEN et al. [102], pour les composites renforcés de fibres naturelles, l'exposant (relatif à la porosité) est défini à $n = 2$.

$$E_c = (E_f V_f + E_m V_m) (1 - V_p)^n \Leftrightarrow E_f = \frac{\frac{E_c}{(1-V_p)^n} - E_m V_m}{V_f} \quad (3.7)$$

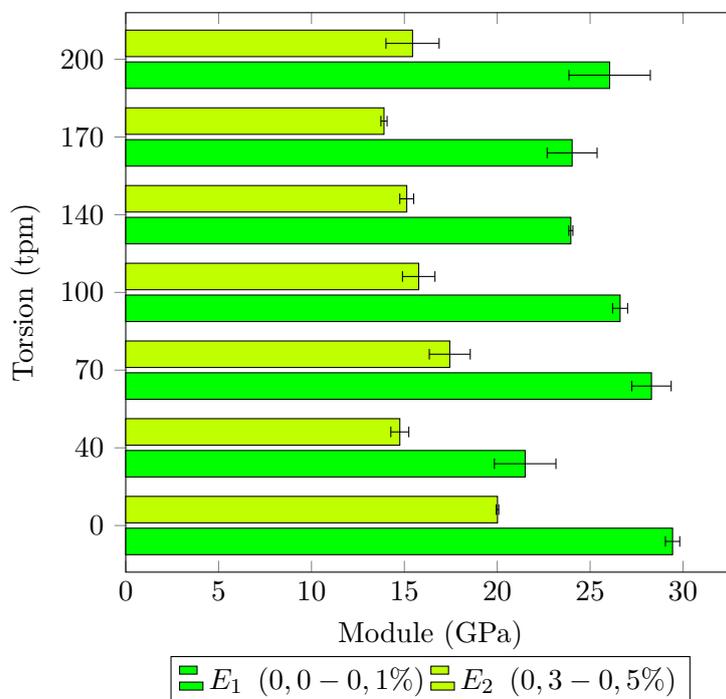


Figure 3.19 – Modules des fibres obtenus via la loi des mélanges intégrant la porosité

La figure 3.19 donne les modules E_1 et E_2 des fibres de lin, à partir des résultats de traction des éprouvettes d'IFBT et de la loi des mélanges avec porosité. A 0 tpm, les modules E_1 et E_2 en traction des fibres obtenus sont de $29,44 \pm 0,39$ et $20,01 \pm 0,07$ GPa. La prise en compte du taux de porosité conduit à un gain de module (figure 3.18) quel que soit le niveau de torsion. Les échantillons de fibres dans les éprouvettes ayant les plus forts taux de porosité (pour 0, 70 et 200 tpm) ne voient pas leurs valeurs de modules augmenter autant que les structures moins poreuses.

3.2.4.3 Modèle de Madsen, incluant un coefficient de torsion basé sur les caractéristiques de la mèche

Le modèle de MADSEN est donné en équation (3.8). Il incorpore, en plus du taux de porosité, deux paramètres : un coefficient de performance de l'orientation des fibres η_0 et un coefficient de performance de la longueur des fibres η_1 . Le coefficient de performance de la longueur des fibres est défini à $\eta_1 = 1$ car la longueur de la fibre de lin est plus de 50 fois supérieure à son diamètre [27]. Le coefficient de performance de l'orientation des fibres η_0 est déterminé à partir de la torsion T et du rayon r de la mèche, via l'équation (3.9). Le rayon est défini par microscopie optique. Les mèches de 500 tex ont un rayon de 0,586 mm quel que soit le niveau de torsion

$$E_c = (\eta_0 \eta_1 E_f V_f + E_m V_m) (1 - V_p)^n \Leftrightarrow E_f = \frac{\frac{E_c}{(1-V_p)^n} - E_m V_m}{\eta_0 \eta_1 V_f} \quad (3.8)$$

$$\eta_0 = \cos(2 \cdot \arctan(2\pi Tr)) \quad (3.9)$$

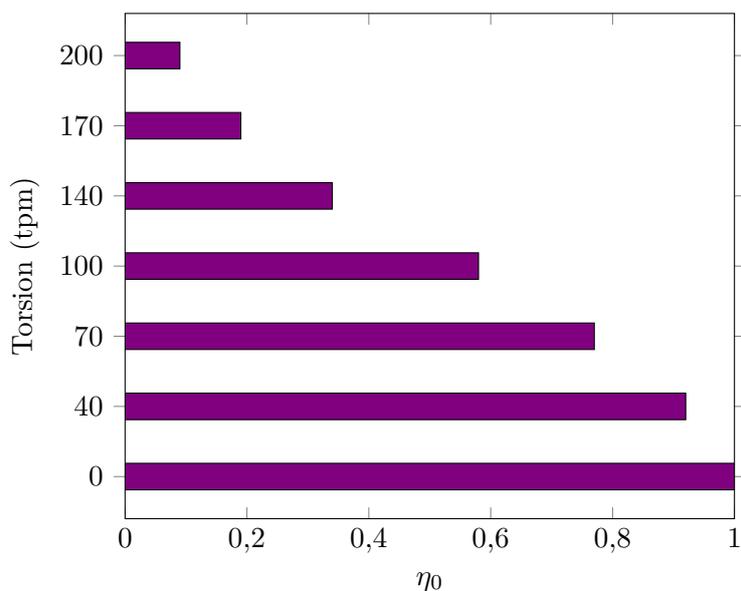


Figure 3.20 – Coefficient de performance de l'orientation des fibres η_0

La figure 3.20 donne les valeurs du coefficient de performance de l'orientation des fibres basées sur les caractéristiques de la mèche pour les sept niveaux de torsion considérés, à l'aide de l'équation (3.8)

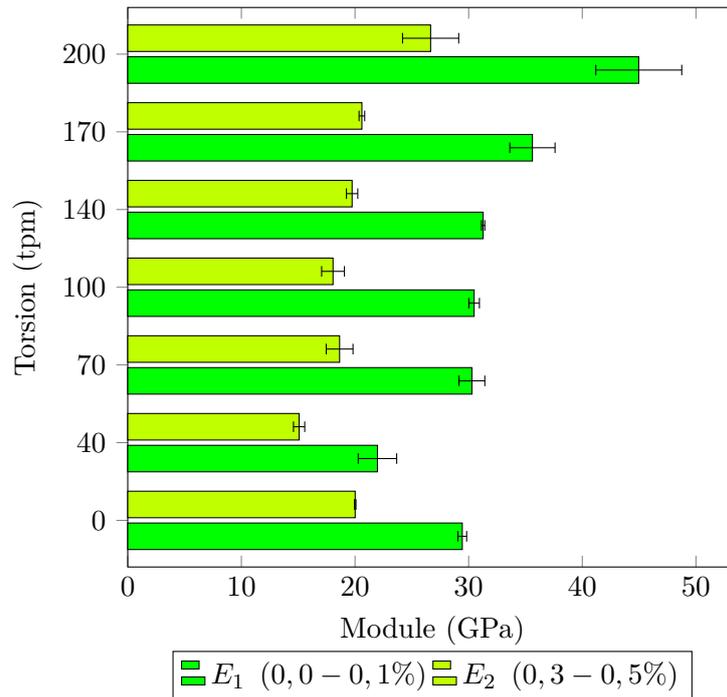


Figure 3.21 – Modules des fibres obtenus via le modèle de MADSEN incluant un coefficient de torsion basé sur les caractéristiques de la mèche

La figure 3.21 représente les modules E_1 et E_2 des fibres de lin issues des sept éprouvettes et calculés avec ce modèle prenant en compte la torsion. Comparativement aux valeurs calculées avec la loi des mélanges ne prenant en compte que le taux de porosité, la prise en compte de la torsion conduit, à partir de 100 tpm, à des valeurs de modules fibres plus élevées. Pour cette matière et à partir de 100 tpm, l'influence du paramètre d'orientation des fibres figure 3.21 est significative.

3.2.4.4 Modèle de Madsen, incluant un coefficient de torsion basé sur les caractéristiques des fibres

Dans le second modèle qui prend en compte la torsion, le coefficient de performance de l'orientation des fibres η_0 est déterminé à partir des caractéristiques à l'échelle de la mèche (torsion, titre) mais également des caractéristiques à l'échelle des fibres (équation (3.10a)). D'une part avec le packing factor ϕ (équation (3.10b)) qui est un coefficient de compaction qui représente la compaction des fibres au sein de la mèche, et par ailleurs la densité des fibres de lin ρ .

$$\eta_0 = \cos \left(2 \cdot \arctan \left(10^{-3} \cdot T \sqrt{4\pi \frac{l}{\rho\phi}} \right) \right) \quad (3.10a)$$

$$\phi = 0,7 \left(1 - 0,78e^{-0,195T} \right) \quad (3.10b)$$

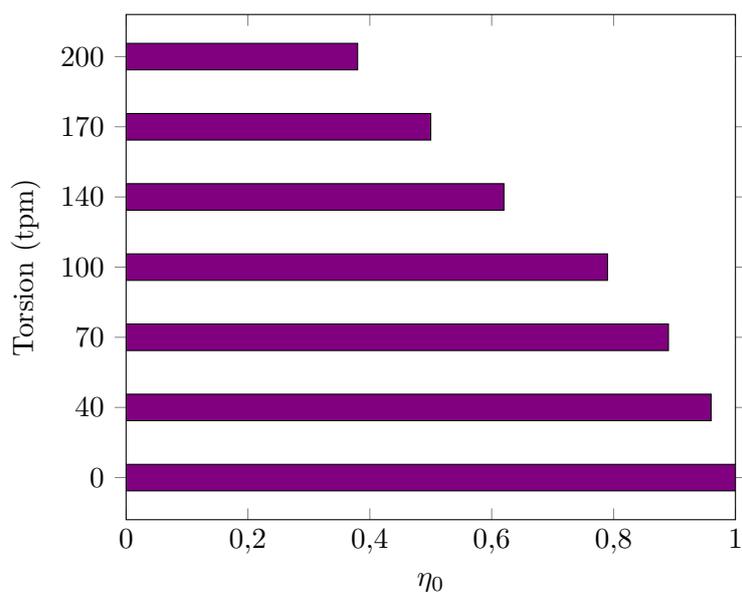


Figure 3.22 – Coefficient de performance de l’orientation des fibres η_0

Avec cette formule, les valeurs du coefficient de performance de l’orientation des fibres pour les sept niveaux de torsion considérés, sont données en figure 3.22. On constate, en comparaison avec la figure 3.20, qu’hormis pour les mèches non retordues, que ce coefficient a des valeurs plus élevées que celles calculées à partir du taux de torsion et du rayon de la mèche (équation (3.9)).

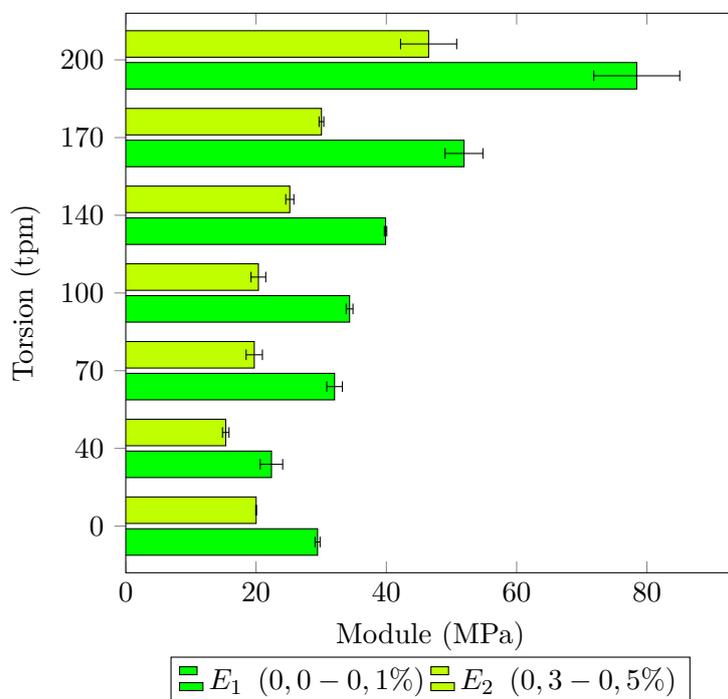


Figure 3.23 – Modules des fibres obtenus via le modèle de MADSEN incluant un coefficient de torsion basé sur les caractéristiques des fibres

Avec ce modèle, les modules E_1 et E_2 des fibres sont reportés sur la figure 3.23 pour les sept

éprouvettes. Comparativement à la loi de Madsen, incluant un coefficient de torsion basé sur les caractéristiques de la mèche, le modèle incluant le packing factor des fibres donne des valeurs de modules plus importantes pour l'ensemble des torsions, notamment à partir de 140 tpm. Au-delà de 170 tpm, les modules des fibres, E_1 , dépassent les 50 GPa.

Analyse théorique des quatre modèles

Les quatre modèles préalablement présentés donnent des résultats différents. Afin de mieux comprendre les résultats expérimentaux, une analyse théorique des quatre modèles est proposée.

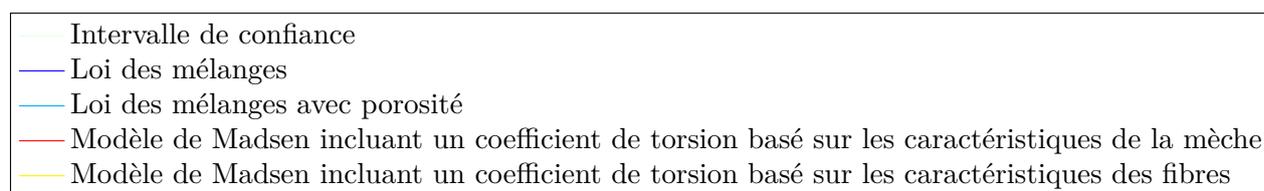
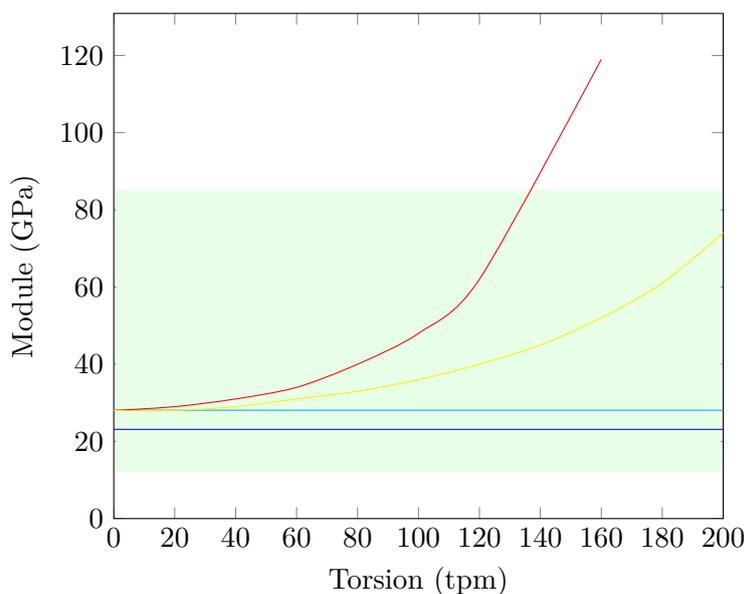


Figure 3.24 – Comparaison des quatre modèles en fonction de la torsion

La figure 3.24 donne l'évolution analytique du module E_1 des fibres, calculé respectivement par les quatre modèles précédemment utilisés, en fonction du niveau de torsion. Pour établir cette comparaison, les paramètres suivants ont été considérés comme constants. Le taux volumique de fibres a été choisi à 50 % et le taux de porosité à 2 %. Le rayon des mèches de 500 tex et le module E_1 ont été choisis à 0,586 mm et à 13 GPa quels que soient le niveau de torsion. La densité du lin est conservée à 1,54 g/cm³. La loi des mélanges (équation (3.6)) et la loi des mélanges modifiée (équation (3.7)) ne prennent pas en compte la torsion du renfort. En prenant en compte la porosité, un gain de 4,95 GPa est relevé entre ces deux modèles. La zone en vert correspond à l'intervalle de confiance des résultats, et est issue de la bibliographie [28], sans prise en compte de la torsion. Les valeurs obtenues par le modèle de MADSEN [44, 102] avec un coefficient de

torsion basé sur les caractéristiques de la mèche divergent, de cet intervalle de confiance, dès 140 tpm, tandis que les valeurs obtenues via le coefficient de torsion basé sur les caractéristiques des fibres restent dans l'intervalle de confiance. En l'absence de porosité ($V_f = V_m = 50\%$), les deux modèles de MADSEN donnent des valeurs de module E_1 légèrement plus faibles (avec une diminution de l'ordre de 1,2 GPa).

Un des paramètres déterminant du second modèle de MADSEN (incluant un coefficient de torsion basé sur les caractéristiques des fibres) est le packing factor. Ce paramètre [44, 174] est défini à partir du niveau de torsion de la mèche. Le comportement exponentiel et asymptotique de l'équation (3.10a) limite les valeurs du packing factor. Pour tous les niveaux de torsion supérieurs à 40 tpm, le packing factor est figé à 0,7. L'utilisation du packing factor avec des valeurs supérieures permettrait de réduire les valeurs de module E_1 des fibres.

Conclusion

L'Impregnated Fibre Bundle Test (IFBT) est un test qui permet de caractériser une grande quantité de fibres issues de mèches (avec ou sans torsion) [39]. Mais contrairement aux tests sur fibres unitaires, les caractéristiques géométriques (longueur, diamètre) des fibres n'ont pas pu être déterminées.

Cette étude couplant les tests IFBT et les différents modèles de la loi des mélanges a permis de conduire une analyse sur l'influence de la torsion sur les propriétés (en modules) à l'échelle des fibres. Les quatre modèles analysés ont permis de montrer la nécessité de prendre en compte la porosité pour des matériaux composites renforcés de fibres naturelles. Les propriétés des fibres, déduites des éprouvettes composites, dépendent très fortement du procédé de mise en œuvre de la résine (notamment en termes de porosité)

Peu d'études expérimentales [44], ont montré expérimentalement les limites de la loi des mélanges classiques pour des niveaux de torsion assez larges. Les deux modèles modifiés, qui considèrent cette torsion à deux échelles différentes (mèches et fibres) donnent des modules de fibres supérieurs à ceux trouvés dans la littérature [28], pour les hauts niveaux de torsion, alors que les valeurs identifiées restent dans les gammes de celles données dans la littérature pour les plus bas niveaux de torsion.

3.3 Étude des matériaux composites renforcés par des structures 3D interlock chaîne en lin

Dans le cadre de l'analyse multi-échelle, plusieurs structures tissées au cours des différentes campagnes de tissage (et décrites au chapitre 2) ont été utilisées en tant que renforts pour élaborer des matériaux composites. Et ce afin de comparer les propriétés des structures 3D interlock chaînes identifiées à l'échelle du renfort (dans le chapitre 2), avant imprégnation, et à celle des matériaux composites.

Les matériaux composites ont été mis en œuvre sous forme de plaques par le partenaire CMP Composites, dans le cadre du projet **FLAX3D**. Les renforts employés sont ceux issus de la troisième campagne de tissage (cf. figure 2.30).

3.3.1 Réalisation des éprouvettes

Nom	Épaisseur (mm)	Masse surfacique (kg/m ²)
OL 5 3-3 Sergé 4, effet mâchoire	7,6 ± 0,46	1,924 ± 0,12
OL 5 3-3 Sergé 4, effet trame	8,0 ± 0,54	1,936 ± 0,06
OL 5 3-4 Sergé 4, effet mâchoire	7,8 ± 0,76	1,850 ± 0,05
OL 5 3-4 Sergé 4, effet trame	6,53 ± 0,33	1,892 ± 0,08
OT 5 3-5 Sergé 4, effet mâchoire	7,45 ± 0,21	1,858 ± 0,06
OT 5 3-5 Sergé 4, effet trame	6,62 ± 0,44	1,895 ± 0,05

Table 3.1 – Propriétés textiles des renforts secs

Les six premières structures tissées lors de la troisième campagne de tissage (figure 2.30) ont été retenues pour réaliser des plaques composites. Les architectures à effet trame sont celles présentées en section §2.4. Les propriétés textiles de ces six tissus 3D interlock chaîne sont donnés en tableau 3.1. Un pli de chaque tissu (orienté à 0°) a permis de réaliser une plaque d'environ 30 × 50 cm². La résine ELIUM 180 a été choisie par le consortium du projet **FLAX3D** pour son origine biosourcée, sa facilité de mise en œuvre et ses propriétés mécaniques. La résine ELIUM a un module de 3,3 GPa, et une contrainte à rupture de 76 MPa pour une densité de 1,19 [175]. Les tissus sont préalablement étuvés à 60°C pendant 72 h, avant tirage à vide et infusion. Les tissus sont ensuite mis sous vide (−995 mbar) durant 48 h. L'infusion est effectuée à 25°C et dure une quarantaine de minutes. La figure 3.25 illustre l'infusion de la structure OL 5 3-4 Sergé 4. Le taux volumique de fibre visé est de 30 %.

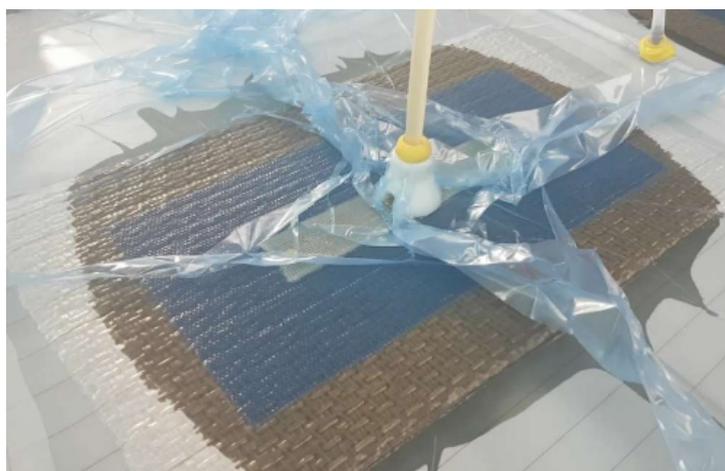


Figure 3.25 – Infusion de la structure OL 5 3-4 Sergé 4 par la résine ELIUM 180

Après polymérisation de la résine, les éprouvettes sont découpées par jet d'eau, puis inspec-

tées visuellement avant caractérisation. La face en contact avec le marbre est parfaitement lisse, tandis que l'autre face est parsemée de microscopiques creux et bosses (cf. figure 3.27). Dans l'épaisseur, les fils de chaîne de renfort ont l'air d'avoir conservé leur alignement, contrairement aux colonnes de fils de trame, qui se sont un peu écrasées.

Les essais de caractérisation mécaniques (traction, flexion trois points et impact charpy) ont été conduits sur ces plaques.

3.3.2 Méthodes de caractérisation

3.3.2.1 Fractions volumiques

L'épaisseur des éprouvettes a été mesurée à l'aide d'un profilomètre. Un profilomètre permet initialement de mesurer les différences d'épaisseur d'une surface irrégulière. Ici utilisée à côté d'un étalon d'épaisseur connue, la mesure permet de connaître l'épaisseur (et les irrégularités de surface) des plaques composites. Les épaisseurs sont mesurées en 4 000 points sur une surface de $50 \times 20 \text{ mm}^2$.

Les fractions volumiques de fibres et de résine sont déterminés à partir des masses du matériau composite, du renfort et des dimensions du matériau composite et du renfort via l'équation 3.4. La masse du renfort est déterminée à partir des dimensions du matériau final et de la masse surfacique du renfort. La fraction volumique de porosité est déduite de la masse réelle du composite, via l'équation 3.5.

① Une plaque ayant été réalisée à partir de chaque tissu 3D interlock chaîne, les fractions volumiques correspondent également à celle des éprouvettes de traction, de flexion et d'impact charpy.

3.3.2.2 Essai de traction

Les essais de traction à l'échelle composite sont effectués selon la norme NF ISO 527-4, sur un banc de traction INSTRON 5980. Les dimensions des éprouvettes sont de $250 \times 25 \text{ mm}^2$. L'entre-mors est de 150 mm. Les essais sont effectués en sens chaîne et en sens trame à la vitesse de 2 mm/min. Les paramètres extraits de la courbe de traction sont, comme pour les éprouvettes d'IFBT, les modules E_1 et E_2 (défini respectivement entre 0 et 0,1 et entre 0,3 et 0,5 % de déformation), la contrainte et la déformation à rupture.

3.3.2.3 Essai de flexion trois points

A l'échelle composite, les essais de flexion trois points, sont effectués selon la norme NF ISO 14125, sur un banc INSTRON 5980. La taille des éprouvettes pour ces essais est de $80 \times 15 \text{ mm}^2$. La distance entre les points de flexion est de 64 mm (portée). La vitesse d'essai est de 1 mm/min. A partir des forces et du déplacement de la traverse, les contraintes en flexion sont déterminées via l'équation (3.11).

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (3.11)$$

où F est la force à rupture, L la portée, b la largeur de l'éprouvette et h l'épaisseur de l'éprouvette. Le module en flexion est ensuite déterminé entre 0,0005 et 0,0025 % de déformation, à partir de la différence des forces $\Delta F = F_{0,0025\%} - F_{0,0005\%}$ et des flèches $\Delta s = s_{0,0025\%} - s_{0,0005\%}$ en ces mêmes valeurs de déformation selon l'équation (3.12)

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3} \left(\frac{\Delta F}{\Delta s} \right) \quad (3.12)$$

Finalement la déformation de la face extérieure de l'éprouvette est calculée à partir de l'équation (3.13).

$$\epsilon = \frac{6 \cdot s \cdot h}{L^2} \quad (3.13)$$

3.3.2.4 Essai d'impact Charpy



Figure 3.26 – Système à choc pendulaire Instron CEAST 9050

Les essais d'impact sont effectués selon la NF ISO 179-1/1eU sur un système à choc pendulaire Instron CEAST 9050, illustré en figure 3.26. Les éprouvettes, non entaillées, mesurent $80 \times 10 \text{ mm}^2$ et sont soumises à un « choc normal (*impact avec direction de la percussion perpendiculaire au plan de renforcement*). » La distance entre les appuis est de 62 mm. L'énergie du pendule à l'impact est de 25 J. L'énergie nécessaire à la rupture est déterminée via l'angle atteint par le marteau après avoir impacté l'éprouvette selon l'équation (3.14). Cinq éprouvettes sont testées dans chaque direction (chaîne et trame). L'énergie par unité de surface (exprimée en $\text{J} \cdot \text{m}^2$) est ensuite calculée, ainsi que l'écart-type associé.

$$E = mgL(1 - \cos(\alpha_0)) \quad (3.14)$$

où L est la longueur du marteau, g l'accélération de pesanteur et α_0 , l'angle atteint par le marteau après impact.

3.3.3 Influence de l'armure de renfort sur les caractéristiques composites

3.3.3.1 Épaisseur et masse surfacique

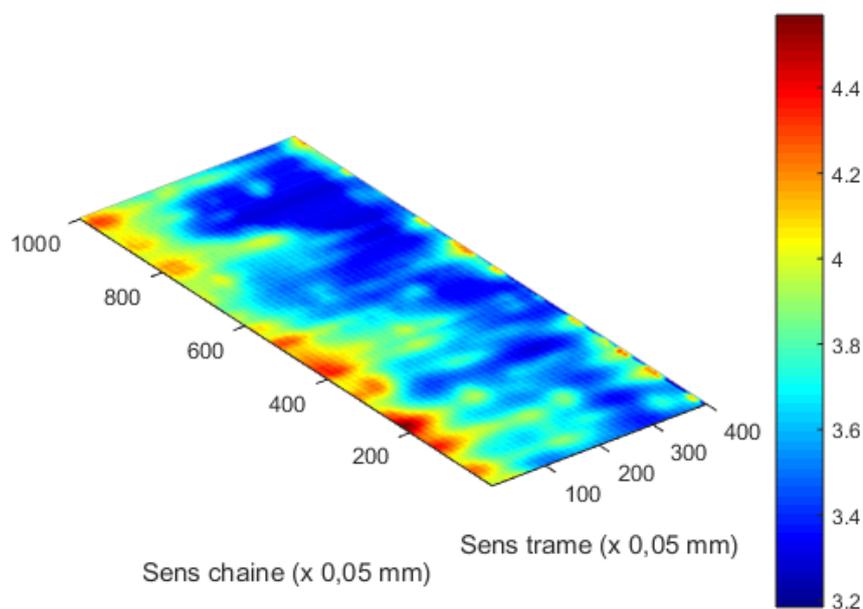


Figure 3.27 – Épaisseur (en mm) sur la structure composite OT 5 3-5 Sergé 4

La figure 3.27 illustre les épaisseurs mesurées au profilomètre sur la plaque composite renforcée de la structure OT 5 3-5 Sergé 4.

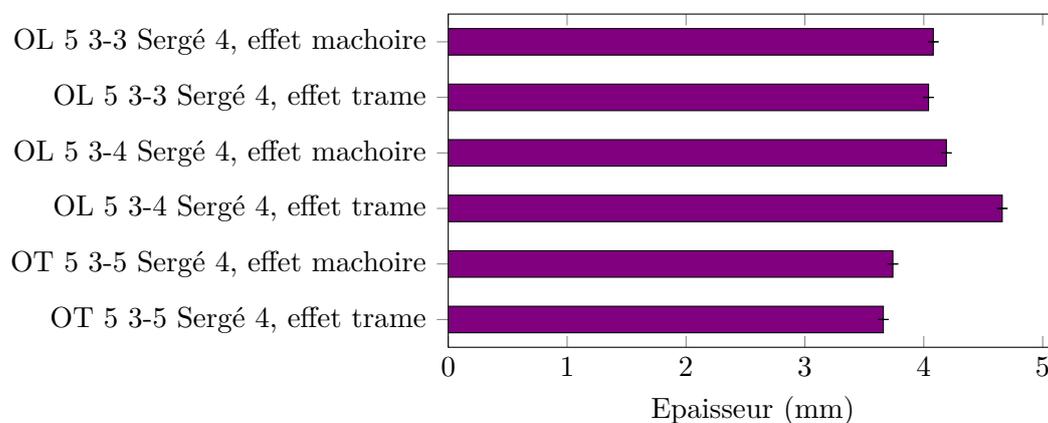


Figure 3.28 – Épaisseur des six plaques composites

La figure 3.28 donne l'épaisseur mesurée des six structures tissées imprégnées par la résine ELIUM 180. Les épaisseurs des préformes sèches ont été rappelées en début de section, tableau 3.1. L'épaisseur des tissus secs est plus importante que celle des matériaux composites associés. Le tirage à vide, avant et pendant l'infusion, compacte la structure tissée qui diminue en épaisseur.

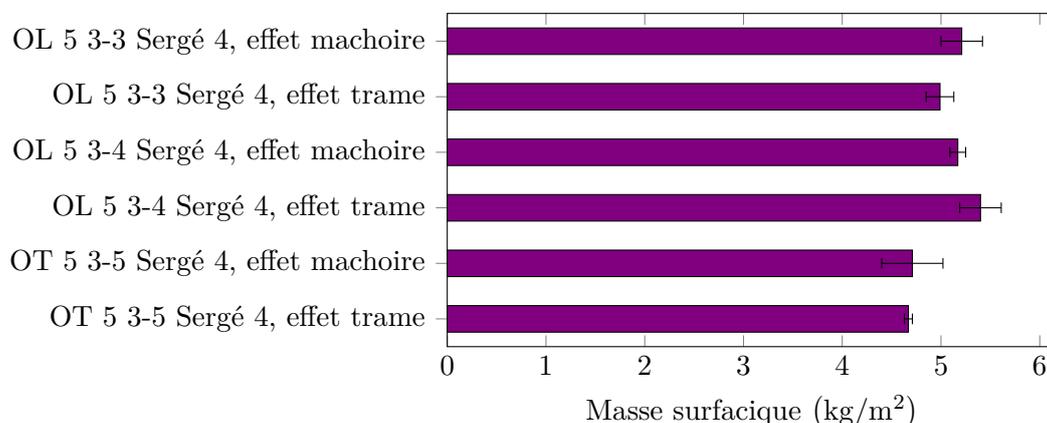


Figure 3.29 – Masse surfacique des six plaques composites

La figure 3.29 illustre les masses surfaciques des six structures après infusion par la résine. La masse surfacique des matériaux composites est plus importante que celle des tissus qui les composent, par l'ajout de la résine soit un gain de plus de 75 % en termes de masse (dans le cas présent environ 3,1 kg/m²).

3.3.3.2 Fractions volumiques

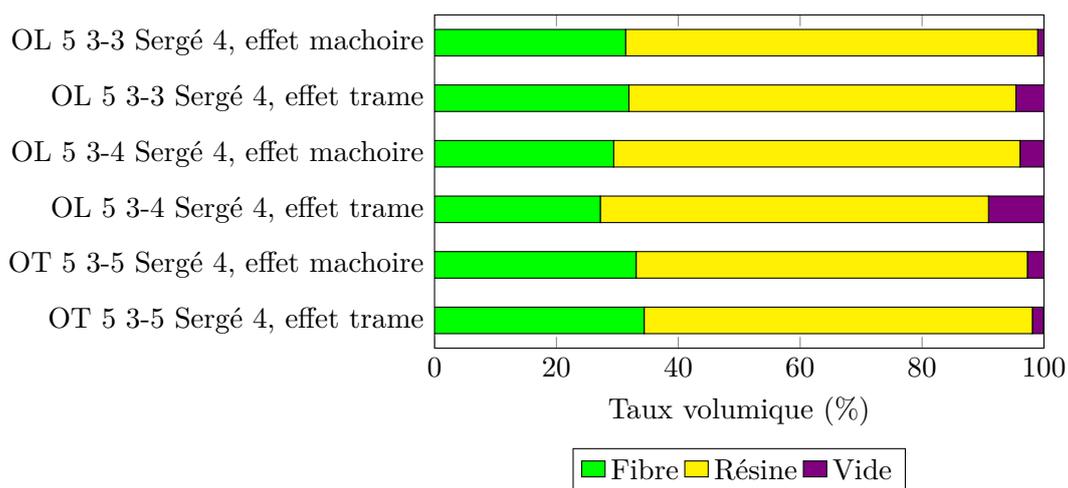


Figure 3.30 – Taux volumiques des six plaques composites

La figure 3.30 donne les fractions volumiques des six structures imprégnées. Les plus faibles fractions volumiques de fibres correspondent aux plaques imprégnées avec la structure OL 5 3-4 Sergé 4. Les fractions volumiques de fibres sont plutôt faibles (de l'ordre de 30 %) pour des

matériaux composites renforcés de fibres naturelles, mais sont cohérentes avec celles obtenues dans la littérature pour des matériaux composites renforcés d'une structure 3D interlock chaîne [176]. Les taux volumiques de porosités sont dans la gamme attendue (entre 2 et 5).

3.3.3.3 Comportement en traction

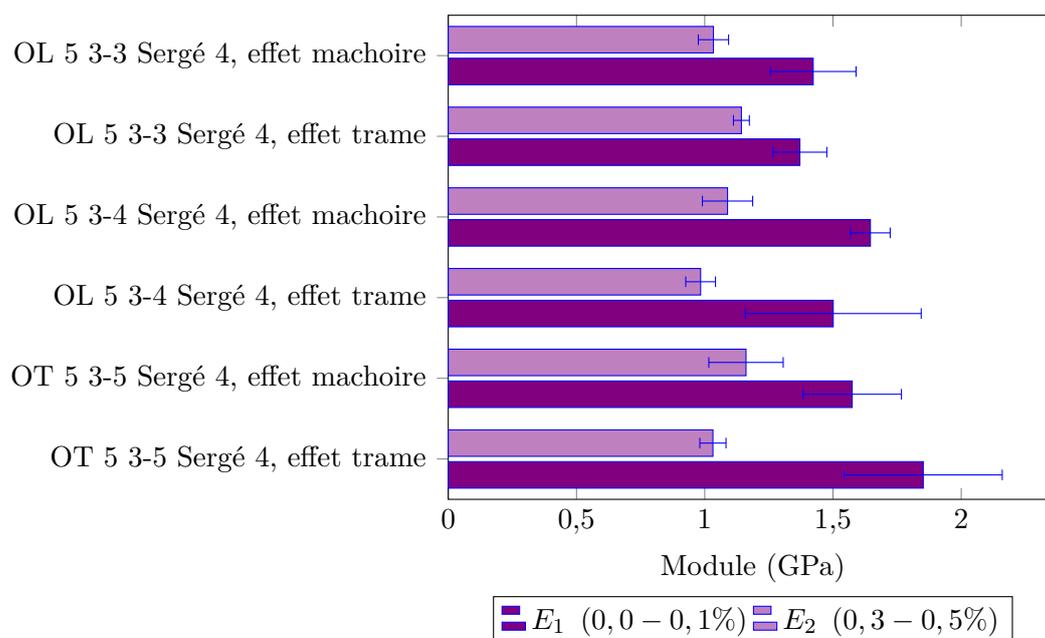


Figure 3.31 – Module en traction des six plaques composites en sens chaîne

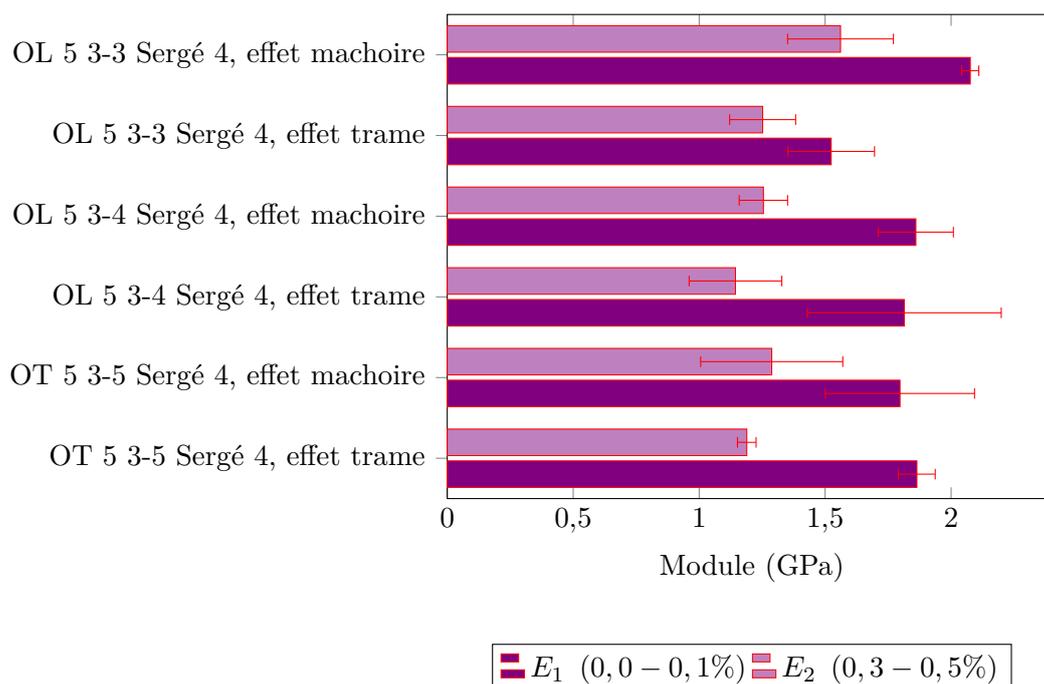


Figure 3.32 – Module en traction des six plaques composites en sens trame

Les figures 3.31 et 3.32 donnent les modules E_1 et E_2 en traction, des six structures étudiées en sens chaîne et en sens trame. Les modules, comme les contraintes, peuvent être comparées directement car les six tissus de renfort ont tous les mêmes densités chaîne (6 fils/cm) et trame (10 fils/cm). L'adoucissement du comportement ($E_1 > E_2$) est à nouveau constaté. Les modules en sens chaîne sont légèrement inférieurs à ceux mesurés en sens trame. En sens chaîne, les modules ont légèrement tendance à augmenter avec la profondeur de liage. L'effet de liage (trame ou mâchoire) influence moins les résultats que la profondeur de liage, en restant dans les écarts-types.

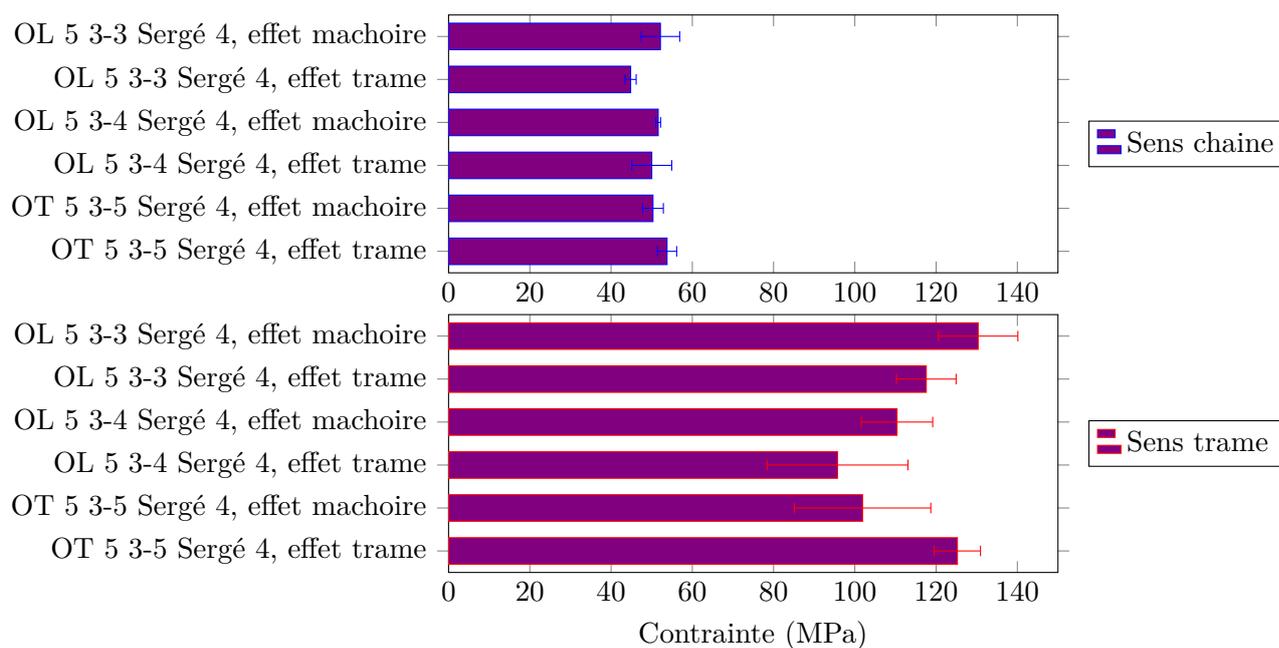


Figure 3.33 – Contrainte à rupture en traction des six plaques composites

La figure 3.33 donne les contraintes à rupture des six structures étudiées. Les contraintes à rupture en sens chaîne sont toujours inférieures à celles en sens trame, comme constaté sur les forces à rupture en traction, sur les tissus secs étudiées dans le chapitre précédent (figure 2.35). Ce comportement est lié à au niveau de densification de la structure de renfort, supérieur en sens trame. La contrainte à rupture des tissus résinés diminue avec la profondeur de liage. Les deux plaques ayant le plus faible taux de porosité exhibent les valeurs de contraintes à rupture les plus élevées.

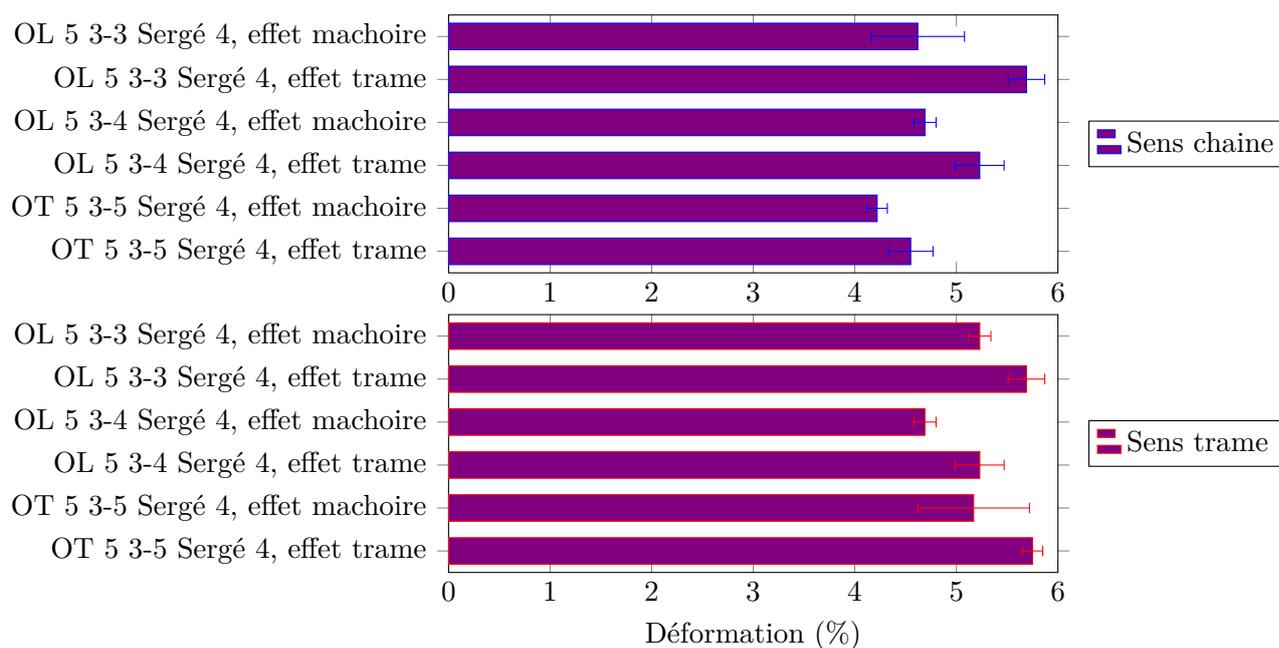


Figure 3.34 – Déformation à rupture en traction des six plaques composites

Les déformations à rupture des six plaques composites sont données en figure 3.34. Dans les deux directions, l'effet mâchoire a tendance à diminuer la déformation à rupture. Tel était déjà le cas, en traction sèche (cf. figure 2.45). En sens chaîne, la profondeur de liage implique une diminution des déformations à rupture.

3.3.3.4 Comportement en flexion trois points

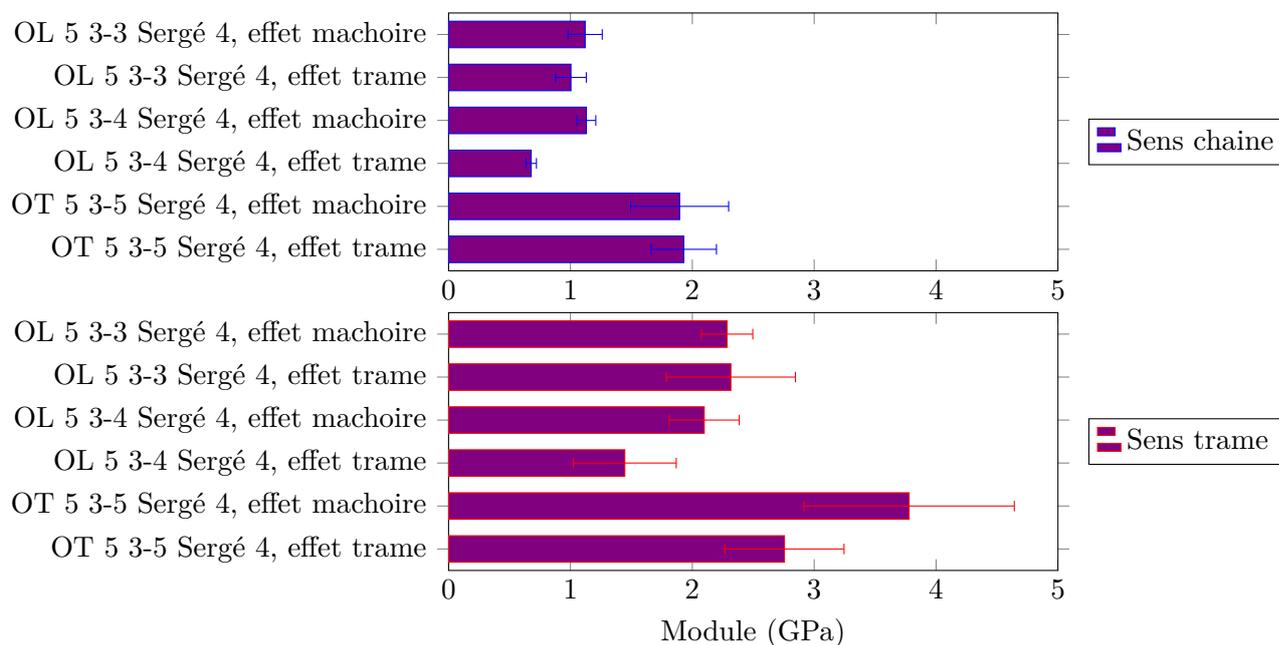


Figure 3.35 – Module d'élasticité en flexion des six plaques composites

Les éprouvettes de flexion rompent principalement en traction de la couche la plus externe (couche la plus éloignée du point d'application de la force). La figure 3.35 donne les modules en flexion des six plaques composites. Les modules en sens trame sont toujours supérieurs à ceux obtenus en sens chaîne. Ces résultats sont cohérents avec les densités des renforts (densité chaîne de 6 fils/cm et densité trame de 10 fils/cm).

Les structures liées au travers de l'épaisseur ($X_2 = T$) présentent un module en flexion supérieur aux structures liées couche à couche ($X_2 = L$). En liant l'ensemble des couches, les fils de chaîne de liage rigidifient à la fois la structure 3D interlock chaîne (cf. figures 2.12 et 2.34) et les matériaux composites associés. L'effet mâchoire améliore légèrement les résultats en symétrisant les structures au travers de l'épaisseur.

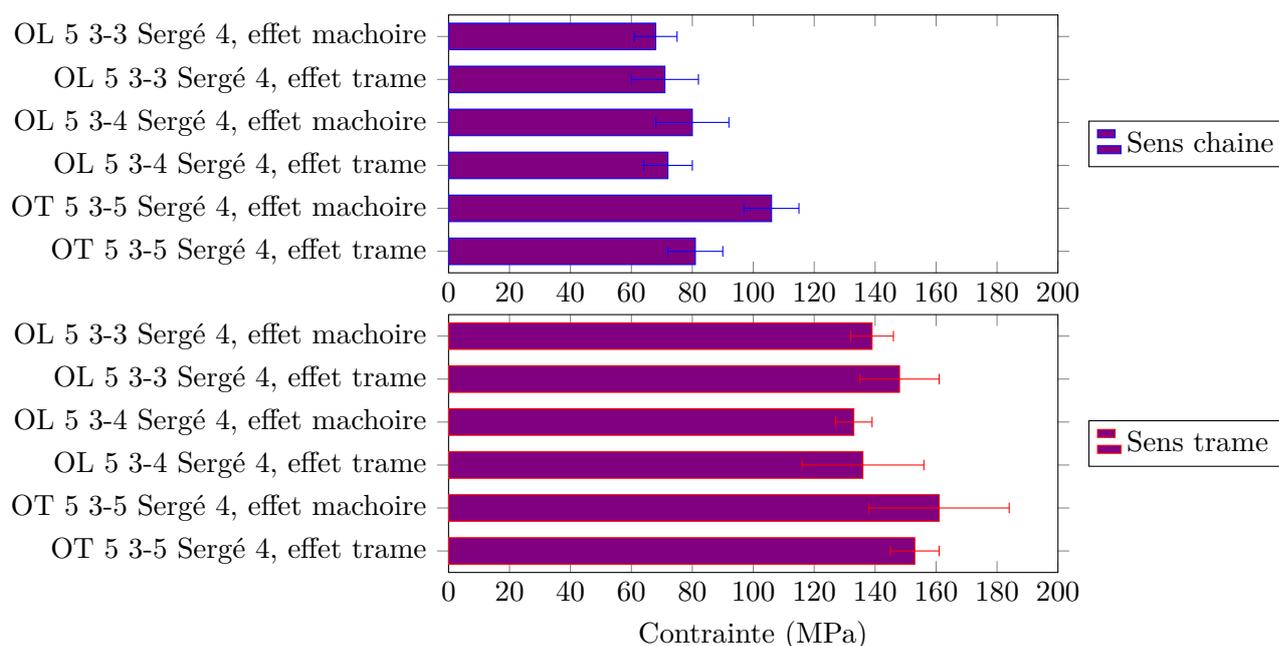


Figure 3.36 – Contrainte à rupture en flexion des six plaques composites

La figure 3.36 donne les contraintes à rupture en flexion des six plaques composites. Comme pour les modules, les contraintes à rupture en sens trame sont supérieures aux contraintes à rupture en sens chaîne. Relativement aux écarts-types, il n'est pas possible de tirer de conclusions concernant l'influence de la profondeur de liage ou de l'effet.

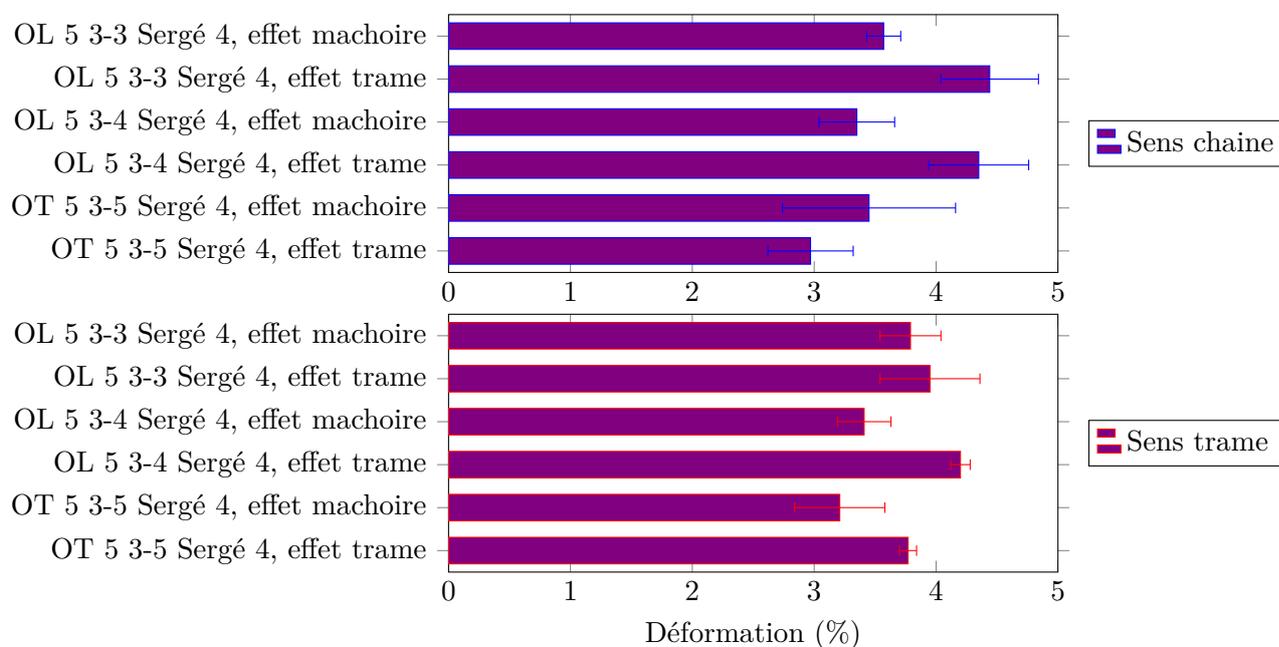


Figure 3.37 – Déformation à rupture en flexion des six plaques composites

La figure 3.37 donne les valeurs de déformations (de la face extérieure) à rupture des six

plaques composites. Les déformations à rupture, sont à peu près identiques dans les deux orientations de sollicitation (chaîne et trame). A l'exception de la structure OT en sens chaîne, la déformation à rupture est plus faible avec un effet mâchoire qu'avec un effet trame. L'effet mâchoire, en emprisonnant les fils de trame, diminue la déformation à rupture ; ce qui implique une diminution de la déformation de la face extérieure.

3.3.3.5 Comportement à l'impact Charpy

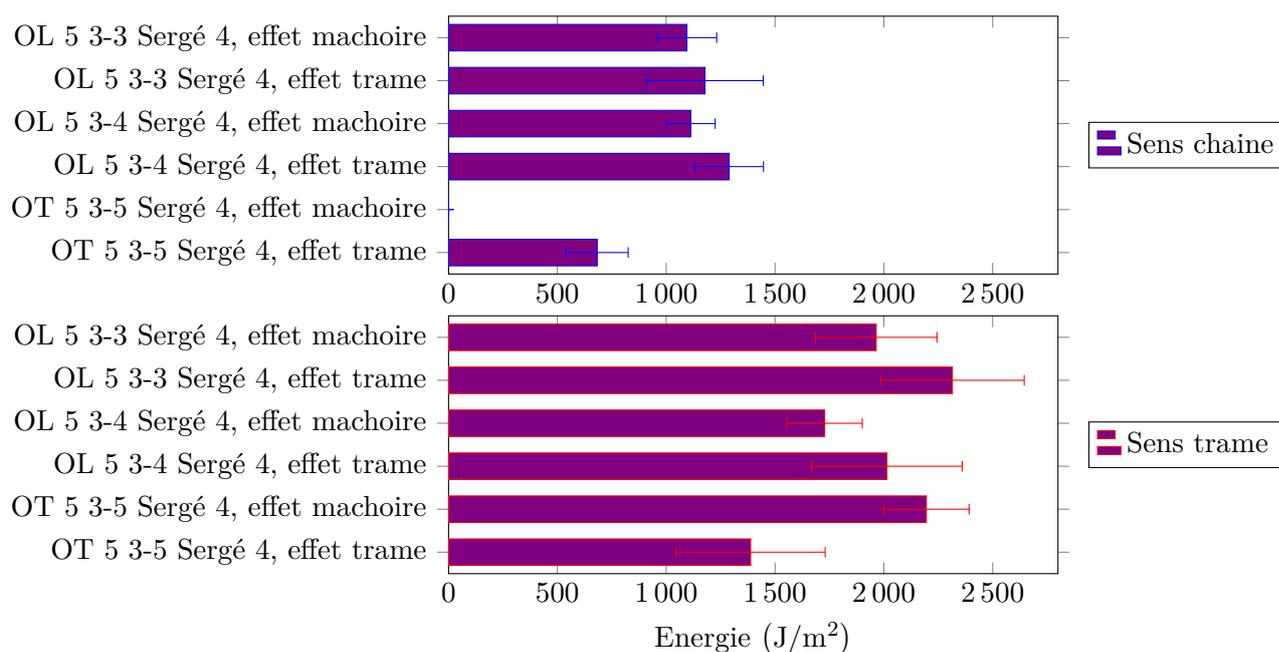


Figure 3.38 – Énergie à rupture des six plaques composites à l'impact

La figure 3.38 donne les énergies à rupture des six plaques composites, en sens chaîne puis en sens trame. Les essais n'ont pas pu être effectués sur la structure OT 5 3-5 Sergé 4, effet mâchoire, en sens chaîne, en raison du manque de disponibilité de matières. Les énergies à rupture en sens trame sont toujours supérieures à celles obtenues en sens chaîne. Ces résultats sont cohérents avec les densités de la structure de renfort. A nouveau, les écarts-types obtenus ne permettent pas de conclure quant à l'influence de la profondeur de liage et de l'effet sur les énergies à rupture du renfort à l'échelle composite. On peut cependant souligner que les architectures à effet trame montrent une diminution de l'énergie absorbée par le composite qui est inversement proportionnelle à l'augmentation de la profondeur de liage dans la structure tissée ;

Conclusion

Les tissus 3D interlock chaîne en lin sont adaptés à la réalisation de matériaux composites biosourcés. Après infusion sous vide, le taux volumique de fibre atteint est d'environ 30%. Malgré une épaisseur inférieure, la masse surfacique a considérablement augmenté au cours de

la réalisation du matériau composite. Les modules en sens chaîne comme en sens trame sont équivalents. La profondeur de liage influe sur les modules et contraintes à ruptures. Le taux volumique de porosité relevé sur la structure OT 5 3-4 Sergé 4 conduit à une plus forte diminution des propriétés mécaniques. De même les contraintes à rupture en sens chaîne sont largement inférieures à celles en sens trame. Comme pour les tissus secs, la densité influe considérablement sur les propriétés à rupture.

Composite Lin/PLA obtenue par thermocompression

L'objectif de cette étude prospective a été de tisser des structures 3D interlock chaîne hybrides lin/PLA puis de les thermocompresser pour obtenir des matériaux composites. Le PLA (ou acide polylactique) est un polymère thermoplastique issue de la transformation de l'amidon du maïs (cf. section 1.2.1.2) [61].



Figure 3.39 – Filage du PLA

Filage du PLA Le PLA employé est l'INGEO BIOPOLYMER 6202D de NATUREWORKS. Le PLA a été filé au sein du laboratoire de filage du GEMTEX. Pour ce faire, le PLA est chauffé progressivement depuis la température ambiante jusqu'à 210°C, au travers d'une extrudeuse bi-vis. Le polymère fondu passe alors au travers d'une filière (figure 3.39g), pour sortir à l'air libre sous forme de multi-filaments. Le filament est ensuite (ré)chauffé au delà de sa température de transition vitreuse pour subir un étirage à chaud (grâce à deux rouleaux successifs ne tournant pas à la même vitesse). Le multi-filament est ensuite bobiné (figure 3.39d). Après étirage, le titre du multifilament réalisé est de 310 tex.

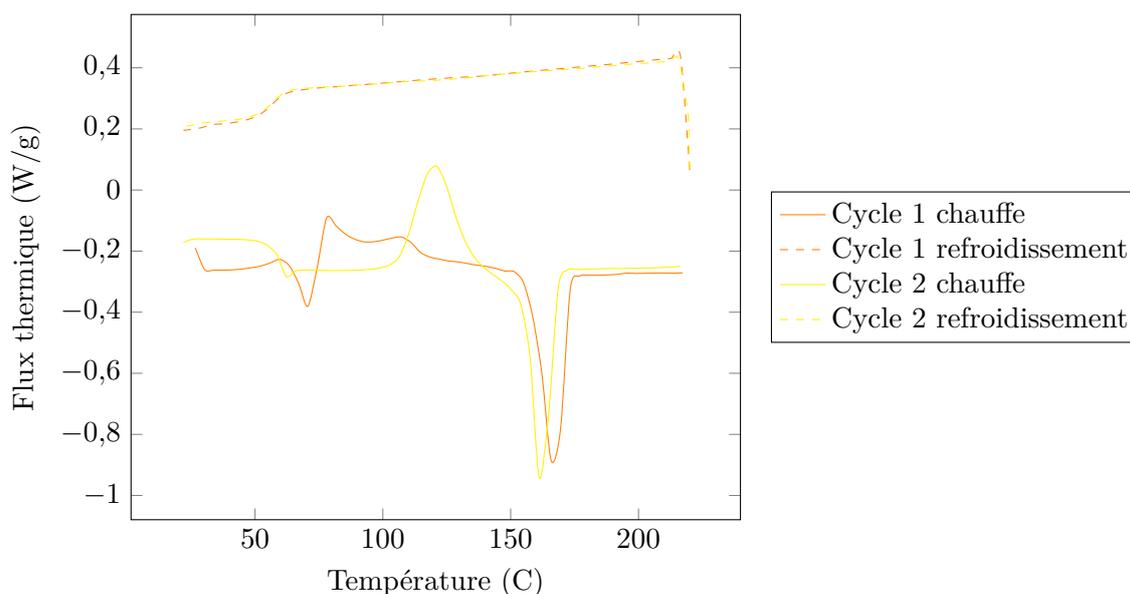


Figure 3.40 – Analyse calorimétrique différentielle à balayage du PLA

Analyses thermiques La figure 3.40 donne les courbes de chauffe et de refroidissement du PLA (après filage) issues d'un test de calorimétrie différentielle à balayage (DSC). Lors de la première chauffe, un pic de cristallisation froide est relevé, traduisant que le PLA n'a pas eu le temps de cristalliser totalement au cours du filage. Le gain de température au cours de l'essai de DSC lui apporte l'énergie nécessaire pour finir sa cristallisation. Aux alentours de 170°C le pic endothermique traduit la fusion du PLA. Au cours de la seconde montée en température, le pic de cristallisation froide se décale légèrement sur la gauche traduisant un taux de cristallinité différent acquis au cours du premier refroidissement. La température de fusion du polymère au cours de la deuxième chauffe est légèrement plus faible.

En complément de l'essai de DSC, l'analyse thermogravimétrique donne la température de dégradation du PLA à 316°C. L'analyse effectuée en ce début de chapitre de la mèche (cf. section 3.1.2), donne de même la température de dégradation de la mèche de lin à 210°C. La gamme de température de mise en œuvre de notre structure hybride sous presse est de 170 (température de fusion du PLA) à 200°C.

Réalisation d'une mèche hybride Lin-PLA Trois multifilaments de PLA ont été retordus avec une mèche de lin de 500 tex (Lincore R500 2019) sur une retordeuse à anneaux TWISTEC 3 (cf. figure 3.2). La torsion de consigne appliquée est de 40 tpm. Le titre théorique de la mèche hybride lin/PLA obtenu est de 1 430 tex. Les proportions en masse de la mèche hybride, après torsion, sont de 65 % de PLA pour 35 % de lin. Les proportions de lin et de PLA sont en adéquation avec celle des tissus imprégnés par le partenaire du projet FLAX3D (cf. section précédente) pour la réalisation de matériaux composites renforcés d'une structure 3D interlock chaîne en lin.

Le titrage réel de la mèche hybride est de $1\,419 \pm 54$ tex ; pour une torsion de $35,0 \pm 0,8$ tpm.

L'ajout de PLA influe sur la ténacité, passant de $19,6 \pm 2,4$ (pour la mèche de lin seule) à $12,0 \pm 1,3$ cN/tex (pour l'assemblage lin-PLA); valeur de ténacité néanmoins suffisante pour tisser la mèche hybride (cf. tableau 2.1, [115]).

Le choix des structures 3D interlock chaîne à tisser à partir de cette mèche hybride s'effectuera au regard des analyses apportées dans ce manuscrit, et notamment celles du chapitre 2.

- ① L'utilisation de structures 3D interlock chaîne en tant que renfort de matériaux composites est intéressante par le fait que les fils de chaîne de renfort et les fils de trame sont droits et très peu ondulés. Le passage sous presse de ces structures peut conduire à une déformation de la structure dans l'épaisseur, impliquant une perte d'alignement de ces deux nappes de fils, et réduisant en conséquence les propriétés finales du matériau composite.

Optimisation des procédés pour la réalisation de matériaux composites en lin

Cette section est l'occasion de résumer les connaissances acquises pendant la mise en œuvre et la caractérisation des mèches (et fibres via l'IFBT) et des matériaux composites.

Choix de la matière entrante Le choix de la matière entrante est primordial. Les propriétés de la fibre influent sur les propriétés de la mèche et par conséquent sur celles de la structure 3D interlock chaîne et du matériau composite. Pour être tissés, les fils doivent présenter une ténacité suffisante. La pilosité et la régularité doivent être également contrôlées et ajustées si besoin par ajout de torsion. La figure 3.41 donne un aperçu de la pilosité de la mèche de lin utilisée au cours de la campagne de tissage #3, malgré l'application d'une torsion de 40 tpm.



Figure 3.41 – Pilosité de l'ensouple avant d'entrer dans la machine à tisser

La torsion permet de réduire la pilosité et d'améliorer la régularité de la mèche. Au cours du

tissage, la mèche doit résister à de nombreuses sollicitations mécaniques. Au cours de l'ourdissage et du tissage, les fils composant les nappes de fils de chaîne sont fortement tendus. Le tassage du fil de trame par le peigne provoque des à-coups à répétition. Le choix d'une matière non retordue peut s'avérer judicieux tant que les propriétés dimensionnelles et mécaniques peuvent être ajustées par ajout de torsion. La torsion permet également d'affiner les dimensions de la mèche si besoin pour permettre son passage dans les éléments de la machine à tisser.

Mise en œuvre des matériaux composites La mise en œuvre d'un matériau composite renforcé d'une structure tissée 3D interlock chaîne dépend de nombreux paramètres dont le type de la matrice. Les polymères thermodurcissables peuvent être mis en œuvre à température ambiante ; les polymères thermoplastiques nécessitent une augmentation de la température pour atteindre la température de transition vitreuse, voir la température de fusion lorsque la nature du renfort le permet. L'ajout de couches à une structure tissée 3D interlock chaîne permet de densifier la structure, et par conséquent d'accroître le taux volumique de fibre du matériau composite. Le choix de la matrice dépend de l'application du matériau composite. De plus en plus de résines biosourcées font leur apparition sur leur marché.

Conclusion

Les propriétés métrologiques et mécaniques des mèches à différentes valeurs de taux de torsion ont été déterminées. Le titre et la déformation à rupture augmentent avec la torsion. L'irrégularité, la pilosité et le coefficient de diffusion en eau diminuent avec la torsion. La force à rupture dépend de deux phénomènes : l'orientation des fibres qui a tendance à réduire les performances des mèches avec la torsion et la friction inter-fibres qui a tendance à augmenter les performances de la mèche. Le choix d'un niveau de torsion dépend de l'application visée. Pour la réalisation d'un tissu 3D interlock chaîne, la ténacité maximale est à privilégier, mais pour des applications composites, si la résine se diffuse comme l'eau, un haut niveau de torsion n'est pas à privilégier. Les études seront prochainement étendues à deux mèches de titrages différents : 320 et 2 400 tex. L'objectif est de déterminer la valeur de torsion optimale en fonction du titrage. Des essais cycliques sur mèches seront prochainement réalisés pour simuler les effets à répétition du tissage et pour déterminer la vitesse de tissage à sélectionner pour minimiser la dégradation des mèches au cours de ce procédé.

Les propriétés des fibres ont été identifiées à partir des propriétés des mèches imprégnées et d'un modèle. Les quatre modèles présentent des similitudes pour de faibles niveaux de torsion. La loi des mélanges avec porosité et les deux modèles de MADSEN ont permis d'évaluer le module des fibres de lin issues de la mèche Lincore R500 2017 à $29,44 \pm 0,39$ GPa.

A l'échelle composite, les modules en traction des six structures considérées sont relativement similaires. Les contraintes à rupture dépendent principalement de la densité : le sens trame étant plus dense que le sens chaîne, les contraintes à rupture sont supérieures pour un module

équivalent. Les tissus 3D interlock chaîne peuvent servir à maintenir des fils (de trame) parallèles avec une haute densité. Et ainsi permettre d'obtenir des matériaux hautes performances (particulièrement en sens trame) grâce à la haute densité trame. D'autres tissus 3D interlock chaîne seront prochainement résinés afin de poursuivre l'étude initiée en section 3.3.3, notamment les architectures de la deuxième campagne de tissage (influence du nombre de couches). Des essais d'absorption en eau à l'échelle composite seront prochainement menés et son influence sur les propriétés mécaniques sera étudiée.

Chapitre 4

Investigation statistique pour l'utilisation de structures 3D interlocks chaines en tant que renforts dans des applications industrielles

Ce chapitre est l'occasion de proposer des solutions pour réaliser des matériaux composites renforcés d'une structure 3D interlock chaine en lin aux propriétés définis. Pour ce faire, différents outils sont mis en avant sur les caractérisations effectuées et présentées au cours des deux précédents chapitres.

Sommaire

4.1	Présentation des méthodes	131
4.1.1	Analyse en composantes principales	131
4.1.2	Régression des moindres carrés partiels	132
4.1.3	Classement PROMÉTHÉE II	132
4.2	Applications aux structures 3D interlock chaine sèches	133
4.2.1	Analyse en composantes principales	133
4.2.2	Régression des moindres carrés partiels	135
4.2.3	Classement PROMÉTHÉE II	139
4.3	Applications aux structures résinées	141
4.3.1	Régression des moindres carrés partiels	141
4.3.2	Classement PROMÉTHÉE II	142
4.4	Applications multi-échelles	143

Introduction

U cours des différentes campagnes de tissage, un grand nombre de tissus 3D interlock chaîne ont été mis en œuvre. L'ensemble de ces architectures et leurs caractérisations constituent une base de données aux nombreux paramètres. Cette base de données contient de nombreuses informations dont certaines ont déjà été extraites et présentées dans le deuxième chapitre. Cependant les architectures n'ont été comparées que par campagne de tissage associée à des paramètres bien précis, et non globalement. Le [chapitre 2](#) a présenté l'influence des différents paramètres d'architectures sur les propriétés structurales et mécaniques des tissus 3D interlock chaîne. Le [chapitre 3](#) a présenté les liens entre les quatre échelles associées à la réalisation de matériaux composites renforcés de structures 3D interlock chaîne en lin. L'objectif de ce chapitre est d'utiliser différentes approches statistiques dans l'objectif de mieux comprendre les structures 3D interlock chaîne et les matériaux composites associés et d'extraire des relations complémentaires entre les paramètres.

Les approches statistiques proposées sont l'analyse en composantes principales (ACP), la régression des moindres carrés partiels (PLS) et une méthode de classement d'individus nommée PROMÉTHÉE II. Ces trois méthodes seront présentées dans une première partie ; puis mises en œuvre, relativement à une échelle de caractérisation dans une section dédiée. Enfin, avant de conclure, chacune de ces méthodes sera utilisée pour réaliser une étude multi-échelles.

L'objectif de cette démarche est, dans le cadre du projet [FLAX3D](#), d'appliquer ces outils d'analyse statistique pour sélectionner les meilleurs paramètres aux échelles de la mèche, du tissu 3D interlock chaîne et du matériau composite associé, pour répondre à un cahier des charges spécifique.

4.1 Présentation des méthodes

L'objectif n'étant pas ici de faire un état de l'art des différentes approches statistiques mais d'utiliser ces différentes méthodes d'analyse statistique pour mieux discerner les interactions à différents niveaux d'influence entre les paramètres produits et les propriétés mécaniques identifiées dans les chapitres précédents.

4.1.1 Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) est une approche statistique née au début du XX^e siècle par PEARSON, puis formalisée par HOTELLING [177] en 1933. Depuis lors, l'ACP a fait ces preuves dans de nombreux domaines, allant de la recherche en neurosciences au traitement de données de masse (voir d'images) en passant par la bio-informatique.

L'ACP est une méthode permettant de réduire les dimensions d'un espace composé de n individus et p variables. Les espaces de dimension 2 (pour une représentation plane) ou 3 (pour

une représentation spatiale) sont privilégiés. D'un point de vue mathématiques, l'ACP est un changement de base : les axes de la base canonique sont échangés avec les vecteurs propres de la matrice des corrélations [178]. Les vecteurs associés à une propriété sont ensuite projetés dans ce nouvel espace pour une meilleure représentation. Les composantes principales et les pourcentages de corrélations sont déterminés par l'ACP. Dans le cadre de ces travaux, l'analyse en composantes principales est réalisée via le logiciel Chemoface [179, 180].

4.1.2 Régression des moindres carrés partiels

La régression des moindres carrés partiels PLS¹ est une approche statistique développée à la fin du XX^e siècle par WOLD et al. [181–183]. Les domaines d'applications actuelles des régressions PLS sont entre autres la chimiométrie, l'analyse sensorielle ou encore l'anthropologie.

La régression PLS est une méthode permettant d'expliquer une ou plusieurs variables Y à partir de variables X . Il s'agit d'une méthode de régression linéaire multiple. A la différence de l'ACP, la régression PLS ne réduit pas le nombre de dimensions de l'espace initial. L'avantage de cette méthode est sa capacité à gérer les espaces à faible nombre d'individus n et à haut nombre de variables p . Dans le cadre de ces travaux, les régressions des moindres carrés partiels sont réalisées via le logiciel Chemoface [179, 180].

4.1.3 Classement Prométhée II

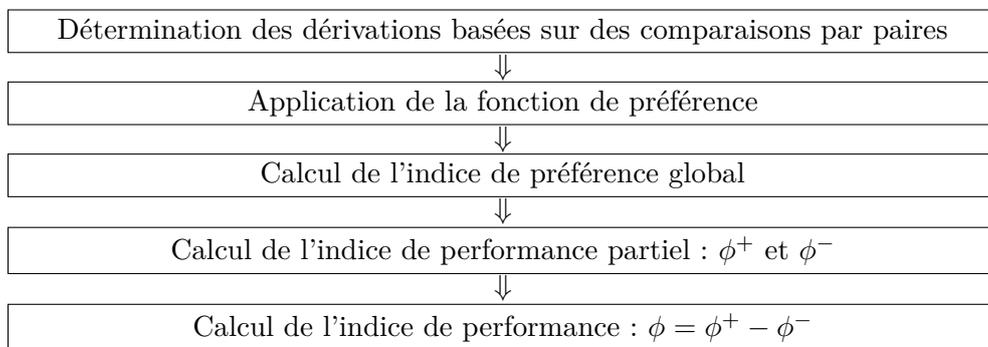


Figure 4.1 – Méthode de calcul de l'indice de performance ϕ [184]

PROMÉTHÉE II est une méthode de classement d'individus développée par B. MARESCAL [185, 186]. La méthode repose sur le calcul d'un indice de performance nommé *net ranking flow*, calculé à partir des entrées et d'une fonction de préférence. La fonction de préférence utilisée pour tous les classements de ce chapitre est une fonction linéaire. La méthode de calcul est donnée en figure 4.1. A chaque paramètre peut être associé un poids, permettant d'évaluer l'influence d'un paramètre sur les indices de performance. La classification PROMÉTHÉE est réalisée via le logiciel éponyme.

1. pour *Projection to Latent Structure*

4.2 Applications aux structures 3D interlock chaîne sèches

Les 18 structures 3D interlock chaîne utilisées dans ces analyses sont issues des trois différentes campagnes de tissage présentées dans le deuxième chapitre. Un index de ces architectures est également donné en Annexe C. Les tables de données sont normalisées avant de procéder à l'analyse en composantes principales et à la régression PLS.

4.2.1 Analyse en composantes principales

L'objectif de cette ACP est de déterminer quelles sont les propriétés qui influencent les forces à rupture en traction (en sens chaîne comme en sens trame). Pour ce faire et au regard des résultats de la deuxième campagne de tissage, l'épaisseur, la masse surfacique, et l'embuvage des fils de chaîne de liage n'ont pas été repris dans cette ACP. La force à rupture en sens trame a cependant été conservée au regard des autres types de liage (le type de liage OT étant le seul étudié au cours de la seconde campagne de tissage).

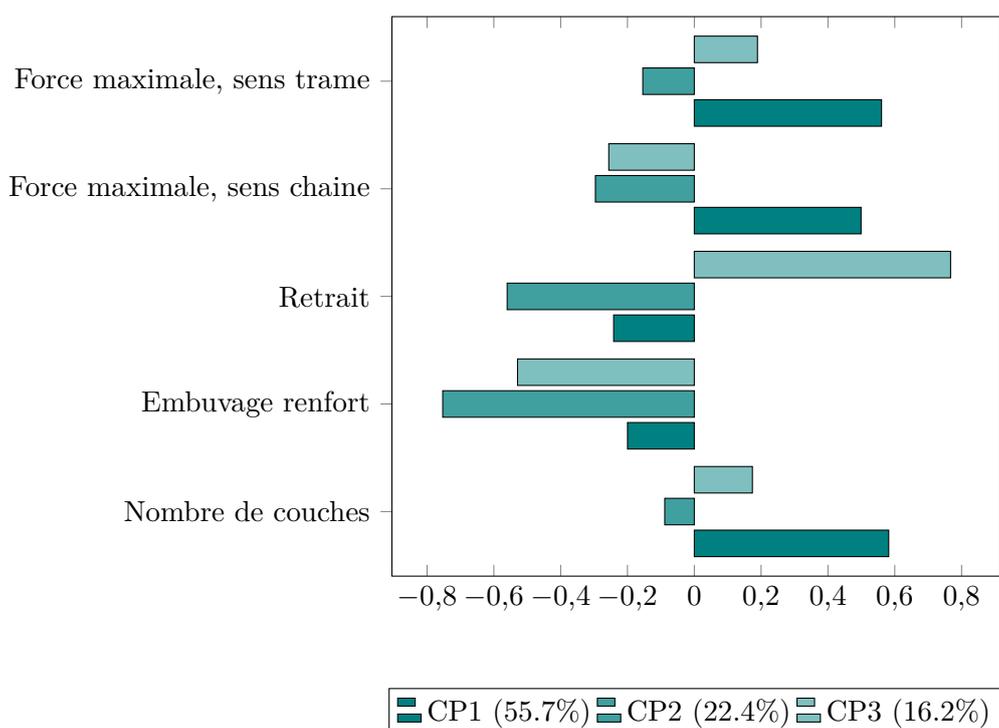


Figure 4.2 – Valeurs propres des trois premières composantes principales ($n = 18; p = 5$)

La figure 4.2 donne les valeurs propres des trois composantes principales de l'ACP des tissus 3D interlock chaîne non résinés. Les composantes principales sont calculées sur les résultats des 18 structures ($n = 18$) et 5 paramètres ($p = 5$). La composante principale 1 (CP1) regroupe les forces à rupture (1e pic en sens chaîne et sens trame) ainsi que le nombre de couches. La composante principale 2 (CP2) regroupe le retrait et l'embuvage des fils de chaîne de renfort. La valeur en pourcentage dans la légende correspond au degré de corrélation. Dans cette ACP, les

deux premiers axes, corrént plutôt bien les cinq paramètres avec une corrélation cumulée de 78,1%. La composante principale 3 (CP3) permet de différencier les deux directions principales des structures 3D interlock chaîne (à savoir le sens chaîne et le sens trame).

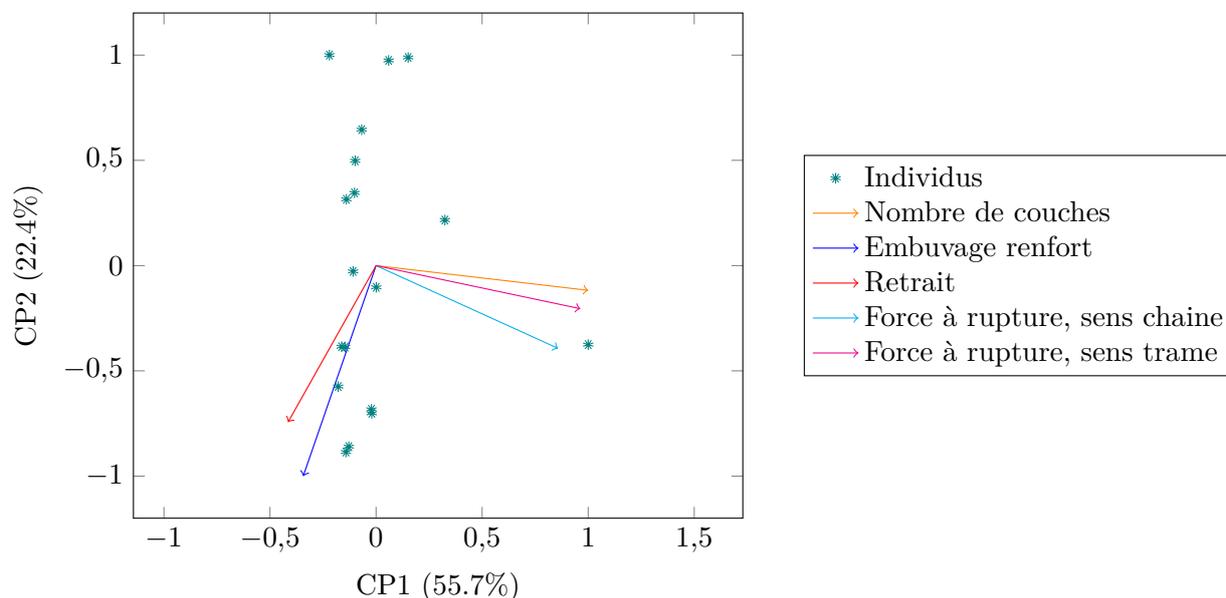


Figure 4.3 – Analyse en composantes principales ($n = 18; p = 5$)

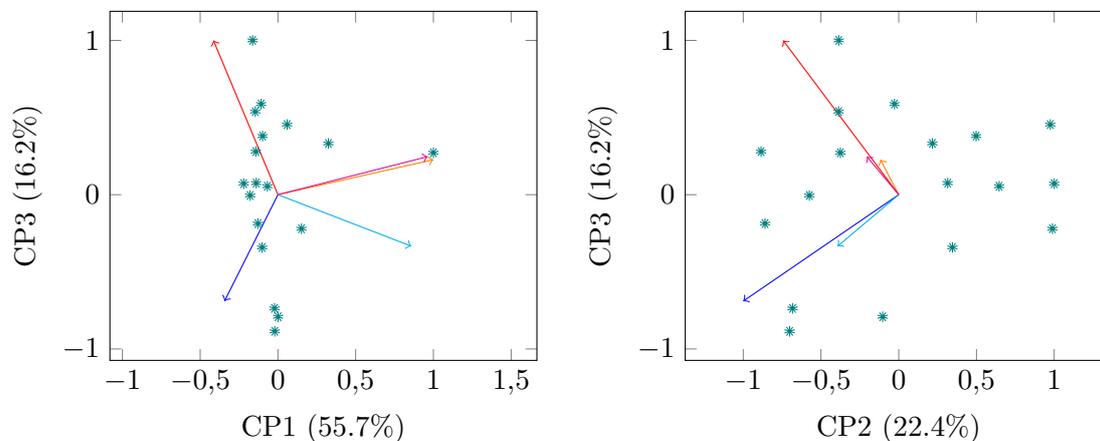


Figure 4.4 – Analyse en composantes principales selon la troisième composante ($n = 18; p = 5$)

Les figures 4.3 et 4.4 illustrent les résultats de l'analyse en composantes principales. La variance cumulée de cette analyse en composantes principales atteint 78,1% sur les deux premiers axes. Via la troisième composante, la variance cumulée atteint 94,3%. Les résultats de l'ACP stipulent que (quel que soit le type de liage) les forces à rupture dans les deux directions de la structure 3D interlock chaîne dépendent du nombre de couches. Par projection des vecteurs de la base canonique dans le plan (CP1;CP2), les valeurs d'embuvages des fils de chaîne de renfort et les valeurs de retrait des fils de trame sont liées l'une à l'autre. Il n'existe cependant pas de relation simple entre ces variations de longueur et les forces à rupture. Par projection

des vecteurs de la base canonique dans le plan (CP1;CP3), la force à rupture en sens trame est très fortement corrélée au nombre de couches, plus que la force à rupture en sens chaîne. Le troisième axe de l'analyse en composantes principales permet de différencier les deux directions du tissu, en raison des valeurs négatives projetées sur cet axe pour la densité en fils de chaîne et des valeurs positives projetées pour la densité en fils de trame. La force à rupture en sens chaîne est influencée par le retrait des fils de trame. La représentation dans le plan (CP2;CP3) confirme que les deux premières composantes sont suffisantes pour interpréter les relations entre ces cinq paramètres. Quel que soit le type de liage, la force à rupture, sens trame est fortement corrélée au nombre de couches.

L'analyse en composantes principales est un outil intéressant permettant de visionner un espace à n dimensions dans un nouveau repère. Ce changement de repère permet de changer de point de vue et de visualiser les relations entre les différents paramètres de la base canonique.

4.2.2 Régression des moindres carrés partiels

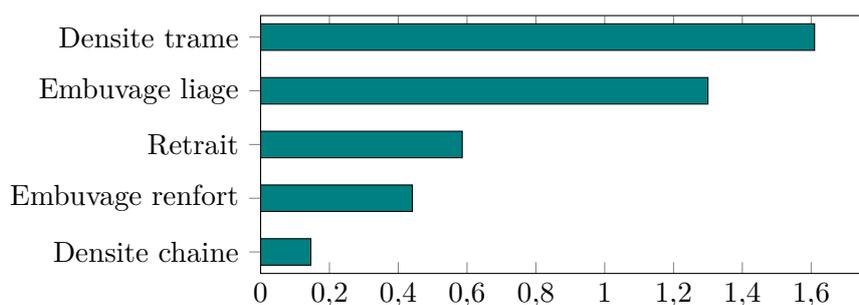


Figure 4.5 – Coefficients VIP associés à l'épaisseur des tissus 3D interlock chaîne ($n = 18; p = 5$)

Épaisseur La figure 4.5 donne les coefficients VIP de l'épaisseur à partir des 18 structures présentées préalablement. Les coefficients VIP donnent les tendances influençant positivement un paramètre. Dans le cadre de l'épaisseur, l'embuvage des fils de chaîne de liage et la densité trame sont les deux paramètres principaux influençant l'épaisseur des structures 3D interlock chaîne.

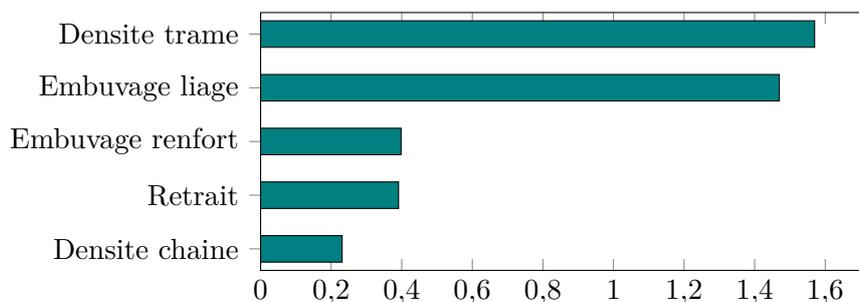


Figure 4.6 – Coefficients VIP associés à la masse surfacique des tissus 3D interlock chaîne ($n = 18; p = 5$)

Masse surfacique La figure 4.6 donne les coefficients VIP de la masse surfacique à partir des 18 structures. La masse surfacique est une combinaison linéaire connue des densités, des retraits et des embuvages. Pour les structures considérées dans cette régression PLS, les densités chaîne n'évoluant quasiment pas, la densité chaîne n'apparaît pas comme un paramètre influençant la masse surfacique.

L'exploitation des résultats de régression PLS implique de garder un esprit critique, tant les relations peuvent être masquées par la faible variabilité d'un paramètre (par exemple la densité chaîne). Les résultats d'une régression PLS dépendent des données en entrée. Dans le cas des 18 structures tissées, la densité chaîne a été définie au cours de l'ourdissage et du piquage à 5 fils/cm pour la première campagne de tissage et à 6 fils/cm pour les autres. Les valeurs mesurées diffèrent certes un peu de cette valeur théorique car la structure se déforme à la sortie de la machine à tisser.

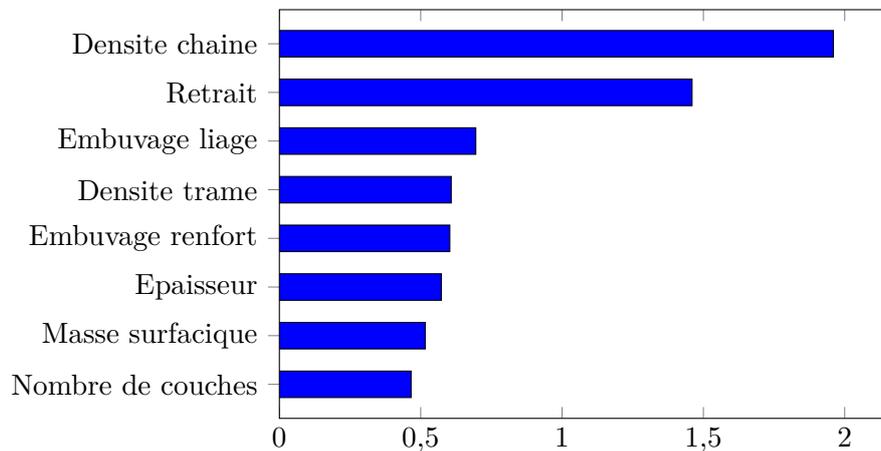


Figure 4.7 – Coefficients VIP associés au coefficient de rigidité en flexion, sens chaîne des tissus 3D interlock chaîne ($n = 18; p = 8$)

Coefficient de rigidité en flexion La figure 4.7 donne les coefficients VIP associés au coefficient de rigidité en flexion, sens chaîne des tissus 3D interlock chaîne à partir des 18 structures. Le coefficient de rigidité en flexion est régi principalement par la densité chaîne et l'embuvage des fils de chaîne (dans la direction de sollicitation) mais également par le retrait des fils de trame (dans la direction perpendiculaire à la sollicitation). En enlevant les paramètres relatifs à l'épaisseur et à la masse surfacique, les proportions entre les six coefficients VIP restant ne sont pas modifiées.

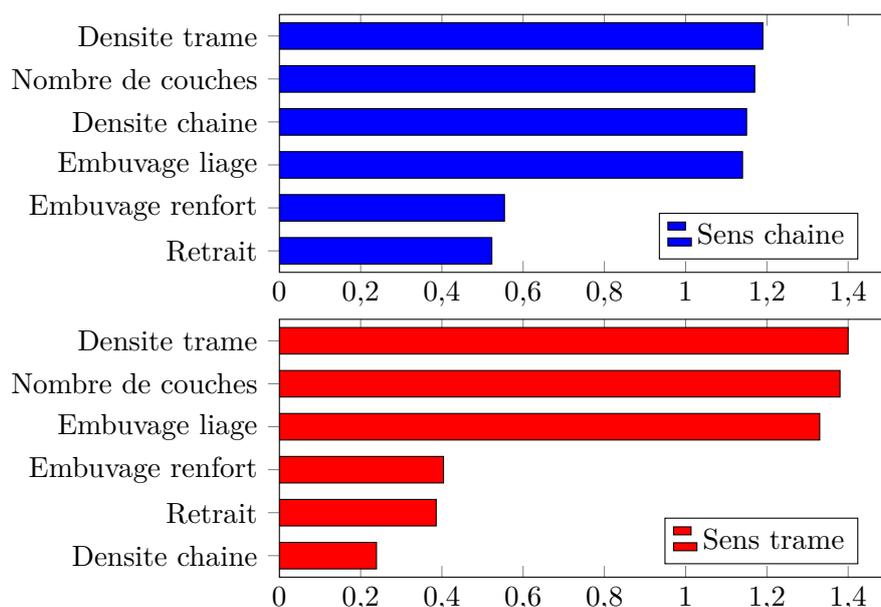


Figure 4.8 – Coefficients VIP associés aux forces à rupture des tissus 3D interlock chaîne ($n = 18; p = 6$)

Traction La figure 4.8 donne les coefficients VIP des forces à rupture sens chaîne et trame à partir des 18 structures. En sens chaîne (pour le 1er pic) comme en sens trame, la force à rupture a tendance à augmenter quand l’embuvage des fils de chaîne de liage augmente (au regard des résultats). Le nombre de couches n’influe pas de la même manière en sens chaîne qu’en sens trame. L’influence de la densité est plus importante dans la direction de sollicitation que dans la direction transversale.

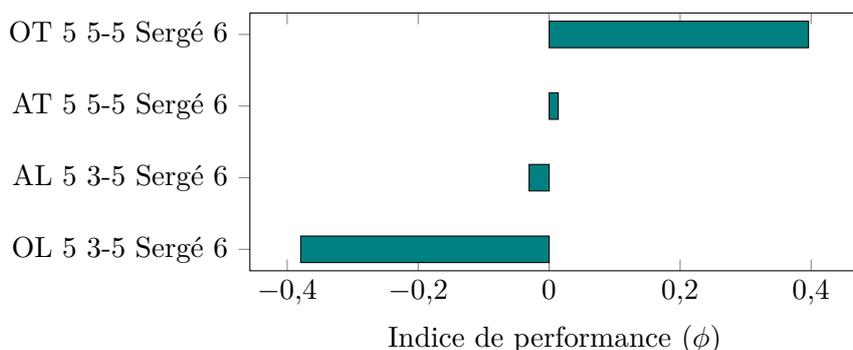


Figure 4.9 – Classement PROMÉTHÉE II des quatre structures de la campagne #1

Les structures tissées ont été soumises au classement PROMÉTHÉE II. La figure 4.9 donne les valeurs de l’indice de performance pour les quatre structures de la première campagne de tissage. Dans ce classement (et les suivants), seules les forces à rupture et le nombre de couches ont été pris en compte. L’objectif étant d’obtenir les meilleures performances mécaniques avec le moins de temps de tissage. Le nombre de couches étant le même pour les quatre structures, seules les forces à rupture dans les deux directions entrent en compte. Un liage orthogonal au travers de l’épaisseur apparaît comme le meilleur choix en termes de propriétés mécaniques. Ce

choix confirme la décision de réaliser des structures OT lors de la deuxième campagne de tissage.

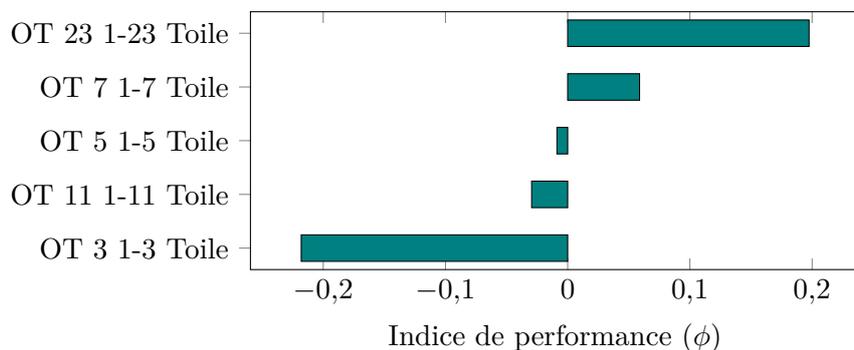


Figure 4.10 – Classement PROMÉTHÉE II des cinq structures de la campagne #2

La figure 4.10 donne les valeurs de l'indice de performance pour les cinq structures de la deuxième campagne de tissage. En sens chaîne, seules les forces issues du premier pic sont considérées. Les performances mécaniques de la structure à 23 couches en sens trame, la positionne au premier rang du classement. La structure à 7 couches, plus équilibrée en termes de force à rupture, atteint la deuxième place du classement. Malgré son nombre élevé de points de liage, la structure 3 couches reste en dernière position. Ce résultat est plutôt surprenant au regard de la chute des propriétés par fil en sens trame avec le nombre de couches (cf. figures 2.24 et 2.25).

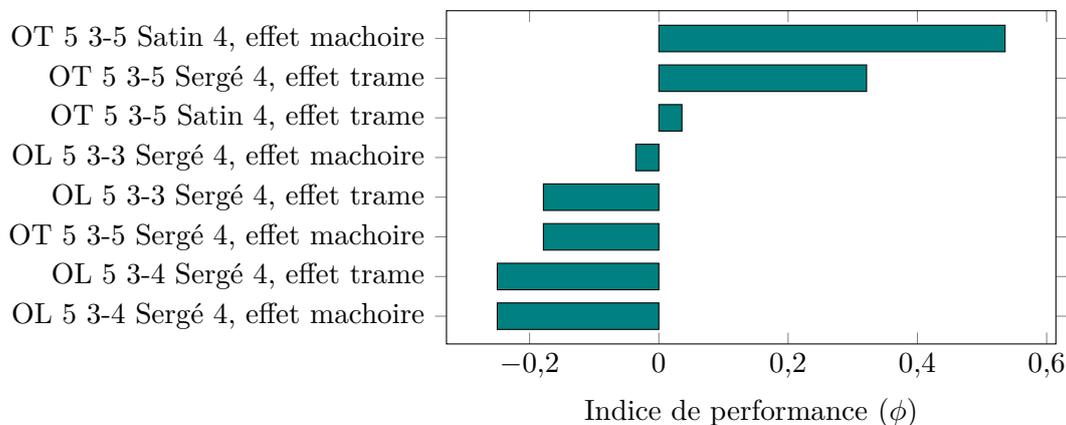


Figure 4.11 – Classement PROMÉTHÉE II des huit structures de la campagne #3 et #4

La figure 4.11 donne les valeurs de l'indice de performance pour les structures de la troisième et quatrième campagne de tissage. Les architectures liées par un satin se retrouvent avec des valeurs d'indices de performance positives, contrairement à la plupart des architectures liées par un sergé. Seule l'architecture OT 5 3-5 Sergé 4, effet trame conserve une valeur positive de la valeur de l'indice de performance (net ranking flow). Les deux effets sont répartis équitablement le long du classement. Comme pour le classement des quatre architectures de la première campagne de tissage, les architectures liées au travers de l'épaisseur sont mieux classées que les structures liées couche à couche.

4.2.3 Classement Prométhée II

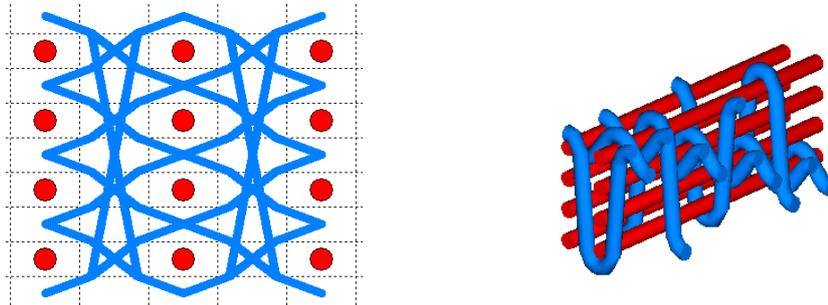


Figure 4.12 – Coupe chaîne et représentation 3D de la structure OT 4 1-4 Toile

Lors de la troisième campagne de tissage, un essai de tissage à quatre couches a été réalisé. L'architecture a pour particularité de ne pas avoir de fils de chaîne de renfort mais des fils de chaîne liant alternativement 1 et 4 couches. La structure est équivalente à un empilement de quatre tissus 2D toiles liés au travers de l'épaisseur par des fils de chaîne de liage de profondeur 4. La figure 4.12 donne la coupe transversale chaîne et la représentation 3D de la structure 3D interlock chaîne. La structure a été conçue au regard des résultats de caractérisation des trois premières campagnes de tissage. Avec une densité chaîne de 6 fils/cm et une densité trame de 11,5 fils/cm, les forces à rupture atteignent respectivement les valeurs de 2710 ± 300 N, 1036 ± 77 N et 8570 ± 726 N en sens chaîne au 1er pic, en sens chaîne au 2e pic et en sens trame. L'embuvage des fils de chaîne de liage est de $7,3 \pm 1,2\%$ et $78,2 \pm 3,5\%$ pour les fils liant une et quatre couches respectivement. Les propriétés mécaniques de cette architecture sont particulièrement intéressantes au vu du nombre de couches. Les résultats de cette architecture seront intégrés au classement PROMÉTHÉE II réalisé sur l'ensemble des tissus 3D interlock chaîne

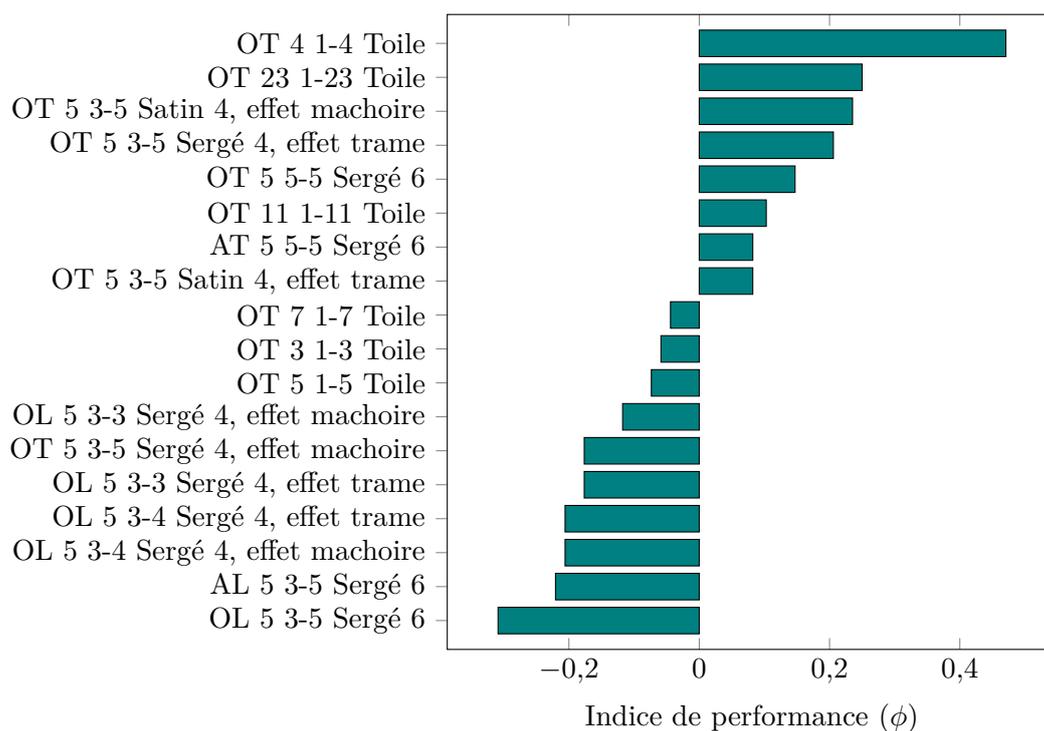


Figure 4.13 – Classement PROMÉTHÉE II des 18 structures en fonction des forces à rupture, du nombre de couches et du module en flexion

La figure 4.13 donne les valeurs de l'indice de performance pour l'ensemble des structures tissées y compris la structure OT 4 1-4 Toile. L'ordre de classement des quatre structures de la campagne de tissage #1 est identique mais diffère pour les autres campagnes de tissage. La structure OT 4 1-4 Toile, présentant d'excellentes propriétés mécaniques, prend la première place de ce classement. Les structures présentant un indice de performance positif ont toutes un liage orthogonal au travers de l'épaisseur.

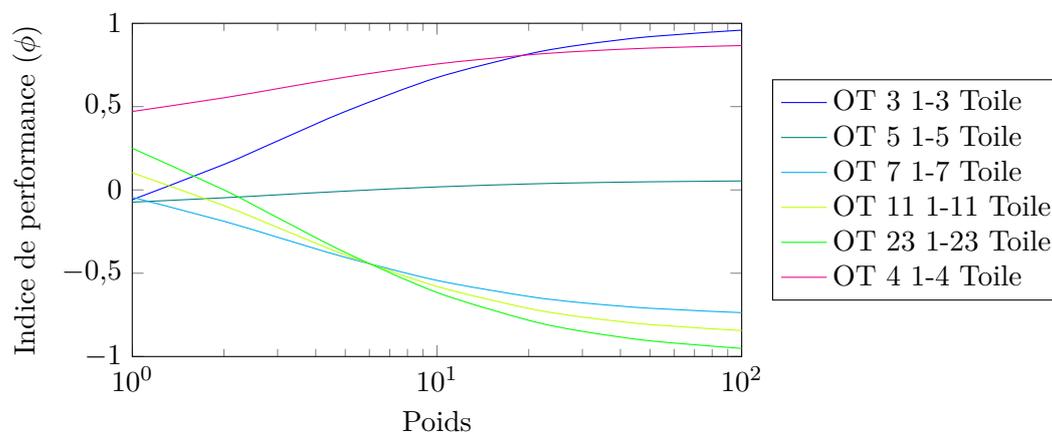


Figure 4.14 – Évolution de l'indice de performance en fonction du poids associé au nombre de couches

La figure 4.14 donne l'évolution de l'indice de performance pour six structures, en fonction

du poids associé au nombre de couches. Le nombre de couches est un paramètre important, car il influe sur de nombreux paramètres dont les forces à rupture mais également sur le temps de tissage. Au regard du temps de tissage, le nombre de couches est un paramètre important à minimiser.

Pour raccourcir le temps de tissage, le poids associé à la force à rupture peut être augmenté. A iso-poids, la structure OT 4 1-4 Toile est le meilleur compromis en termes de performances mécaniques et temps de mise en œuvre. Les architectures à 7, 11 et 23 couches chutent dans le classement d'autant plus que leur nombre de couches est important. Les architectures à 3, 4 et 5 couches gagnent des places dans le classement d'autant plus que leur nombre de couches est faible. Au-delà d'un poids légèrement supérieur à 10, la structure 3 couches devient plus intéressante, alors qu'à faible poids la même architecture se situait au pied du classement.

Les résultats du classement PROMÉTHÉE dépendent de ces poids. Ces poids sont à définir en fonction de l'application et de son cahier des charges.

4.3 Applications aux structures résinées

L'analyse en composantes principales n'a pas été effectuée pour les structures résinées, en raison du faible nombre d'individus. Cependant la régression PLS peut être utilisée. Les paramètres considérés à cette échelle composite sont le taux volumique de fibre et de vide, l'épaisseur et la masse surfacique de ces structures résinées.

4.3.1 Régression des moindres carrés partiels

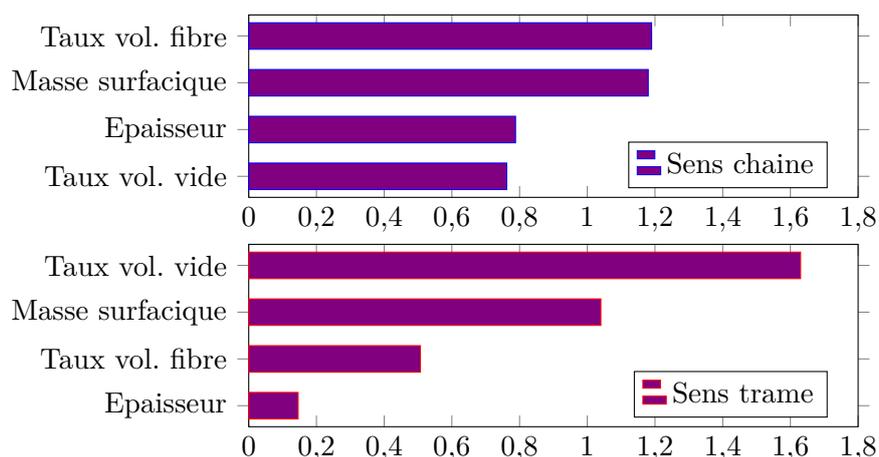


Figure 4.15 – Coefficients VIP associés aux modules en traction des composites renforcés de tissus 3D interlock chaîne ($n = 6; p = 4$)

Les tables de données sont normalisées avant de réaliser la régression PLS. La figure 4.15 donne les coefficients VIP associés aux modules E_1 en traction des six plaques composites étudiées. Au regard des résultats, le module E_1 en sens chaîne, dépend autant du taux volumique

de fibre que de la masse surfacique, mais également de l'épaisseur et du taux volumique de vide (porosité).

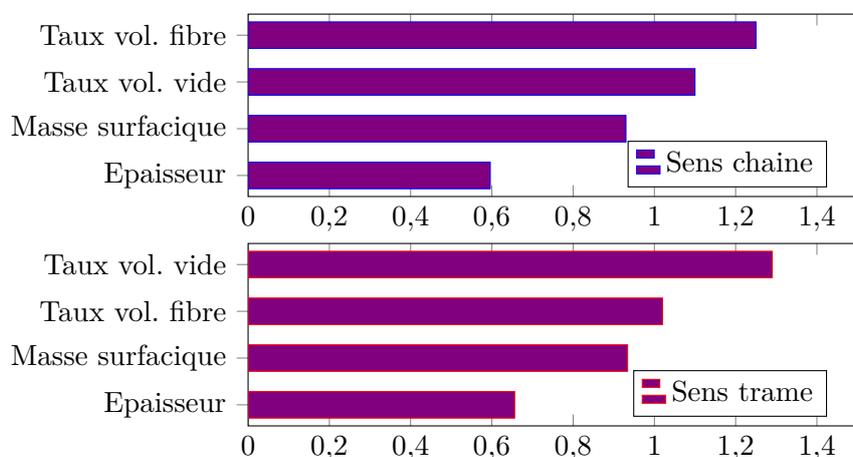
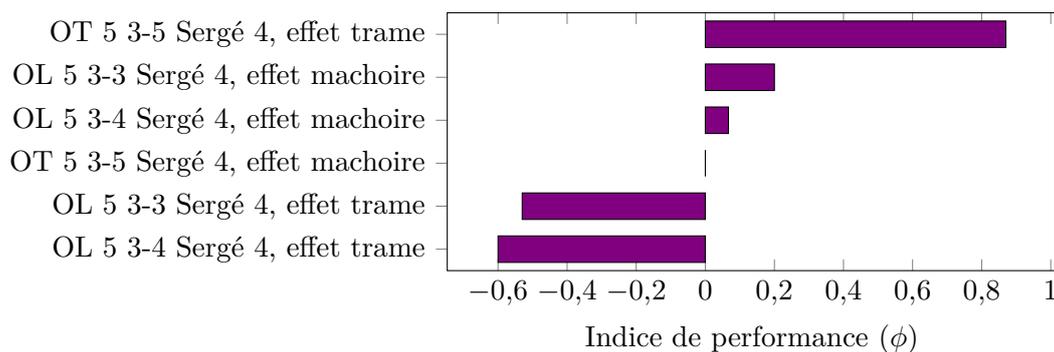


Figure 4.16 – Coefficients VIP associés aux contraintes à rupture en traction des composites renforcés de tissus 3D interlock chaîne ($n = 6; p = 4$)

La figure 4.16 donne les coefficients VIP associés aux contraintes à rupture des six plaques composites étudiées. La contrainte à rupture en sens chaîne est plutôt régie par le taux volumique de fibre. Les contraintes à rupture dans les deux directions dépendent également à moindre mesure de l'épaisseur et de la masse surfacique.

4.3.2 Classement Prométhée II

Pour ce classement des six individus à l'échelle composite, les paramètres à maximiser (\nearrow) sont le taux volumique de fibre, les modules en traction et les contraintes à rupture. Le taux volumique de vide est un paramètre à minimiser (\searrow).



Paramètre	Direction	Poids
Taux volumique de fibre	\nearrow	1
Taux volumique de vide	\searrow	1
Modules (chaîne et trame)	\nearrow	1
Contrainte à rupture (chaîne et trame)	\nearrow	1

Figure 4.17 – Classement PROMÉTHÉE II des six structures résinées

La figure 4.17 donne le classement PROMÉTHÉE II des six plaques composites renforcées de tissus 3D interlock chaine. Contrairement au classement des tissus secs de la troisième campagne de tissage, les structures liées couche à couche ($X_2 = L$) et à effet mâchoire regagnent quelques places une fois considérées ces propriétés résinées. La structure OT 5 3-5 Sergé 4, effet trame conserve cependant sa première place, grâce à ses excellentes propriétés mécaniques.

Si les taux volumiques (de fibres et de vide) ne sont pas pris en compte dans le classement PROMÉTHÉE, les structures OL 5 3-4 Sergé 4, effet mâchoire et OL 5 3-3 Sergé 4, effet mâchoire échangent leur place dans le classement.

4.4 Applications multi-échelles

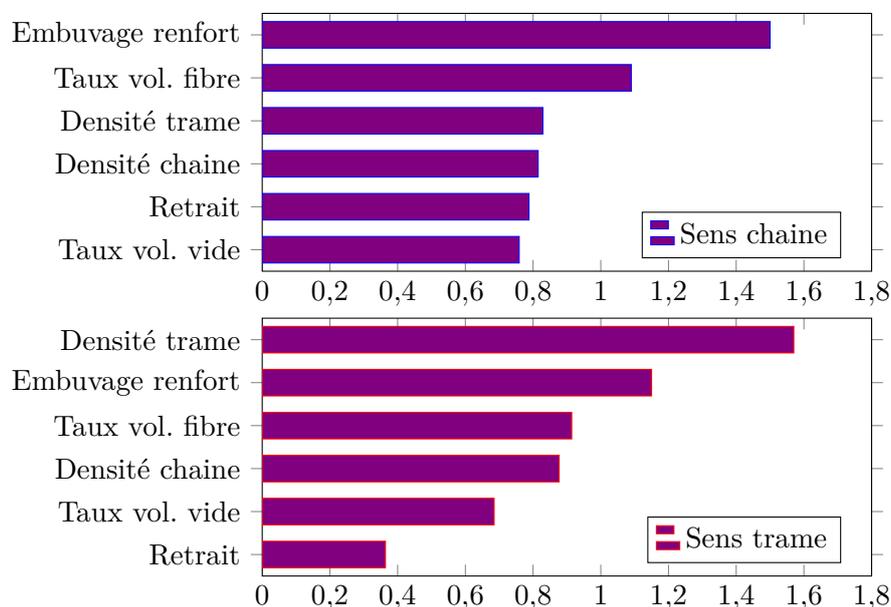


Figure 4.18 – Coefficients VIP associés aux modules en traction des composites renforcés de tissus 3D interlock chaine ($n = 6; p = 6$)

Comportement en traction La figure 4.18 donne les coefficients VIP associés aux modules E_1 des composites renforcés de tissus 3D interlock chaine. Suite à l'ACP sur les tissus secs, le paramètre densité trame est relié au nombre de couches. Le module E_1 , en sens chaine, est fonction de nombreux paramètres, et principalement de l'embuvement des fils de chaine de renfort. Le module E_1 en sens trame est fonction des mêmes paramètres, dans des proportions différentes. Ce module est fortement régi par la densité trame.

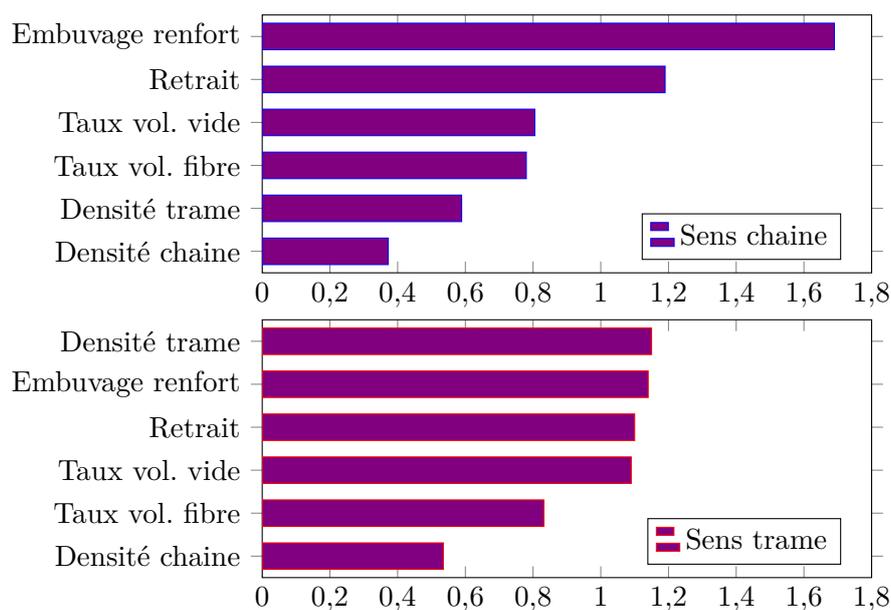


Figure 4.19 – Coefficients VIP associés aux contraintes à rupture en traction des composites renforcés de tissus 3D interlock chaîne ($n = 6; p = 6$)

La figure 4.19 donne les coefficients VIP associés aux contraintes à rupture des composites renforcés de tissus 3D interlock chaîne. L'ensemble des paramètres influe sur les contraintes à rupture dans chaque direction. L'embuvage des fils de chaîne de renfort influe majoritairement sur la contrainte à rupture en sens chaîne tandis que la densité trame influe majoritairement sur la contrainte à rupture en sens trame.

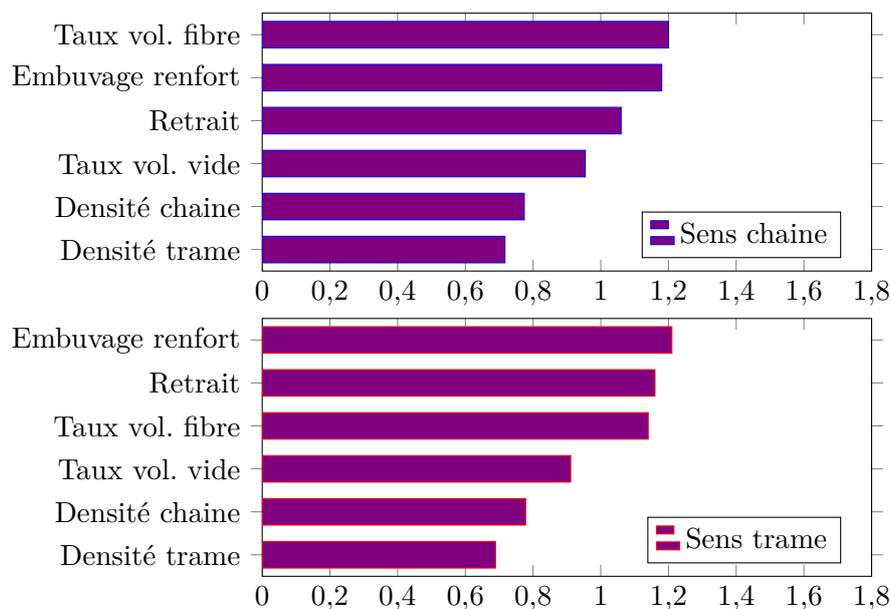


Figure 4.20 – Coefficients VIP associés aux modules de rigidité en flexion des composites renforcés de tissus 3D interlock chaîne ($n = 6; p = 6$)

Comportement en flexion La figure 4.20 donne les coefficients VIP associés aux modules de rigidité en flexion des composites renforcés de tissus 3D interlock chaîne. L'ensemble des paramètres influe (dans diverses proportions) sur les modules de rigidité en flexion dans chaque direction. Les trois paramètres principaux influençant le comportement en flexion sont le taux volumique de fibre, l'embuvage des fils de chaîne de renfort et le retrait des fils de trame. Les densités chaîne et trame des tissus de renfort étant les mêmes pour les six structures, l'influence de ces paramètres est plus faible.

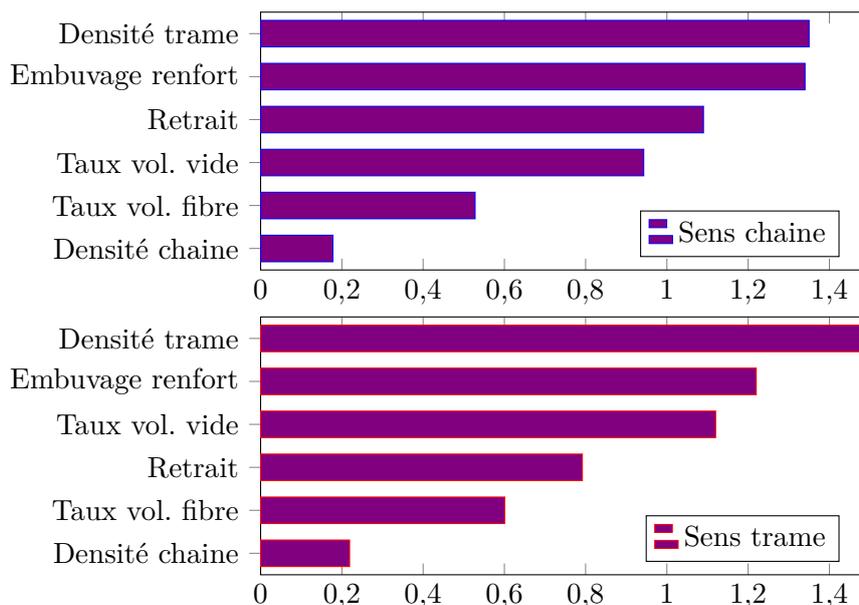


Figure 4.21 – Coefficients VIP associés aux contraintes à rupture en flexion des composites renforcés de tissus 3D interlock chaîne ($n = 6; p = 6$)

La figure 4.21 donne les coefficients VIP associés aux contraintes à rupture en flexion des composites renforcés de tissus 3D interlock chaîne. L'ensemble des paramètres influe (dans diverses proportions) sur les contraintes à rupture en flexion dans chaque direction. La densité chaîne, invariante pour les six tissus de renfort, n'apparaît pas comme un paramètre influençant la contrainte à rupture, contrairement à la densité trame. L'embuvage des fils de chaîne de renfort a un rôle plus important dans la contrainte à rupture en flexion, en sens chaîne qu'en sens trame. Enfin, l'influence du taux volumique de vide est plus importante que le taux volumique de fibre.

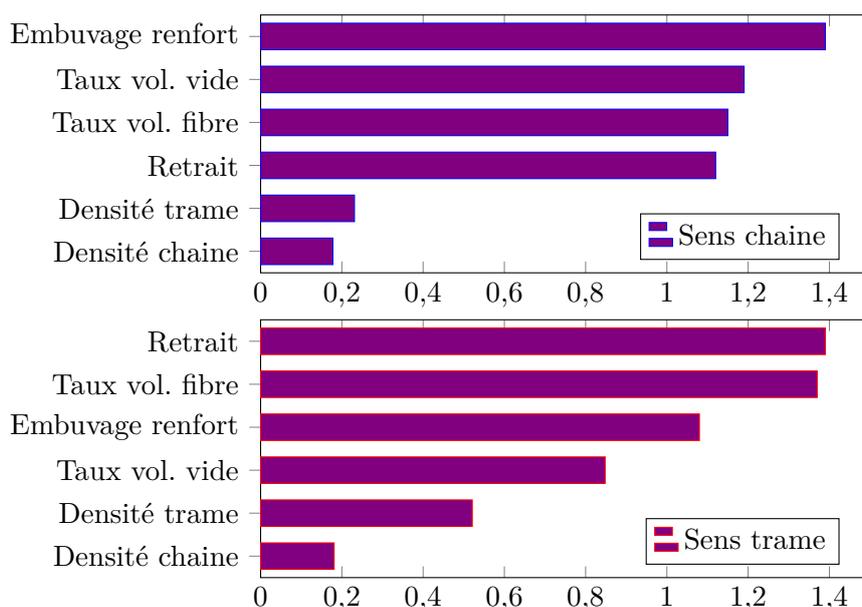


Figure 4.22 – Coefficients VIP associés aux énergies de rupture à l’impact des composites renforcés de tissus 3D interlock chaîne ($n = 6; p = 6$)

Comportement à l’impact La figure 4.22 donne les coefficients VIP associés aux énergies de rupture à l’impact des composites renforcés de tissus 3D interlock chaîne. Le comportement en flexion est fortement influencé par les longueurs relatives des fils dans la structure (retrait et embuvage) et par les taux volumiques (de fibres et de porosité). Le comportement en sens chaîne est régi par l’embuvage des fils de chaîne de renfort, et celui en sens trame par le retrait des fils de trame. Ce résultat semble plutôt cohérent, au regard de la direction de la sollicitation et de l’orientation des fils.

Conclusion

Au cours des trois campagnes de tissage présentées dans le cadre de ce manuscrit, une vingtaine de structures 3D interlock chaîne ont été tissées. L’analyse en composantes principales et la régression des moindres carrés partiels sont deux approches statistiques intéressantes et relativement faciles à mettre en œuvre pour dévoiler des relations entre paramètres. Le classement PROMÉTHÉE est un bon outil d’aide à la décision, notamment pour sa simplicité d’utilisation et la prise en compte de l’ensemble des paramètres des produits (par le biais de fonction de préférence et de poids). L’utilisation de ces différentes approches statistiques pour établir des relations entre les paramètres de structures tissés 3D interlock chaîne est une approche originale. Il en va de même de l’utilisation d’outils d’aide à la décision pour le développement de démonstrateurs de matériaux composites renforcés d’une structure 3D interlock chaîne en lin.

L’analyse en composantes principales a permis d’établir des relations entre toutes les architectures malgré leurs grands nombres de paramètres. En raison du faible nombre de matériaux composites caractérisés, la régression des moindres carrés partiels a été utilisée et a permis

d'établir des relations entre les tissus secs et imprégnés de résine. L'outil PROMÉTHÉE a permis de classer les architectures en fonction de leurs performances mécaniques et a démontré qu'un liage au travers de l'épaisseur conduit aux meilleures performances mécaniques.

L'objectif du projet **FLAX3D** est de classer l'ensemble des structures réalisées au cours de toutes campagnes de tissage et d'obtenir une structure qui une fois résinée répondra aux attentes de l'utilisateur. La difficulté réside désormais dans la traduction **du cahier des charges de la pièce composites et** des attentes client en paramètres et d'y associer les bons poids.

Conclusions et perspectives

LE tissage 3D interlock chaîne est un procédé qui nécessite un choix rigoureux de la matière entrante pour faciliter le tissage et la mise en œuvre des matériaux composites associés. La matière, le titre, la torsion, le degré de pilosité, ou encore les propriétés mécaniques de la mèche sont des informations essentielles pour la mise en œuvre du tissage et obtenir des renforts aux propriétés maîtrisées. L'ajout de torsion est un moyen de modifier la géométrie et les propriétés mécaniques des mèches : le titre et la régularité de la mèche augmentent avec la torsion alors que la pilosité diminue.

Les structures tissées 3D interlocks chaînes sont des structures complexes. Cette technologie, dérivée du tissage 2D traditionnel, permet de tisser plusieurs couches de tissus à la fois. Le résultat est une structure multicouches, aux propriétés mécaniques remarquables. La mise en œuvre de ces structures de renfort est complexe, tant du point de vue du nombre d'étapes (filature, ourdissage, rentrage, tissage) que des phénomènes parallèles occasionnant de la fibrillation et forçant à ralentir la vitesse de tissage. Chacune des trois campagnes de tissage a permis de mieux comprendre les structures 3D interlock chaîne à base de mèche de lin. Pas moins d'une soixantaine de structures ont été réalisées au cours de ces campagnes de tissage et la sélection de dix-sept d'entre-elles ont permis d'extraire les résultats présentés.

Les tissus 3D interlock chaîne sont des structures de renfort de matériaux composites intéressantes, tant par les propriétés qu'elles apportent et que par la polyvalence des architectures réalisables et des propriétés obtenues. Ces propriétés sont fortement corrélées à la densité de tissage et à l'embuvage des fils de chaîne de liage. L'augmentation de densité, conduisant à de plus haut taux volumique de fibre, est à l'origine des meilleures performances mécaniques des matériaux composites. Mais également de bonnes performances hors plan (en flexion et à l'impact) grâce aux fils de chaîne de liage qui assurent les propriétés au travers de l'épaisseur.

La démarche multi-échelles a pour objectif de déterminer l'influence des paramètres à une échelle sur les propriétés aux autres échelles et de suivre l'évolution des caractéristiques des différents constituants. Les propriétés des fibres ont été extraites des propriétés en traction des fils imprégnés de résine, via la méthodologie de l'IFBT. Cette détermination des propriétés fibres a conduit à une étude comparative de différents modèles (lois des mélanges et modèles

de MADSEN) associées aux fibres naturelles et a permis d'évaluer le module des fibres de lin utilisées au cours de ces travaux à $29,44 \pm 0,39$ GPa.

Appliquées aux renforts pour matériaux composites, l'analyse en composantes principales (ACP) et la régression PLS sont deux approches innovantes et inédites. Elles ont permis de mettre en lumière des relations entre paramètres non révélées par les outils d'analyse classique. Même si l'ACP n'a pu être appliquée qu'aux structures sèches, la régression PLS a permis de faire le lien entre les deux échelles macroscopiques. Le classement d'individus Prométhée II a permis de classer les structures selon différents critères et en y associant des poids.

Les outils développés au cours de ce travail (cf. Annexe B) permettent de traiter rapidement de grandes quantités de données liées aux tissus 3D interlock chaîne. Ces outils seront d'autant plus précieux pour poursuivre la démarche de caractérisation de nouvelles structures 3D interlocks chaînes. Si le comportement en traction des structures 3D interlock chaîne a été analysé en fonction des paramètres d'élaboration de ces structures, le comportement en compaction et en cisaillement plan se doivent d'être identifiés, afin de comprendre, dans la même démarche que celle conduite en traction, l'influence des paramètres sur ces composantes. Par ailleurs pour les différentes étapes de mise en œuvre composites, des essais de préformage de ces structures 3D Interlock chaîne en lin permettront de caractériser les limites de déformabilités de ces renforts. Aux autres échelles, les différents modèles mis en place de la loi des mélanges ont permis d'évaluer les modules des fibres, sur le même principe la détermination de la contrainte à rupture à l'échelle des fibres en fonction des contraintes des éprouvettes d'IFBT devra s'effectuer.

A l'échelle des mèches, des essais de traction cycliques peuvent être entrepris pour simuler les effets du tissage et déterminer ainsi la vitesse de tissage engendrant le moins de dégradation.

A l'échelle macroscopique des composites, hormis le fait de réaliser plus d'échantillons avec d'autres d'architectures, des échantillons plus épais (soit en superposant les plis de tissu, soit en utilisant des structures avec de plus grand nombre de couches) doivent être élaborés tout en maîtrisant la qualité d'imprégnation (via les taux de porosités)

Disposer d'un plus grand nombre d'échantillons composites permettra de compléter les caractérisations mécaniques (traction à $\pm 45^\circ$; flexion trois points rapprochés pour le comportement au délaminage) afin d'enrichir les bases de données et les fiches techniques de ces produits.

Ces caractérisations supplémentaires permettront par ailleurs de multiplier le nombre d'individus dans les approches statistiques.

Bibliographie

- [1] K. HALADA, « Progress of ecomaterials toward a sustainable society », *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 7, p. 209–216, juin 2003. (Cité en page 1)
- [2] MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER, « Chiffres clés du climat, France et Monde, Édition 2017 », 2017. (Cité en page 1)
- [3] P. KRAWCZAK, « Recyclage des composites », *Techniques de l'ingénieur, Matériaux - Plastiques et composites*, 2011. (Cité en page 1)
- [4] F. BENSADOUN, B. VANDERFEESTEN, I. VERPOEST, A. W. VAN VUURE et K. VAN ACKER, « Environmental impact assessment of end of life options for flax-MAPP composites », *Industrial Crops and Products*, vol. 94, no. Supplement C, p. 327–341, 2016. (Cité en page 1)
- [5] T. S. LEMMI, M. BARBURSKI et B. T. SAMUEL, « Analysis of mechanical properties of unidirectional flax roving and sateen weave woven fabric-reinforced composites », *Autex Research Journal*, vol. 0, mars 2020. (Cité en pages 1 et 22)
- [6] C. POILÂNE, Z. E. CHERIF, F. RICHARD, A. VIVET, B. B. DOUDOU et J. CHEN, « Polymer reinforced by flax fibres as a viscoelastoplastic material », *Composite Structures*, vol. 112, p. 100–112, juin 2014. (Cité en page 1)
- [7] AGENCE FRANCAISE DE NORMALISATION, « NF G00-001 - Textiles - Dictionnaire des termes normalisés », rap. tech., Agence Francaise de Normalisation, 1988. (Cité en pages 1, 14 et 28)
- [8] G. NEMOZ, « Textures textiles tridimensionnelles », *Techniques de l'ingénieur, Matériaux, Matériaux fonctionnels*, 2003. (Cité en pages 1 et 36)
- [9] T. HUANG, Y. WANG et G. WANG, « Review of the mechanical properties of a 3D woven composite and its applications », *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 57, p. 740–756, août 2017. (Cité en pages 1 et 35)
- [10] R. B. LADANI, C. H. WANG et A. P. MOURITZ, « Delamination fatigue resistant three-dimensional textile self-healing composites », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 127, p. 105626, déc. 2019. (Cité en page 2)
- [11] D. SCIDA, A. BOURMAUD et C. BALEY, « Influence of the scattering of flax fibres properties on flax/epoxy woven ply stiffness », *Materials & Design*, vol. 122, p. 136–145, mai 2017. (Cité en page 2)

- [12] JEC COMPOSITES PUBLICATIONS, *Overview of the global composites market, 2018-2023*. 2018. (Cité en page 5)
- [13] T. CADU, M. BERGES, O. SICOT, V. PERSON, B. PIEZEL, L. V. SCHOORS, V. PLACET, S. CORN, R. LÉGER, L. DIVET, P. IENNY et S. FONTAINE, « What are the key parameters to produce a high-grade bio-based composite? Application to flax/epoxy UD laminates produced by thermocompression », *Composites Part B : Engineering*, vol. 150, p. 36–46, oct. 2018. (Cité en pages 5, 19 et 20)
- [14] E. S. IHAB, Z. FAWAZ, R. ZITOUNE et H. BOUGHERARA, « An investigation of the damage mechanisms and fatigue life diagrams of flax fiber-reinforced polymer laminates », *Journal of Materials Science*, vol. 49, p. 2338–2346, déc. 2013. (Cité en pages)
- [15] T. JEANNIN, X. GABRION, E. RAMASSO et V. PLACET, « About the fatigue endurance of unidirectional flax-epoxy composite laminates », *Composites Part B : Engineering*, vol. 165, p. 690–701, mai 2019. (Cité en pages)
- [16] F. BENSADOUN, K. A. M. VALLONS, L. B. LESSARD, I. VERPOEST et A. W. VAN VUURE, « Fatigue behaviour assessment of flax-epoxy composites », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 82, p. 253–266, 2016. (Cité en pages 5 et 23)
- [17] A. BOURMAUD, J. BEAUGRAND, D. U. SHAH, V. PLACET et C. BALEY, « Towards the design of high-performance plant fibre composites », *Progress in Materials Science*, vol. 97, p. 347–408, 2018. (Cité en pages 6, 7, 8 et 102)
- [18] FIBRES RECHERCHE DÉVELOPPEMENT, « Mémento - Panorama des marchés : fibres végétales techniques matériaux (hors bois) ». (Cité en page 6)
- [19] JEC COMPOSITES PUBLICATIONS, *Flax & Hemp Fiber Composites, a market reality - The biobased solutions for the industry*. 2018. (Cité en page 6)
- [20] ORGANISATION DES NATIONS UNIS POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE, « Produits par pays - Lin, fibre et étoupe », 2016. (Cité en page 6)
- [21] CONFÉDÉRATION EUROPÉENNE DU LIN ET DU CHANVRE, « The linen map », 2010. (Cité en page 6)
- [22] Z. WANG, N. HOBSON, L. GALINDO, S. ZHU, D. SHI, J. MCDILL, L. YANG, S. HAWKINS, G. NEUTELINGS, R. DATLA, G. LAMBERT, D. W. GALBRAITH, C. J. GRASSA, A. GERALDES, Q. C. CRONK, C. CULLIS, P. K. DASH, P. A. KUMAR, S. CLOUTIER, A. G. SHARPE, G. K. WONG, J. WANG et M. K. DEYHOLOS, « The genome of flax (*linum usitatissimum*) assembled de novo from short shotgun sequence reads », *The Plant Journal*, vol. 72, no. 3, p. 461–473, 2012. (Cité en page 6)
- [23] N. P. J. DISSANAYAKE, J. SUMMERSCALES, S. M. GROVE et M. M. SINGH, « Energy use in the production of flax fiber for the reinforcement of composites », *Journal of Natural Fibers*, vol. 6, no. 4, p. 331–346, 2009. (Cité en pages 6 et 8)
- [24] M. P. M. DICKER, P. F. DUCKWORTH, A. B. BAKER, G. FRANCOIS, M. K. HAZZARD et P. M. WEAVER, « Green composites : A review of material attributes and complementary applications », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 56, p. 280–289, 2014. (Cité en pages 6, 9, 20 et 23)
- [25] C. GOUDENHOFT, A. BOURMAUD et C. BALEY, « Flax (*Linum usitatissimum* L.) fibers for composite reinforcement : Exploring the link between plant growth, cell walls development, and fiber properties », *Frontiers in Plant Science*, vol. 10, avril 2019. (Cité en page 6)

- [26] AGENCE FRANCAISE DE NORMALISATION, « NF T25-501-1 - Fibres de renfort - Fibres de lin pour composites plastiques - Partie 1 : terminologie et caractérisation des fibres de lin », rap. tech., Agence Francaise de Normalisation, 2015. (Cité en page 7)
- [27] C. BALEY, « Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 33, no. 7, p. 939–948, 2002. (Cité en pages 7, 8, 12 et 107)
- [28] C. BALEY, « Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites », *Techniques de l'ingénieur, Matériaux, Plastiques et composites*, 2013. (Cité en pages 7, 8, 9, 11, 19, 23, 111 et 112)
- [29] N. JAUHARI, R. MISHRA et H. THAKUR, « Natural fibre reinforced composite laminates : A review », *Materials Today : Proceedings*, vol. 2, no. 4, p. 2868–2877, 2015. 4th International Conference on Materials Processing and Characterization. (Cité en page 7)
- [30] A. BOURMAUD, M. GIBAUD, A. LEFEUVRE, C. MORVAN et C. BALEY, « Influence of the morphology characters of the stem on the lodging resistance of marylin flax », *Industrial Crops and Products*, vol. 66, p. 27–37, avril 2015. (Cité en page 7)
- [31] C. BALEY, M. GOMINA, J. BREARD, A. BOURMAUD, S. DRAPIER, M. FERREIRA, A. L. DUIGOU, P. J. LIOTIER, P. OUAGNE, D. SOULAT et P. DAVIES, « Specific features of flax fibres used to manufacture composite materials », *International Journal of Material Forming*, vol. 12, p. 1023–1052, déc. 2018. (Cité en pages 8 et 96)
- [32] N. DISSANAYAKE et J. SUMMERSCALES, « Life cycle assessment for natural fiber composites », in *Green Composites from Natural Resources*, p. 157–186, CRC Press, oct. 2013. (Cité en page 8)
- [33] G. CICALA, G. CRISTALDI, G. RECCA et A. LATTERI, « Composites based on natural fibre fabrics », in *Woven fabric engineering*, InTech, 2010. (Cité en pages 9, 12 et 20)
- [34] J. SUMMERSCALES, N. P. J. DISSANAYAKE, A. S. VIRK et W. HALL, « A review of bast fibres and their composites. part 1 - fibres as reinforcements », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 10, p. 1329–1335, 2010. (Cité en page 9)
- [35] D. U. SHAH, « Natural fibre composites : Comprehensive ashby-type materials selection charts », *Materials & Design*, vol. 62, p. 21–31, 2014. (Cité en pages 9 et 12)
- [36] A. LEFEUVRE, A. BOURMAUD, C. MORVAN et C. BALEY, « Tensile properties of elementary fibres of flax and glass : Analysis of reproducibility and scattering », *Materials Letters*, vol. 130, p. 289–291, sept. 2014. (Cité en pages 9 et 11)
- [37] P. HAMELIN, « Polymeres renforces de fibres (FRP) identification et champs d'application », *Techniques de l'ingénieur, Construction et travaux publics, Les superstructures du bâtiment*, 2010. (Cité en pages 9 et 16)
- [38] CONFÉDÉRATION EUROPÉENNE DU LIN ET DU CHANVRE, « Impregnated fibre bundle test (ifbt) - methodology of uses », 2015. (Cité en pages 11 et 102)
- [39] F. BENSADOUN, I. VERPOEST, J. BAETS, J. MÜSSIG, N. GRAUPNER, P. DAVIES, M. GOMINA, A. KERVOELEN et C. BALEY, « Impregnated fibre bundle test for natural fibres used in composites », *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 36, no. 13, p. 942–957, 2017. (Cité en pages 11 et 112)
- [40] N. MARTIN, P. DAVIES et C. BALEY, « Comparison of the properties of scutched flax and flax tow for composite material reinforcement », *Industrial Crops and Products*, vol. 61, p. 284–292, nov. 2014. (Cité en pages 11 et 21)

- [41] A. BARBULÉE et M. GOMINA, « Variability of the mechanical properties among flax fiber bundles and strands », *Procedia Engineering*, vol. 200, p. 487–493, 2017. 3rd International Conference on Natural Fibers : Advanced Materials for a Greener World, ICNF 2017, 21-23 June 2017, Braga, Portugal. (Cité en pages 11 et 92)
- [42] A. BARBULÉE, J.-P. JERNOT, J. BREARD et M. GOMINA, « Damage to flax fibre slivers under monotonic uniaxial tensile loading », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 64, p. 107–114, 2014. (Cité en page 11)
- [43] H. MA, Y. LI et D. WANG, « Investigations of fiber twist on the mechanical properties of sisal fiber yarns and their composites », *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 33, p. 687–696, jan. 2014. (Cité en pages 11, 22 et 105)
- [44] D. U. SHAH, P. J. SCHUBEL et M. J. CLIFFORD, « Modelling the effect of yarn twist on the tensile strength of unidirectional plant fibre yarn composites », *Journal of Composite Materials*, vol. 47, p. 425–436, mars 2012. (Cité en pages 11, 26, 27, 89, 97, 111 et 112)
- [45] S. GOUTIANOS et T. PEIJS, « The optimisation of flax fibre yarns for the development of high-performance natural fibre bio-composites », *Advances Composites Letters*, vol. 47, p. 425–436, 2003. (Cité en pages 11 et 96)
- [46] F. OMRANI, P. WANG, D. SOULAT et M. FERREIRA, « Mechanical properties of flax-fibre-reinforced preforms and composites : Influence of the type of yarns on multi-scale characterisations », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 93, p. 72–81, 2017. (Cité en pages 12, 23 et 89)
- [47] P. A. FOWLER, J. M. HUGHES et R. M. ELIAS, « Biocomposites : technology, environmental credentials and market forces », *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 86, no. 12, p. 1781–1789, 2006. (Cité en pages 12, 13 et 24)
- [48] A. ALI, K. SHAKER, Y. NAWAB, M. JABBAR, T. HUSSAIN, J. MILITKY et V. BAHETI, « Hydrophobic treatment of natural fibers and their composites - A review », *Journal of Industrial Textiles*, vol. 47, p. 2153–2183, juin 2016. (Cité en page 12)
- [49] S. RANA et R. FANGUEIRO, « 1 - Advanced composites in aerospace engineering », in *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering*, p. 1–15, Woodhead Publishing, 2016. (Cité en pages 13 et 33)
- [50] F. BENSADOUN, *In-Service behaviour of flax fibre reinforced composites for high performance applications*. Thèse doctorat, 2016. Ku Leuven. (Cité en page 13)
- [51] F. BOUSSU, I. CRISTIAN et S. NAUMAN, « General definition of 3D warp interlock fabric architecture », *Composites Part B : Engineering*, vol. 81, p. 171–188, 2015. (Cité en pages 13, 28, 29, 39 et 86)
- [52] D. DAS et B. POURDEYHIMI, *Composite Nonwoven Materials : Structure, Properties and Applications*. WOODHEAD PUB, 2014. (Cité en page 14)
- [53] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, « NF EN ISO 9092 - Textiles - Nontissés - Définition », 1988. (Cité en page 14)
- [54] D. XUE et H. HU, « Mechanical properties of biaxial weft-knitted flax composites », *Materials and Design*, vol. 46, p. 264–269, 2013. (Cité en pages 15 et 20)
- [55] K. BILISIK, « Three-dimensional braiding for composites : A review », *Textile Research Journal*, vol. 83, p. 1414–1436, juil. 2012. (Cité en pages 15 et 28)

- [56] Y. KYOSEV, *Advances in Braiding Technology*. Elsevier Science, 2016. (Cité en pages 15 et 28)
- [57] J. HU, « 1 - Introduction to three-dimensional fibrous assemblies », in *3-D Fibrous Assemblies* (J. HU, éd.), Woodhead Publishing Series in Textiles, p. 1–32, Woodhead Publishing, 2008. (Cité en page 15)
- [58] M. BIRON, « Propriétés des thermoplastiques - Tableau comparatifs », *Techniques de l'ingénieur, Matériaux, Plastiques et composites*, 2014. (Cité en pages 16 et 17)
- [59] M. BIRON, « Propriétés des thermodurcissables - Tableau comparatifs », *Techniques de l'ingénieur, Matériaux, Plastiques et composites*, 2001. (Cité en page 17)
- [60] D. RAY et S. SAIN, « Thermosetting bioresins as matrix for biocomposites », in *Biocomposites for High-Performance Applications*, p. 57–80, Elsevier, 2017. (Cité en page 17)
- [61] D. NOTTA-CUVIER, A. BOUZOUITA, J. ODENT, R. DELILLE, M. MURARIU, F. LAURO, J.-M. RAQUEZ, G. HAUGAOU et P. DUBOIS, « L'acide polylactique (PLA) pour des applications automobiles », *Techniques de l'ingénieur, Innovation, Innovations technologiques*, 2018. (Cité en pages 17 et 125)
- [62] D. ÅKESSON, M. SKRIFVARS et P. WALKENSTRÖM, « Preparation of thermoset composites from natural fibres and acrylate modified soybean oil resins », *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 114, p. 2502–2508, nov. 2009. (Cité en pages 17, 18, 21 et 23)
- [63] M. A. MOSIEWICKI et M. I. ARANGUREN, « A short review on novel biocomposites based on plant oil precursors », *European Polymer Journal*, vol. 49, no. 6, p. 1243–1256, 2013. (Cité en page 17)
- [64] R. TEMMINK, B. BAGHAEI et M. SKRIFVARS, « Development of biocomposites from denim waste and thermoset bio-resins for structural applications », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 106, p. 59–69, 2018. (Cité en pages 17 et 23)
- [65] G. I. WILLIAMS et R. P. WOOL, « Composites from natural fibers and soy oil resins », *Applied Composite Materials*, vol. 7, no. 5, p. 421–432, 2000. (Cité en pages 18 et 23)
- [66] H. E. HOYDONCKY et W. M. VAN RHINJN, « Application of novel furan resins in composites », in *JEC Composites Magazine*, vol. 38, 2008. (Cité en page 18)
- [67] G. LEBRUN, A. ADNOT et E. LORANGER, « Influence des paramètres d'impregnation à la nanocellulose sur les propriétés de traction à sec d'un renfort unidirectionnel de lin », in *Journées Nationales sur les Composites 2019*, 2019. (Cité en page 18)
- [68] J. HU, « 4 - Multilayer woven fabrics », in *3D Fibrous Assemblies*, p. 104–130, Elsevier, 2008. (Cité en pages 19 et 32)
- [69] M. RAMESH, « Flax (*linum usitatissimum* l.) fibre reinforced polymer composite materials : A review on preparation, properties and prospects », *Progress in Materials Science*, vol. 102, p. 109–166, mai 2019. (Cité en page 19)
- [70] S. ADANUR et C. A. TAM, « On-machine interlocking of 3D laminate structures for composites », *Composites Part B : Engineering*, vol. 28, no. 5, p. 497–506, 1997. (Cité en pages 19, 31, 34 et 35)
- [71] GREENBOATS, « FLAX27 | Sustainable Composites ». (Cité en pages 20, 23 et 24)
- [72] L. PIL, F. BENSADOUN, J. PARISET et I. VERPOEST, « Why are designers fascinated by flax and hemp fibre composites ? », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 83, p. 193–205, 2016. (Cité en pages 20, 24 et 25)

- [73] A. LE DUIGOU, « Fibres végétales, bioinspiration et structures déployables », in *Journées Nationales sur les Composites 2019*, 2019. (Cité en page 20)
- [74] P. GEORGIPOULOS, A. CHRISTOPOULOS, S. KOUTSOUMPIS et E. KONTOU, « The effect of surface treatment on the performance of flax/biodegradable composites », *Composites Part B Engineering*, vol. 106, p. 88–98, 2016. (Cité en pages 20 et 21)
- [75] A. ALAVUDEEN, N. RAJINI, S. KARTHIKEYAN, M. THIRUCHITRAMBALAM et N. VENKATESHWAREN, « Mechanical properties of banana/kenaf fiber-reinforced hybrid polyester composites : Effect of woven fabric and random orientation », *Materials & Design*, vol. 66, p. 246–257, fév. 2015. (Cité en pages 20 et 22)
- [76] A. STAMBOULIS, C. A. BAILLIE et T. PEIJS, « Effects of environmental conditions on mechanical and physical properties of flax fibers », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 32, no. 8, p. 1105–1115, 2001. (Cité en page 21)
- [77] F. BENSADOUN, D. DEPUYDT, J. BAETS, I. VERPOEST et A. W. VAN VUURE, « Low velocity impact properties of flax composites », *Composite Structures*, vol. 176, p. 933–944, 2017. (Cité en page 21)
- [78] P. WAMBUA, J. IVENS et I. VERPOEST, « Natural fibres : can they replace glass in fibre reinforced plastics ? », *Composites Science and Technology*, vol. 63, no. 9, p. 1259–1264, 2003. (Cité en page 21)
- [79] A. ATHIJAYAMANI, M. THIRUCHITRAMBALAM, U. NATARAJAN et B. PAZHANIVEL, « Effect of moisture absorption on the mechanical properties of randomly oriented natural fibers/polyester hybrid composite », *Materials Science and Engineering : A*, vol. 517, no. 1-2, p. 344–353, 2009. (Cité en pages 21 et 26)
- [80] H. ALAMRI et I. M. LOW, « Mechanical properties and water absorption behaviour of recycled cellulose fibre reinforced epoxy composites », *Polymer Testing*, vol. 31, no. 5, p. 620–628, 2012. (Cité en pages 22, 23 et 93)
- [81] M. PÉRON, A. CÉLINO, F. JACQUEMIN et A. L. DUIGOU, « Hygroscopic stresses in asymmetric biocomposite laminates submitted to various relative humidity conditions », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 134, p. 105896, juil. 2020. (Cité en pages 22, 93 et 99)
- [82] M. BERGES, R. LÉGER, V. PLACET, V. PERSON, S. CORN, X. GABRION, J. ROUSSEAU, E. RAMASSO, P. IENNY et S. FONTAINE, « Influence of moisture uptake on the static, cyclic and dynamic behaviour of unidirectional flax fibre-reinforced epoxy laminates », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 88, p. 165–177, sept. 2016. (Cité en page 22)
- [83] S. D. MALINGAM, N. L. FENG, A. A. KAMAROLZAMAN, H. T. YI et A. F. A. GHANI, « Mechanical characterisation of woven kenaf fabric as reinforcement for composite materials », *Journal of Natural Fibers*, p. 1–11, juil. 2019. (Cité en page 22)
- [84] J. M. F. A. BLANCHARD, A. J. SOBEY et J. I. R. BLAKE, « Multi-scale investigation into the mechanical behaviour of flax in yarn, cloth and laminate form », *Composites Part B : Engineering*, vol. 84, p. 228–235, jan. 2016. (Cité en page 22)
- [85] F. DUC, P. E. BOURBAN, C. J. G. PLUMMER et J.-A. E. MÅNSON, « Damping of thermoset and thermoplastic flax fibre composites », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 64, p. 115–123, 2014. (Cité en page 22)

- [86] V. ARUMUGAM, R. MISHRA, V. BALAJI, R. SUBRAMANIAM, H. JAMSHAD et J. MILITKY, « Bio-composites reinforced with flax, jute and glass fabrics : Comparative study of static, dynamic-mechanical and thermal properties », in *3D Fabrics & Their Applications*, 2016. (Cité en page 22)
- [87] C. BALEY, M. LAN, A. BOURMAUD et A. L. DUIGOU, « Compressive and tensile behaviour of unidirectional composites reinforced by natural fibres : Influence of fibres (flax and jute), matrix and fibre volume fraction », *Materials Today Communications*, vol. 16, p. 300–306, sept. 2018. (Cité en page 23)
- [88] P. BOISSE, N. HAMILA, E. GUZMAN-MALDONADO, A. MADEO, G. HIVET et F. DELL’ISOLA, « The bias-extension test for the analysis of in-plane shear properties of textile composite reinforcements and preregs : a review », *International Journal of Material Forming*, vol. 10, no. 4, p. 473–492, 2016. (Cité en page 23)
- [89] J. CAO, R. AKKERMAN, P. BOISSE, J. CHEN, H. S. CHENG, E. F. de GRAAF, J. L. GORCZYCA, P. HARRISON, G. HIVET, J. LAUNAY, W. LEE, L. LIU, S. V. LOMOV, A. LONG, E. de LUYCKER, F. MORESTIN, J. PADVOISKIS, X. Q. PENG, J. SHERWOOD, T. STOILOVA, X. M. TAO, I. VERPOEST, A. WILLEMS, J. WIGGERS, T. X. YU et B. ZHU, « Characterization of mechanical behavior of woven fabrics : Experimental methods and benchmark results », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 39, no. 6, p. 1037–1053, 2008. (Cité en pages)
- [90] M. A. SALEH, M. H. AL HARON, A. A. SALEH et M. FARAG, « Fatigue behavior and life prediction of biodegradable composites of starch reinforced with date palm fibers », *International Journal of Fatigue*, vol. 103, p. 216–222, 2017. (Cité en page 23)
- [91] G. PARK et H. PARK, « Structural design and test of automobile bonnet with natural flax composite through impact damage analysis », *Composite Structures*, vol. 184, p. 800–806, jan. 2018. (Cité en page 23)
- [92] L. NUEZ, A. BOURMAUD, C. MAYER-LAIGLE, J. BEAUGRAND, S. H. A. H. DARSHIL, P. D’ARRAS et C. BALEY, « Valorisation des anas de lin comme renforts de biocomposites », in *Journées Nationales sur les Composites 2019*, 2019. (Cité en page 23)
- [93] SSUCHY, « Ssuchy - Application fields », 2018. (Cité en page 23)
- [94] S. CASTEGNARO, C. GOMIERO, C. BATTISTI, M. POLI, M. BASILE, P. BARUCCO, U. PIZZARELLO, M. QUARESIMIN et A. LAZZARETTO, « A bio-composite racing sailboat : Materials selection, design, manufacturing and sailing », *Ocean Engineering*, vol. 133, p. 142–150, mars 2017. (Cité en page 23)
- [95] A. DAMODARAN, H. MANSOUR, L. LESSARD, G. SCAVONE et A. SURESH BABU, « Application of composite materials to the chenda, an indian percussion instrument », *Applied Acoustics*, vol. 88, p. 1–5, 2015. (Cité en page 24)
- [96] BLACK BIRD GUITAR, « Bio-prepreg guitar : The look, feel and acoustic quality of wood », 2019. (Cité en page 24)
- [97] D. MATHIJSEN, « The renaissance of flax fibers », *Reinforced Plastics*, vol. 62, p. 138–147, mai 2018. (Cité en page 24)
- [98] S. PHILLIPS et L. LESSARD, « Application of natural fiber composites to musical instrument top plates », *Journal of Composite Materials*, vol. 46, no. 2, p. 145–154, 2011. (Cité en page 24)

- [99] « La technologie greenK », 2010. (Cité en page 25)
- [100] A. THUAULT, J. BAZIN, S. EVE, J. BRÉARD et M. GOMINA, « Numerical study of the influence of structural and mechanical parameters on the tensile mechanical behaviour of flax fibres », *Journal of Industrial Textiles*, vol. 44, p. 22–39, mars 2013. (Cité en page 25)
- [101] A. KELLY et W. R. TYSON, « Tensile properties of fibre-reinforced metals : Copper/tungsten and copper/molybdenum », *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 13, p. 329–350, déc. 1965. (Cité en page 25)
- [102] B. MADSEN, A. THYGESEN et H. LILHOLT, « Plant fibre composites - porosity and stiffness », *Composites Science and Technology*, vol. 69, p. 1057–1069, juin 2009. (Cité en pages 25, 27, 106 et 111)
- [103] Y. LI, Y.-W. MAI et L. YE, « Sisal fibre and its composites : a review of recent developments », *Composites Science and Technology*, vol. 60, p. 2037–2055, août 2000. (Cité en page 26)
- [104] M. G. A. EFENDY et K. L. PICKERING, « Comparison of strength and young modulus of aligned discontinuous fibre PLA composites obtained experimentally and from theoretical prediction models », *Composite Structures*, vol. 208, p. 566–573, oct. 2018. (Cité en pages 26 et 27)
- [105] C. FUCHS, D. BHATTACHARYYA, K. FRIEDRICH et S. FAKIROV, « Application of halpin-tsai equation to microfibril reinforced polypropylene/poly(ethylene terephthalate) composites », *Composite Interfaces*, vol. 13, p. 331–344, jan. 2006. (Cité en page 26)
- [106] S.-Y. FU, B. LAUKE et Y.-W. MAI, *Science and Engineering of Short Fibre-Reinforced Polymer Composites*. Elsevier Science & Technology, 2019. (Cité en page 26)
- [107] M. N. SALEH, G. LUBINEAU, P. POTLURI, P. J. WITHERS et C. SOUTIS, « Micro-mechanics based damage mechanics for 3D orthogonal woven composites : Experiment and numerical modelling », *Composite Structures*, vol. 156, p. 115–124, nov. 2016. (Cité en page 27)
- [108] A. D'AMORE, G. CAPRINO, P. STUPAK, J. ZHOU et L. NICOLAIS, « Effect of stress ratio on the flexural fatigue behaviour of continuous strand mat reinforced plastics », *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 5, p. 1–8, jan. 1996. (Cité en page 27)
- [109] I. GNABA, X. LEGRAND, P. WANG et D. SOULAT, « Through-the-thickness reinforcement for composite structures : A review », *Journal of Industrial Textiles*, vol. 49, p. 71–96, avril 2018. (Cité en page 28)
- [110] A. P. MOURITZ, « Review of z-pinned composite laminates », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, p. 2383–2397, déc. 2007. (Cité en page 28)
- [111] F. BOUSSU, F. VEYET et N. DUMONT, « Développement d'une machine prototype de tissage pour la réalisation d'échantillons textile 2,5D ». Patent A0807017N, OSEO, Lille, France, 03/11/2008 - 03/05/2009, 2008-2009. (Cité en pages 28, 33, 42 et 58)
- [112] F. BOUSSU et V. BEGUS, « Procédé de fabrication d'un matériau composite, notamment pour la protection balistique, et matériau composite obtenu ». Patent WO2008152337A1, 2008. (Cité en pages)
- [113] E. BOUILLON, F. CHARLEUX, D. COUPE, B. DAMBRINE et J. N. MAHIEU, « Reinforcing fibrous structure for a composite material and a part containing said structure ». Patent US8685868B2, 2006. (Cité en page 28)

-
- [114] H. M. EL-DESSOUKY, A. E. SNAPE, H. TEW, R. J. SCAIFE, D. K. MODI, K. KENDALL et C. MCHUGH, « Design, weaving and manufacture of a large 3D composite structures for automotive applications », in *3D Fabrics & Their Applications*, 2016. (Cité en pages 31, 32, 58 et 85)
- [115] A.-C. CORBIN, « Élaboration et caractérisation de renforts 3D en lin », mathesis, 2017. ENSAIT. (Cité en pages 34, 39, 56, 58 et 127)
- [116] C. HA-MINH, *Comportement mécanique des matériaux tissés soumis à un impact balistique : approches expérimentale, numérique et analytique*. Thèse doctorat, 2011. Université de Lille. (Cité en pages)
- [117] M. LEFEBVRE, *Résistance à l'impact balistique de matériaux composites à renforts Interlocks tissés : application au blindage de véhicules*. Thèse doctorat, 2011. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis. (Cité en pages)
- [118] B. PROVOST, *Etude et réalisation d'une solution de renforts tissés interlock pour la protection de balistique de véhicule*. Thèse doctorat, 2013. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis. (Cité en pages 32 et 36)
- [119] X. CHEN et P. POTIYARAJ, « CAD/CAM of orthogonal and angle-interlock woven structures for industrial applications », *Textile Research Journal*, vol. 69, p. 648–655, sept. 1999. (Cité en page 32)
- [120] LINDAUER DORNIER GMBH, « 3D weaving machine ». (Cité en page 32)
- [121] J. KLINGELE, « Cost-efficient and flexible production of high quality 3D woven fabrics for composites applications », in *3D Fabrics & Their Applications*, 2016. (Cité en page 33)
- [122] STÄUBLI, « Jacquard machine UNIVAL 100 for 3D weaving technical textiles », 2019. (Cité en page 33)
- [123] M. DECRETTE, S. MOURAD, J.-F. OSSELIN et J.-Y. DREAN, « Jacquard UNIVAL 100 parameters study for high-density weaving optimization », *Journal of Industrial Textiles*, vol. 45, no. 6, p. 1603–1618, 2015. (Cité en pages 33 et 86)
- [124] C. BESSETTE, M. DECRETTE, M. TOURLONIAS, J.-F. OSSELIN, F. CHARLEUX, D. COUPÉ et M.-A. BUENO, « In-situ measurement of tension and contact forces for weaving process monitoring : Application to 3D interlock », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 126, p. 105604, nov. 2019. (Cité en pages 33, 35 et 36)
- [125] Z. YING, X. HU, X. CHENG et Z. WU, « Numerical investigation on the effect of tow tension on the geometry of three-dimensional orthogonally woven fabric », *Textile Research Journal*, vol. 89, p. 3779–3791, déc. 2018. (Cité en page 33)
- [126] SAFRAN GROUP, « 3D-woven composite materials : The jacquard loom 2.0 », avril 2017. (Cité en pages 33, 35 et 36)
- [127] E. DE LUYCKER, F. MORESTIN, P. BOISSE et D. MARSAL, « Simulation of 3D interlock composite preforming », *Composite Structures*, vol. 88, no. 4, p. 615–623, 2009. (Cité en page 33)
- [128] M. UMAIR, Y. NAWAB, M. H. MALIK et K. SHAKER, « Development and characterization of three-dimensional woven-shaped preforms and their associated composites », *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 34, p. 2018–2028, oct. 2015. (Cité en pages 33 et 53)

- [129] C. MC HUGH, « The use of recent developments in conventional weaving & shedding technology to create 3D one piece woven carbon preforms », p. 18, 2009. (Cité en page 33)
- [130] B. N. COX, M. S. DADKHAH et W. L. MORRIS, « On the tensile failure of 3D woven composites », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 27, no. 6, p. 447–458, 1996. (Cité en page 34)
- [131] M. DAHALE, G. NEALE, R. LUPICINI, L. CASCONI, C. MCGARRIGLE, J. KELLY, E. ARCHER, E. HARKIN-JONES et A. MCILHAGGER, « Effect of weave parameters on the mechanical properties of 3D woven glass composites », *Composite Structures*, vol. 223, p. 110947, sept. 2019. (Cité en page 35)
- [132] S. DAI, P. R. CUNNINGHAM, S. MARSHALL et C. SILVA, « Influence of fibre architecture on the tensile, compressive and flexural behaviour of 3D woven composites », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 69, p. 195–207, fév. 2015. (Cité en pages)
- [133] M. JABBAR, Y. NAWAB, M. KARAHAN, M. ASHRAF et T. HUSSAIN, « Mechanical response of novel 3D woven flax composites with variation in Z yarn binding », *Journal of Natural Fibers*, p. 1–16, 2018. (Cité en page 35)
- [134] S. KOUTSONAS, « Compaction and bending variability measurements of a novel geometry 3D woven layer to layer interlock composite textile around a 90 curve plate 3.2 mm radius », *Composites Communications*, vol. 5, p. 40–45, sept. 2017. (Cité en pages)
- [135] Y. MAHADIK, K. A. R. BROWN et S. R. HALLETT, « Characterisation of 3D woven composite internal architecture and effect of compaction », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, p. 872–880, juil. 2010. (Cité en pages)
- [136] R. MISHRA, « Drape behavior of 3D woven glass-epoxy composites », *Polymer Composites*, vol. 37, p. 472–480, août 2014. (Cité en pages)
- [137] J. PAZMINO, V. CARVELLI et S. V. LOMOV, « Formability of a non-crimp 3D orthogonal weave e-glass composite reinforcement », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 61, p. 76–83, juin 2014. (Cité en page 34)
- [138] C. REN, A. SIDDIQUE, B. SUN et B. GU, « Differences of transverse impact damages in 3D angle-interlock woven composites between warp and weft directions », *International Journal of Damage Mechanics*, vol. 28, p. 105678951882305, jan. 2019. (Cité en pages)
- [139] B. SUN, B. GU et X. DING, « Compressive behavior of 3-D angle-interlock woven fabric composites at various strain rates », *Polymer Testing*, vol. 24, p. 447–454, juin 2005. (Cité en pages)
- [140] K.-H. TSAI, C.-H. CHIU et T.-H. WU, « Fatigue behavior of 3D multi-layer angle interlock woven composite plates », *Composites Science and Technology*, vol. 60, p. 241–248, fév. 2000. (Cité en pages 34 et 35)
- [141] A. K. BANDARU, Y. SACHAN, A. SUHAIL, R. ALAGIRUSAMY et N. BHATNAGAR, « On the mechanical response of 2D plain woven and 3D angle-interlock fabrics », *Composites Part B Engineering*, vol. 118, p. 135–148, 2017. (Cité en pages 34 et 58)
- [142] F. M. Z. NASRUN, M. F. YAHYA, S. A. GHANI et M. R. AHMAD, « Effect of weft density and yarn crimps towards tensile strength of 3D angle interlock woven fabric », *AIP Conference Proceedings*, 2016. (Cité en pages 34 et 64)

- [143] A.-C. CORBIN, A. KECECI, F. BOUSSU, M. FERREIRA et D. SOULAT, « Engineering design and mechanical property characterisation of 3D warp interlock woven fabrics », *Applied Composite Materials*, vol. 25, p. 811–822, 2018. (Cité en pages 34, 53 et 58)
- [144] M. KASHIF, S. T. A. HAMDANI, Y. NAWAB, M. A. ASGHAR, M. UMAIR et K. SHAKER, « Optimization of 3D woven preform for improved mechanical performance », *Journal of Industrial Textiles*, vol. 48, p. 1206–1227, mars 2018. (Cité en page 34)
- [145] M. KORKMAZ, A. R. LABANIEH, A. OKUR et F. BOUSSU, « An investigation on the mechanical behavior of 3D warp interlock carbon fabrics », in *American Society for Composites 2019*, DEStech Publications, Inc., oct. 2019. (Cité en page 34)
- [146] N. VERNET et F. TROCHU, « Analysis and modeling of 3D interlock fabric compaction behavior », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 80, p. 182–193, 2016. (Cité en page 34)
- [147] C. DUFOUR, P. WANG, F. BOUSSU et D. SOULAT, « Experimental investigation about stamping behaviour of 3D warp interlock composite preforms », *Applied Composite Materials*, 2013. (Cité en page 35)
- [148] C. DUFOUR, F. BOUSSU, P. WANG et D. SOULAT, « Experimental forming studies on thick 3D warp interlock fabrics », in *16th European Conference on Composite Materials, ECCM 2014*, 2014. (Cité en page 35)
- [149] Y. NAWAB, X. LEGRAND et V. KONCAR, « Study of changes in 3D-woven multilayer interlock fabric preforms while forming », *Journal of the Textile Institute*, vol. 103, p. 1273–1279, déc. 2012. (Cité en page 35)
- [150] E. DE LUYCKER, *Simulation et expérimentation en mise en forme de renforts composites 3D interlocks*. Thèse doctorat, 2009. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. (Cité en page 35)
- [151] K. C. WARREN, R. A. LOPEZ-ANIDO et J. GOERING, « Experimental investigation of three-dimensional woven composites », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 73, p. 242–259, juin 2015. (Cité en pages 35 et 36)
- [152] Q. MA, K. WANG, S.-D. WANG, H. LIU, B.-C. JIN, L.-M. JIN et P. MA, « Tensile damage mechanism of 3-D angle-interlock woven composite using acoustic emission events monitoring », *Autex Research Journal*, vol. 18, p. 46–50, mars 2018. (Cité en page 35)
- [153] M. KOMEILI et A. S. MILANI, « The effect of meso-level uncertainties on the mechanical response of woven fabric composites under axial loading », *Computers & Structures*, vol. 90-91, p. 163–171, jan. 2012. (Cité en page 36)
- [154] T. LIU, W. FAN et X. WU, « Comparisons of influence of random defects on the impact compressive behavior of three different textile structural composites », *Materials & Design*, vol. 181, p. 108073, nov. 2019. (Cité en page 36)
- [155] J. HU, « 2 - Applications of three-dimensional textiles », in *3D Fibrous Assemblies* (J. HU, éd.), Woodhead Publishing Series in Textiles, p. 33–69, 2008. (Cité en page 36)
- [156] C. DUFOUR, P. PINEAU, P. WANG, D. SOULAT et F. BOUSSU, « 10 - Three-dimensional textiles in the automotive industry », in *Advances in 3D Textiles*, Woodhead Publishing Series in Textiles, p. 265–291, Woodhead Publishing, 2015. (Cité en page 36)
- [157] ADVANCED MANUFACTURING RESEARCH CENTRE - UNIVERSITY OF SHEFFIELD, « Weaving a way to fusion energy », 2020. (Cité en page 36)

- [158] C. HA-MINH, B. PROVOST, F. BOUSSU, D. COUTELLIER et A. IMAD, « Vers la géométrie réelle d'un tissu 3D interlock sur la précision de la simulation numérique à l'impact », *in 11e Colloque National en Calcul des Structures*, 2013. (Cité en page 36)
- [159] C. HA-MINH, A. IMAD, F. BOUSSU et T. KANIT, « Experimental and numerical investigation of a 3D woven fabric subjected to a ballistic impact », *International Journal of Impact Engineering*, vol. 88, p. 91–101, 2016. (Cité en page 36)
- [160] M. A. ABTEW, F. BOUSSU, P. BRUNIAUX, C. LOGHIN, I. CRISTIAN, Y. CHEN et L. WANG, « Influences of fabric density on mechanical and moulding behaviours of 3D warp interlock para-aramid fabrics for soft body armour application », *Composite Structures*, vol. 204, p. 402–418, nov. 2018. (Cité en page 36)
- [161] J. POURTIER, *Etude de la déformabilité de Non-Crimp Fabrics et optimisation du procédé de préformage*. Thèse doctorat, 2019. Université de Lille. (Cité en page 46)
- [162] SICOMIN, « SR8200/SD720x - Systèmes époxydes de stratification », 2014. (Cité en page 46)
- [163] Q. T. NGUYEN, *Analyse expérimentale et numérique de la compaction des renforts fibreux. Application pour la perméabilité*. Thèse doctorat, 2011. Institut national des sciences appliquées de Lyon. (Cité en page 47)
- [164] A.-C. CORBIN, F. BOUSSU, M. FERREIRA et D. SOULAT, « Influence of 3D warp interlock fabrics parameters made with flax rovings on their final mechanical behaviour », *Journal of Industrial Textiles*, vol. 49, p. 1123–1144, nov. 2018. (Cité en page 53)
- [165] M. LI, P. WANG, F. BOUSSU et D. SOULAT, « A review on the mechanical performance of three-dimensional warp interlock woven fabrics as reinforcement in composites », *Journal of Industrial Textiles*, p. 152808371989438, jan. 2020. (Cité en pages)
- [166] H. LANSIAUX, D. SOULAT, F. BOUSSU et A. R. LABANIEH, « Development and multiscale characterization of 3d warp interlock flax fabrics with different woven architectures for composite applications », *Fibers*, vol. 8, p. 15, feb 2020. (Cité en page 53)
- [167] M. DECRETTE, *Tissage Jacquard : étude de paramètres et optimisation du tissage 3D haute densité*. Thèse doctorat, 2014. Université de Haute Alsace. (Cité en page 86)
- [168] A.-C. CORBIN, D. SOULAT, M. FERREIRA, A.-R. LABANIEH, X. GABRION, P. MALÉCOT et V. PLACET, « Towards hemp fabrics for high-performance composites : Influence of weave pattern and features », *Composites Part B : Engineering*, vol. 181, p. 107582, jan. 2020. (Cité en page 89)
- [169] A.-C. CORBIN, D. SOULAT, M. FERREIRA et A.-R. LABANIEH, « Influence of process parameters on properties of hemp woven reinforcements for composite applications : Mechanical properties, bias-extension tests and fabric forming », *Journal of Natural Fibers*, p. 1–13, mai 2020. (Cité en page 89)
- [170] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, « NF ISO 16549 - textiles - irrégularité des fils textiles - méthode capacitive », 2005. (Cité en page 90)
- [171] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, « NF ISO 2061 - textiles - détermination de la torsion des fils - méthode par comptage direct », 2005. (Cité en page 92)
- [172] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, « NF ISO 2062 - textiles - fils sur enroulements - détermination de la force de rupture et de l'allongement à la rupture des fils individuels à l'aide d'un appareil d'essai à vitesse constante d'allongement », 2005. (Cité en page 92)

- [173] A. BOURMAUD, C. MORVAN, A. BOUALI, V. PLACET, P. PERRÉ et C. BALEY, « Relationships between micro-fibrillar angle, mechanical properties and biochemical composition of flax fibers », *Industrial Crops and Products*, vol. 44, p. 343–351, jan. 2013. (Cité en page 106)
- [174] N. PAN, « Development of a constitutive theory for short fiber yarns : Mechanics of staple yarn without slippage effect », *Textile Research Journal*, vol. 62, p. 749–765, déc. 1992. (Cité en page 112)
- [175] ARKEMA, « Elium 180 technical datasheet », 2015. (Cité en page 113)
- [176] H. M. EL-DESSOUKY et M. N. SALEH, « 3D woven composites : From weaving to manufacturing », in *Recent Developments in the Field of Carbon Fibers*, InTech, juil. 2018. (Cité en page 118)
- [177] H. HOTELLING, « Analysis of a complex of statistical variables into principal components », *Journal of Educational Psychology*, vol. 24, no. 6, p. 417–441, 1933. (Cité en page 131)
- [178] P. BESSE et A. BACCINI, « Analyse des données ou statistique exploratoire multidimensionnelle », *Techniques de l'Ingenieur, Sciences fondamentales, Mathématiques*, 2011. (Cité en page 132)
- [179] C. A. NUNES, M. P. FREITAS, A. C. M. PINHEIRO et S. C. BASTOS, « Chemoface : a novel free user-friendly interface for chemometrics », *Journal of the Brazilian Chemical Society*, vol. 23, p. 2003–2010, nov. 2012. (Cité en page 132)
- [180] C. A. NUNES, « Chemoface - User guide », 2020. (Cité en page 132)
- [181] S. WOLD, M. SJÖSTRÖM et L. ERIKSSON, « PLS-regression : a basic tool of chemometrics », *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 58, p. 109–130, oct. 2001. (Cité en page 132)
- [182] S. RÄNNAR, F. LINDGREN, P. GELADI et S. WOLD, « A PLS kernel algorithm for data sets with many variables and fewer objects. part 1 : Theory and algorithm », *Journal of Chemometrics*, vol. 8, p. 111–125, mars 1994. (Cité en pages)
- [183] F. LINDGREN, P. GELADI et S. WOLD, « The kernel algorithm for PLS », *Journal of Chemometrics*, vol. 7, p. 45–59, jan. 1993. (Cité en page 132)
- [184] M. BEHZADIAN, R. B. KAZEMZADEH, A. ALBADVI et M. AGHDASI, « PROMETHEE : A comprehensive literature review on methodologies and applications », *European Journal of Operational Research*, vol. 200, p. 198–215, jan. 2010. (Cité en page 132)
- [185] J. P. BRANS et P. VINCKE, « Note - A preference ranking organisation method », *Management Science*, vol. 31, p. 647–656, juin 1985. (Cité en page 132)
- [186] J. P. BRANS, P. VINCKE et B. MARESCHAL, « How to select and how to rank projects : The promethee method », *European Journal of Operational Research*, vol. 24, p. 228–238, fév. 1986. (Cité en page 132)

Index

A

Absorption, 93
Analyse en composantes principales, 131, 133
Analyse infrarouge, 90, 93
Analyse thermogravimétrique, 90, 94, 126
Angle microfibrillaire, 7
Attachage, 41

C

Calorimétrie différentielle à balayage, 90, 126
Carbone, 9
Cellulose, 9
Chanvre, 9
Charpy, 115, 124
Classement, 132, 139, 142
Coir, 9
Coton, 9

D

Densité
Fibre, 9, 102
Tissu, 44, 50, 61, 71, 78
Diffusion
Fil, 93, 98

E

Embuage, 44, 50, 62, 72, 79
Épaisseur, 45, 51, 63, 72, 80

F

Fibres libériennes, 9
Filature, 8
Flexion
Composites, 114, 122
Tissu, 45, 52, 73, 81

I

IFBT, 11, 102
Impact, 115, 124

J

Jute, 9

L

Lin, 5
Lincore, 39
Loi de Fick, 93
Loi des mélanges, 25, 106

M

Masse surfacique, 45, 51, 63, 72, 80
Matériaux composites, 12
Modèle de Cox-Kernchel, 26
Modèle de Halpin-Tsai, 26
Modèle de Hirsch, 26
Modèle de Madsen, 26, 107

N

NCF, 14
Non-tissé, 14
Nouage, 42

O

Ortie, 9
Ourdissage, 40, 49, 59

P

Packing factor, 109, 112
Pilosité, 90, 95
Piquage, 41
Point de liage, 49, 54, 83
Polymère
Biosourcé, 17
PLA, 17, 125
Thermodurcissable, 16
Thermoplastique, 16
Prométhée II, 132, 139, 142

R

Ramie, 9

Régression des moindres carrés partiels, 132,
135, 141, 143
Régularité, 90, 95
Rentrage, 41
Retrait, 44, 50, 62, 72, 79
Rouissage, 7

S

Sisal, 9

T

Teillage, 8
Température
 Dégradation, de, 21, 126
Ténacité, 39, 93
Tissage
 2D, 28
 3D interlock chaîne, 28, 38, 85
 Jacquard, 41
Titre, 91, 95
Torsion, 91
Traction
 Composites, 114, 118
 Fil, 92, 96
 Tissu, 46, 53, 64, 74, 81
Tressage, 15
Tricot, 14

U

Unidirectionnel, 14

V

Verre, 9

Listes des conférences et publications

Identifiant chercheur

ORCID iD <https://orcid.org/0000-0002-8594-9877>

Research Gate https://www.researchgate.net/profile/Henri_Lansiaux

IdHAL [henri-lansiaux](https://www.idhal.fr/henri-lansiaux)

Publications scientifiques

- H. LANSIAUX, D. SOULAT, F. BOUSSU, AND A. R. LABANIEH, « Manufacture and characterization of 3D warp interlock fabric made of flax roving », in **IOP Conference Series : Materials Science and Engineering** , 2018, vol. 406, p. 12040. DOI : [10.1088/1757-899x/406/1/012040](https://doi.org/10.1088/1757-899x/406/1/012040)
- H. LANSIAUX, A.-C. CORBIN, D. SOULAT, B. FRANÇOIS, M. FERREIRA, et A. R. LABANIEH, « Identification du comportement mécanique de tissu 3D interlock chaîne à base de mèches de lin », **Revue des Composites et des Matériaux Avancés** , vol. 29, no. 1, pp. 73 - 81, Feb. 2019. DOI : [10.18280/rcma.290505](https://doi.org/10.18280/rcma.290505)
- H. LANSIAUX, A.R. LABANIEH, D. SOULAT, F. BOUSSU, « Flax roving twisting preparation for weaving and effect of the weft layers number on the physical and mechanical properties of 3D interlock flax fabric », **SN Applied Sciences**, 249, 2020. DOI : [10.1007/s42452-020-2047-2](https://doi.org/10.1007/s42452-020-2047-2).
- H. LANSIAUX, A.R. LABANIEH, D. SOULAT, F. BOUSSU, « Development and multiscale characterization of 3D warp interlock flax fabrics with different woven architectures for composite applications », **Fibers**, 2020. DOI : <https://doi.org/10.3390/fib8020015>

Conférence internationales

- H. LANSIAUX, D. SOULAT, F. BOUSSU and A. R. LABANIEH, « *Manufacture and characterization of 3D warp interlock fabric made of flax roving* », **TexComp-13**, 17-19 Septembre 2018, Milan, Italie.
- H. LANSIAUX, D. SOULAT, F. BOUSSU and A. R. LABANIEH, « *Influence of the number of layers on mechanical properties of 3D warp interlock fabrics made with flax roving* », **AUTEX 2019**, 11-15 Juin 2019, Gand, Belgique
- H. LANSIAUX, D. SOULAT, F. BOUSSU and A. R. LABANIEH, « *Weavability of flax fibre for 3D warp interlock preform : Effect of the weft layers number on the physical*

and mechanical properties of the preform », **4th International Conference on Natural Fibers**, 1-3 Juillet 2019, Porto, Portugal

- H. LANSIAUX, D. SOULAT, F. BOUSSU and A. R. LABANIEH, « *Optimization of flax roving for bio-based composites reinforced by 3D warp interlock fabric* », **ASC 34th Technical Conference** 23-25 Septembre 2019, Atlanta, Etats-Unis

Conférences nationales

- H. LANSIAUX, A.-C. CORBIN, D. SOULAT, F. BOUSSU, M. FERREIRA, et A. R. LABANIEH, « *Identification du comportement mécanique de tissu 3D interlock chaîne à base de mèches de lin* », **Journées Jeunes Chercheurs Composites Bio-sourcés** 15 et 16 mars 2018, ENIT, Tarbes.
- H. LANSIAUX, D. SOULAT, F. BOUSSU et A. R. LABANIEH, « *Influence du nombre de couches sur les propriétés mécaniques de tissus 3D interlock chaîne en lin* », **Journées Nationales des Composites 21** 1-3 Juillet 2019, Bordeaux.
- H. LANSIAUX, D. SOULAT, F. BOUSSU et A. R. LABANIEH, « *Caractérisation mécanique de tissus 3D interlock chaîne en lin à différents nombres de couches* », **Congrès Français de Mécanique** 26-30 Août 2019, Brest.

Salons internationaux

- H. LANSIAUX, A.-C. CORBIN, D. SOULAT, F. BOUSSU, M. FERREIRA, and A. R. LABANIEH, « *Characterization of the mechanical behaviour of 3D-warp interlock from flax roving* », Salon **JEC World 2018** Paris.
- H. LANSIAUX, D. SOULAT, F. BOUSSU and A. R. LABANIEH, « *Influence of the number of layers on mechanical properties of flax 3D warp interlock fabric* », Salon **JEC World 2019** Paris.
- H. LANSIAUX, D. SOULAT, F. BOUSSU and A. R. LABANIEH, « *Influence of the number of layers on mechanical properties of flax 3D warp interlock fabric* », **Techtextil 2019** Francfort.

Réunions de consortium

Ces travaux ont également fait l'objet d'un transfert de connaissances vers les partenaires du projet **FLAX3D** au cours de réunions de consortium. Celles-ci ont eu lieu tout au long du projet :

- 18 janvier 2018 au sein du **TEILLAGE VANDECANDELAÈRE** à Bourguebus ;
- 18 avril 2018 au sein de **SM FRANCE**, à Rochefort sur Mer ;
- 16 janvier 2019 au sein de **l'ENSAIT**, à Roubaix ;
- 18 septembre 2019 au sein de **CMP COMPOSITES**, au Pian Médoc ;
- 12 février 2020, par vidéoconférence depuis **l'ENSAIT** ;

Outils développés

Base de données

Dans le cadre de cette thèse, une base de données a été développée sous MICROSOFT ACCESS pour réaliser un suivi matière. Celle-ci se compose des *tables* suivantes :

Fils Cette table regroupe l'ensemble des résultats de caractérisation des fils, ainsi que des informations pratiques telles que la date de réception et les quantités disponibles.

Tissu Cette table regroupe l'ensemble des résultats de caractérisation textile (tels que les densités, retrait et embuvages, épaisseur, masse surfacique) et mécanique (traction, flexion) des tissus 3D interlock chaîne réalisés lors de ce projet.

Composite Cette table regroupe l'ensemble des résultats de caractérisation métrologique (proportions volumiques, épaisseur, masse surfacique) et mécanique (traction, flexion, impact Charpy) des composites réalisés par les partenaires du projet [FLAX3D](#).

Les informations contenues dans ces différentes tables sont éditées à partir de différents *formulaires*. Les entrées successives d'information permettent de générer plusieurs *états* dont :

Plan de tissage Cet état présente les éléments nécessaires à l'élaboration d'une campagne de tissage, tel que les fils utilisés, les densités souhaitées ainsi que le carton, une représentation 3D de la structure et une coupe trame de chaque architecture à réaliser.

Fiche technique Cet état regroupe l'ensemble des paramètres de tissage et les résultats de caractérisation d'un tissu 3D interlock chaîne réalisé lors de ce projet. Un exemple de fiche technique est donné à la suite de cette section.

Stockage Par entrecroisement des trois tables, cet état permet de connaître en temps réel l'état du stock matière mèche, tissus et composites.

Outre la création de ces états, la base de données permet de visualiser et de comparer rapidement les structures entre-elles. L'exportation de données vers d'autre logiciel d'analyse de données s'en trouve également facilitée.

Macros VBA Excel®

L'objectif de ces macros est d'automatiser les calculs à partir des données brutes et de les présenter de manière raisonnée à l'utilisateur. L'objectif n'est pas d'effectuer l'analyse de données mais de supprimer les étapes fastidieuses de calculs et de mise en forme. Ainsi, après exécution de la macro, l'utilisateur peut simplement supprimer les essais non concluant grâce à une mise en forme conditionnelle et une représentation graphique des résultats. L'ajustement des paramètres statistiques s'effectue automatiquement.

Ces macros font régulièrement appel à des régressions linéaires. Le coefficient de variation des régressions linéaires minimum toléré est $R^2 = 0,995$. Si cette valeur n'est pas atteinte, une coloration rouge de cellule, notifie à l'utilisateur l'incident.

Essai de traction mèche Cette macro permet de calculer les paramètres relatifs à un essai de traction mèche (ie. force et déformation à rupture, pente, perte d'ondulation et travail). A l'aide de la fonction *msoFileDialogFolderPicker*, l'utilisateur sélectionne simplement le dossier dans lequel sont enregistrées les données brutes. Dans un premier temps, la macro génère une liste des fichiers contenus dans le dossier sélectionné via la fonction *Scripting.FileSystemObject*. La force et la déformation à rupture, ainsi que la pente, la perte d'ondulation et le travail sont calculés pour chacun des fichiers du dossier. La feuille de calcul est ensuite copiée dans un classeur de synthèse. Dans ce classeur, et après avoir traité les essais de manière individuelle, la macro génère une feuille de résultats dans laquelle les résultats des différents tests sont compilés et moyennés. L'écart-type et le coefficient de variation sont également calculés.

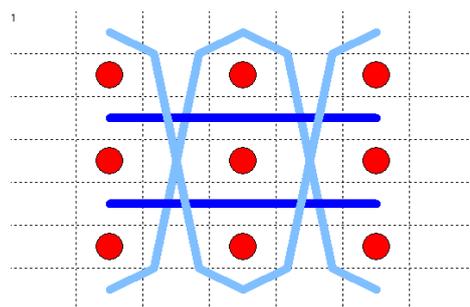
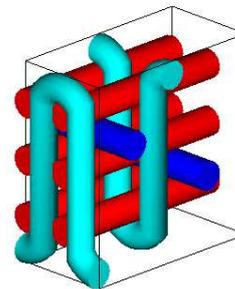
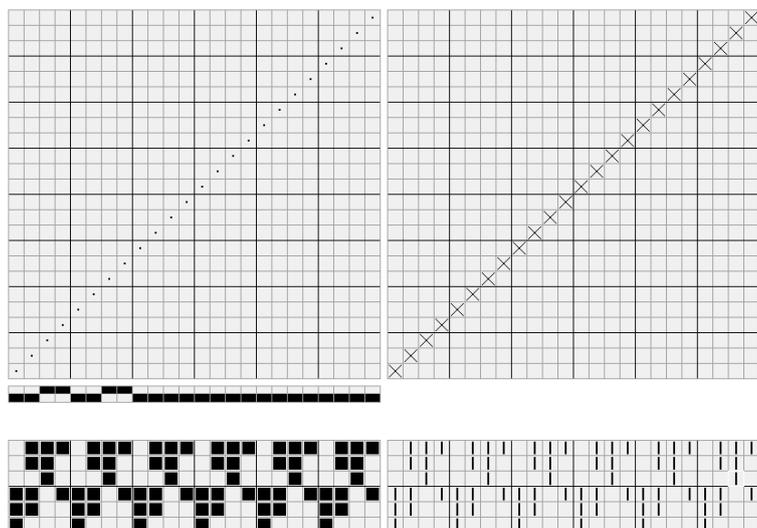
Essai de traction tissu Cette macro permet de calculer les paramètres relatifs à un essai de traction tissu (ie. l'effort maximum, la déformation à rupture, la pente et la perte d'ondulation). Le fonctionnement global de cette macro est comparable à celle de traction mèche. Les principales différences sont causées par le placement différent des données brutes dans les fichiers exportés du banc de traction. Cette macro inclut également un système de détection de second pic (pour les essais de traction en sens chaîne).

Essai de compaction dans l'épaisseur Cette macro permet de calculer les paramètres relatifs à un essai de compaction de tissus dans l'épaisseur (ie. la pente à rupture, le taux volumique de fibre critique, le taux volumique maximum et la pression maximale). La courbe force-déplacement est convertie en courbe taux volumique de fibre en fonction de la pression (cf. figure 2.37). Le fonctionnement global (feuille de résultats et moyenne) de cette macro est comparable à celle de traction mèche.

Essai de traction composite Cette macro permet de calculer les paramètres relatifs à un essai de traction de composites (ie. l'effort maximum et la contrainte associée, la déformation à rupture, la pente, les modules E_1 et E_2 et le travail à rupture). Le fonctionnement global (feuille de résultats et moyenne) de cette macro est comparable à celle de traction mèche. Cette macro peut être également utilisée avec les données brutes issues du test de traction sur éprouvette d'IFBT.

Essai de flexion Cette macro permet de calculer les paramètres relatifs à un essai de flexion trois points de composites (ie le module d'élasticité, la contrainte et la déformation à rupture). Le fonctionnement global (feuille de résultats et moyenne) de cette macro est comparable à celle de traction mèche.

OT 3 1-3 Liage {Toile} {1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23 - # - #- #} Renfort {# - 2 6 10 14 18 22 - 4 8 12 16 20 24 - #}



Fils de chaîne

Lincore R1000 2017 45tpm

Fils de trame

Lincore R1000 2017 45tpm

Densité chaîne théorique (fils/cm)

6

Densité trame théorique (fils/cm)

5

Réalisé sur métier

Tip Top Fun

Densité chaîne expérimentale (fils/cm)

6,08 ± 0

Densité trame expérimentale (fils/cm)

5,18 ± 0,19

Densité selon ISO 4602

Epaisseur (mm)

5,11 ± 0,26

Epaisseur selon ISO 4603

Masse surfacique (kg/m²)

1,2465 ± 0,0294

Masse surfacique selon ISO 12127

Embuvement moyen des fils de chaîne de liage (%)

22,33 ± 4,1

Embuvement moyen des fils de chaîne de renfort (%)

2,06 ± 0,78

Retrait moyen des fils de trame (%)

2,71 ± 0,71

Embuvement et retrait selon NF ISO 7211-3

Comportement en flexion

Coefficient de rigidité en flexion, sens chaîne (N·cm)

1,87 ± 0,2

Coefficient de rigidité en flexion, sens trame (N·cm)

Coefficients adaptés de l'ISO 9073-7

Comportement en traction, sens chaîne

Effort à rupture (1e pic - N)

1 653 ± 202

Déformation à rupture (1e pic - %)

4,71 ± 0,49

Pente (1e pic - N)

706 ± 214

Perte d'ondulation (1e pic - %)

2,21 ± 0,46

Effort à rupture (2e pic - N)

2011,72 ± 239

Déformation à rupture (2e pic - %)

27,68 ± 0,46

Pente (2e pic - N)

347 ± 89

Perte d'ondulation (2e pic - %)

21,63 ± 0,80

↘ Effort à rupture par fil (1e pic - N)

108,7

↘ Effort à rupture par fil (2e pic - N)

132,3

Comportement en traction, sens trame

Effort à rupture (N)

4 616 ± 639

Déformation à rupture (%)

4,22 ± 0,17

Pente (N)

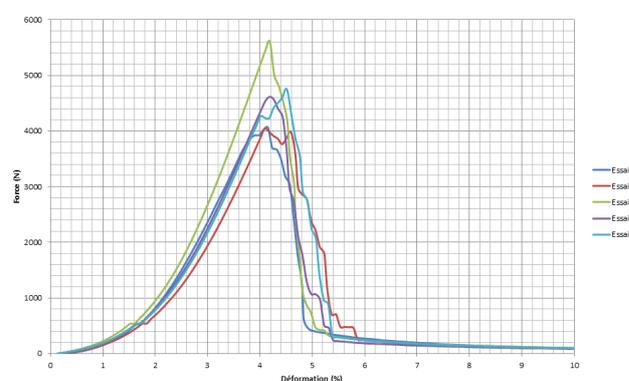
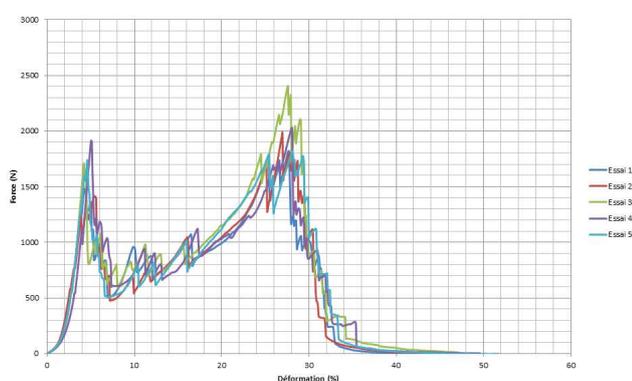
2 015 ± 356

Perte d'ondulation (%)

1,85 ± 0,24

↘ Effort à rupture par fil (N)

178,22



Comportement en traction, selon l'ISO 13934-1

Structures tissées

Influence du type de liage

- AL 5 5-3 Liage {Sergé 6 effet trame cordon à gauche} {1 7 13 19 25 31 - 3 9 15 21 27 33 - 5 11 17 23 29 35 - # - # - #} Renfort {# - 2 14 26 - 4 12 16 24 28 36 - 6 10 18 22 30 34 - 8 20 32 - #}
- AT 5 5-5 Liage {Sergé 6 effet trame cordon à gauche} {1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 - # - # - # - # - #} - Renfort {# - 2 14 26 - 4 12 16 24 28 36 - 6 10 18 22 30 34 - 8 20 32 - #}
- OL 5 5-3 Liage {Sergé 6 effet trame cordon à gauche} {1 7 13 19 25 31 - 3 9 15 21 27 33 - 5 11 17 23 29 35 - # - # - #} Renfort {# - 2 14 26 - 4 12 16 24 28 36 - 6 10 18 22 30 34 - 8 20 32 - #}
- OT 5 5-5 Liage {Sergé 6 effet trame cordon à gauche} {1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 - # - # - # - # - #} Renfort {# - 2 14 26 - 4 12 16 24 28 36 - 6 10 18 22 30 34 - 8 20 32 - #}

Influence du nombre de couches

- OT 3 1 - 3 Liage {Toile} {1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23 - # - # - #} Renfort {# - 2 6 10 14 18 22 - 4 8 12 16 20 24 - #}
- OT 5 1 - 5 Liage {Toile} {1 4 7 10 13 16 19 22 - # - # - # - # - #} Renfort {# - 2 8 14 20 - 3 9 15 21 - 5 11 17 23 - 6 12 18 24 - #}
- OT 7 1 - 7 Liage {Toile} {1 5 9 13 17 21 - # - # - # - # - # - # - #} Renfort {# - 2 10 18 - 3 11 19 - 4 12 20 - 6 14 22 - 7 15 23 - 8 16 24 - #}
- OT 11 1 - 11 Liage {Toile} {1 7 13 19 - # - # - # - # - # - # - # - # - # - # - #} Renfort {# - 2 14 - 3 15 - 4 16 - 5 17 - 6 18 - 8 20 - 9 21 - 10 22 - 11 23 - 12 24 - #}
- OT 23 1-23 Liage {Toile} {1 13 - #} Renfort {# - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 - 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - 19 - 20 - 21 - 22 - 23 - 24 - #}
- OT 23 1-23 Liage {Toile} {2 14 - #} Renfort {# - 11 - 6 - 24 - 19 - 13 - 8 - 3 - 21 - 16 - 10 - 5 - 23 - 18 - 12 - 7 - 1 - 20 - 15 - 9 - 4 - 22 - 17 - #}

Influence de la profondeur de liage et de l'armure de liage :

- OT 5 3-5 Liage {Sergé 4 effet trame} {1 4 7 10 13 16 19 22 - # - # - # - # - #} Renfort {# - 2 8 14 20 - 3 9 15 21 - 5 11 17 23 - 6 12 18 24 - #}
- OT 5 3-5 Liage {Sergé 4 effet trame} {1 7 13 19 - # - # - # - # - #} {Sergé 4 effet chaîne} {4 10 16 22 - # - # - # - # - #} Renfort {# - 2 8 14 20 - 3 9 15 21 - 5 11 17 23 - 6 12 18 24 - #}
- OL 5 3-4 Liage {Sergé 4 effet trame} {1 7 13 19 - # - # - # - # - #} {Sergé 4 effet trame} {# - 4 10 16 22 - # - # - # - # - #} Renfort {# - 2 8 14 20 - 3 9 15 21 - 5 11 17 23

- 6 12 18 24 - #}
- OL 5 3-4 Liage {Sergé 4 effet trame} {1 7 13 19 - # - # - # - # - #} {Sergé 4 effet chaîne} {# - 4 10 16 22 - # - # - # - #} Renfort {# - 2 8 14 20 - 3 9 15 21 - 5 11 17 23 - 6 12 18 24 - #}
- OL 5 3-3 Liage {Sergé 4 effet trame} {1 7 13 19 - # - # - # - # - #} {Sergé 4 effet trame} {# - # - 4 10 16 22 - # - # - #} Renfort {# - 2 8 14 20 - 3 9 15 21 - 5 11 17 23 - 6 12 18 24 - #}
- OL 5 3-3 Liage {Sergé 4 effet trame} {1 7 13 19 - # - # - # - # - #} {Sergé 4 effet chaîne} {# - # - 4 10 16 22 - # - # - #} Renfort {# - 2 8 14 20 - 3 9 15 21 - 5 11 17 23 - 6 12 18 24 - #}
- OT 5 3-5 Liage {Satin 4 effet trame} {1 4 7 10 13 16 19 22 - # - # - # - # - #} Renfort {# - 2 8 14 20 - 3 9 15 21 - 5 11 17 23 - 6 12 18 24 - #}
- OT 5 3-5 Liage {Satin 4 effet trame} {1 7 13 19 - # - # - # - # - #} {Satin 4 effet chaîne} {4 10 16 22 - # - # - # - # - #} Renfort {# - 2 8 14 20 - 3 9 15 21 - 5 11 17 23 - 6 12 18 24 - #}
- OL 5 3-4 Liage {Satin 4 effet trame} {1 7 13 19 - # - # - # - # - #} {Satin 4 effet trame} {# - 4 10 16 22 - # - # - # - #} Renfort {# - 2 8 14 20 - 3 9 15 21 - 5 11 17 23 - 6 12 18 24 - #}
- OL 5 3-4 Liage {Satin 4 effet trame} {1 7 13 19 - # - # - # - # - #} {Satin 4 effet chaîne} {# - 4 10 16 22 - # - # - # - #} Renfort {# - 2 8 14 20 - 3 9 15 21 - 5 11 17 23 - 6 12 18 24 - #}
- OL 5 3-3 Liage {Satin 4 effet trame} {1 7 13 19 - # - # - # - # - #} {Satin 4 effet trame} {# - 4 10 16 22 - # - # - # - #} Renfort {# - 2 8 14 20 - 3 9 15 21 - 5 11 17 23 - 6 12 18 24 - #}
- OL 5 3-3 Liage {Satin 4 effet trame} {1 7 13 19 - # - # - # - # - #} {Satin 4 effet chaîne} {# - 4 10 16 22 - # - # - # - #} Renfort {# - 2 8 14 20 - 3 9 15 21 - 5 11 17 23 - 6 12 18 24 - #}

Élaboration et caractérisation de renforts tissés 3D interlock chaîne en lin pour matériaux composites

Résumé : La caractérisation multi-échelle des préformes textiles en fibres naturelles est un moyen indispensable pour comprendre et évaluer les propriétés mécaniques et le comportement du composite. Dans cette étude, une caractérisation expérimentale multi-échelle est réalisée sur des tissus 3D interlock chaîne en fibre de lin à l'échelle des fibres (micro), des mèches (méso), des tissus et des matériaux composites (macro). Les propriétés mécaniques en traction de la fibre de lin ont été déterminées en utilisant la méthodologie de l'IFBT. L'effet de la torsion a également été pris en compte dans le calcul de la rigidité de la fibre et a révélé les limites de la loi des mélanges et d'autres modèles. Des essais de traction sur des mèches sèches ont été effectués en considérant différents niveaux de torsion afin de déterminer le niveau de torsion optimal pour tisser 3D la mèche de lin. Les résultats révèlent l'importance de considérer les propriétés de la fibre et des mèches à ces échelles pour déterminer la matière première la plus adéquate pour le tissage. A l'échelle du tissu, dix sept tissus 3D interlocks chaînes ont été réalisés pour comprendre l'influence des paramètres produits sur les paramètres textiles et sur le comportement mécanique. La caractérisation des structures tissées 3D interlock chaîne montre le rôle prépondérant des mèches sur les propriétés structurelles et mécaniques. A l'échelle macroscopique suivante, les six structures résinées ont permis d'établir des relations entre les structures de renfort et les matériaux composites associés. Couplé à l'ensemble de ces études, une approche statistique a permis d'apporter une vision globale des paramètres produits qui influent sur les tissus 3D interlock chaîne et les matériaux composites associés.

Mots clés : Fibres naturelles, Tissage 3D, Matériaux composites, Propriétés mécaniques, Analyse statistique

Abstract: The multi-scale characterisation of textile preforms made with natural fibres is a necessary method to understand and analyse the mechanical properties and behaviour of the composite. In this study, a multi-scale experimental characterisation is carried out on 3D warp interlock fabrics made with flax fibres at the fibre (micro), yarns (meso), fabric and composites (macro) scales. The mechanical tensile properties of the flax fibre were determined using the IFBT methodology. The twist effect was also taken into account in the calculation of fibre stiffness and revealed the limits of the rules of mixtures and some other models. Tensile tests on dry rovings were carried out considering different levels of twist, in order to determine the optimal twist level suited for 3D weaving process. The results reveal the importance of considering the properties of the fibre and the yarn at these scales to determine the most suitable material for weaving. At the fabric scale, seventeen 3D warp interlock fabrics were produced to understand the influence of product parameters on textile parameters and mechanical behaviour. The characterisation of 3D warp interlock woven structures shows the predominant role of yarns on structural and mechanical properties. On the following macroscopic scale, the six impregnated structures have enabled relationships to be established between the reinforcing structures and the associated composite materials. Coupled with these studies, a statistical approach provided a global vision of the product parameters that influence the 3D interlock warp interlock fabrics and the associated composite materials.

Keywords: Natural fiber, 3D weaving, Composite reinforcement, Mechanical properties, Statistical analysis.