

THÈSE DE DOCTORAT UNIVERSITÉ DE LILLE

Pour obtenir le grade de Docteur

Discipline : Mécanique, Energétique, Matériaux

Présentée et soutenue par :
Anne-Clémence Corbin

Développement et analyse multi-échelle de renforts en chanvre pour applications biocomposites

Ecole doctorale Sciences Pour l'Ingénieur (EDSPI) Université Lille Nord-de-France

Laboratoire de recherche : GEMTEX – Génie des Matériaux Textiles

Soutenue le 10/07/2020 devant la commission d'examen :

Pierre OUAGNE	PU, ENIT	Président du jury
Karine CHARLET	MCF-HDR, SIGMA Clermont	Rapporteur
Christophe BALEY	PU, Université de Bretagne Sud	Rapporteur
Johnny BEAUGRAND	DR, INRAE	Examineur
Damien SOULAT	PU, ENSAIT	Directeur de thèse
Ahmad-Rashed LABANIEH	MCF, ENSAIT	Co-Encadrant
Manuela FERREIRA	MCF, ENSAIT	Co-Encadrante
Vincent PLACET	IR-HDR, Université de Franche-Comté	Invité

Manuscrit confidentiel

Remerciements

En premier lieu, je souhaite remercier l'Union Européenne, pour le financement du projet SSUCHY au travers du programme Horizon 2020 et du partenariat « Bio Based Industries Joint Undertaking ». C'est en effet grâce à ce financement que j'ai pu réaliser mes travaux de thèse et évoluer dans le milieu de la recherche en lien étroit avec plusieurs industriels.

Je voudrais remercier Karine CHARLET et Johnny BEAUGRAND pour avoir accepté d'être les rapporteurs de mes travaux et pour la qualité de leurs retours. Merci également à Pierre OUAGNE et Christophe BALEY pour avoir été respectivement président du jury et examinateur de ces travaux de thèse.

Je souhaite ensuite remercier Damien SOULAT, Professeur des Universités à l'ENSAIT, pour m'avoir accordé sa confiance sur ce projet, et m'avoir encadrée et accompagnée durant mes années d'étudiante et de thésarde. Je remercie également Manuela FERREIRA et Ahmad-Rashed LABANIEH, Maitres de Conférences à l'ENSAIT, pour la qualité de leur encadrement.

Je tiens également à remercier l'ensemble des partenaires du projet SSUCHY, pour les belles rencontres effectuées et la qualité des échanges. J'adresse mes remerciements particuliers à Giorgio RONDÌ, Responsable au sein de l'entreprise Linificio e Canapificio Nazionale, Vincent PLACET, Ingénieur au sein du laboratoire FEMTO-ST et Coordinateur du projet SSUCHY, Xavier GABRION, Ingénieur au sein du laboratoire FEMTO-ST et Benjamin SALA, Doctorant au sein du laboratoire FEMTO-ST pour l'ensemble des travaux réalisés en commun.

Je voudrais aussi remercier l'ensemble du personnel technique et administratif de l'ENSAIT et particulièrement Valentin LAURENT, Nicolas DUMONT et Lucas PUTIGNY, Techniciens, ainsi que, Guillaume LEMORT, Assistant ingénieur et Frederick VEYET et Sabine CHLEBICKI, Ingénieurs, pour l'ensemble de leur aide apporté durant toutes ces années. Je remercie également l'ensemble des doctorants pour les bons moments partagés et les étudiants de l'ENSAIT ayant travaillé sur le projet SSUCHY.

Enfin, je souhaite adresser des remerciements particuliers à l'ensemble de mes proches et amis, mes parents, grands-parents, oncles et tantes, cousins et cousines, Louis-Thibault, Claire-Odile, Maxime, Sandrine, Jessie et tous les autres qui se reconnaîtront pour m'avoir soutenue et accompagnée durant ces longues années faites de hauts et de bas.

Sommaire

Liste des figures	7
Liste des tables	14
Introduction générale	16
Chapitre 1 : Etat de l'art sur la caractérisation multi-échelle des composites biosourcés....	22
1 Introduction.....	24
2 Présentation et caractéristiques des fibres naturelles	29
2.1 Aspects économiques	29
2.2 Obtention des fibres de lin et de chanvre	32
2.2.1 Procédés d'extraction des fibres de lin	32
2.2.2 Procédés d'extraction des fibres de chanvre	34
2.3 Propriétés physico-chimiques des fibres naturelles.....	35
2.3.1 Composition des fibres de lin et de chanvre.....	35
2.3.2 Longueur des fibres de lin et de chanvre	37
2.3.3 Diamètre des fibres de lin et de chanvre	37
2.3.4 Densité des fibres de lin et de chanvre	38
2.4 Propriétés mécaniques des fibres naturelles	39
2.4.1 Méthodes de caractérisations.....	39
2.4.1.1 Méthode sur fibre unitaire	40
2.4.1.2 Méthode sur éprouvettes composites	41
2.4.2 Résultats obtenus.....	41
3 Mise en œuvre des fibres naturelles en vue de l'obtention de fils	43
3.1 Procédés de production des fils	43
3.2 Amélioration des propriétés mécaniques des mèches	45
3.2.1 Utilisation de fils retordus	45
3.2.2 Recours aux traitements des fibres.....	47

3.3	Réalisation de fils comelés	49
3.3.1	Présentation des diverses méthodes réalisables pour obtenir des produits comelés.	49
3.3.2	Recours à la technologie de guipage.....	52
4	Utilisation des fils pour la production de renforts	55
4.1	Panorama des différentes structures de renforts en fibres naturelles.....	55
4.2	Présentation du procédé de tissage	57
4.2.1	Description de la technologie de production.....	57
4.2.2	Paramètres de production de tissus	59
4.3	Avantages des renforts tissés par rapport aux autres renforts.....	61
4.4	Influence du procédé de tissage sur les propriétés des fils	64
5	Réalisation de composites biosourcés	66
5.1	Méthodes de fabrication des composites biosourcés.....	66
5.2	Domaines d'applications des composites biosourcés	69
5.3	Utilisation de renforts tissés pour la production de biocomposites	71
6	Conclusion	77
	Références.....	80

Chapitre 2 : Tissabilité des fibres naturelles91

1	Introduction.....	92
2	Présentation des matières	94
2.1	Panorama des matières disponibles.....	94
2.2	Propriétés mécaniques des fils.....	96
3	Amélioration de la tissabilité.....	100
3.1	Réalisation de traitements chimiques sur les mèches	100
3.2	Production de fils guipés chanvre/thermoplastique	103
3.2.1	Mise en place de la technologie de guipage	103
3.2.2	Etude des propriétés des fils guipés.....	106
4	Etude des propriétés des fibres	109
4.1	Mise en place de l' « Impregnated Fibre Bundle Test »	109
4.1.1	Préparation des éprouvettes	109

4.1.2	Observations à la loupe binoculaire.....	111
4.2	Détermination de la composition et des propriétés mécaniques.....	112
4.2.1	Détermination de la composition des éprouvettes	112
4.2.2	Détermination des propriétés des fibres par la loi des mélanges	113
4.3	Analyse des résultats	116
4.3.1	Influence de la torsion et de la porosité dans la loi des mélanges	116
4.3.2	Impact du traitement chimique à l'échelle des fibres	120
5	Influence du procédé de tissage sur les propriétés des fils et des fibres	123
5.1	Impact sur les propriétés textiles des fils	124
5.2	Impact sur les propriétés mécaniques des fils	129
5.3	Impact sur les propriétés des fibres	135
6	Conclusion	138
	Références.....	142

Chapitre 3 : Caractérisation des renforts en fibres naturelles144

1	Introduction.....	146
2	Panorama des différents renforts	147
2.1	Production des renforts par tissage	147
2.2	Propriétés textiles des renforts	152
2.2.1	Masse surfacique des renforts	152
2.2.2	Epaisseur des renforts.....	153
2.2.3	Perméabilité à l'air des renforts.....	154
2.2.4	Conclusion	155
3	Etude des propriétés en traction des renforts.....	156
3.1	Présentation de l'essai de traction des renforts	156
3.2	Caractérisation en traction des renforts	158
3.2.1	Effort maximal en traction des renforts.....	158
3.2.2	Rigidité en traction des renforts	161
3.2.3	Perte d'ondulation des renforts.....	162
3.2.4	Déformation à l'effort maximal des renforts	164
3.2.5	Conclusion	165

4	Etude de la tenue en flexion à l'état sec	166
4.1	Présentation du dispositif de caractérisation.....	166
4.2	Etude de la flexion des tissus à l'état sec	167
5	Etude du comportement en cisaillement dans le plan au moyen de l' « Uniaxial Bias-Extension test »	169
5.1	Mise en place de l'« Uniaxial Bias-Extension test »	169
5.2	Résultats obtenus	172
5.2.1	Force normalisée de cisaillement.....	173
5.2.2	Point d'inflexion de la courbe « Effort – Déplacement ».....	174
5.2.3	Angles de blocage.....	175
5.2.4	Conclusion	177
6	Etude de la mise en forme des renforts.....	178
6.1	Présentation du banc d'emboutissage	178
6.2	Etude du comportement des renforts lors d'un emboutissage par diverses formes	182
6.2.1	Force maximale d'emboutissage.....	182
6.2.2	Avalement des renforts lors des essais d'emboutissage	185
6.2.3	Angles de cisaillement.....	189
6.2.4	Défauts lors de la mise en forme	190
6.2.5	Conclusion	194
6.3	Etude de l'influence de l'armure et de la densité trame lors de l'emboutissage par divers poinçons.....	194
6.3.1	Force maximale d'emboutissage.....	195
6.3.2	Avalement des renforts lors des essais d'emboutissage	196
6.3.3	Angles de cisaillement.....	202
6.3.4	Défauts lors de la mise en forme	203
6.3.5	Conclusion	207
7	Conclusion	208
	Références.....	210

Chapitre 4 : Elaboration de matériaux biocomposites	213
--	------------

Sommaire

1	Introduction.....	214
2	Réalisation des matériaux biocomposites	215
2.1	Choix des renforts.....	215
2.2	Fabrication des matériaux biocomposites	216
2.3	Protocole de caractérisation	217
3	Propriétés des matériaux biocomposites	219
3.1	Caractérisation mécanique des matériaux.....	219
3.1.1	Composition des plaques produites.....	219
3.1.2	Propriétés mécaniques des éprouvettes	220
3.2	Comparaison avec la littérature	226
3.2.1	Biocomposites renforcés de tissus.....	226
3.2.2	Biocomposites renforcés d'unidirectionnels ou de quasi-unidirectionnels	229
4	Conclusion	233
	Références.....	235
	Conclusion et perspectives	236
	Annexes	240
	Annexe A : Liste des communications.....	241
	Annexe B : Propriétés des fils.....	243
	Annexe C : Propriétés des renforts	252
	Annexe D : Angles de cisaillement des renforts lors des essais d'emboutissage	262
	Annexe E : Propriétés mécaniques des matériaux biocomposites	270

Liste des figures

Figure I : Partenaires du projet SSUCHY	17
Figure II : Vue d'ensemble du projet SSUCHY	18
Figure III : Organisation générale des différents WP du projet SSUCHY.....	19
Figure IV : Démonstrateurs du projet SSUCHY.....	20
Figure 1-1 : Schématisation de la structure d'un matériau composite [4]	24
Figure 1-2 : Evolution du marché mondial des composites entre 1960 et 2018 [3]	25
Figure 1-3 : Utilisation des fibres de renforts pour matériaux composites entre 2000 et 2018 [3]	26
Figure 1-4 : Comparaison des propriétés des fibres naturelles et des fibres de verre A. Contraintes et modules B. Contraintes et modules spécifiques [5]	26
Figure 1-5 : Utilisation des résines thermodurcissables et thermoplastiques sur le marché des composites entre 1980 et 2018	27
Figure 1-6 : Surfaces agricoles françaises cultivées en lin et en chanvre entre 2013 et 2018 [7,8]	29
Figure 1-7 : Domaines d'application des fibres naturelles A. Fibres de lin, B. Fibres de chanvre [1]	30
Figure 1-8 : Production européenne de lin fibre [10]	31
Figure 1-9 : Production mondiale de chanvre en 2016 [11]	31
Figure 1-10 : Comparaison du prix de vente par tonne des fibres naturelles et de verre [13]	32
Figure 1-11 : Etapes de récolte des tiges de lin A. Arrachage, B. Rouissage [14]	32
Figure 1-12 : Teillage des pailles de lin (Terre de Lin)	33
Figure 1-13 : Peignage des fibres de lin (Terre de Lin).....	33
Figure 1-14 : Mise en pot des rubans de lin (Terre de Lin)	33
Figure 1-15 : Production du chanvre A. Culture, B. Récolte [20]	34
Figure 1-16 : Rouissage du chanvre [20]	35
Figure 1-17 : Teillage et peignage du chanvre [20]	35
Figure 1-18 : Structure des fibres de lin [1].....	36
Figure 1-19 : Représentation schématique des fibres naturelles [27].....	36
Figure 1-20 : Exemple de courbe effort-déplacement d'une fibre de lin [40]	40

Figure 1-21 : Etirage des rubans (Linificio e Canapificio Nazionale)	44
Figure 1-22 : Production des mèches (Linificio e Canapificio Nazionale)	44
Figure 1-23 : Production des fils A. Continu à filer, B. Bobinoir (Linificio e Canapificio Nazionale).....	45
Figure 1-24 : Comparaison entre A. Mèches sans torsion et B. Fils avec une torsion élevée [54]	46
Figure 1-25 : Influence de la torsion sur la résistance des fils [58].....	46
Figure 1-26 : Evolution de la résistance de fils secs et imprégnés en fonction de leur torsion [55]	47
Figure 1-27 : Fils comelés A. Fil guipé B. Fil tressé C. Fil DREF [51].....	51
Figure 1-28 : Schématisation de la production d'un fil comélé consolidé par voie thermique [76]	52
Figure 1-29 : Comparaison entre un fil conventionnel (gauche) et un fil guipé (droite) [60] .	53
Figure 1-30 : Schématisation du procédé de guipage.....	53
Figure 1-31 : Types de renforts disponibles sur le marché [1].....	55
Figure 1-32 : Images des différents renforts disponibles pour les biocomposites [1].....	56
Figure 1-33 : Propriétés mécaniques de biocomposites renforcés par différents types de renforts [1]	57
Figure 1-34 : Schématisation du procédé de tissage [95]	57
Figure 1-35 : Etape d'ourdissage (ENSAIT)	58
Figure 1-36 : Etapes de A. rentrage et de B. piquage (ENSAIT).....	58
Figure 1-37 : A. Métier à tisser manuel Leclerc Weavebird et B. navette (ENSAIT)	59
Figure 1-38 : Dégradation des fils de lin pendant le tissage [124]	65
Figure 1-39 : Procédés utilisés pour la mise en œuvre des composites entre 2010 et 2018 [3]	66
Figure 1-40 : Schématisation du procédé de drapage manuel [125].....	67
Figure 1-41 : Schématisation du procédé d'infusion [125]	67
Figure 1-42 : Schématisation du procédé de thermocompression [126]	68
Figure 1-43 : Allure générale d'un cycle de thermocompression [126].....	69
Figure 1-44 : Exemples d'applications des biocomposites dans le domaine de l'automobile [1]	70
Figure 1-45 : Exemples d'applications des biocomposites dans le domaine de l'ameublement [1]	70
Figure 1-46 : Exemples d'application des biocomposites dans le domaine des loisirs [1]	71

Liste des figures

Figure 1-47 : Comparaison des modules de matériaux composites renforcés par différentes natures de fibres et types de renforts A. Unidirectionnels (UD), B. Tissus [1]	72
Figure 1-48 : Démarche générale des travaux présentés	79
Figure 2-1 : Fils retordus et mèches sans traitement (ST)	94
Figure 2-2 : Pilosité des fils pendant le tissage	95
Figure 2-3 : Aspect visuel des fils retordus et mèches sans traitement	96
Figure 2-4 : Réponse en traction d'un fil de chanvre [6].....	97
Figure 2-5 : Paramètres étudiés sur les courbes de traction des fils	98
Figure 2-6 : Propriétés mécaniques des fils sans traitement.....	99
Figure 2-7 : Aspect visuel des mèches sans (ST) et avec (T1) traitement chimique	101
Figure 2-8 : Influence de la torsion des mèches sur leur pilosité	101
Figure 2-9 : Propriétés mécaniques des mèches LINO.....	102
Figure 2-10 : Propriétés mécaniques des mèches CANAPA.....	102
Figure 2-11 : Analyse ATG des fibres issues des mèches de chanvre (CANAPA ST1)	104
Figure 2-12 : Propriétés mécaniques des mèches CANAPA ST1 avant et après chauffage à 220°C	104
Figure 2-13 : Pilote de filage.....	105
Figure 2-14 : Présentation de la broche creuse utilisée pour la production de fils guipés ...	106
Figure 2-15 : Analyse ATG des fils guipés.....	107
Figure 2-16 : Aspect visuel d'une mèche de chanvre (CANAPA ST1) et d'un fil guipé (CAPA121).....	108
Figure 2-17 : Propriétés mécaniques des fils guipés et comparaison avec les mèches d'âme	108
Figure 2-18 : Fabrication des éprouvettes IFBT	110
Figure 2-19 : Moule IFBT en cours de fabrication	110
Figure 2-20 : Moule IFBT en cuisson dans la presse chauffante	111
Figure 2-21 : Allure d'une courbe de traction composite d'une éprouvette d'IFBT	113
Figure 2-22 : Relation entre le facteur de longueur des fibres η_1 et le rapport L/D [19].....	115
Figure 2-23 : Relation entre la torsion des fils et la porosité dans les éprouvettes d'IFBT ...	117
Figure 2-24 : Comparaison des modèles pour le module E_{f1} (0,01% – 0,1% de déformation)	120
Figure 2-25 : Comparaison des modèles pour le module E_{f2} (0,3% - 0,5% de déformation). 120	

Figure 2-26 : Modules (E_{f1} et E_{f2}) des fibres sans et avec traitement chimique	122
Figure 2-27 : Evolution du titre des fils de lin pendant le tissage	125
Figure 2-28 : Evolution du titre des fils de chanvre pendant le tissage	125
Figure 2-29 : Evolution du titre des fils guipés pendant le tissage	125
Figure 2-30 : Evolution de la torsion des fils de lin pendant le tissage	127
Figure 2-31 : Evolution de la torsion des fils de chanvre pendant le tissage	127
Figure 2-32 : Embuvage des fils au sein des tissus	128
Figure 2-33 : Retrait des fils au sein des tissus	128
Figure 2-34 : Evolution de la ténacité à rupture des fils de lin pendant le tissage	130
Figure 2-35 : Evolution de la ténacité à rupture des fils de chanvre pendant le tissage	131
Figure 2-36 : Evolution de la ténacité à rupture des fils guipés pendant le tissage	131
Figure 2-37 : Ecart relatif entre la ténacité avant et après tissage	132
Figure 2-38 : Evolution de la déformation à rupture des fils de lin pendant le tissage	133
Figure 2-39 : Evolution de la déformation à rupture des fils de chanvre pendant le tissage	133
Figure 2-40 : Evolution de la déformation à rupture des fils guipés pendant le tissage	134
Figure 2-41 : Evolution de la pente des fils de lin pendant le tissage	134
Figure 2-42 : Evolution de la pente des fils de chanvre pendant le tissage	135
Figure 2-43 : Evolution de la pente des fils guipés pendant le tissage	135
Figure 2-44 : Modules (E_{f1} et E_{f2}) des fibres avant et après tissage (renforts HEMP1, HEMP2, HEMP3 et QUASI-UD)	137
Figure 2-45 : Ondulation résiduelle des fils après tissage	137
 Figure 3-1 : Images des renforts produits à l'échelle laboratoire	 150
Figure 3-2 : Images des renforts produits à l'échelle industrielle	151
Figure 3-3 : Fraction massique de fibres dans les deux directions des tissus	152
Figure 3-4 : Masse surfacique et densité trame des renforts	153
Figure 3-5 : Epaisseur des renforts	154
Figure 3-6 : Perméabilité à l'air des renforts	155
Figure 3-7: Allure générale d'une courbe "contrainte - déformation" d'un tissu toile en chanvre [5]	156
Figure 3-8 : Banc de traction MTS Criterion 45	157
Figure 3-9 : Paramètres étudiés sur les courbes de traction des renforts	158

Figure 3-10 : Effort maximal global en traction des renforts.....	159
Figure 3-11 : Effort maximal par fil en traction des renforts	160
Figure 3-12 : Pente globale de la réponse en traction des renforts	162
Figure 3-13 : Pente par fil de la réponse en traction des renforts.....	162
Figure 3-14 : Perte d'ondulation, embuvage et retrait	164
Figure 3-15 : Déformation à rupture des renforts	165
Figure 3-16 : Banc d'essai du cantilever test pour la tenue en flexion à l'état sec.....	166
Figure 3-17: Principe du cantilever test	166
Figure 3-18 : Coefficient de rigidité en flexion des renforts	168
Figure 3-19 : Module de rigidité en flexion des renforts	168
Figure 3-20 : Représentation schématique d'un échantillon d'UBE test [19].....	169
Figure 3-21 : Différentes étapes de l'UBE test	170
Figure 3-22 : Exemple de courbe « Effort – Déformation » (UBE test).....	171
Figure 3-23 : Exemple de courbe « Angle de cisaillement – Déplacement » (UBE test)	172
Figure 3-24 : Rappel des différentes armures de tissage utilisées	173
Figure 3-25 : Force normalisée de cisaillement des renforts tissés (UBE test).....	173
Figure 3-26 : Relation Force vs. Déplacement des renforts tissés (UBE test).....	175
Figure 3-27 : Angles de blocages (UBE test).....	176
Figure 3-28 : Relation entre la perméabilité à l'air sur l'angle de blocage	177
Figure 3-29 : Présentation du dispositif d'emboutissage.....	178
Figure 3-30 : Présentation des différents types de poinçons utilisés A. Hémisphérique B. Cubique C. Cubique arrondi	179
Figure 3-31 : Schémas descriptifs de l'emboutissage avec différents poinçons A. Hémisphérique B. Cubique C. Cubique arrondi	179
Figure 3-32 : Mesure de l'avalement pour les renforts à 0° avec les poinçons A. Hémisphérique B. Cubiques	181
Figure 3-33 : Mesure de l'avalement pour les renforts à 45° avec les poinçons cubiques....	181
Figure 3-34 : Exemple de courbe « Force d'emboutissage – Course du poinçon »	184
Figure 3-35 : Force maximale d'emboutissage des renforts.....	184
Figure 3-36 : Relation entre la masse surfacique et la force maximale d'emboutissage pour les renforts tissés.....	185
Figure 3-37 : Avalement en sens chaîne des renforts avec le poinçon hémisphérique	186
Figure 3-38 : Avalement en sens trame des renforts avec le poinçon hémisphérique	187

Figure 3-39 : Avalement en sens chaine des renforts avec le poinçon cubique.....	187
Figure 3-40 : Avalement en sens trame des renforts avec le poinçon cubique.....	188
Figure 3-41 : Avalement maximal lors des essais d'emboutissage	188
Figure 3-42 : Localisation des zones d'angles maximum pour les deux types de poinçon (hémisphérique et cubique)	190
Figure 3-43 : Angles de cisaillement maximum lors de l'emboutissage des renforts tissés..	190
Figure 3-44 : Renfort tissé après emboutissage avec le poinçon hémisphérique	191
Figure 3-45 : Renfort quasi-unidirectionnel après emboutissage avec le poinçon hémisphérique	192
Figure 3-46 : Renfort tissé après emboutissage avec le poinçon cubique.....	193
Figure 3-47 : Renfort quasi-unidirectionnel après emboutissage avec le poinçon cubique .	193
Figure 3-48 : Force maximale d'emboutissage des renforts.....	196
Figure 3-49 : Avalement en sens chaine (0° poinçon hémisphérique)	197
Figure 3-50 : Avalement en sens trame (0° poinçon hémisphérique)	197
Figure 3-51 : Avalement en sens chaine (0° poinçon cubique).....	198
Figure 3-52 : Avalement en sens trame (0° poinçon cubique).....	198
Figure 3-53 : Avalement en sens chaine (0° poinçon cubique arrondi)	198
Figure 3-54 : Avalement en sens trame (0° poinçon cubique arrondi)	199
Figure 3-55 : Avalement en sens 1 (45° poinçon cubique)	199
Figure 3-56 : Avalement en sens 2 (45° poinçon cubique)	199
Figure 3-57 : Avalement en sens 1 (45° poinçon cubique arrondi).....	200
Figure 3-58 : Avalement en sens 2 (45° poinçon cubique arrondi).....	200
Figure 3-59 : Avalement maximal en sens chaine / sens 1	201
Figure 3-60 : Avalement maximal en sens trame / sens 2	201
Figure 3-61 : Localisation des zones d'angles maximum pour les poinçons A. Hémisphérique, B. Cubique ou Cubique arrondi avec une orientation à 0°, C. Cubique ou Cubique arrondi avec une orientation à 45°	203
Figure 3-62 : Angle maximal de cisaillement lors de l'emboutissage des renforts	203
Figure 3-63 : Echantillons orientés à 0° après emboutissage avec le A. Poinçon cubique B. Poinçon cubique arrondi	205
Figure 3-64 : Echantillons orientés à 45° après emboutissage avec le A. Poinçon cubique B. Poinçon cubique arrondi	206
Figure 3-65 : Zoom sur les défauts après emboutissage d'un échantillon orienté à 45°	207

Figure 4-1 : Vues 3D des renforts (fils de chaîne en bleu et fils de trame en rouge)	215
Figure 4-2 : Imprégnation des matériaux biocomposites A. Préparation du moule, B. Plaque composite [5].....	217
Figure 4-3 : Essai de traction composite [5]	217
Figure 4-4 : Paramètres étudiés sur les courbes de traction des biocomposites	218
Figure 4-5 : Contraintes à rupture des matériaux biocomposites ($V_f = 45\%$)	222
Figure 4-6 : Comparaison entre la torsion des mèches après tissage et la contrainte à rupture des biocomposites ($V_f = 45\%$)	223
Figure 4-7 : Modules des matériaux biocomposites ($V_f = 45\%$)	223
Figure 4-8 : Eprouvettes CQUUD en sens fibres après essais de traction	224
Figure 4-9 : Déformations à rupture des matériaux biocomposites.....	225
Figure 4-10 : Comparaison entre la perte d'ondulation dans les renforts tissés et la déformation à rupture des biocomposites	225
Figure 4-11 : Comparaison des contraintes à rupture des biocomposites SSUCHY avec la littérature pour les renforts tissés [7,9] ($V_f = 45\%$)	228
Figure 4-12 : Comparaison des modules des biocomposites SSUCHY avec la littérature pour les renforts tissés [7,9] ($V_f = 45\%$)	228
Figure 4-13 : Comparaison des déformations à rupture des biocomposites SSUCHY avec la littérature pour les renforts tissés [7,9]	229
Figure 4-14 : Comparaison des contraintes à rupture des biocomposites SSUCHY avec la littérature pour les renforts UD et quasi-UD [7–10] ($V_f = 45\%$)	231
Figure 4-15 : Comparaison des modules des biocomposites SSUCHY avec la littérature pour les renforts UD et quasi-UD [7–10] ($V_f = 45\%$)	231
Figure 4-16 : Comparaison des déformations à rupture des biocomposites SSUCHY avec la littérature pour les renforts UD et quasi-UD [7–10]	232

Liste des tables

Table 1-1 : Composition chimique des fibres de lin et de chanvre [13,26,33,34]	37
Table 1-2 : Propriétés mécaniques des fibres naturelles par la méthode sur fibre unitaire [13,43]	42
Table 1-3 : Comparaison des propriétés fibres obtenues par essais sur fibres unitaires et IGBT [46]	42
Table 1-4 : Armures utilisées (vues issues du logiciel WiseTex)	60
Table 1-5 : Propriétés mécaniques en traction de biocomposites issues de la littérature	76
Table 2-1 : Présentation des fils retordus et mèches sans traitement	96
Table 2-2 : Présentation des mèches avec traitement chimique	101
Table 2-3 : Présentation des fils guipés.....	107
Table 2-4 : Quantités de fibres nécessaires à la réalisation des éprouvettes IGBT.....	109
Table 2-5 : Coupes longitudinales et transversales des éprouvettes IGBT.....	112
Table 2-6 : Matières utilisées en IGBT dans l'étude de l'influence de la torsion et de la porosité	116
Table 2-7 : Composition des éprouvettes IGBT pour l'étude de l'influence de la torsion et de la porosité.....	117
Table 2-8 : Modules de fibres de chanvre issus de la littérature.....	118
Table 2-9 : Composition des éprouvettes IGBT pour l'étude de l'influence du traitement chimique sur les propriétés des fibres	121
Table 2-10 : Présentation des préformes tissées étudiées	123
Table 2-11 : Composition des éprouvettes IGBT pour l'étude de l'influence du procédé de tissage sur les propriétés des fibres	136
Table 3-1 : Renforts produits à l'échelle laboratoire.....	150
Table 3-2 : Renforts produits à l'échelle industrielle	151
Table 3-3 : Différentes étapes d'un essai d'emboutissage (exemple avec le poinçon hémisphérique)	180
Table 4-1 : Propriétés des renforts utilisés.....	216
Table 4-2 : Renforcement des matériaux biocomposites produits.....	216

Liste des tables

Table 4-3 : Fraction volumique de fibres et de porosités dans les matériaux biocomposites produits	220
Table 4-4 : Composition des biocomposites renforcés de tissus de la littérature [7,9]	226
Table 4-5 : Composition des biocomposites renforcés d'unidirectionnels et de quasi-unidirectionnels de la littérature [7–10]	230

Introduction générale

De nos jours, les matériaux composites sont de plus en plus recherchés dans l'industrie en remplacement de matériaux plus traditionnels, tels que les métaux. Ces matériaux composites sont utilisés dans le secteur des transports (automobile, aéronautique ou ferroviaire) ainsi que dans celui des loisirs, du fait de leurs propriétés mécaniques spécifiques, mais également acoustiques ou en présence de vibrations et de leur bonne résistance aux agressions chimiques et thermiques de l'environnement extérieur. Par ailleurs l'influence de l'utilisation actuelle de constituants pétrosourcés pour ces matériaux composites, mélange de fibres techniques (fibres de verre, d'aramide, de carbone ou de polyéthylène haut module) et de résines polymères, sur l'impact environnemental des produits se pose et par conséquent leur substitution par des composants biosourcés est envisagée. Ces constituants issus de ressources renouvelables peuvent être recyclables et biodégradables. Dans le cas des renforts, ces ressources biosourcées relèvent de fibres naturelles en tant que substituants aux fibres pétrosourcées.

Le projet SSUCHY, pour « **S**ustainable **S**tructural and **M**ultifunctional **B**iocomposites from **H**ybrid Natural Fibres and bio-based polymers » est un projet de recherche Horizon 2020 de l'Union Européenne, financé par le partenariat « Bio Based Industries Joint Undertaking ». L'objectif du projet est l'utilisation de ressources renouvelables, telles que les fibres naturelles et les biopolymères, pour développer des matériaux composites biosourcés avec des propriétés avancées destinés aux domaines des transports et des loisirs. Pour les renforts, des fibres naturelles, principalement de chanvre mais aussi de lin, sont utilisées pour produire des préformes, tandis que pour les résines, des monomères issus de la lignocellulose seront utilisés pour synthétiser des biopolymères. Ce projet, d'une durée de quatre ans (Septembre 2017 à Août 2021), dispose d'un budget total de 7,5 M€ et regroupe dix-sept partenaires (dix institutions académiques, trois industries, trois PME et un pôle de compétitivité) issus de 7 pays européens, présentés en Figure I.

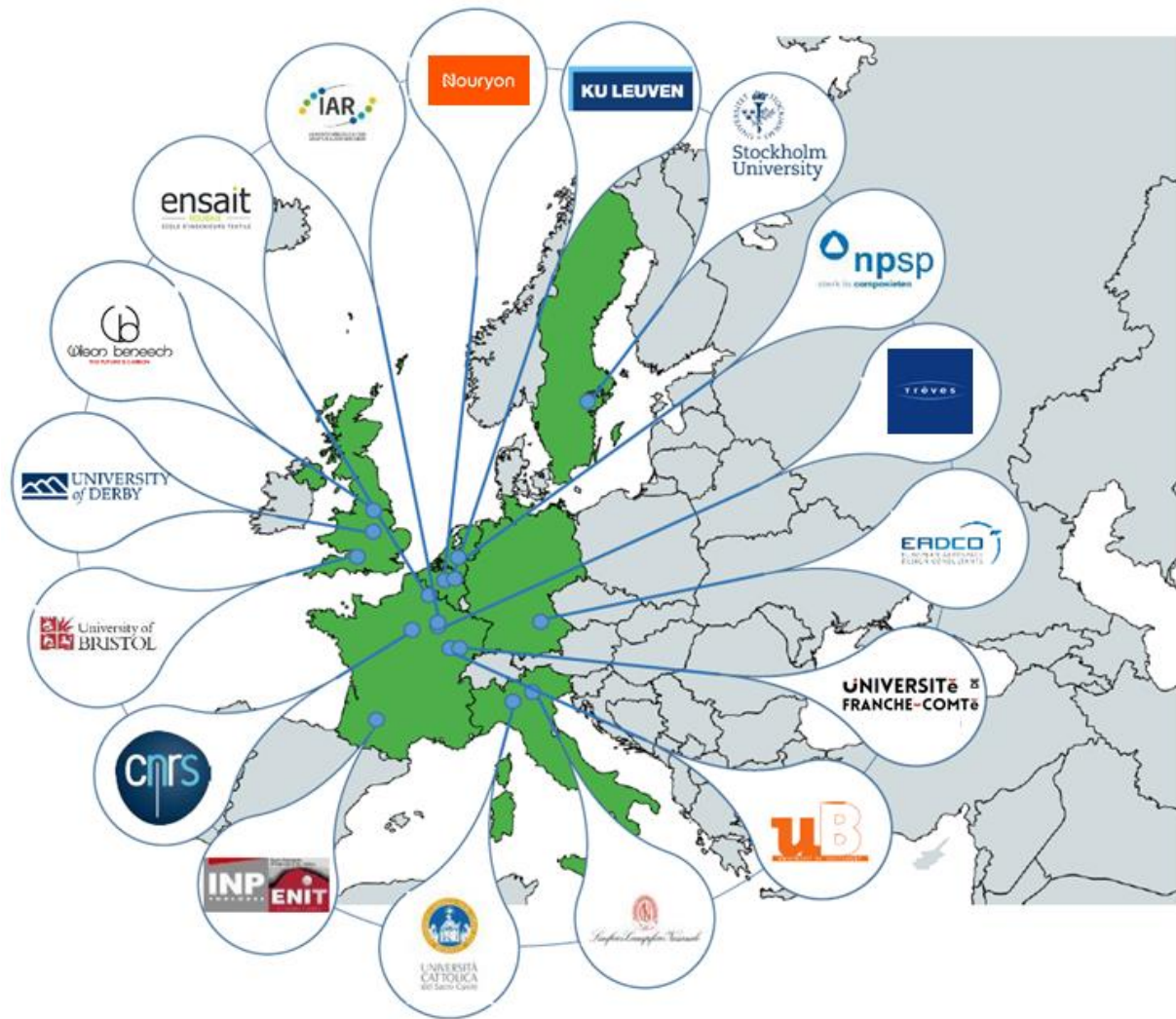


Figure I : Partenaires du projet SSUCHY

L'objectif global du projet SSUCHY est présenté en Figure II. A partir des propriétés intrinsèques des biopolymères et des fibres végétales utilisés, les propriétés des matériaux composites biosourcés vont être identifiées. En plus des caractéristiques classiquement recherchées telles que l'allègement des structures et l'obtention de propriétés mécaniques élevées, les travaux réalisés au sein du projet SSUCHY visent à développer des matériaux présentant une durabilité importante, une résistance au feu, une recyclabilité des matériaux, un contrôle vibro-acoustique et un amortissement des vibrations. A l'heure actuelle, les matériaux composites biosourcés ne possèdent pas toutes ces propriétés. De plus, les fibres naturelles commercialisées et utilisées communément dans l'industrie sont des fibres de lin, les fibres de chanvre ne sont que très peu valorisées.

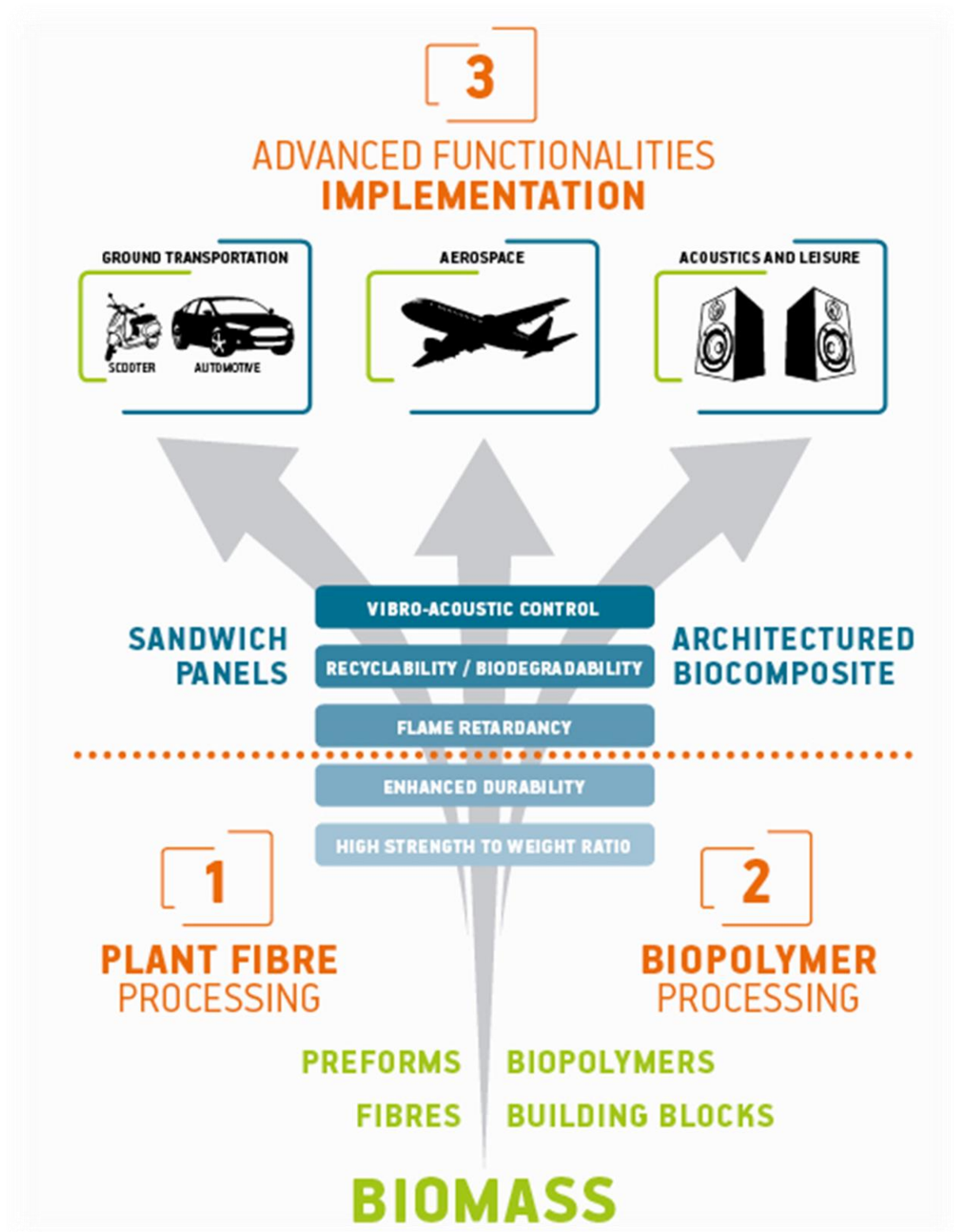


Figure II : Vue d'ensemble du projet SSUCHY

Les travaux du projet sont regroupés en différents lots, « Work Packages » (WP), exposés en Figure III. L'ENSAIT, au travers du GEMTEX, est leader du WP5 (« From aligned fibers to preforms ») dédié au développement des renforts en fibres naturelles. A partir des fils ou mèches issues du WP4 (« From plant stems to aligned fibres »), différentes préformes

sont élaborées en fonction des procédés de mise en œuvre choisis au sein du WP6 (« Composite Manufacturing and basic evolution ») et du cahier des charges des différents démonstrateurs réalisés au sein du WP9 (« Technology demonstrators / prototypes »). De plus, les données de production seront collectées pour alimenter l'Analyse de Cycle de Vie effectuée au sein du WP10 (« Sustainability, End of Life, Recyclability ») ; les actions de dissémination sont l'objet du WP11 (« Dissemination and exploitation »). Quatre actions majeures sont établies au sein du WP5. La première consiste à déterminer le cahier des charges des préformes à élaborer en fonction des propriétés finales requises par les différents démonstrateurs et des technologies textiles disponibles. La seconde tâche est dédiée à l'élaboration des préformes à l'échelle laboratoire. Une fois ces préformes produites, la troisième action consiste à caractériser ces préformes et établir des fiches techniques. Enfin, à partir des résultats obtenus à l'échelle sèche au sein du WP5 mais également à l'échelle composite en lien avec le WP6, les paramètres optimaux des préformes sont définis afin d'industrialiser cette phase d'élaboration.

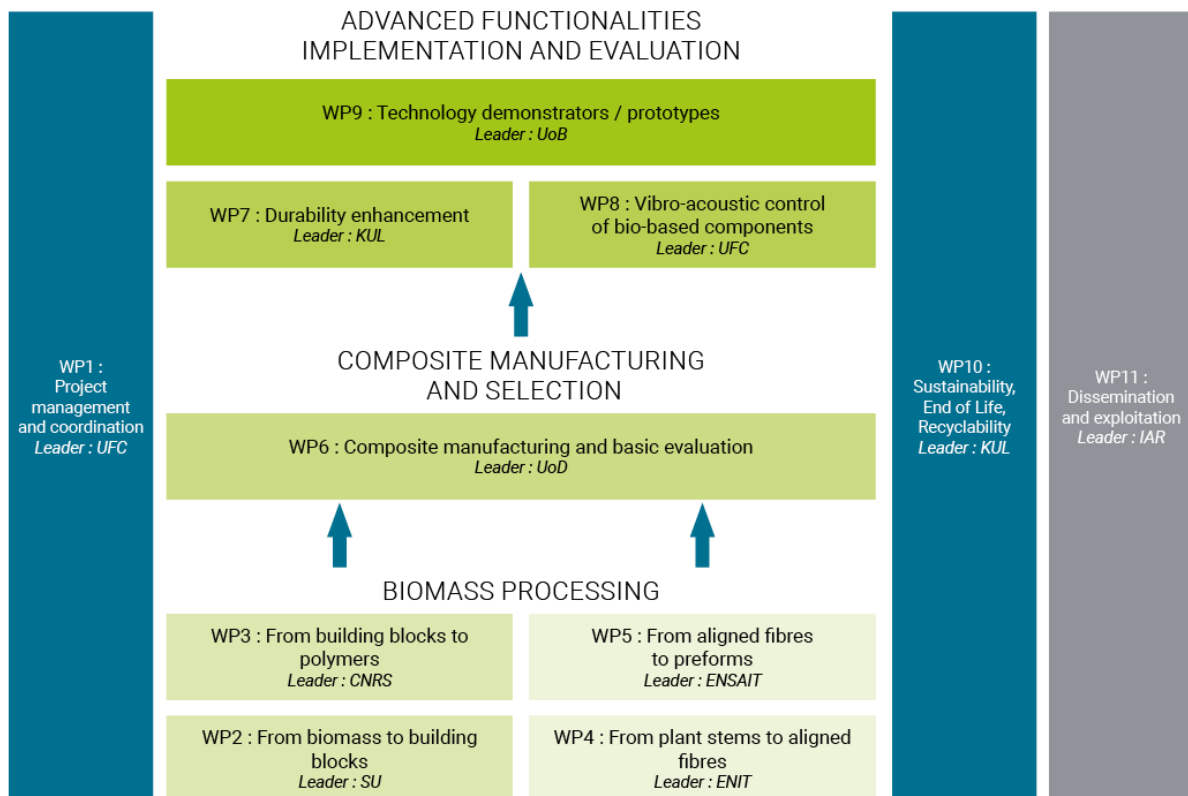


Figure III : Organisation générale des différents WP du projet SSUCHY

A terme, le projet SSUCHY vise à produire quatre démonstrateurs, destinés aux domaines du transport (terrestre et aérien) et des loisirs (haut-parleur), comme présenté en Figure IV.



Figure IV : Démonstrateurs du projet SSUCHY

Les travaux de thèse financés dans le cadre du projet SSUCHY et présentés dans ce manuscrit se focalisent sur les activités développées dans le cadre du WP5, et notamment sur le développement de renforts tissés à partir de fibres de chanvre aux propriétés optimisées pour chaque application. A partir de fils composés de fibres de lin ou de chanvre, des renforts ont été produits par tissage. Une analyse multi-échelle, c'est-à-dire aux échelles fibres, fils, tissus et composites, est réalisée dans le but de caractériser les différents produits, d'établir des fiches techniques, mais également d'étudier l'influence des paramètres de chaque échelle sur les autres, afin de choisir pour chaque application le renfort qui répondra au mieux aux attentes du cahier des charges de la pièce composite. Ces travaux ont été réalisés au sein du Laboratoire de Génie et Matériaux Textiles (GEMTEX, EA n°2461 ENSAIT Roubaix) sous la direction de Damien SOULAT et co-encadrés par Manuela FERREIRA et Ahmad-Rashed LABANIEH. D'étroites collaborations ont été menées d'une part avec l'entreprise Linificio e Canapificio Nazionale (LCN, Villa d'Almè, Italie), partenaire du WP5, pour la fourniture des fils en lin et en chanvre et la production de renforts tissés à l'échelle industrielle ainsi qu'avec le laboratoire FEMTO-ST (UMR 6174) pour la réalisation et la caractérisation d'éprouvettes composites, dans le cadre du WP6. Ce manuscrit est divisé en quatre chapitres.

Le Chapitre 1, intitulé « Etat de l'art sur la caractérisation multi-échelle des composites biosourcés », propose une revue de la littérature concernant les diverses échelles impliquées dans l'élaboration. A l'échelle des fibres, après une brève présentation des aspects économiques, les procédés d'extraction des fibres de lin et de chanvre sont présentés et les

propriétés physico-chimiques et mécaniques de ces dernières sont exposées. Ensuite à l'échelle des fils, la technologie de filature est décrite puis diverses méthodes pouvant être utilisées pour améliorer les propriétés des fils sont définies. A l'échelle des tissus, après un bref rappel des différentes structures de renforts pour les matériaux composites, la technologie de tissage est décrite, ainsi que l'influence du procédé sur les propriétés des fils. Enfin, à l'échelle composite, les principales méthodes de fabrication utilisées dans ces travaux sont présentées, puis les domaines d'applications des composites biosourcés sont exposés et les apports liés aux renforts tissés dans les matériaux composites sont proposés.

Le Chapitre 2, intitulé « Tissabilité des fibres naturelles », se focalise sur les échelles fils et fibres. Les fils produits à partir de fibres de lin et de chanvre sont présentés et caractérisés puis deux solutions d'amélioration de leurs propriétés mécaniques sont proposées : par recours à un traitement chimique et par technologie de guipage. Les propriétés des fils sont également identifiées pour établir les fiches techniques de tous les semi-produits (fils/mèches) concernés par ces travaux. A partir de ces fils, les propriétés en traction des fibres sont caractérisées, grâce à la méthode de l'« Impregnated Fibre Bundle Test », et l'impact à l'échelle des fibres du traitement chimique réalisé sur les fils est étudié. Enfin, l'influence du procédé de tissage sur les propriétés des fils et des fibres est également analysée.

Le Chapitre 3, intitulé « Caractérisation des renforts en fibres naturelles », propose une analyse des propriétés de l'ensemble des tissus élaborés à l'échelle laboratoire et à l'échelle industrielle. Les propriétés textiles (masse surfacique, épaisseur et perméabilité à l'air), puis les propriétés en traction uniaxiale et la tenue en flexion à l'état sec des renforts, sont identifiées et comparées en fonction des paramètres d'élaboration. Puis des propriétés plus complexes mais néanmoins primordiales dans le domaine des renforts pour matériaux composites sont étudiées, avec le comportement en cisaillement plan, au moyen d'essais dits de l'« Uniaxial Bias Extension Test », et la capacité de mise en forme, avec des essais d'emboutissage. L'obtention de toutes ses propriétés permet d'établir une fiche technique pour chaque renfort, afin de choisir le mieux adapté au cahier des charges de la pièce composite finale, mais également de comparer les deux échelles de production (laboratoire et industrielle) et les effets des paramètres choisis au moment de la production.

Le Chapitre 4, intitulé « Elaboration de matériaux biocomposites », présente certains matériaux composites élaborés à partir des renforts précédemment développés. Les renforts sélectionnés pour produire ces plaques biocomposites sont exposés, puis le procédé de fabrication et le protocole de caractérisation sont présentés. Les propriétés en traction des matériaux biocomposites SSUCHY sont ensuite définies et analysées, afin de faire un lien avec les paramètres de production des renforts utilisés, puis comparées avec celles de matériaux renforcés de produits en fibres naturelles déjà commercialisés, afin de positionner les développements SSUCHY par rapport aux matériaux existants actuellement.

Chapitre 1 : Etat de l'art sur la caractérisation multi-échelle des composites biosourcés

Table des matières

1	Introduction.....	24
2	Présentation et caractéristiques des fibres naturelles	29
2.1	Aspects économiques.....	29
2.2	Obtention des fibres de lin et de chanvre	32
2.2.1	Procédés d'extraction des fibres de lin	32
2.2.2	Procédés d'extraction des fibres de chanvre	34
2.3	Propriétés physico-chimiques des fibres naturelles.....	35
2.3.1	Composition des fibres de lin et de chanvre.....	35
2.3.2	Longueur des fibres de lin et de chanvre	37
2.3.3	Diamètre des fibres de lin et de chanvre	37
2.3.4	Densité des fibres de lin et de chanvre	38
2.4	Propriétés mécaniques des fibres naturelles	39
2.4.1	Méthodes de caractérisations.....	39
2.4.1.1	Méthode sur fibre unitaire	40
2.4.1.2	Méthode sur éprouvettes composites	41
2.4.2	Résultats obtenus.....	41
3	Mise en œuvre des fibres naturelles en vue de l'obtention de fils	43
3.1	Procédés de production des fils	43
3.2	Amélioration des propriétés mécaniques des mèches	45
3.2.1	Utilisation de fils retordus	45
3.2.2	Recours aux traitements des fibres.....	47
3.3	Réalisation de fils comelés	49
3.3.1	Présentation des diverses méthodes réalisables pour obtenir des produits comelés	49

3.3.2	Recours à la technologie de guipage.....	52
4	Utilisation des fils pour la production de renforts	55
4.1	Panorama des différentes structures de renforts en fibres naturelles.....	55
4.2	Présentation du procédé de tissage	57
4.2.1	Description de la technologie de production.....	57
4.2.2	Paramètres de production de tissus	59
4.3	Avantages des renforts tissés par rapport aux autres renforts.....	61
4.4	Influence du procédé de tissage sur les propriétés des fils	64
5	Réalisation de composites biosourcés	66
5.1	Méthodes de fabrication des composites biosourcés.....	66
5.2	Domaines d’applications des composites biosourcés	69
5.3	Utilisation de renforts tissés pour la production de biocomposites.....	71
6	Conclusion	77
	Références.....	80

1 Introduction

Par définition, un matériau composite est assemblage intime de deux ou plusieurs constituants, dont à minima un renfort et une matrice (Figure 1-1) et dont les propriétés sont supérieures à celles de ses composants pris indépendamment. Les matériaux composites ont de bonnes rigidités et résistances tout en étant moins lourds que les matériaux métalliques, permettant ainsi d’alléger des structures sans altérer leurs propriétés. Le renfort apporte au matériau ses propriétés mécaniques, tandis que la matrice assure une certaine cohésion au sein du matériau et transfère les sollicitations mécaniques provenant de l’extérieur vers le renfort. Ainsi, les matériaux composites sont de plus en plus utilisés, comme en témoigne l’évolution du marché depuis 1960 présentée en Figure 1-2. Le marché mondial a connu une forte augmentation entre 1960 et 2000. Entre 2000 et 2010, l’accroissement est moins prononcé, de seulement 14% en dix ans, puis la tendance repart à la hausse entre 2010 et 2018, avec une augmentation des volumes de 35% en huit ans. Sur la même période, entre 2012 et 2017, le secteur de l’industrie a connu une stabilisation du marché des biocomposites dans le domaine automobile mais une croissance d’environ 30% pour des applications techniques et objets de consommations, ce qui témoigne du fait que le développement de biocomposites est encore de nos jours en pleine expansion. Ainsi, l’utilisation et le développement de matériaux composites est un sujet d’actualité, et particulièrement dans le cas des matériaux biocomposites, composés soit de renforts biosourcés, soit de matrices biosourcées, soit des deux. Ces composants biosourcés étant issus des ressources naturelles, il est nécessaire d’axer les travaux de recherche sur l’optimisation de la production des fibres naturelles, sur le développement de renforts et sur l’industrialisation de la production de résines biosourcées pour la partie matrice [1–3].

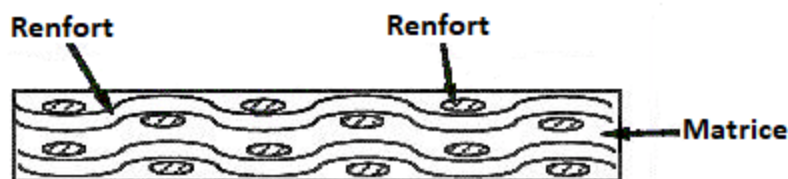


Figure 1-1 : Schématisation de la structure d'un matériau composite [4]

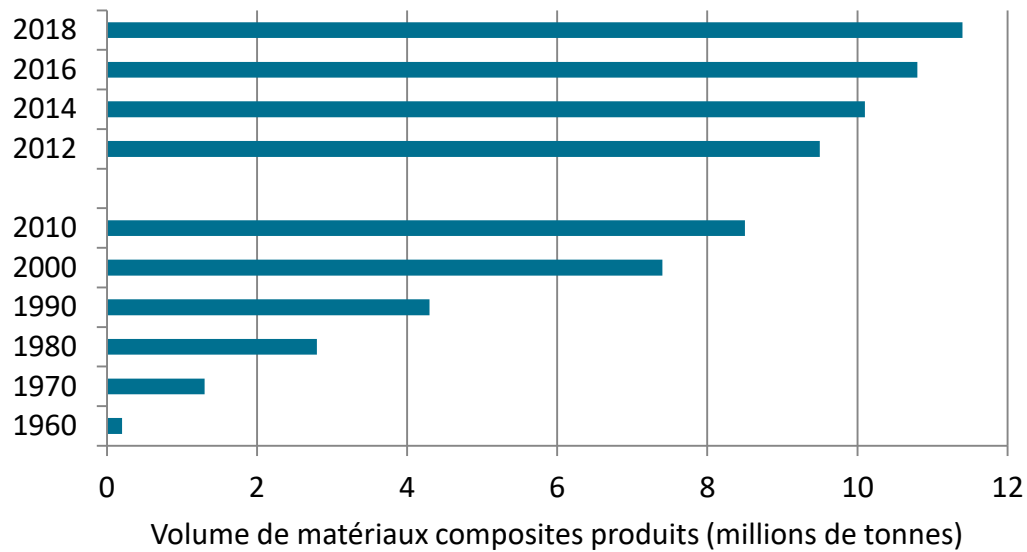


Figure 1-2 : Evolution du marché mondial des composites entre 1960 et 2018 [3]

Le principal composant des matériaux composites est la phase de renfort, qui confère au matériau ses propriétés. Ces fibres sont d’origine minérale ou synthétique, comme le verre ou le carbone, ou d’origine naturelle et leur répartition dans les matériaux composites entre les années 2000 et 2018 est présentée en Figure 1-2. Depuis les années 2000, les fibres de verre restent majoritaires, mais l’utilisation des fibres naturelles progresse. Les propriétés des fibres naturelles sont comparées à celles des fibres de verre dans l’étude conduite par D.U. Shah dans [5] et dont sont issus les graphes présentés en Figure 1-4. Les fibres naturelles sont rassemblées par catégories, selon leur localisation sur la plante (tige, graines ou feuilles). Les fibres libériennes, c’est-à-dire les fibres issues des tiges des plantes (telles que les fibres de lin, de chanvre ou de jute), possèdent le meilleur rapport de propriétés mécaniques contrainte/module parmi l’ensemble des fibres naturelles (Figure 1-4.A.). Lorsque ces propriétés sont rapportées à la densité des fibres (en Figure 1-4.B.), les fibres libériennes ont des propriétés spécifiques relativement proches de celles des fibres de verre, notamment en termes de rigidités spécifiques. Ainsi, dans de nombreuses applications, il est possible de substituer les fibres de verre par des fibres naturelles, telles que le lin et le chanvre. Ceci permet d’expliquer l’intérêt croissant des fibres naturelles illustré en Figure 1-3 [2,3,5].

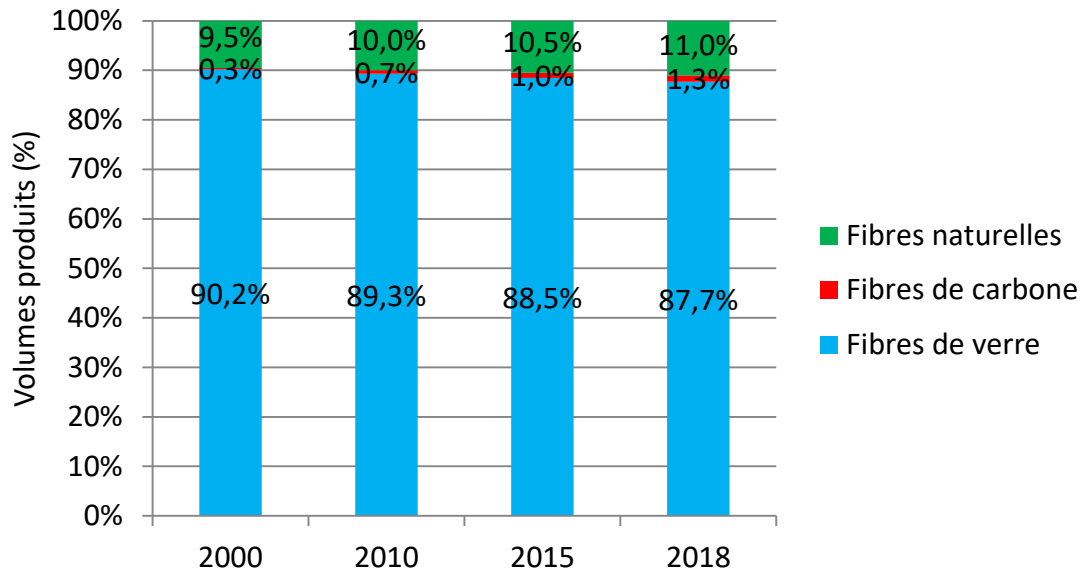


Figure 1-3 : Utilisation des fibres de renforts pour matériaux composites entre 2000 et 2018 [3]

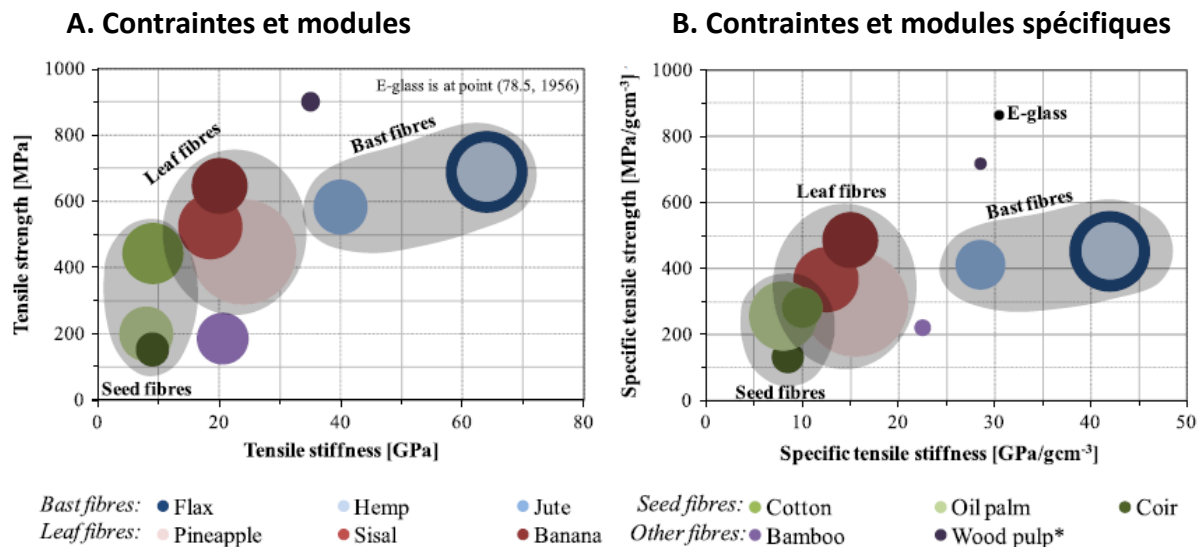


Figure 1-4 : Comparaison des propriétés des fibres naturelles et des fibres de verre A. Contraintes et modules B. Contraintes et modules spécifiques [5]

Le deuxième constituant du matériau composite est la matrice, phase continue aux faibles propriétés mécaniques qui permet de transférer les contraintes à la phase de renfort et d’assurer la cohésion du matériau. Il existe deux principaux types de matrices : les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables. Les résines thermodurcissables sont composées de molécules qui se lient entre elles en présence d’un durcisseur lors d’une phase de réticulation pour former une structure tridimensionnelle. Avant la réticulation, la résine possède une faible viscosité, ce qui facilite une bonne imprégnation des fibres dans un temps relativement rapide. Après réticulation, la résine est polymérisée et impossible à transformer de nouveau. Néanmoins, elle confère au matériau composite final d’excellentes propriétés mécaniques, notamment en fatigue et fluage. Ainsi, en dépit de la phase de réticulation qui ralentit le procédé de mise en œuvre composite et la difficulté de recycler le

matériau composite en fin de vie, les résines thermodurcissables sont très largement utilisées. Les résines thermoplastiques sont composées de longues chaînes moléculaires linéaires. Cette structure leur permet d’avoir une viscosité élevée à haute température et de se présenter sous une forme durcie après refroidissement. Elles peuvent ainsi être chauffées et refroidies plusieurs fois sans subir de dégradations importantes (tant que la température de chauffe est inférieure à la température de dégradation) et ne nécessitent pas d’étapes de réticulation contrairement aux résines thermodurcissables. Le recours aux résines thermoplastiques permet donc d’accélérer les temps de production des matériaux composites et ces derniers sont plus facilement recyclables, le processus pouvant être réversible. Du fait de ces avantages, le marché des composites se tourne de plus en plus vers l’utilisation de résines thermoplastiques, comme en témoigne la Figure 1-5. Entre 1980 et 2018, le volume total de composites a augmenté de plus de 300%, pour passer de 2,8 millions de tonnes produites en 1980 à 11,4 millions de tonnes en 2018 et dans le même temps, l’utilisation de résines thermodurcissables a diminué de 37%. Ainsi, non seulement les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans diverses industries, mais ils sont également de plus en plus élaborés à partir de résines thermoplastiques [1–3,6].

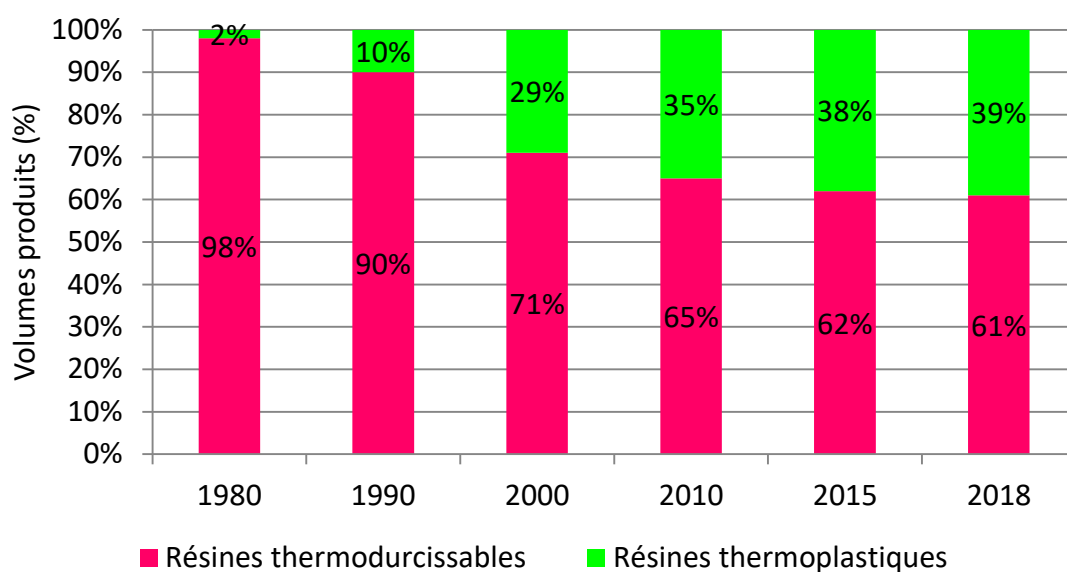


Figure 1-5 : Utilisation des résines thermodurcissables et thermoplastiques sur le marché des composites entre 1980 et 2018

Ce premier chapitre se focalise sur l’état de l’art aux différentes échelles du développement de matériaux composites biosourcés. Dans une première partie, les fibres naturelles, et principalement les fibres de lin et de chanvre, seront présentées sous différents aspects : l’économie de leurs filières de production, les étapes d’extraction, l’étude de leurs propriétés physico-chimiques (composition, longueur, diamètre et densité) ainsi que leur comportement mécanique. La deuxième échelle d’étude se focalisera sur l’obtention de semi-produits alignés (fils ou mèches) à partir de fibres naturelles discontinues, avec la description des procédés d’élaboration des fils, la présentation de

différentes méthodes d’amélioration des propriétés mécaniques des fils (par torsion ou traitements sur les fibres) ainsi que la réalisation de fils comelés. L’analyse multi-échelle se poursuivra avec l’utilisation des fils pour la production de renforts. Après une présentation des différents types de renforts, le procédé de tissage sera présenté et les paramètres de production définis, puis les avantages des renforts tissés seront mis en évidence ainsi que les inconvénients par le biais des défauts générés par cette technologie textile. Enfin dans une dernière partie, l’échelle des biocomposites sera étudiée, en termes de procédés de fabrication et de domaines d’applications, et l’apport des renforts tissés au sein des biocomposites sera mis en avant.

2 Présentation et caractéristiques des fibres naturelles

2.1 Aspects économiques

Après avoir été moins privilégiées par les agriculteurs pendant de nombreuses années pour des cultures plus rentables, les plantations de lin et de chanvre connaissent un renouveau. A partir des pailles de lin, il est possible d’obtenir respectivement 28 à 40 % de fibres, 45 à 52 % de granulats, appelés anas, et 10 à 12 % de poudres, composées de paillettes et d’épidermes de tiges. Concernant les pailles de chanvre, ces ratios sont de 27 à 30 % de fibres, 45 à 55 % de granulats, appelés chènevottes, et 15 à 24% de poudres, composées elles aussi de déchets provenant des tiges. L’avantage de ces filières est donc la valorisation possible de l’ensemble des produits issus de ces cultures, au travers de diverses applications, permettant ainsi de n’avoir quasiment aucun déchet. Dans le cas des renforts pour matériaux composites, seule la partie fibre sera utilisée. La Figure 1-6, présentant les surfaces agricoles françaises cultivées en lin et en chanvre entre 2013 et 2018, met en évidence la constante augmentation des productions de lin et de chanvre, de l’ordre de 75% en termes de surfaces cultivées sur cette période. Le chanvre, quant à lui, peine un peu plus à se développer, du fait de technologies de transformation et d’utilisation encore trop peu développées. Même si les surfaces agricoles destinées au chanvre ont connu une augmentation de 46% en 6 ans, la surface totale de culture reste faible par rapport à celle du lin. La majorité des fibres de lin et de chanvre n’est pas destinée à une utilisation composite, comme en témoigne la Figure 1-7. En effet, seulement 10% et 15% de la récolte respectivement de lin et de chanvre est dédiée à des applications [1,7–11].

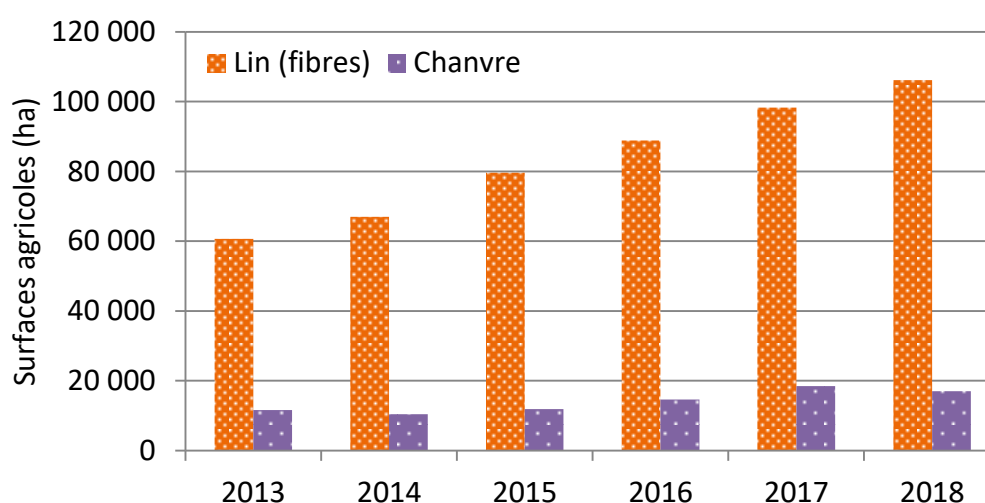


Figure 1-6 : Surfaces agricoles françaises cultivées en lin et en chanvre entre 2013 et 2018 [7,8]

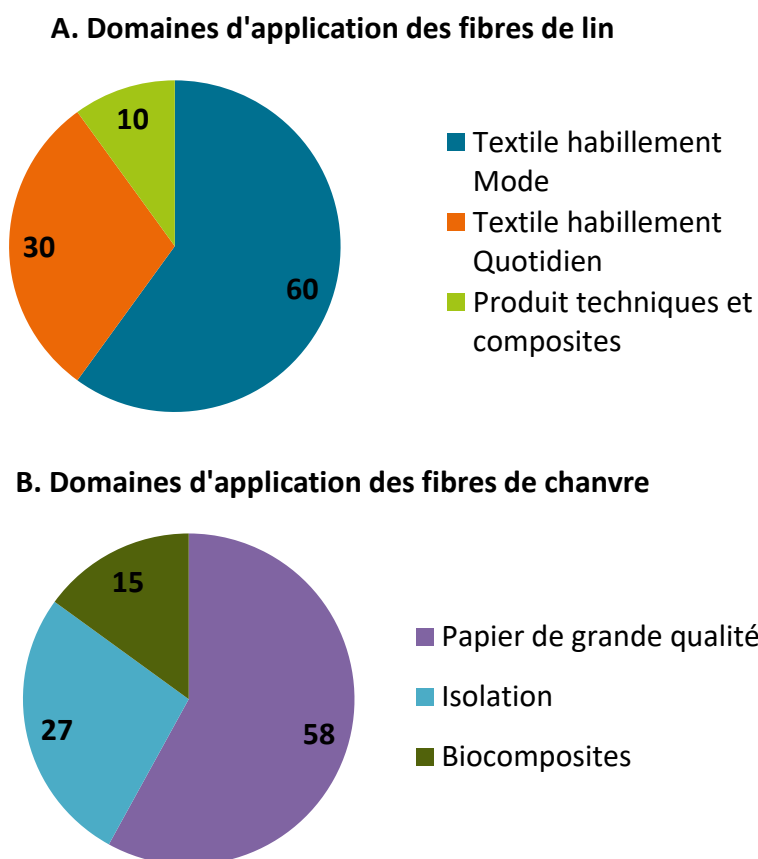


Figure 1-7 : Domaines d'application des fibres naturelles A. Fibres de lin, B. Fibres de chanvre [1]

Pour une croissance optimale, les plants de lin requièrent des conditions environnementales spécifiques, dans des zones sans fortes chaleurs et avec beaucoup d’humidité. Ainsi, même si ces plants sont produits dans différents pays (Chine, Egypte, Russie ou Europe de l’Est par exemple), environ 80% de la production mondiale est localisée en Europe de l’Ouest, où les conditions météorologiques (température et humidité) sont les plus favorables. La Figure 1-8 présente les différentes régions de production en Europe de l’Ouest en termes de surfaces et de rendements enregistrés en 2017. La France concentre à elle seule 5/6 de la production de toute l’Europe de l’Ouest, ce qui en fait le leader mondial avec des zones majoritairement localisées dans deux régions, la Normandie et les Hauts-de-France [10,12]. La production de chanvre est, quant à elle, plus répartie sur la surface du globe, comme en témoigne la Figure 1-9. Il existe ainsi trois grandes zones géographiques, qui sont le Canada, la Chine et l’Europe. Néanmoins, le chanvre produit au Canada ou en Chine est majoritairement destiné à des applications alimentaires ou thérapeutiques, tandis que les applications du chanvre européen sont plutôt à visée industrielle.

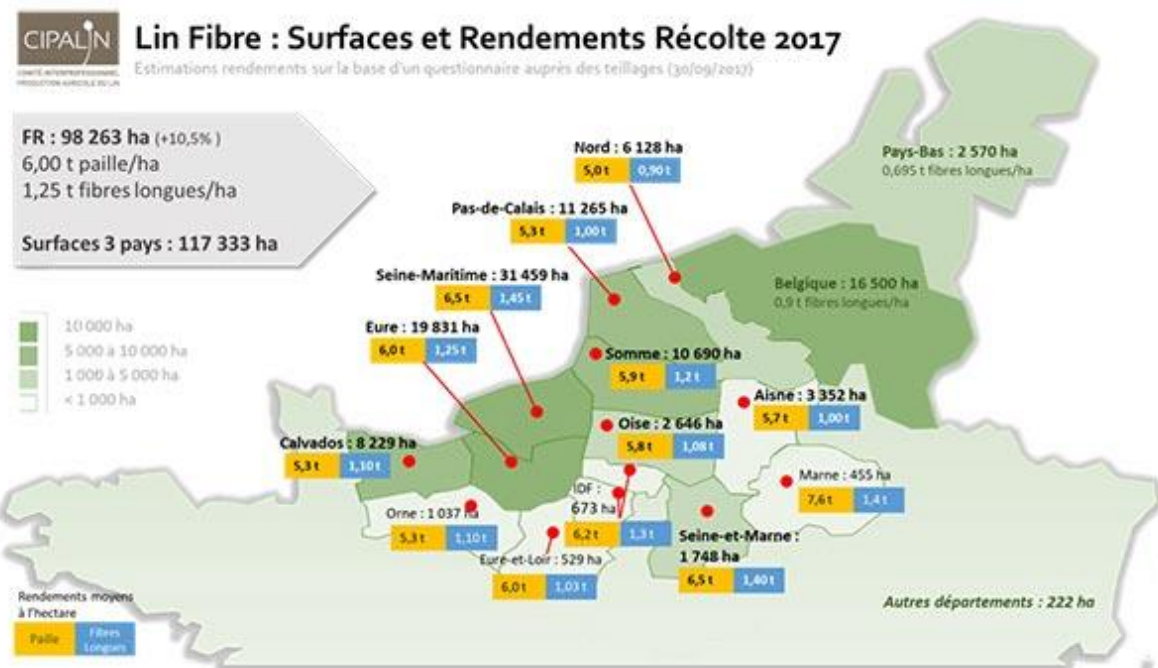


Figure 1-8 : Production européenne de lin fibre [10]

Production mondiale de Chanvre en 2016

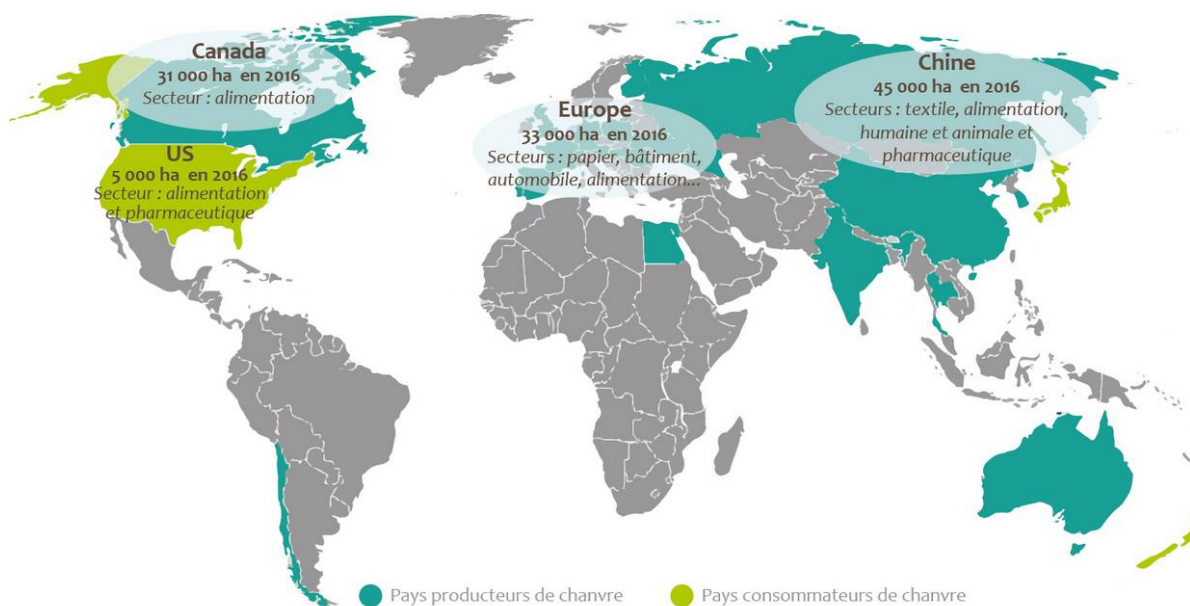


Figure 1-9 : Production mondiale de chanvre en 2016 [11]

Le prix de vente des fibres naturelles est comparé à celui des fibres de verre en Figure 1-10. Les fibres naturelles sont moins chères à l’achat que les fibres de verre, ce qui permet de réduire les coûts des matières premières. Les fibres de chanvre, et encore plus les fibres de lin, font partie des fibres naturelles les plus onéreuses. En effet, en comparaison à d’autres fibres, ces dernières sont plus longues, leur extraction est plus complexe et leurs propriétés sont plus intéressantes ce qui rend leur prix de vente plus élevé. Les fibres de chanvre étant moins utilisées à l’heure actuelle, elles sont moins recherchées et donc moins

chères que les fibres de lin. Il y a donc un réel intérêt économique à développer des applications aux fibres de chanvre [13].

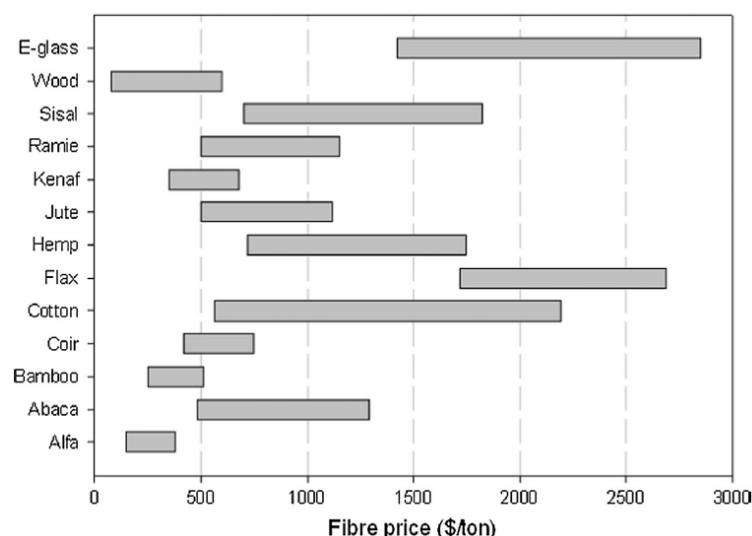


Figure 1-10 : Comparaison du prix de vente par tonne des fibres naturelles et de verre [13]

2.2 Obtention des fibres de lin et de chanvre

2.2.1 Procédés d’extraction des fibres de lin



A. Arrachage des plants de lin

B. Rouissage des tiges de lin

Figure 1-11 : Etapes de récolte des tiges de lin A. Arrachage, B. Rouissage [14]

Le cycle de production des fibres de lin débute au début du printemps, avec la plantation des graines qui a lieu entre la mi-mars et la mi-avril. La croissance dure environ une centaine de jours et se termine avec la floraison des champs, les tiges de lin atteignant alors environ un mètre. Au mois de juillet, les tiges sont arrachées et déposées au sol, alignées parallèlement pour former des andains. L’étape suivante est le rouissage, étape durant laquelle les alternances de soleil et de pluie permettent aux faisceaux de fibres de se détacher des tiges et de se séparer entre eux grâce à l’intervention de micro-organismes. Pour améliorer les performances et l’homogénéité du rouissage, les andains sont retournés

régulièrement. Les tiges de lin sont ensuite ramassées et introduites dans le procédé de teillage, qui va permettre la séparation entre les fibres et les tiges au moyen d’une succession d’étapes de battage et de broyage mécanique, présenté en Figure 1-12. Les faisceaux de fibres sont ensuite étirés et peignés. Une ligne de peignage est constituée de machines équipées de peignes, illustrées en Figure 1-13, dont le nombre de dents augmente au fur et à mesure que les faisceaux de fibres avancent afin d’individualiser au maximum les fibres. Les fibres sont alors rassemblées pour former des rubans qui sont déposés dans des pots, en Figure 1-14, et destinés aux procédés de transformation textile [1,9,15–19].



Figure 1-12 : Teillage des pailles de lin (Terre de Lin)



Figure 1-13 : Peignage des fibres de lin (Terre de Lin)



Figure 1-14 : Mise en pot des rubans de lin (Terre de Lin)

2.2.2 Procédés d’extraction des fibres de chanvre

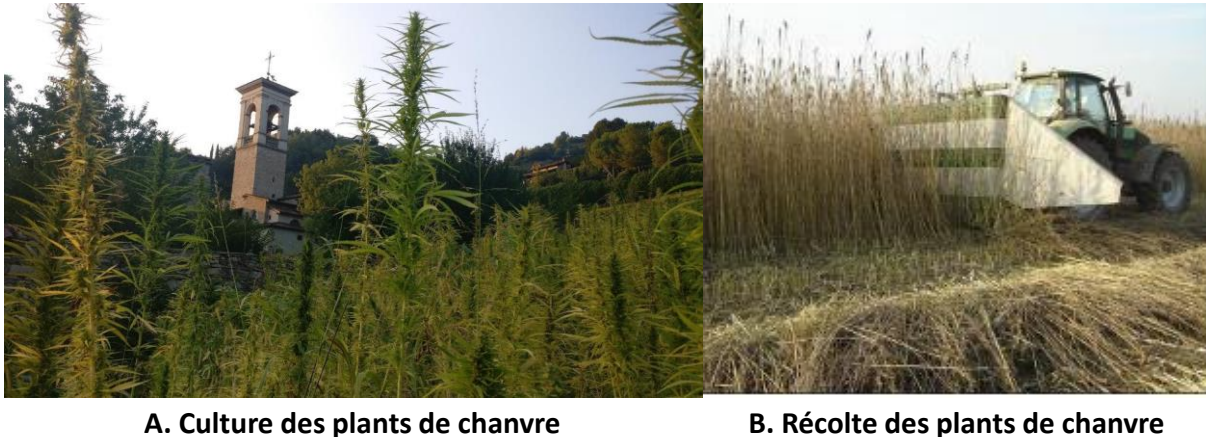


Figure 1-15 : Production du chanvre A. Culture, B. Récolte [20]

Comme pour le lin, les plants de chanvre sont semés au printemps, entre mi-mars et fin mai. La croissance dure entre 100 et 130 jours, pour donner des tiges d’une hauteur de 3 à 5 mètres. La culture du chanvre ne nécessite aucun traitement phytosanitaire et puise dans des ressources qui ne sont pas utilisées par les cultures agroalimentaires. La période de récolte du chanvre varie en fonction de la destination future des plants : fin août, dès la fin de la floraison, si cette culture est « non battue » et courant septembre si la culture est « battue ». Pour la culture non battue, seules les pailles sont récupérées, les plants vont être coupés et déposés au sol pour sécher et être rouis de manière semblable au lin (Figure 1-16). Ce mode de récolte présente certains inconvénients, comme une qualité de fibre non optimisée (puisqu’elle continue de se développer après la floraison), un défibrage difficile des tiges, un temps de séchage et un rouissage durant lequel les pailles peuvent pourrir en raison de la forte présence d’eau dans les tiges à cette période. La culture battue permet de récolter les pailles et les graines, ces dernières se développant après la floraison. Les graines sont alors et d’abord moissonnées, et les pailles sont déposées au sol pour le rouissage (Figure 1-16). Lorsque le temps de rouissage est atteint, en fonction des applications visées, les pailles de chanvre sont récoltées sous formes de balles. Les étapes suivantes (Figure 1-17) sont identiques à celles présentées précédemment (paragraphe 2.2.1) pour les pailles de lin. Les balles sont coupées et passent dans un procédé de défibrillation mécanique, durant lequel des marteaux métalliques vont venir cogner les tiges pour séparer les fibres des parois. Ces fibres sont ensuite affinées et alignées en vue de leur utilisation dans les procédés textiles [9,18,21–24].



Figure 1-16 : Rouissage du chanvre [20]



Figure 1-17 : Teillage et peignage du chanvre [20]

2.3 Propriétés physico-chimiques des fibres naturelles

2.3.1 Composition des fibres de lin et de chanvre

Les fibres de chanvre et de lin sont connues pour être les fibres naturelles les plus résistantes [25]. La Figure 1-18 présente la structure générale des fibres de lin, depuis la tige de la plante jusqu’aux microfibrilles. Le teillage des tiges de lin, détaillé à la section 2.2.1, permet d’obtenir des faisceaux de fibres à partir de tiges d’un diamètre initial de 2 à 3 mm. De ces faisceaux, des fibres techniques d’un diamètre compris entre 50 et 100 μm sont obtenues grâce à l’étape de peignage. Ces fibres techniques sont composées de fibres élémentaires, de diamètre compris entre 10 et 20 μm . Les mésfibrilles de lin, contenues dans les fibres élémentaires, ont un diamètre variant de 0,1 à 0,3 μm et sont constituées de microfibrilles, de diamètre entre 1 et 4 nm. Ainsi, une fibre de lin est constituée d’une multitude de composants, de diamètres de plus en plus petits, maintenus entre eux par de la pectine. La structure interne des fibres de chanvre est similaire à celle des fibres de lin [1,26,27].

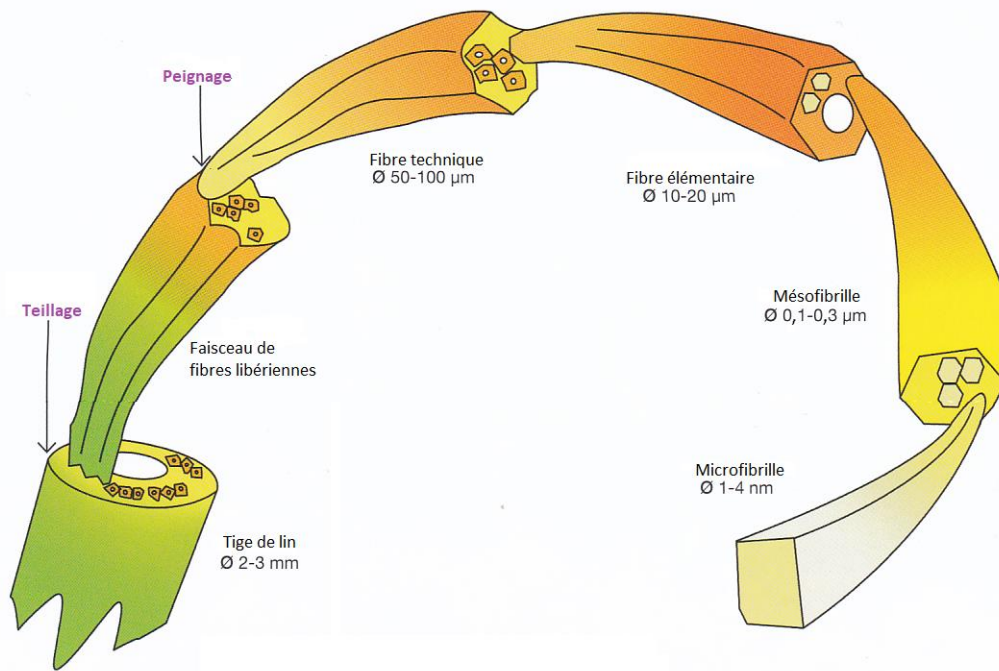


Figure 1-18 : Structure des fibres de lin [1]

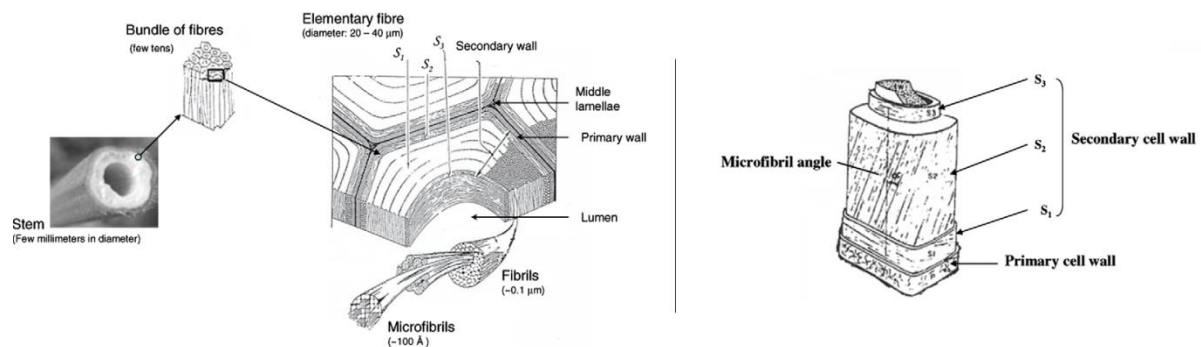


Figure 1-19 : Représentation schématique des fibres naturelles [27]

Les fibres élémentaires, qu’elles soient de lin ou de chanvre, sont constituées d’une paroi cellulaire primaire, d’une paroi cellulaire secondaire ainsi que d’un lumen (partie centrale de la fibre qui est composée de vide) comme représenté sur la Figure 1-19. Ces parois sont composées d’une phase de microfibrilles de cellulose et d’une phase matrice constituée principalement d’hémicellulose et de lignine. La croissance des plantes permet l’accroissement des parois cellulaires et des fibres. Durant cette croissance, la paroi secondaire va s’épaissir et les microfibrilles de cellulose vont s’orienter selon un angle appelé « angle microfibrillaire » (Figure 1-19). Cet angle microfibrillaire (noté MFA) influe sur les propriétés mécaniques de la fibre : les fibres ayant un petit angle sont plus rigides et résistantes tandis que les fibres ayant un angle microfibrillaire plus important seront plus ductiles. Par conséquent, les conditions de production des plantes ont une influence importante sur la qualité des fibres, leur arrangement au sein de la structure, leur diamètre ainsi que la taille du lumen, et donc sur les propriétés mécaniques et la densité des fibres. La composition chimique et l’angle microfibrillaire des fibres de lin et de chanvre sont

présentées en Table 1-1. Les propriétés mécaniques de la fibre sont essentiellement dues au réseau de cellulose et d’hémicellulose. L’humidité, les graisses et les pectines ont au contraire une mauvaise influence sur ces mêmes propriétés. Ainsi, des traitements sur les fibres sont nécessaires pour obtenir des propriétés optimales [18,28–32].

Table 1-1 : Composition chimique des fibres de lin et de chanvre [13,26,33,34]

	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)	Pectine (%)	Graisses (%)	MFA (°)
Chanvre	55 – 90	12 – 18	2 – 5	0,9 – 3	0,8 – 1,7	4 - 11
Lin	60 – 85	14 – 21	1 – 4	1 – 15	1 – 6	8,3 - 11

2.3.2 Longueur des fibres de lin et de chanvre

Contrairement aux fibres synthétiques élaborées sous forme continue, les fibres naturelles sont extraites sous une forme discontinue, dont la longueur est un paramètre essentiel pour son influence sur les propriétés mécaniques, à l’échelle des fibres mais également à l’échelle des matériaux produits à partir de ces fibres, tels que les renforts ou les composites [29,35]. Néanmoins, du fait de la complexité de la morphologie des fibres naturelles, présentée au paragraphe 2.3.1, leur individualisation est complexe et laborieuse. La méthode la plus répandue pour obtenir les fibres à partir des faisceaux ou des rubans est une extraction manuelle, qui doit être effectuée avec soin pour ne pas endommager les fibres [36]. Une autre méthode est proposée par C. Baley et al. [37] dans laquelle le recours à une solution composée de Trioxyde de chrome (CrO_3) et d’acide nitrique (HNO_3) permet de faciliter la séparation des fibres élémentaires.

Après s’être assuré que les fibres obtenues sont bien unitaires, par observation microscopique par exemple, leur longueur peut être identifiée. Selon leur localisation au sein des tiges de lin ou de chanvre (en bas, au milieu ou en haut), la longueur moyenne des fibres varie, entre 5 et 80 mm pour les fibres de lin et entre 5 et 55 mm pour celles de chanvre. Dans l’ensemble, les fibres les plus longues sont issues du milieu des tiges, mais cette variabilité implique des dispersions de valeur, en fonction de la localisation de prélèvement. Ainsi, même si la longueur moyenne est un des paramètres utilisés pour caractériser les fibres naturelles, il est préférable de parler d’intervalles de valeurs pour prendre en compte cette grande dispersion [13,26,37,38].

2.3.3 Diamètre des fibres de lin et de chanvre

Les fibres naturelles présentent des sections et des dimensions différentes. La section des fibres n’est pas cylindrique mais se rapproche plus d’une géométrie polygonale et, notamment pour les fibres de lin et de chanvre, leurs centres sont creux par la présence du lumen (voir Figure 1-19). Face à cette complexité, dans la littérature, des approximations sont effectuées pour obtenir les grandeurs caractéristiques du comportement mécanique,

en modules ou contraintes. Dans le domaine textile, et à plus forte raison en présence de fibres naturelles, les efforts et modules sont rapportés à la finesse (ou densité linéique) de la structure. De plus, les fibres naturelles étant différentes (variété et localisation de la culture) et pouvant présenter de nombreux défauts, les résultats issus d’une caractérisation à l’autre peuvent varier [27,39]. D’autre part, la présence du lumen au centre de chaque fibre, composée de vide, vient altérer certains calculs, comme celui du diamètre par exemple [40]. Le diamètre des fibres naturelles augmente progressivement lors de la croissance des plants, ce qui entraîne des variations le long de chaque fibre élémentaire. Les mesures de diamètres doivent donc être effectuées à plusieurs endroits sur une même fibre puis être moyennées [37].

Dans l’étude présentée par V. Placet et al. [34], le diamètre des fibres varie entre 10 et 50 μm . Au-delà d’une certaine valeur, aux alentours de 20 μm , qu’il est possible de qualifier de diamètre « optimal », les propriétés mécaniques de la fibre vont diminuer. Les propriétés d’un matériau, quel qu’il soit, dépendent de la présence des défauts. Ainsi, plus le diamètre de la fibre est élevé, plus la probabilité d’avoir des défauts est importante, et plus les propriétés mécaniques peuvent diminuer. Ces défauts sont principalement des nœuds ou des déboîtements. Par ailleurs, plus le diamètre de la fibre augmente, plus le lumen présent en son centre sera important, contribuant ainsi également à la diminution des performances mécaniques [18,34,40]. A. Bourmaud et al. ont rassemblé dans [13] les valeurs de diamètre des fibres naturelles. Le diamètre des fibres de lin varie entre 12,4 et 23,9 μm tandis que celui des fibres de chanvre est compris entre 10,9 et 42,0 μm . Ainsi les fibres de chanvre ont un diamètre plus grossier que les fibres de lin et avec une plus grande variabilité, ce qui peut entraîner des propriétés mécaniques plus dispersées que pour les fibres de lin.

2.3.4 Densité des fibres de lin et de chanvre

La densité, plus particulièrement des fibres naturelles, est un paramètre important dans l’étude des matériaux composites. En effet, cette dernière intervient dans de nombreux calculs, ou pour comparer différentes matières entre elles, en termes de propriétés spécifiques.

Pour les fibres naturelles, la mesure de la densité est complexe, ces dernières étant poreuses, de géométrie variable, et présentant un lumen en leur centre, ce qui complexifie la détermination du volume [41,42]. A l’heure actuelle, il n’existe pas de méthode normée pour déterminer la densité des fibres naturelles. La méthode la plus précise pour déterminer la densité des fibres naturelles est l’utilisation d’un pycnomètre à gaz [42], dans laquelle la différence de pression entre une enceinte de référence et une enceinte de mesure est utilisée pour déterminer le volume de l’échantillon. Par ce moyen, le gaz peut pénétrer au sein de la fibre et au sein du lumen, conduisant ainsi à des mesures plus précises que celles obtenues après immersion dans l’eau. En effet, avec une immersion dans l’eau, l’eau ne pénètre pas au cœur de la fibre et de son lumen, et est freinée par l’aspect de surface et le

caractère hydrophile des fibres, donnant ainsi lieu à des résultats moins précis qu’avec le pycnomètre. Dans Le Gall et al. [42], les valeurs de densités des fibres de lin caractérisées par ces deux méthodes en sortie de peignage et extraites d’un renfort UD, sont comparées. Avec la méthode du pycnomètre la densité des fibres est de 1,571 pour les fibres issues de l’UD et 1,534 pour celles issues du teillage tandis qu’avec la méthode de l’immersion, les valeurs sont respectivement de 1,415 et 1,392. La méthode de l’immersion entraîne une sous-estimation de la densité des fibres. Une autre méthode basée sur le principe de la poussée d’Archimède est proposée par Amiri et al. [31] comme alternative à l’utilisation d’un pycnomètre. L’immersion des fibres dans l’eau ne conduit pas à des résultats pertinents mais l’utilisation d’huile de colza combinée à une pression de vide élevée et un temps d’exposition à vide important montrent des résultats proches de ceux obtenus avec un pycnomètre. Les valeurs de densité obtenues sur différentes fibres de lin varient entre 1,4869 et 1,5065. Plus généralement, les valeurs de densité les plus répandues dans la littérature sont comprises entre 1,50 et 1,55 pour les fibres de lin et entre 1,40 et 1,60 pour les fibres de chanvre [1,13,18,43].

Dans le cadre de ces travaux et en raison d’une harmonisation au sein du consortium de SSUCHY, la densité des fibres de lin ainsi que celle des fibres de chanvre sera considérée comme égale à 1,504. Cette valeur est issue d’un benchmark réalisé au sein de plusieurs laboratoires.

2.4 Propriétés mécaniques des fibres naturelles

2.4.1 Méthodes de caractérisations

Les propriétés mécaniques des fibres naturelles dépendent de nombreux paramètres : leur composition, leur morphologie, les conditions environnementales de production, la maturité des plantes au moment de la récolte ou encore les procédés d’extraction des fibres. Les étapes les plus cruciales dans la production des fibres naturelles sont la croissance des plantes et l’extraction, pendant lesquelles les tiges doivent être manipulées avec précaution [28]. Les différences d’environnement de production et de transformation des fibres naturelles ont un impact sur la structure interne et la composition chimique des fibres qui seront les sources principales de ruptures lorsque les fibres seront soumises à des contraintes mécaniques, que ce soit en caractérisation ou lors de leur utilisation dans des applications industrielles [40,44]. Deux méthodes sont principalement utilisées pour déterminer les propriétés en traction des fibres naturelles : la méthode sur fibre unitaire et la méthode sur éprouvettes composites ou « Impregnated Fibre Bundle Test » (IFBT).

2.4.1.1 Méthode sur fibre unitaire

La caractérisation en traction des propriétés mécaniques des fibres naturelles réalisée par des essais sur fibre unitaire, s’effectue selon la norme NF T25-501-2 [45]. Lors d’un essai de traction, par exemple, sur une fibre de lin la courbe de réponse effort-déplacement présente une première partie non-linéaire (en vert sur la courbe de la Figure 1-20) qui peut être attribuée à la réorientation des microfibrilles dans l’axe de la sollicitation et à l’extension des parois des fibres. L’angle microfibrillaire va alors diminuer, et ce quelle que soit la nature de la fibre naturelle (la littérature rapporte des essais sur des fibres de lin, de ramie, de coton et de chanvre). La seconde partie, linéaire (en orange sur la Figure 1-20), correspond à la déformation élastique des microfibrilles, leur allongement et leur glissement les unes par rapport aux autres conduisant à la rupture de la fibre. En ce qui concerne spécifiquement les fibres libériennes, selon leur emplacement dans la tige, leurs propriétés mécaniques varient : ces dernières sont plus importantes si les fibres sont localisées au milieu de la tige en comparaison de celles situées aux extrémités (pieds et sommets des tiges). Ce comportement des fibres, à l’échelle microscopique, aura une influence sur la réalisation de fils/mèches [27,40,44,46].

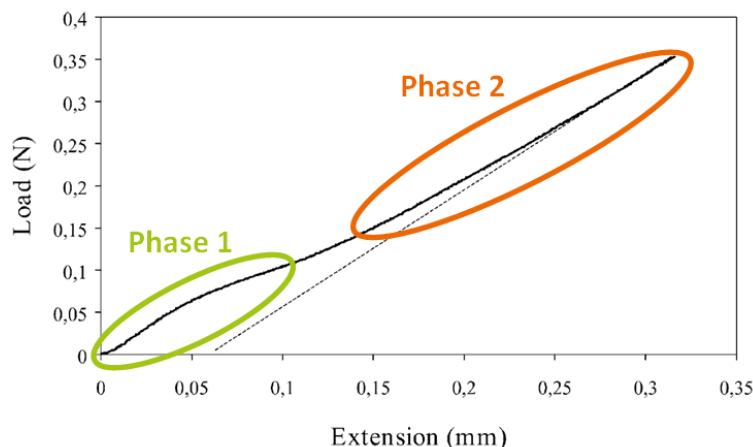


Figure 1-20 : Exemple de courbe effort-déplacement d'une fibre de lin [40]

Les essais de traction sur fibre unitaire permettent d’obtenir directement la force, le module et l’allongement d’une fibre. Cependant, ces essais prennent du temps, la mesure de l’allongement est souvent parasitée par des glissements au sein des mors, la mise en œuvre est complexe, du fait notamment des difficultés d’individualisation des fibres élémentaires et de la préparation méticuleuse des éprouvettes. Une grande dispersion des résultats est très souvent observée. Des essais de traction peuvent également être réalisés sur les fibres techniques (voir Figure 1-18). Cependant, en les utilisant, il y a de nombreux biais sur les résultats : les fibres élémentaires peuvent glisser entre elles et la qualité de la pectine qui colle ces fibres élémentaires entre elles peut varier d’une fibre technique à l’autre [1,38,47].

2.4.1.2 Méthode sur éprouvettes composites

Une alternative à la méthode de traction sur fibre unitaire est la méthode de l’ « Impregnated Fibre Bundle Test » (nommée IFBT par la suite) développée par la Confédération Européenne du Lin et du Chanvre (CELC) [1,48]. Cette méthode consiste à fabriquer des éprouvettes composites avec soit des faisceaux de fibres, des rubans ou des fils de fibres naturelles. Ces éprouvettes sont ensuite caractérisées en traction et par calcul inverse, à l’aide de la loi des mélanges [49], présentée en Equation (1-1) pour le module et en Equation (1-2) pour la contrainte, les propriétés des fibres naturelles sont déduites.

$$E_f = \frac{E_c - (1 - V_f)E_m}{V_f} \quad (1-1)$$

$$\sigma_f = \frac{\sigma_c - (1 - V_f)\sigma_m}{V_f} \quad (1-2)$$

Avec : E_f : module des fibres [GPa]
 E_c : module de l’éprouvette composite [GPa]
 E_m : module de la matrice [GPa]
 V_f : fraction volumique de fibres dans l’éprouvette composite
 σ_f : contrainte des fibres [MPa]
 σ_c : contrainte de l’éprouvette composite [MPa]
 σ_m : contrainte de la matrice [MPa]

L’IFBT présente de nombreux avantages, tels que le recours à un protocole expérimental plus simple à mettre en œuvre, la détermination de la contrainte et de la rigidité des fibres avec précision et peu d’écart-types, le reflet du comportement des fibres telles qu’elles sont dans le matériau composite et le fait que cette méthode est réalisable à partir de nombreux produits fibreux, comme des fibres techniques, des rubans, des mèches, des fils ou des quasi-UD par exemple. Cependant, les résultats dépendent de l’imprégnation des fibres par la résine, et donc des paramètres associés tels que la porosité au sein des éprouvettes ou la torsion du produit fibreux utilisé. Ces deux paramètres ne sont pas pris en compte dans la loi des mélanges, présentée aux équations (1-1) et (1-2). Dans la suite des travaux présentés dans le cadre de cette thèse, les propriétés des fibres seront identifiées au moyen du protocole IFBT qui sera détaillé dans le chapitre suivant, ainsi que les versions modifiées de la loi des mélanges permettant de prendre en compte la torsion des fibres ainsi que la porosité.

2.4.2 Résultats obtenus

A. Bourmaud et al. ont rassemblé [13] les propriétés en traction des fibres naturelles déterminées par essais sur fibre unitaire, dont les valeurs pour les fibres de chanvre et de lin sont présentées en Table 1-2. Ces propriétés dépendent des conditions d’essais (durée du test, humidité et température) et varient en raison de la non-homogénéité des fibres naturelles. Les fibres de lin ont des propriétés (module et contrainte à rupture) plus élevées

que celles des fibres de chanvre. Dans les deux cas, les intervalles de valeurs sont importants, ce qui témoigne d’une grande variabilité de ces propriétés mécaniques [13,43,50].

Table 1-2 : Propriétés mécaniques des fibres naturelles par la méthode sur fibre unitaire [13,43]

	Module (GPa)	Contrainte (MPa)	Allongement à rupture (%)
Chanvre	14,4 – 44,5	285 - 889	0,8 – 3,3
Lin	37,2 – 75,1	595 – 1510	1,6 – 3,6

L’étude menée par F. Bensadoun et al. [46] compare les propriétés mécaniques des fibres de lin identifiées d’une part par la méthode de traction sur fibre unitaire et par la méthode de l’IFBT. Par les deux méthodes, deux modules de fibres sont identifiés, un module E_{f1} associé à une déformation inférieure à 0,1% et un module E_{f2} correspondant à une déformation supérieure à 0,3%. Le module E_{f1} correspond à la définition originelle du module d’Young (pour des petites déformations) tandis que le module E_{f2} traduit l’adoucissement qu’il peut y avoir dans la courbe de traction. Les valeurs obtenues dans l’étude sont données en Table 1-3. Les écart-types obtenus pour les propriétés identifiées avec les essais sur fibre unitaire sont bien plus élevés que ceux obtenus pour les essais IFBT, ce qui met en évidence la plus grande dispersion des résultats sur fibre unitaire. Les propriétés mécaniques des fibres de lin issues des essais IFBT sont similaires à celles obtenues avec les essais sur fibre unitaire, à l’écart-type près, ce qui valide le procédé IFBT pour la caractérisation des propriétés mécaniques des fibres naturelles.

Table 1-3 : Comparaison des propriétés fibres obtenues par essais sur fibres unitaires et IFBT [46]

	E_{f1} (GPa)	E_{f2} (GPa)	σ_f (MPa)
Essais sur fibre unitaire	57,0 ± 13,0	44,5 ± 14,0	791 ± 319
Essais IFBT	59,8 ± 2,4	40,8 ± 3,5	527 ± 138

3 Mise en œuvre des fibres naturelles en vue de l’obtention de fils

Les fils sont obtenus à partir de fibres alignées et assemblées entre elles par de la torsion. Lorsque le taux de torsion appliqué est faible, le produit obtenu est appelé « mèche » tandis que lorsqu’il est plus élevé, le produit est appelé « fil retordu ». La torsion appliquée sur le fil permet d’augmenter sa ténacité et de faciliter son utilisation pour la production de renforts (par tissage, tressage ou tricotage), mais entraîne une désorientation des fibres et des difficultés d’imprégnation, qui contribueront à diminuer les propriétés mécaniques du matériau composite. L’idéal pour la réalisation de renforts pour composites est donc l’utilisation de mèches, mais ces dernières n’ont pas toujours les propriétés mécaniques requises pour la fabrication des renforts. Plusieurs voies d’amélioration de ces propriétés sont possibles, parmi lesquelles les traitements chimiques (pour dissoudre certains constituants des fibres et les coller entre elles) ou le guipage par un filament continu (pour améliorer la cohésion interne du fil) [1,51].

3.1 Procédés de production des fils

Les renforts produits avec des fibres, aussi appelés mat de fibres, confèrent au matériau composite de faibles propriétés, puisque les fibres ne sont pas orientées et leur répartition est hétérogène. Pour améliorer ces propriétés mécaniques, les fibres sont transformées en fils afin d’être utilisés dans les procédés de tissage, tricotage ou tressage [52]. A l’issue des procédés d’extraction, les fibres sont alignées dans une direction privilégiée sous forme de rubans, de titrage important en sortie de teillage et peignage (étapes décrites au paragraphe 2.2). Ces rubans sont ensuite utilisés pour les différentes étapes de filature.

Plusieurs passages successifs sont réalisés sur des bancs d’étirage pour étirer les rubans et les affiner au maximum, tout en gardant un minimum de cohésion entre les fibres (Figure 1-21). Une fois les rubans suffisamment affinés, un passage avec étirage et/ou légère torsion est réalisé sur un banc à broches pour obtenir des mèches (Figure 1-22). Ces mèches présentent généralement une faible cohésion entre les fibres qui les composent, et ne sont pas assez résistantes pour pouvoir être introduites en tissage, tressage ou tricotage. Les étirages pour passer d’un ruban à une mèche conduisent à un assouplissement de la fibre : la contrainte à rupture diminue tandis que l’allongement à rupture augmente [53]. C’est suite à l’obtention des mèches que des traitements chimiques peuvent être appliqués pour améliorer la cohésion entre les fibres et ainsi les propriétés mécaniques.



Figure 1-21 : Etirage des rubans (Linificio e Canapificio Nazionale)



Figure 1-22 : Production des mèches (Linificio e Canapificio Nazionale)

La production de fils retordus est également réalisée à partir des mèches : ces dernières sont étirées une dernière fois et une torsion plus importante est appliquée pour apporter de la cohésion entre les fibres au niveau du continu à filer (Figure 1-23.A). Au niveau du continu à filer, la vitesse de production est réduite, c’est pourquoi de nombreuses têtes de production sont présentes sur chaque machine. De plus, les fils retordus sont enroulés sur des fuseaux, une étape de bobinage (Figure 1-23.B.) est par la suite nécessaire pour rassembler les fils retordus sur des bobines. Un épurateur est, la plupart du temps, présent sur le bobinoir pour contrôler la régularité du fil, et va couper les parties irrégulières du fil puis rattacher le fil sur les parties homogènes sans défauts. Ainsi, en plus d’entraîner des difficultés d’imprégnation à l’échelle du composite, la production de fils retordus est très longue et donc couteuse.



A. Continu à filer

B. Bobinoir

Figure 1-23 : Production des fils A. Continu à filer, B. Bobinoir (Linificio e Canapificio Nazionale)

3.2 Amélioration des propriétés mécaniques des mèches

3.2.1 Utilisation de fils retordus

Dans l’industrie textile, les fils retordus sont traditionnellement utilisés puisque la torsion permet de protéger les fils lors du tissage, de leur apporter la résistance nécessaire aux passages dans les lignes de production textiles, et maintenir des vitesses de production importantes. La Figure 1-24 propose une comparaison schématique des structures de fibres alignées sans torsion (Figure 1-24.A.) et avec une forte torsion (Figure 1-24.B.). Si la torsion oriente les fibres de manière hélicoïdale, dans une direction différente du sens de la sollicitation mécanique, des études sur des fils de lin [54–58] ont montré que plus la torsion du fil est élevée, meilleures seront ses propriétés mécaniques à cette échelle du fil. En effet, la torsion augmente les efforts de friction internes et les surfaces de contact entre les fibres sont plus élevées. Si la torsion des fils n’est pas suffisante, la cohésion entre les fibres au sein du fil sera faible, et elles glisseront entre elles sous l’effet de la moindre sollicitation mécanique. Il a également été démontré qu’au-delà d’une certaine torsion, les propriétés mécaniques du fil diminuent. Ce phénomène est mis en évidence par sur le graphe présenté en Figure 1-25 : en augmentant la torsion, les glissements interfibres sont diminués mais les ruptures de fibres sont facilitées. Ainsi, pour une torsion élevée mais inférieure au seuil critique, l’augmentation de la torsion permettra d’augmenter la cohésion interfibres et la résistance du fil. Au-delà de ce seuil critique, les fibres seront fortement désorientées de l’axe du fil et la résistance du fil diminuera. Néanmoins, le comportement mécanique des fils avec une faible torsion, désignés par le terme de mèches, dépend de la longueur d’essai, et notamment si cette dernière est inférieure à 250 mm. Puisque la torsion des mèches est faible, les fibres sont moins compactées au sein de la structure fibreuse et la rupture des mèches est causée par déboîtement des fibres. Ainsi, si la longueur d’essai est de l’ordre de la longueur moyenne des fibres, la rupture de la mèche est plutôt causée par une rupture des fibres, tandis que lorsque la longueur d’essai est supérieure à la longueur moyenne des

fibres, la rupture de la mèche est due à un déboitement des fibres. Il faut donc trouver un compromis entre le taux de torsion appliqué et la résistance souhaitée pour le fil : si la torsion est trop faible, les fibres glisseront entre elles et la résistance du fil sera insuffisante tandis que si la torsion est trop élevée, les fibres ne seront plus alignées dans l’axe de la sollicitation mécanique et ne pourront plus contribuer à la résistance du fil [51,54–61].

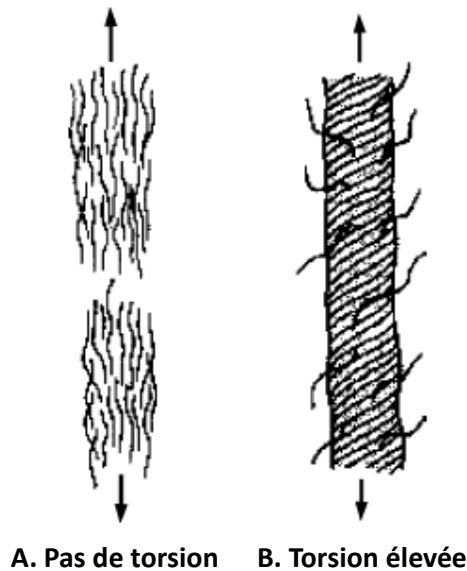


Figure 1-24 : Comparaison entre A. Mèches sans torsion et B. Fils avec une torsion élevée [54]

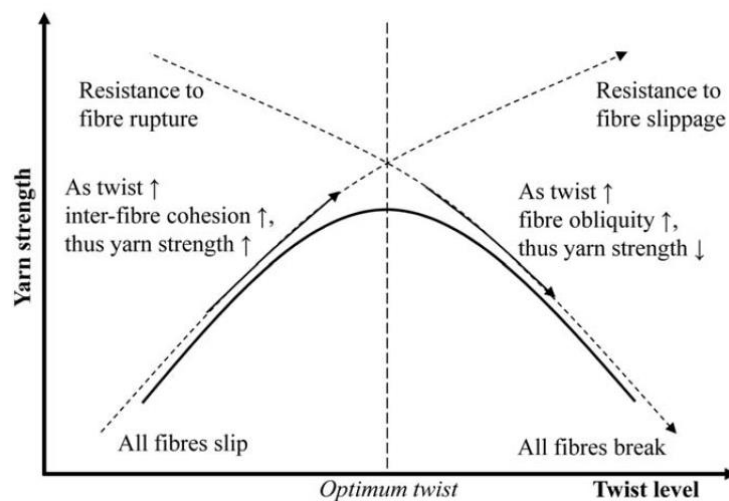


Figure 1-25 : Influence de la torsion sur la résistance des fils [58]

Dans son étude, S. Goutianos [55] affirme que la contrainte minimale d’un roving (désignant une mèche faiblement retordue) doit être de 200 MPa pour en assurer sa tissabilité. Cette valeur est déterminée en utilisant le titre des fils et la densité des fibres [54], ce qui représente une approximation puisque les fils constitués de fibres naturelles ne sont pas homogènes. Pour atteindre la contrainte minimale, une torsion a été appliquée sur ces rovings. Cependant cette torsion a un impact négatif sur les propriétés du composite final : les renforts à base de fils fortement retordus seront moins bien imprégnés par la

résine, puisque la torsion resserre la structure du fil. Une torsion optimale permettra d’obtenir un nombre de surfaces de contacts entre les fibres optimisé, maximisant ainsi les frictions interfibres [56,57,60]. La Figure 1-26, issue de l’étude menée par S. Goutianos et al. [55], compare la contrainte à rupture de fils secs et imprégnés en fonction de leur torsion. La contrainte des fils imprégnés est maximale pour la torsion la plus faible, les fibres étant mieux alignées dans le sens de la sollicitation mécanique si elles sont faiblement retordues. Lorsque la torsion augmente, la réponse de ces fils imprégnés diminue, l’imprégnation ayant été rendue plus difficile par la diminution de la perméabilité des fils. Le retordage de deux rovings ensemble a été également étudié [54], puisqu’il s’agit d’une pratique fréquente dans l’industrie textile. Ces fils double-retors ont été étudiés secs et imprégnés et, dans les deux cas, les propriétés mécaniques sont inférieures à celles des rovings simples. Il est donc nécessaire de trouver un bon compromis entre une torsion suffisante pour la production des renforts et qui permet une bonne imprégnation de la résine et un bon comportement mécanique du matériau final. [55,56].

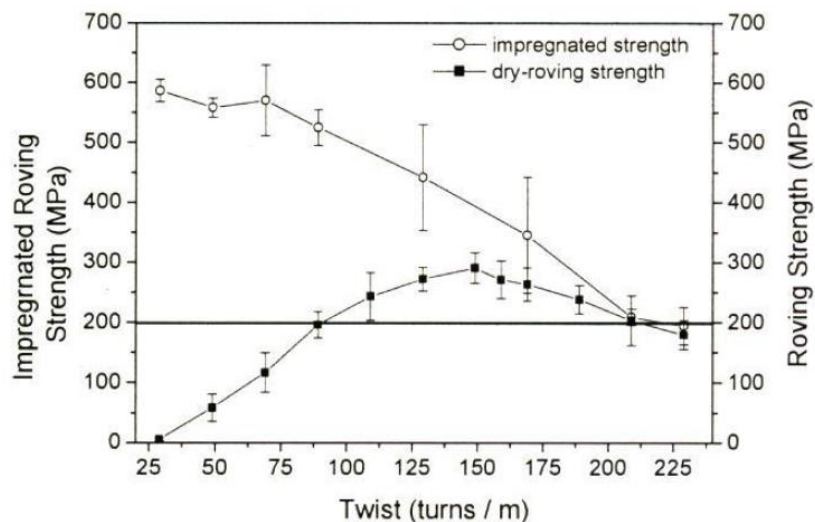


Figure 1-26 : Evolution de la résistance de fils secs et imprégnés en fonction de leur torsion [55]

3.2.2 Recours aux traitements des fibres

Dans la majeure partie des cas, les traitements réalisés sur les fibres sont des traitements chimiques. Ils ont pour but d’améliorer l’interface fibre-matrice et ainsi la cohésion globale du matériau composite, ainsi que d’améliorer la cohésion globale des fils pour permettre leur utilisation en tissage. Les propriétés mécaniques des fibres naturelles sont principalement conférées par la cellulose ; la lignine, la pectine et l’hémicellulose ayant des fonctionnalités de liants. Ces composés possèdent des zones cristallines mais également des zones amorphes dans lesquelles sont présents des groupes hydroxyles. En présence d’humidité, des groupements hydroxyles vont réagir avec les molécules d’eau et les entrainer d’abord dans les parois de la fibre (constituées d’hémicellulose et de lignine), puis dans le cœur de la fibre (constitué de cellulose). Cette réaction rend les fibres naturelles hydrophiles et polaires, compliquant ainsi leur affinité avec les matrices utilisées lors de la

mise en œuvre des matériaux composites, ces dernières étant hydrophobes [39]. Pour réduire le nombre de groupements hydroxyles et augmenter cette affinité avec les résines, des traitements chimiques sont réalisés. Ces traitements chimiques, qui influent sur les propriétés des fibres, sont majoritairement réalisés à l’échelle des faisceaux, rubans ou mèches. L’objectif de ces traitements étant la dissolution de la pectine, de la lignine et de l’hémicellulose, ils sont pour la plupart réalisés avec des solutions acides ou alcalines. Les traitements alcalins permettent de dissoudre les composés, autres que la cellulose, présents dans les fibres. Ces traitements alcalins sont la plupart du temps couplés avec une solution acide, toujours dans l’objectif d’améliorer l’interface entre les fibres et la matrice. Des acides biosourcés, tels que l’acide formique, sont étudiés afin de diminuer l’impact environnemental des traitements chimiques. En effet, en plus du caractère biosourcé de l’acide utilisé, le temps d’immersion des fibres dans la solution est réduit et ne nécessite pas de chauffage, ce qui diminue l’énergie nécessaire à la réalisation du traitement. Ainsi, de nombreux traitements peuvent être réalisés sur les fibres naturelles dans le but d’améliorer les propriétés du matériau composite final, mais ces derniers ne sont pas sans influence sur le comportement et les propriétés des fibres [38,44,51,62–64].

En étudiant l’impact de tels traitements chimiques sur des fibres de chanvre [39,65], il s’avère que les propriétés mécaniques des fibres, et notamment la résistance en traction, diminuent après traitement chimique. En effet, les molécules de la fibre sont dénaturées pendant le traitement chimique, et sont dans une configuration moins optimale pour répondre aux sollicitations mécaniques. Les fibres présentent alors de nombreuses fibrilles à leur surface et sont déstructurées. Selon la substance chimique utilisée, les effets secondaires peuvent avoir plus ou moins d’influence sur les propriétés mécaniques. Même s’ils ont tendance à diminuer les performances des fibres, ces traitements sont nécessaires pour obtenir un bon comportement à l’échelle composite. L’étude menée par M.M. Kabir et al. [66], analysant le comportement mécanique de panneaux sandwichs en fibres de chanvre (avec des peaux en tissus et un cœur en fibres disposées aléatoirement), a mis en évidence l’influence des traitements chimiques sur les propriétés des matériaux composites. Plusieurs traitements ont été réalisés, avec de la soude caustique (dans le cadre de traitements d’alcalisation), des siloxanes, et de l’acide acétique (pour réaliser un traitement d’acétylation). Les ruptures dues au cisaillement, en flexion apparaissent dans le cœur et à l’interface entre les peaux et le cœur du panneau mais les propriétés en termes de résistance, d’allongement à la rupture et de module de flexion sont augmentées de 10% à 25%. Ainsi, la résistance mécanique d’un matériau composite à base de fibres naturelles dépend principalement de l’interface entre les fibres naturelles et les matrices utilisées.

Des solutions alternatives à l’utilisation de produits chimiques sont également étudiées, telles que les traitements thermiques, plasma ou au CO₂ supercritique. Le recours à une forte chaleur, supérieure à 220°C, et sous atmosphère inerte entraîne une dégradation de l’hémicellulose. En dégradant le composé majeur responsable de l’hydrophilie des fibres

naturelles, la morphologie des fibres est homogénéisée et l’interface fibre/matrice est plus régulière [51,67,68]. Le recours au traitement plasma des fibres naturelles entraîne une modification de leur rugosité de surface. En rendant la surface des fibres plus rugueuse, l’interface fibre/matrice sera améliorée. Néanmoins, la résistance des fibres après traitement plasma est diminuée [51,69,70]. Le recours au CO₂ supercritique permet de modifier la composition chimique des fibres naturelles, en dégradant la lignine, la pectine et l’hémicellulose, tout comme les traitements chimiques. La stabilité thermique des fibres ainsi que leurs propriétés mécaniques ne sont pas dégradées [71,72].

L’impact des différents traitements réalisés pour améliorer l’interface fibre/matrice est principalement étudié à l’échelle composite, afin de valider son influence mais également à l’échelle des fibres, pour vérifier si les performances des fibres ont été altérées. De plus, certains de ces traitements permettent également d’améliorer la cohésion interfibres permettant ainsi d’améliorer la ténacité des mèches ou fils.

3.3 Réalisation de fils comelés

3.3.1 Présentation des diverses méthodes réalisables pour obtenir des produits comelés

La plupart des matériaux composites élaborés actuellement sont fabriqués avec des résines thermodurcissables, ce qui crée notamment des difficultés de recyclage en fin de vie. Grâce aux résines thermoplastiques, cet aspect de recyclabilité est amélioré (par réversibilité de la polymérisation), et les temps et coûts de production sont également réduits, puisqu’il n’y a plus la nécessité d’avoir une étape supplémentaire de réticulation de la résine polymère. De plus, les composites thermoplastiques peuvent être mis en œuvre par des procédés automatisés et rapides tels que la thermocompression. Cependant, l’imprégnation peut être plus difficile avec une résine thermoplastique du fait de la viscosité plus importante de cette dernière [73,74]. Enfin, les matrices thermoplastiques présentent une résistance à la propagation des fissures et un allongement plus élevés que les matrices thermodurcissables. Sur cette base la solution développée dans ces travaux concerne des renforts réalisés à partir de fils comelés alliant à cette échelle, fibres naturelles et polymère thermoplastique. De nombreuses méthodes existent pour l’élaboration de ces fils comelés. Suivant le type de technologie utilisée, la liaison entre les deux types de fibres sera soit mécanique, soit adhésive [60,75,76].

Tout d’abord, le mélange intime de deux types de fibres, fibres de renfort et fibres thermoplastiques (qui viendront former plus tard la matrice) peut être considéré, avec des fibres de renfort soit naturelles [60], soit synthétiques [77]. Dans le cas des fibres naturelles, un mélange intime entre deux types de rubans (fibres naturelles et fibres thermoplastiques) peut être effectué au niveau du banc d’étirage. Les rubans de fibres naturelles et de fibres thermoplastiques sont étirés ensemble, ce qui conduit à un mélange intime des deux natures de fibres. Cette technologie permet d’améliorer les performances mécaniques du

matériau composite, et notamment sa rigidité en flexion, en comparaison d’un composite produit à partir de fils retordus, puisque dans le fil comélé par mélange intime, les fibres sont mieux alignées dans l’axe du fil [60,78].

La technologie de guipage est également envisagée lors de la filature, sur une machine appelée broche creuse. Grâce à ce procédé, un fil de guipage vient s’enrouler autour d’un fil d’âme. Par cette méthode, le fil de guipage va venir comprimer les fibres du fil d’âme, en augmentant ainsi leur cohésion [79–81]. Ces deux fils pouvant être de natures différentes, le fil obtenu est ainsi comélé. Classiquement, le fil de guipage est composé de polymère thermoplastique qui vient entourer un fil (ou une mèche) produit à partir de fibres naturelles [60,73,74,82] ou minérales/synthétiques (verre ou carbone) [83,84], comme présenté en Figure 1-27.A. Cette technologie est celle retenue pour produire des fils comelés dans le cadre de ces travaux, et sera détaillée au paragraphe suivant (paragraphe 3.3.2).

Le recours à la technologie textile de tressage, plus souvent utilisé pour la production de renforts pour matériaux composites, permet aussi de produire des fils comelés. Le fil à base de fibres naturelles est introduit verticalement au sein de la tresseuse et va être, lors du procédé de tressage, surtressé par des fils à base de polymère thermoplastique. Le fil comélé ainsi obtenu, et illustré en Figure 1-27.B, permettra une bonne imprégnation des fibres par la matrice, puisque cette dernière est relativement proche des fibres naturelles. De plus, cette technique permet de minimiser les dégradations du fil de fibres naturelles lors de la production du renfort et/ou du matériau composite, puisqu’il est protégé par les fils thermoplastiques [13,85,86].

La filature par friction, réalisée sur une machine DREF, schématisée en Figure 1-27.C, permet également de produire des fils comelés. Un ruban de fibres thermoplastiques est inséré dans la machine et des briseurs (cylindres garnis de dents de scie) vont venir le séparer en petites fibres qui seront projetées autour d’un fil de fibres naturelles. Les fibres synthétiques vont alors venir recouvrir le fil de fibres naturelles, créant un fil comélé dont l’imprégnation lors de la mise en œuvre du matériau composite sera facilitée par la proximité des deux types de fibres. Cependant, la technologie DREF ne permet pas de recouvrir uniformément le fil de fibres naturelles, qui est alors moins bien protégé des agressions extérieures que les fils obtenus par guipage ou tressage [51,87,88].

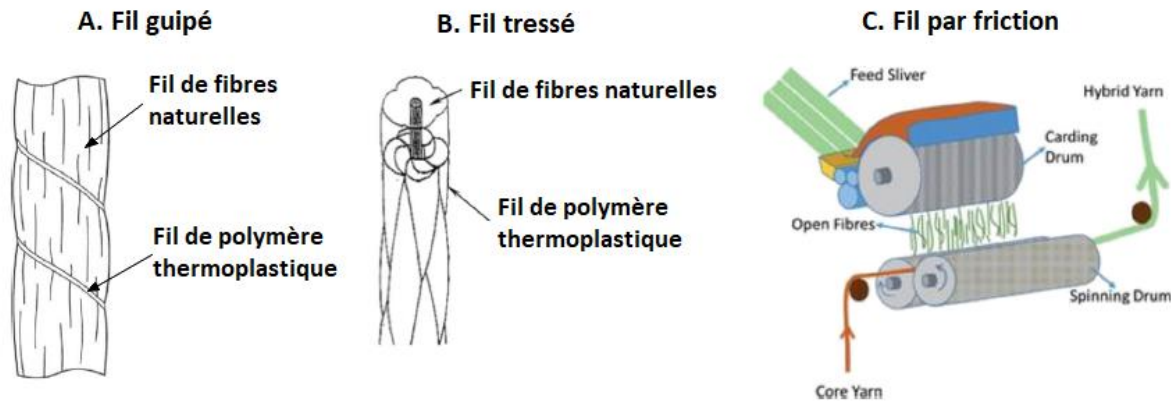


Figure 1-27 : Fils comelés A. Fil guipé B. Fil tressé C. Fil DREF [51]

Les méthodes précédemment évoquées établissent une liaison mécanique entre les fibres naturelles et les fibres thermoplastiques avant la réalisation du matériau composite. Il existe d'autres techniques, permettant une liaison adhésive entre les fibres naturelles et les fibres thermoplastiques. Cette technologie a fait l'objet de nombreux brevets [89–92] dans lesquels les fibres naturelles sont d'abord alignées, étirées et rassemblées entre elles par friction, leur conférant ainsi une fausse torsion, puis passées dans un bain contenant une solution permettant de les coller entre elles. Le fil obtenu est cependant très rigide, et il n'est alors pas envisageable de produire des renforts à partir de ces derniers. De plus, la colle présente à leur surface ne permet pas une bonne imprégnation de la résine [76].

La cohésion au sein des mèches comelées peut également être apportée par liaison thermique. M. Bar et al. [76,88] proposent une méthode qui consiste à étirer des rubans de fibres de lin et de fibres de polypropylène puis à chauffer ce mélange intime pour le consolider, comme illustré en Figure 1-28. La fusion des fibres thermoplastiques permettra de consolider le ruban obtenu. Les fibres thermoplastiques pouvant être chauffées plusieurs fois sans être détériorées, tant que la température est inférieure à leur température de dégradation. Au sein de ces mèches comelées, plus la proportion de fibres naturelles est importante, meilleures seront les propriétés mécaniques. Plus le mélange entre les fibres de lin et les fibres thermoplastiques est intime (c'est-à-dire plus il y a eu de passages d'étirage des rubans), meilleure sera la souplesse du fil comelé, permettant ainsi une meilleure utilisation pour la réalisation de renforts. Il est alors nécessaire de trouver un compromis entre un taux de fibres naturelles garantissant de bonnes performances mécaniques, une bonne souplesse du fil et un taux de fibres thermoplastiques suffisant pour permettre une bonne imprégnation à l'échelle composite.

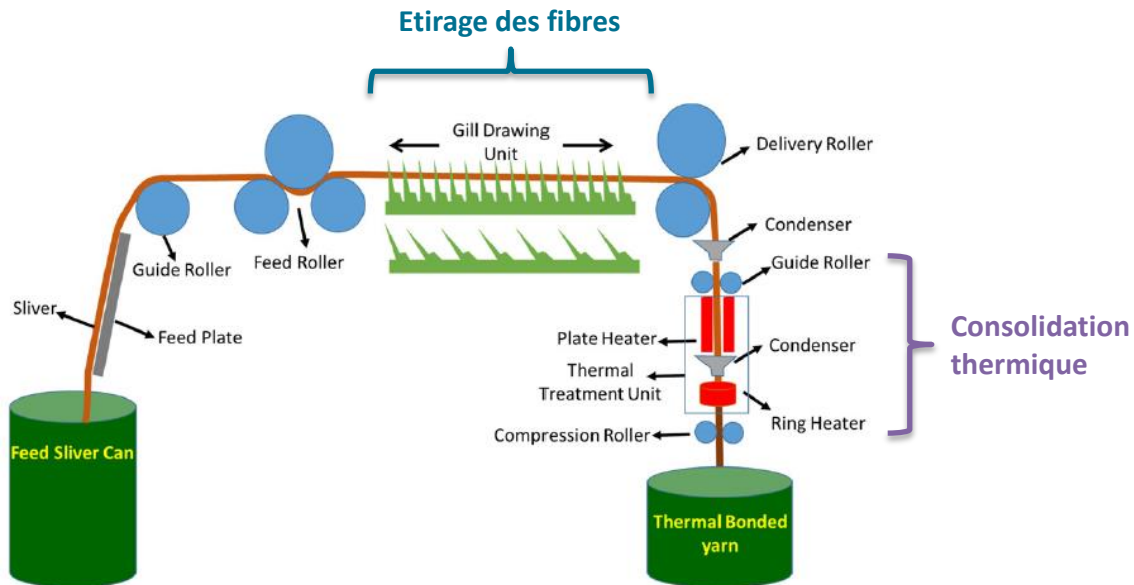


Figure 1-28 : Schématisation de la production d'un fil comélé consolidé par voie thermique [76]

Suivant les méthodes utilisées pour coméler les fibres naturelles et le polymère thermoplastique, la répartition des fibres après thermocompression va différer. Dans le cas d'un fil guipé, la thermocompression va faire fondre le fil de guipage, et les fibres vont alors se répartir dans toute la surface du matériau, en restant alignées dans le sens longitudinal du fil. Dans le cas d'un fil comélé par mélange intime, les fibres garderont leur orientation désaxée due à la torsion du fil et ne se répandront pas aussi uniformément dans le matériau. En termes de propriétés mécaniques en flexion, les matériaux composites renforcés avec des unidirectionnels en fils guipés sont meilleurs que ceux renforcés d'unidirectionnels en fils comelés, et ce pour le même taux de fibres. La répartition des fibres et leur orientation dans le sens de la sollicitation au sein du matériau est ainsi bénéfique pour les propriétés mécaniques. La technologie de guipage semble ainsi avantageuse pour la réalisation de fils comelés en vue d'une utilisation dans le domaine des matériaux composites [51,60,88].

3.3.2 Recours à la technologie de guipage

L'utilisation de fils faiblement retordus permet d'avoir des fibres mieux alignées dans le sens longitudinal, mais les glissements interfibres sont alors présents, ce qui diminue considérablement les propriétés mécaniques. Ce sont en effet les forces de frictions interfibres qui transmettent les contraintes mécaniques le long de la structure. Cette résistance du semi-produit (fil ou mèche) n'est nécessaire que pour les étapes de transformation textile. Le guipage d'un fil polymère thermoplastique autour d'une mèche, positionnée en tant que fil d'âme, comme illustré en Figure 1-29, permet d'améliorer la résistance de la mèche mais également son imprégnation. Le fil guipé va appliquer une pression suffisante sur les fibres pour apporter la cohésion, la friction interfibres et la résistance nécessaires à la mèche tout en laissant les fibres alignées dans le sens longitudinal. Les propriétés mécaniques d'un fil guipé sont néanmoins plus faibles que pour

un fil retordu à sa torsion optimale, mais le procédé de fabrication est moins couteux lorsque le titre du fil est important [60,73,74,79–82].

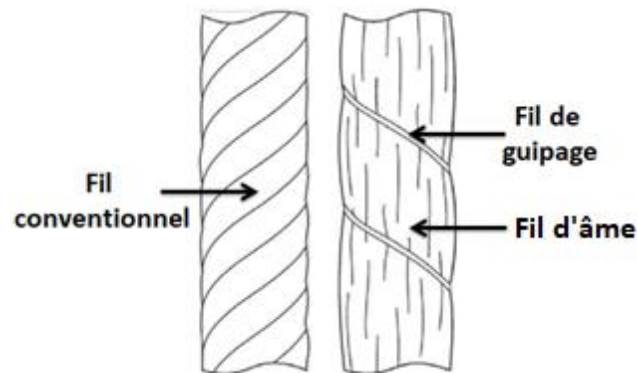


Figure 1-29 : Comparaison entre un fil conventionnel (gauche) et un fil guipé (droite) [60]

La technologie de guipage présente de nombreux avantages pour la réalisation de fils comelés. Comme tout type de fil comelé, le fil guipé se compose de fibres de renfort et de filaments qui constitueront la matrice, ce qui facilite la mise en œuvre du matériau composite. Ce procédé permet également d’introduire à cœur des mèches faiblement retordues, ce qui préserve l’alignement des fibres dans le sens de la sollicitation mécanique. Enfin, le fil de guipage, en plus d’apporter la cohésion nécessaire au fil comelé, permet de protéger les fibres naturelles des agressions extérieures, et notamment celles causées par les procédés de transformation textiles dont le tissage [74,87]. Les fils guipés sont produits sur une machine de type « broche creuse » dont le principe est schématisé en Figure 1-30. En fonction de la vitesse de rotation de la bobine portant le multifilament thermoplastique, et de la vitesse de production, le taux de couverture du fil d’âme, en l’occurrence les fibres naturelles, par le thermoplastique va varier, ce qui influe sur la proportion de fibres naturelles au sein du fil guipé. Dans la littérature, lorsque ce type de fil guipé est utilisé, les propriétés sont étudiées à l’échelle composite [60,73,82], et non à l’échelle fil.

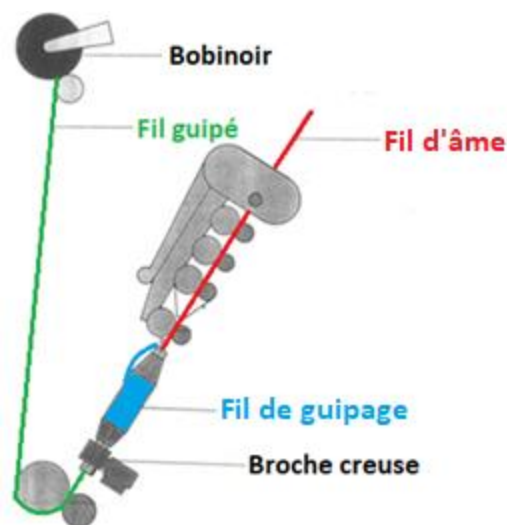


Figure 1-30 : Schématisation du procédé de guipage

De par la nature des fibres naturelles et la forte viscosité des polymères thermoplastiques, des difficultés d’imprégnations peuvent être rencontrées lors de la mise en œuvre des composites produits à partir de renforts comelés [74,87]. Pour améliorer cette imprégnation, il est possible d’utiliser en âme un mélange intime de fibres naturelles et de polymère thermoplastique et/ou d’ajouter un fil thermoplastique dans le même axe que celui des fibres naturelles en plus du fil de guipage thermoplastique [60,93].

4 Utilisation des fils pour la production de renforts

4.1 Panorama des différentes structures de renforts en fibres naturelles

Les différents types de renforts disponibles sur le marché des composites sont présentés en Figure 1-31 et illustrés en Figure 1-32. Ces renforts se classent en deux grandes catégories : les renforts secs, qui nécessiteront un apport ultérieur de matrice pour la formation du matériau composite, et les renforts pré-imprégnés, qui se composent d’un mélange intime de fibres et de polymère qui deviendra matrice après consolidation. Au sein du groupe des renforts secs, différentes structures de renforts existent, suivant les méthodes de fabrication et le fait qu’ils soient élaborés à partir de fibres courtes ou de fils/mèches.

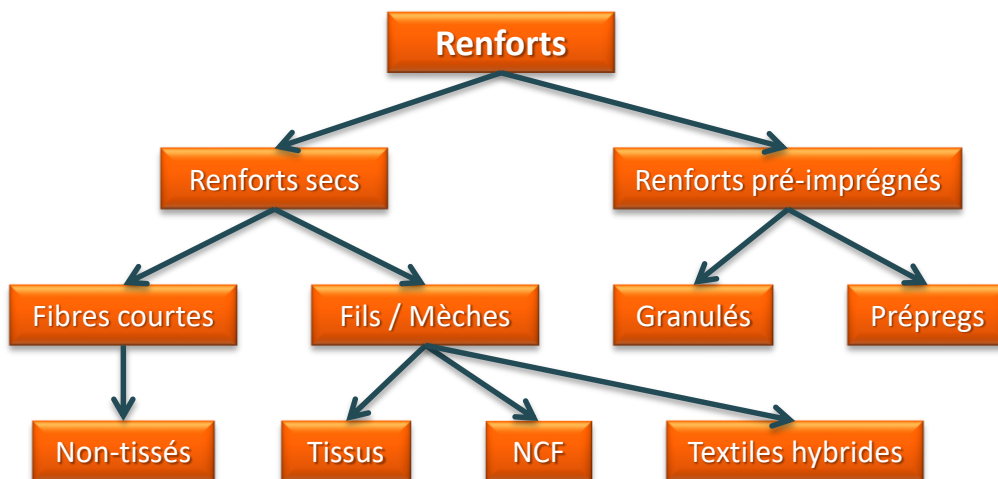


Figure 1-31 : Types de renforts disponibles sur le marché [1]

Les non-tissés sont constitués de fibres courtes disposées aléatoirement pour former un matelas de fibres non orientées, plus ou moins consolidées. Ce renfort est donc peu coûteux à produire, mais présente de faibles propriétés mécaniques du fait de la désorientation des fibres et de la faible tenue du renfort. Les renforts unidirectionnels (UD), sont également obtenus à partir des fibres, mais ces dernières sont toutes alignées dans une même direction et sont liées par des procédés faisant intervenir les constituants des fibres pour en assurer leur cohésion [1,51,94].

A partir de fils ou de mèches, le type de renfort le plus couramment utilisé est le renfort tissé. Un tissu est constitué de renforts orientés dans deux directions principales grâce à l’entrelacement perpendiculaire de mèches ou de fils avec une armure définie. Un autre type de renfort pouvant être obtenu à partir de fils ou de mèches est le renfort quasi-unidirectionnel (quasi-UD), qui se compose, en faible densité, de fils fins dans une direction assurant le maintien de nombreuses mèches ou fils insérés perpendiculairement dans l’autre direction. Les NCF (« Non-Crimp Fabrics ») sont constitués de plusieurs couches d’UD

superposées à différentes orientations (0° , 45° et 90°), et cousues entre elles. Ce type de structure permet d’avoir des renforts dans plusieurs directions sans ondulation. Enfin, des renforts hybrides peuvent être obtenus sous forme de quasi-UD ou de tissus en mélangeant des fibres naturelles et techniques (verre, carbone, aramide ou basalte par exemple). Ces renforts hybrides permettent de combiner les avantages de chacune des matières [1,51,94].

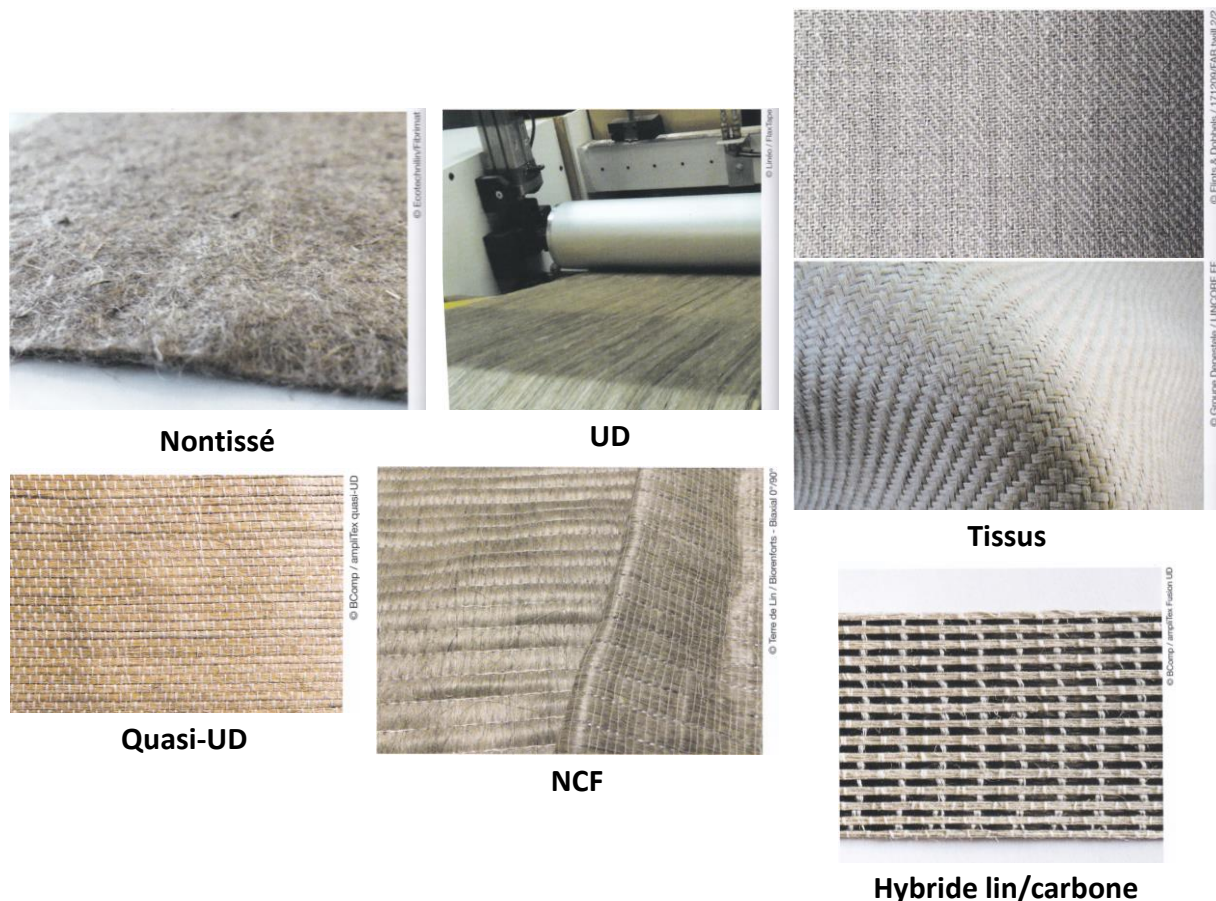


Figure 1-32 : Images des différents renforts disponibles pour les biocomposites [1]

L’influence des structures de renforts, les plus couramment utilisées pour la fabrication de biocomposites, sur leurs propriétés mécaniques en traction est illustrée en Figure 1-33 [1]. Les renforts apportant les meilleures propriétés au matériau composite sont les renforts tissés et unidirectionnels. Néanmoins, les propriétés des composites renforcés d’UD sont étudiées uniquement dans la direction des fibres, tandis que celles des composites renforcés de tissus sont une moyenne des deux directions. Les renforts tissés sont un bon compromis pour combiner l’ensemble des propriétés membranaires : en traction dans les deux directions principales du plan et en cisaillement plan grâce à l’entrelacement entre ces deux directions.

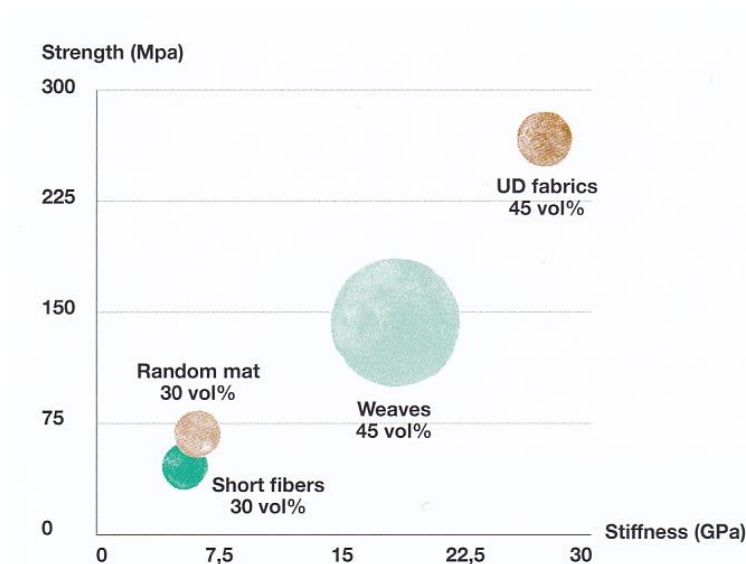


Figure 1-33 : Propriétés mécaniques de biocomposites renforcés par différents types de renforts [1]

4.2 Présentation du procédé de tissage

4.2.1 Description de la technologie de production

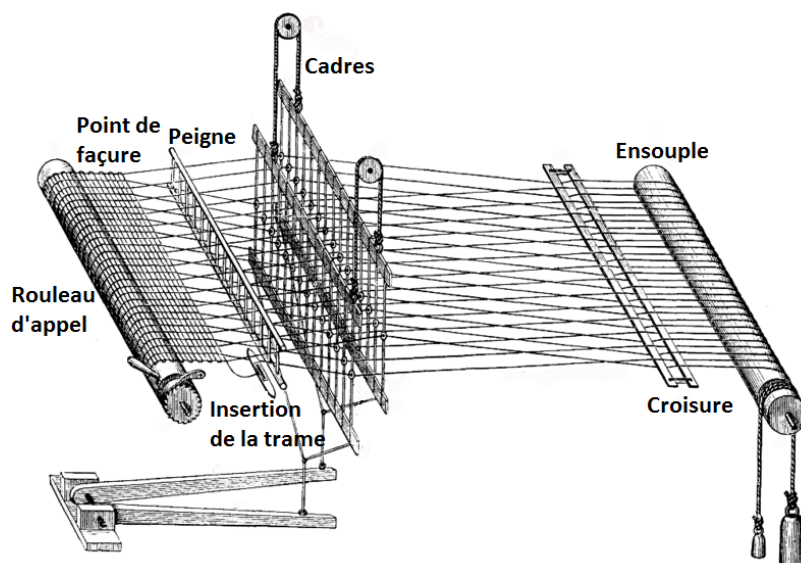


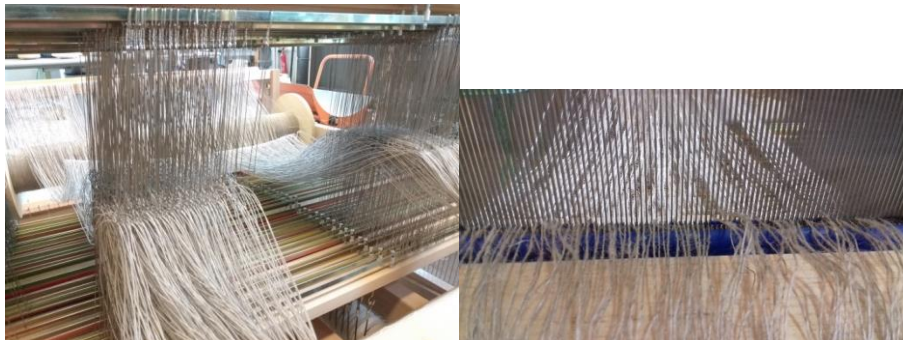
Figure 1-34 : Schématisation du procédé de tissage [95]

Par définition, un tissu est une structure textile réalisée par l’entrecroisement perpendiculaire de fils de chaîne et de fils de trame. La fabrication des tissus, schématisée en Figure 1-34, s’effectue sur un métier à tisser, dans une zone comprise entre l’ensouple, sur laquelle sont disposés les fils de chaîne, et le rouleau d’appel, sur lequel s’enroule le tissu. Pour former un tissu, il est d’abord nécessaire de sélectionner les fils de chaîne, au moyen de cadres : ces derniers sont séparés en deux nappes, une inférieure composée des fils de chaîne qui seront situés sous la trame qui sera insérée, et une nappe supérieure avec les autres fils. Entre ces deux nappes, l’angle ainsi formé est appelé la « foule ». La deuxième

étape consiste en l’insertion dans la foule du fil de trame, perpendiculairement aux fils de chaîne, à l’aide d’une navette ou d’une lance. Une fois la trame insérée, le peigne du métier se rabat sur la trame et vient la tasser au niveau de ce qui est appelé le « point de façure ». Ce cycle est répété autant que nécessaire jusqu’à la production de la longueur voulue ou jusqu’à épuisement de la chaîne [96].



Figure 1-35 : Etape d'ourdissage (ENSAIT)



A. Rentrage

B. Piquage

Figure 1-36 : Etapes de A. rentrage et de B. piquage (ENSAIT)

La première étape préalable au tissage est la préparation de la chaîne. Lors de l’étape d’ourdissage (Figure 1-35), les fils sont enroulés parallèlement entre eux et les uns après les autres sur le tambour de l’ourdissoir, la longueur de la chaîne est donc un multiple du périmètre de ce tambour. Cette étape d’ourdissage requiert une certaine ténacité pour le fil utilisé puisque celui-ci est soumis à une forte sollicitation de traction pour être pris sur la bobine et enroulé sur le tambour. La seconde étape consiste à faire passer les fils de chaîne du tambour de l’ourdissoir à l’ensouple qui viendra alimenter le métier à tisser. Lors de cette étape, une croisure est réalisée pour repérer les fils pairs et impairs et éviter qu’ils ne s’emmêlent entre eux. Les étapes suivantes, après montage de l’ensouple sur le métier à tisser, sont le rentrage et le piquage.

Lors du rentrage (Figure 1-36.A.), les fils de chaîne sont passés un à un dans les lisses présentes sur les cadres. Au cours du tissage, le mouvement des cadres sera commandé

suivant l’armure à réaliser, entraînant ainsi les lisses vers le haut ou vers le bas, ce qui formera la foule. Le piquage (Figure 1-36.B.) consiste à faire passer les fils de chaîne dans le peigne, permettant de réguler la densité des fils en chaîne. La densité trame sera régulée par le tassage sur le point de façure. Une fois le piquage réalisé, les fils sont noués sur le rouleau d’appel et mis sous tension. Ainsi, des fils trop faibles mécaniquement auront tendance à se rompre à ce moment-là, interrompant alors la production des tissus.

Lorsque toutes ces opérations sont effectuées, le tissage peut débuter. La complexité et la durée de ces étapes demandent de la main d’œuvre qualifiée et sont coûteuses [96]. Le tissage des préformes élaborées dans le cadre de la thèse, à l’échelle laboratoire, est réalisé sur un métier à tisser manuel Leclerc Weavebird, présenté en Figure 1-37. L’insertion de la trame se fait au moyen d’une navette, alimentée par une canette sur laquelle le fil de trame a été préalablement enroulé. Sur métier industriel, le fil de trame est pris directement sur la bobine, et est inséré à l’aide d’une lance ou d’un jet d’air. Ainsi, l’étape d’enroulement du fil sur une canette est uniquement présente dans le procédé à l’échelle laboratoire. L’avance du tissu produit n’est pas régulière, comme elle pourrait l’être sur un métier industriel, la densité trame dépend du nombre de fils qui peut être inséré en fonction de l’armure choisie et de la force de tassage appliquée par l’opérateur tisserand. Ainsi, il peut y avoir des variations dans la densité trame effective et celle prévue lors du paramétrage du tissage.



A. Métier à tisser

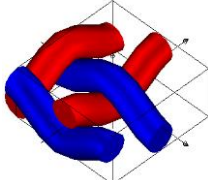
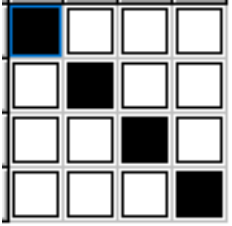
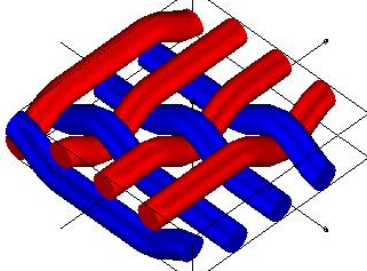
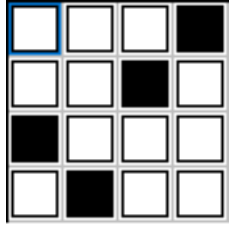
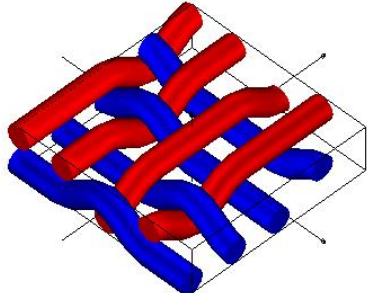
B. Navette

Figure 1-37 : A. Métier à tisser manuel Leclerc Weavebird et B. navette (ENSAIT)

4.2.2 Paramètres de production de tissus

Le premier paramètre permettant de différencier les tissus est l’armure choisie pour entrelacer les fils de chaîne et de trame. Les armures principales sont la toile, le sergé et le satin. L’armure toile est la plus utilisée et la plus simple, dans le tissage traditionnel. Elle est définie par l’entrecroisement continu d’un fil de chaîne avec un fil de trame. L’armure sergé, quant à elle, se caractérise par la présence de flottés de fils en sens chaîne ou sens trame, suivant l’effet souhaité, liés entre eux par un point de liage suivant un décalage de 1 au fil de la production. Ainsi, un tissu sergé aura un effet visuel de diagonale. Enfin, l’armure satin présente également de long flottés chaîne ou trame, mais les points de liage sont disséminés sur toute la surface du rapport d’armure, suivant un décalage défini par des règles complexes. Le rapport en largeur et en hauteur de l’armure correspond au nombre de

fils de chaîne et de trame nécessaires pour réaliser un motif élémentaire de cette armure. Ainsi, l’armure toile aura toujours un rapport de 2 tandis que les armures sergé et satin ont un rapport variable [96]. Ces trois types d’armures sont présentés en Table 1-4, avec un rapport d’armure de 4 choisi pour les armures sergé et satin. Les représentations 2D et 3D ont été réalisées avec le logiciel WiseTex®. La représentation 2D des armures est toujours la même : lorsque le fil de chaîne passe au-dessus du fil de trame, il s’agit d’un « pris » et la case correspondant au fil est colorée en noir tandis que lorsque le fil de trame passe au-dessus du fil de chaîne, il s’agit d’un « laissé » et la case correspondant au fil est colorée en blanc. Pour la représentation 3D, les fils de chaîne sont représentés en bleu et les fils de trame en rouge.

Table 1-4 : Armures utilisées (vues issues du logiciel WiseTex)		
	Représentation 2D	Représentation 3D
Toile		
Sergé 4		
Satin 4		

Les réductions chaîne et trame du tissu sont le nombre de fils de chaîne et de trame par centimètre. La réduction chaîne est définie par le nombre de dents présentes sur le peigne du métier à tisser et la densité trame dépend de la force appliquée au moment du tassage du peigne et de la vitesse d’enroulement du rouleau d’appel. Ainsi, il est possible de choisir une faible densité trame sur un métier industriel, dont la vitesse d’enroulement du rouleau d’appel est constante, tandis que sur un métier manuel, le rouleau d’appel n’étant pas enroulé en continu, la densité trame se rapprochera de la densité maximale atteignable en fonction de l’armure et des fils choisis. Pour plus de précision, il est préférable de compter ces fils sur une large distance et de rapporter ensuite le résultat au centimètre. En

fonction de la nature des fils et des densités chaîne et trame, l’épaisseur et la masse surfacique des tissus seront différentes.

L’embuvage, pour les fils de chaîne, et le retrait, pour les fils de trame, représentent la différence entre la longueur réelle et la longueur apparente des fils dans le tissu, permettant ainsi de caractériser la consommation de fil dans les sens chaîne et trame. Ces paramètres sont calculés selon la norme NF G07-316 [97] au moyen de l’Equation (1-3) [96]. Une première mesure des fils se fait dans les tissus, avant prélèvement, à l’aide d’une règle, pour obtenir la longueur apparente du fil. Une seconde mesure est réalisée sur un maillemètre, dont la précharge est définie par l’Equation (1-4), pour obtenir la longueur réelle du fil.

$$Emb \text{ ou } Ret = \frac{L_r - L_a}{L_r} \times 100 \quad (1-3)$$

Avec : Emb : Embuvage (%)

Ret : Retrait (%)

L_r : longueur réelle (mm)

L_a : longueur apparente (mm)

$$P = (0,2 \times Tex) + 4 \quad (1-4)$$

Avec : P : Précharge (gf)

Tex : Titre (Tex)

4.3 Avantages des renforts tissés par rapport aux autres renforts

Les différences d’armures influent sur les propriétés mécaniques, la stabilité dimensionnelle et la drapabilité du tissu. De même, le recours à divers types de fils ou à différentes densités de fils confèrent au tissu des propriétés différentes. A l’origine, les tissus étaient produits avec des fils fortement retordus, mais le recours aux mèches est de plus en plus utilisé pour la réalisation de renforts pour composites, puisque cela permet d’obtenir des renforts avec une faible torsion et une faible ondulation au sein de la structure. Ainsi, dans les renforts tissés avec des mèches, les fibres sont mieux alignées dans les deux directions principales de sollicitation mécanique. Le recours à une armure sergé ou satin, comparativement à une armure toile, permet également de diminuer l’ondulation des fibres au sein du renfort [1].

L’entrelacement des fils de chaîne et des fils de trame crée une interaction entre les fils caractéristique des structures tissées. Cette interaction se caractérise par des comportements d’adhésion et de friction. Les forces d’adhésion sont négligeables devant celles de friction, qui sont directement liées à la pression appliquée par les fils les uns sur les autres. Le comportement en traction d’une structure tissée dépend ainsi des caractéristiques du fil, composition ou ténacité, mais également des propriétés induites par le tissage, et notamment les choix d’armures et de densités de fils, qui jouent sur le nombre

de points de liage, l’épaisseur et le taux de fibres du tissu. Les fils obtenus à partir de fibres naturelles possèdent des propriétés variables, tant en termes de performances mécaniques que de taux de fibres. Cette variabilité à l’échelle fil génère des différences de comportement à l’échelle du tissu. Le procédé de tissage entraîne également des différences de comportement des structures tissées, puisque les fils seront plus ou moins tendus et/ou dégradés au sein du renfort. Ce phénomène de dégradation des fils induit pendant le tissage sera détaillé dans le prochain paragraphe (paragraphe 4.4). De plus, l’utilisation de fibres naturelles entraîne un allongement plus important des renforts tissés avant rupture, ce qui peut être bénéfique ou non suivant la déformabilité souhaitée pour le tissu. L’ondulation des fils au sein de la structure tissée entraîne une déformation plus importante. En effet, la réponse en traction d’un tissu est d’abord non-linéaire et associée à la désondulation des fils au sein du renfort, puis linéaire lorsque les fils sont tendus (ce comportement sera détaillé au paragraphe 3.1 du Chapitre 3). Ainsi, plus les fils sont ondulés, plus le phénomène de désondulation sera long et l’allongement du tissu important. Le recours à une armure qui confère des grands flottés au tissu, et ainsi peu de points de liage, permet d’obtenir de plus grandes densités de fils et de diminuer la capacité d’extension du tissu. Au sein d’un tissu déséquilibré en termes de densités de fils, les fils perpendiculaires à la direction ayant la densité de fils la plus importante seront fortement ondulés, et l’allongement du tissu dans cette direction sera élevé. Ainsi les paramètres ayant le plus d’influence sur les propriétés en traction des tissus sont principalement la nature (type de fibre), le titre et le comportement mécanique des fils, ainsi que les paramètres de tissage, tels que les densités de fils ou l’armure choisie [98–106].

Lors de la mise en œuvre des matériaux composites, les renforts ne sont pas uniquement soumis à une sollicitation en traction dans les deux directions principales du matériau (directions chaîne et trame). Ces renforts sont également sollicités à 45°, d’où la nécessité d’étudier leurs propriétés en cisaillement plan, notamment au moyen d’essais de traction à 45°, avec la méthode de l’« Uniaxial bias-Extension Test » (UBE Test). Cette caractérisation est largement utilisée pour les renforts en verre et en carbone, et a fait l’objet de nombreuses études [107–112]. Sous l’effet d’une sollicitation en traction à 45°, les fils sont assujettis à des déformations de rotation, tant que l’espace est disponible entre les fils de chaîne et les fils de trame. Une fois en contact, le cisaillement maximal est atteint, et si la sollicitation se poursuit des défauts hors-plan de type plis peuvent survenir. La capacité de cisaillement des tissus dépend donc essentiellement du type de fils et d’armures utilisés et est caractéristique des renforts tissés en comparaison d’autres renforts.

En fonction de leur structure, les renforts tissés présentent des propriétés de déformabilité qui diffèrent. En effet, contrairement aux renforts unidirectionnels, ils peuvent épouser des formes non développables grâce aux deux directions de fibres. En flexion, la rigidité des tissus peut être optimisée par leur masse surfacique ainsi que par l’ondulation des fils au sein de la structure tissée. Plus les tissus seront denses, plus leur rigidité en flexion

sera importante, et plus il sera difficile de les faire fléchir. L’ondulation des fils, quant à elle, permet d’assouplir la structure tissée : une forte ondulation est témoin d’un fort entrelacement des fils, qui conduit à la diminution de la densité de fils par unité de surface pouvant être insérée [112–114].

Lors de la réalisation de matériaux composites, leur forme finale est souvent complexe, d’où l’importance d’utiliser des renforts possédant une certaine déformabilité sans l’apparition de défauts. La mise en forme des renforts entraîne des déformations couplées de traction, de cisaillement mais également de flexion et de compaction dans l’épaisseur. Même si les renforts tissés ont une meilleure déformabilité que les renforts unidirectionnels ou non-tissés, des défauts peuvent apparaître à l’issue des phases de drapage. Ces défauts sont majoritairement l’apparition de plis, de boucles ou de glissements intra-plis lors de la mise en forme. Dans le cas d’une forme trop complexe à draper, notamment celle à double courbure, le renfort sera soumis à un cisaillement important, et une trop forte résistance au cisaillement de la préforme entraînera la formation de plis. Ces plis sont plus ou moins importants selon la rigidité en flexion des renforts ainsi que de l’ensemble des tensions et rigidités appliquées sur le renfort. Il est possible de faire varier les paramètres liés aux outils pour réduire les efforts appliqués et minimiser l’apparition de plis [115]. Le phénomène de boucles a été décrit pour des renforts tissés emboutis par des formes complexes. Ces boucles se caractérisent pas des glissements de fibres au sein de l’entrelacement perpendiculaire de fils, créant ainsi un changement d’orientation des fils et donc des fibres. Lors du tissage des renforts, il est possible de minimiser les risques d’apparition de ces boucles. Lorsque les densités de fils sont très importantes, et qu’il n’y a pas d’espaces entre les fils, ou lorsque le renfort est fortement déséquilibré et composé de fils très souples, la formation de boucles est réduite en comparaison d’un renfort tissé non optimisé. De plus, comme pour prévenir de l’apparition de plis, un contrôle de la tension appliquée sur les fils dans chaque direction permettra d’éviter la formation de boucles. Il est nécessaire d’appliquer une forte tension sur les fils qui seront susceptibles de glisser et former des boucles et une plus faible tension sur les fils perpendiculaires [116–120].

Pour conclure, même si la production de renforts tissés à partir de fibres naturelles est plus complexe que celle de renforts nontissés ou unidirectionnels, il est plus avantageux dans de nombreux cas de recourir aux renforts tissés. En effet, ces derniers présentent de meilleures propriétés en traction dans les deux directions du plan, de meilleures performances en cisaillement, une rigidité en flexion plus élevée ainsi qu’une drapabilité mieux maîtrisée. Tous ces paramètres étant principalement dépendant des types de fils utilisés et des paramètres choisis lors du tissage, tels que les densités de fils ou l’armure de tissage, il est possible d’optimiser les renforts tissés dans le but de conférer au renfort les propriétés nécessaires en fonction de l’application visée.

4.4 Influence du procédé de tissage sur les propriétés des fils

Lors des différentes étapes de préparation mais également propres au procédé de tissage, suite aux nombreuses sollicitations (tension, frottement avec organes des métiers, entre fils, etc...) les fils sont assujettis à de nombreux endommagements. Ces dégradations lors du tissage génèrent des pertes de propriétés sur les fils qui sont identifiées en comparant avec les propriétés avant tissage. F. Omrani et al. [56] ont réalisé des essais de traction sur trois types de fils de lin (un fil faiblement retordu, un fil fortement retordu et une mèche) avant et après tissage. Le tissage entraîne des dégradations sur les fils, et en particulier une diminution de la rigidité, ainsi qu’une augmentation de l’allongement à rupture. Cependant, le fil fortement retordu est le moins impacté par le tissage, une forte torsion peut donc être utilisée pour protéger le fil lors du procédé de tissage. La dégradation des fils pendant le tissage influe sur le comportement mécanique du tissu, puisque ce dernier est dépendant des propriétés apportées par le fil [56,121].

D’autres travaux, menés sur du tissage 3D, mettent également en évidence ces phénomènes de dégradations [122,123]. La perte des propriétés mécaniques des fils après tissage est principalement due aux frottements des fils entre eux, mais également au contact des fils avec les éléments constitutifs des métiers à tisser. En ce qui concerne les fils de chaîne, la majeure partie des dégradations est initiée lors de l’étape de mise sous tension des fils sur le métier à tisser. Néanmoins, l’ourdissage et le tassage du fil de trame par le peigne sont également des étapes agressives pour les fils. Ainsi, durant tout le procédé de tissage, les fils sont soumis à de nombreuses sollicitations qui conduisent progressivement à détériorer leurs performances mécaniques de manière irréversible [56,122,123].

Les frottements des fils entre eux et au contact des composants du métier à tisser entraînent des dommages identifiés visuellement. Les fibrilles présentes à la surface du fil vont s’accumuler à certains endroits des fils pour former des paquets de matière, illustrés sur la Figure 1-38. Ces défauts vont venir se bloquer dans les œillets des lisses ou dans les dents du peigne et créer des ruptures des fils. Ces fibrilles peuvent également s’accrocher entre les fils, qui ne se lèveront plus malgré les mouvements des cadres, créant ainsi des défauts dans la réalisation de l’armure pendant le tissage. Le meilleur moyen de remédier à ce type de défaut est l’utilisation de fils avec une pilosité la plus faible possible, puisque la pilosité caractérise le nombre de fibrilles présentes à la surface du fil [124].



Figure 1-38 : Dégradation des fils de lin pendant le tissage [124]

5 Réalisation de composites biosourcés

5.1 Méthodes de fabrication des composites biosourcés

Quelle que soit la nature du renfort (fibres synthétiques ou naturelles), les procédés de mise en œuvre des matériaux composites sont similaires. Certains sont dédiés à l’utilisation de résines thermoplastiques, d’autres à l’utilisation de résines thermodurcissables et enfin certains sont compatibles aux deux natures de résines. Ces procédés, et leurs parts associées en volume de produits, entre 2010 et 2018, sont présentés en Figure 1-39. Quatre grandes catégories de procédés de mise en œuvre peuvent être distinguées. La première concerne les procédés manuels, avec le drapage manuel, la pulvérisation et le drapage de préimprégnés. La seconde famille regroupe les procédés de compression, avec la thermocompression et les méthodes SMC/BMC. La troisième catégorie est constituée des procédés d’injection, avec le moulage par injection et l’infusion. Enfin, les procédés continus sont rassemblés dans une quatrième catégorie, avec la pultrusion, la fabrication de panneaux et l’enroulement filamentaire. Entre 2010 et 2018, le volume de produits réalisés par des procédés manuels et continus a diminué, de respectivement 6% et 3%, tandis que celui des composites élaborés en ayant recours aux procédés d’injection et de compression a augmenté, de respectivement 7% et 2% [3]. Ces procédés d’injection et de compression sont de plus en plus utilisés, car ils permettent de produire des matériaux composites principalement à partir de résines thermoplastiques, de plus en plus utilisées, comme discuté précédemment (Figure 1-5). Seuls quelques procédés utilisés dans le cadre de ces travaux, à savoir le drapage manuel, l’infusion et la thermocompression, seront détaillés.

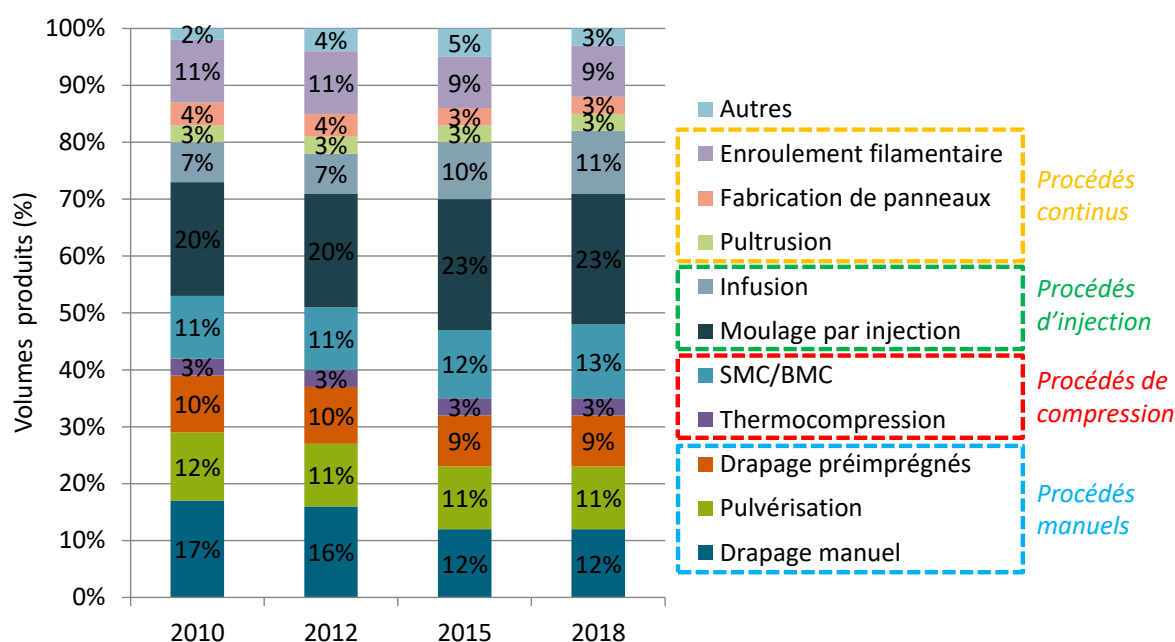


Figure 1-39 : Procédés utilisés pour la mise en œuvre des composites entre 2010 et 2018 [3]

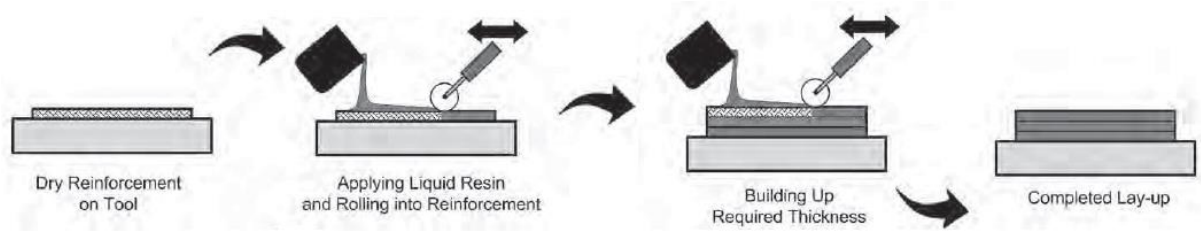


Figure 1-40 : Schématisation du procédé de drapage manuel [125]

Le procédé de drapage manuel, aussi appelé moulage au contact, réalisé avec une résine thermodurcissable est schématisé en Figure 1-40. Par ce procédé, le renfort est d’abord drapé au fond d’un moule, puis la résine est déposée et étalée. Ces deux étapes sont répétées pour l’ensemble des plis. L’étape de réticulation peut ensuite se faire à température ambiante ou à une température plus élevée, suivant les préconisations de la résine. Ce procédé, assez facile à mettre en œuvre, reste fastidieux si il doit être répété, et conduit souvent à l’obtention d’un composite avec un faible taux de fibres et un fort taux de porosités. De plus, il n’est pas possible de réaliser des formes trop complexes [125].

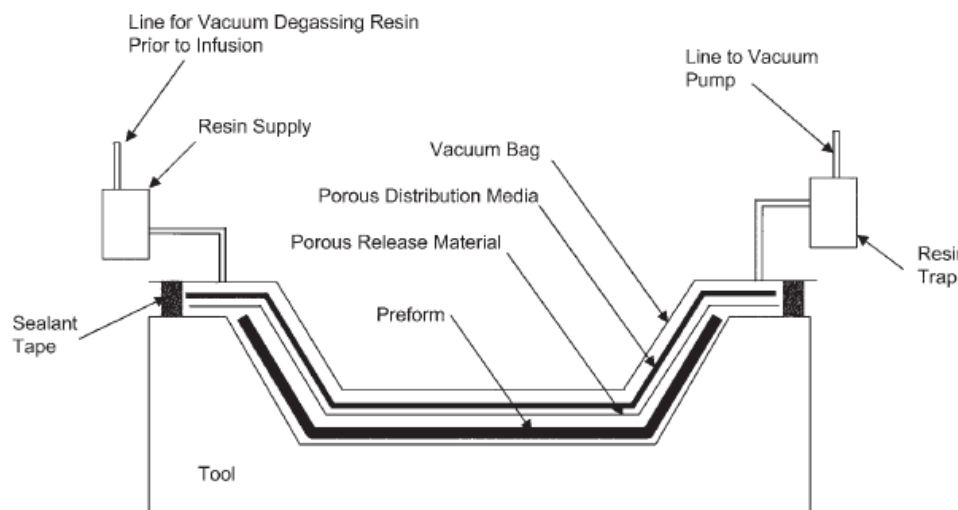


Figure 1-41 : Schématisation du procédé d'infusion [125]

Le second procédé de mise en œuvre utilisé avec les résines thermodurcissables est le procédé d’infusion, schématisé en Figure 1-41. Le renfort fibreux est déposé dans un moule puis différents consommables, tels que des tissus d’absorption, d’arrachage ou une grille de diffusion de la résine, dont le but est de faciliter l’imprégnation du renfort, sont insérés. Une fois le moule fermé par une bâche fixée par du joint, une pompe à vide est utilisée pour faire le vide dans le moule et procéder à l’infusion de la résine. Lorsque le renfort est totalement imprégné par la résine, l’ensemble est conservé sous vide le temps de la réticulation, soit à température ambiante, soit dans une étuve. Ce procédé permet d’obtenir un matériau composite avec un taux de fibres plus élevé et un taux de porosité plus faible qu’un composite fabriqué par drapage manuel. Avec le procédé d’infusion, des pièces de grandes dimensions peuvent être produites, et la viscosité de la résine doit être

peu élevée. Néanmoins, l’aspect de surface du composite sur sa face supérieure peut être granuleuse du fait de l’utilisation du tissu d’arrachage [125].

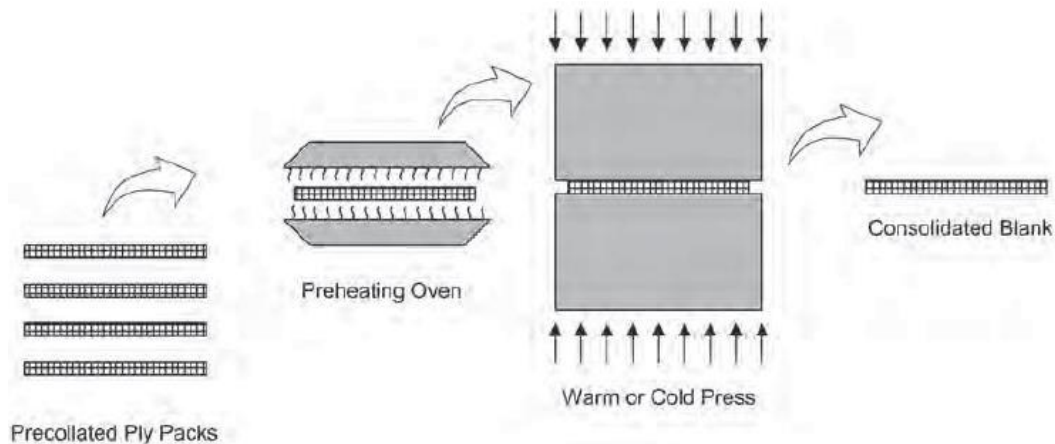


Figure 1-42 : Schématisation du procédé de thermocompression [126]

Les procédés de mise en œuvre les plus utilisés pour la production de matériaux biocomposites avec des résines thermoplastiques sont les procédés de compression car ils permettent de réduire les temps de production. Les matériaux utilisés sont soit des matériaux comelés, composés à la fois des fibres de renforts et de la matrice thermoplastique, ou des renforts secs associés à des films de résine entre les plis. Une fois l’ensemble inséré dans une presse chauffante, le cycle de thermocompression, décrit en Figure 1-43, se divise en trois phases. Durant la première phase de chauffage, la température est progressivement augmentée, jusqu’à dépasser la température de fusion, pour permettre au polymère de fondre et d’atteindre la viscosité optimale pour imprégner correctement les fibres. Lors de la deuxième phase de consolidation, une pression est appliquée pour permettre à la résine de pénétrer au cœur des fibres de renfort et pour chasser le maximum d’air qui pourrait être présent dans le renfort. Une augmentation de la pression progressive par paliers peut être également réalisée, ce qui améliorera les propriétés mécaniques du matériau composite final. Enfin, lors de la dernière étape de refroidissement, la température est diminuée progressivement, jusqu’à être inférieure à la température de transition vitreuse puis la pression est retirée. Ce procédé permet d’obtenir des pièces composites dans un temps relativement court, et à la forme souhaitée : les plateaux de la presse chauffante peuvent être plans, pour obtenir des plaques composites, ou composés d’un moule et d’un contre-moule, pour la réalisation de pièces de formes plus complexes [1,126,127].

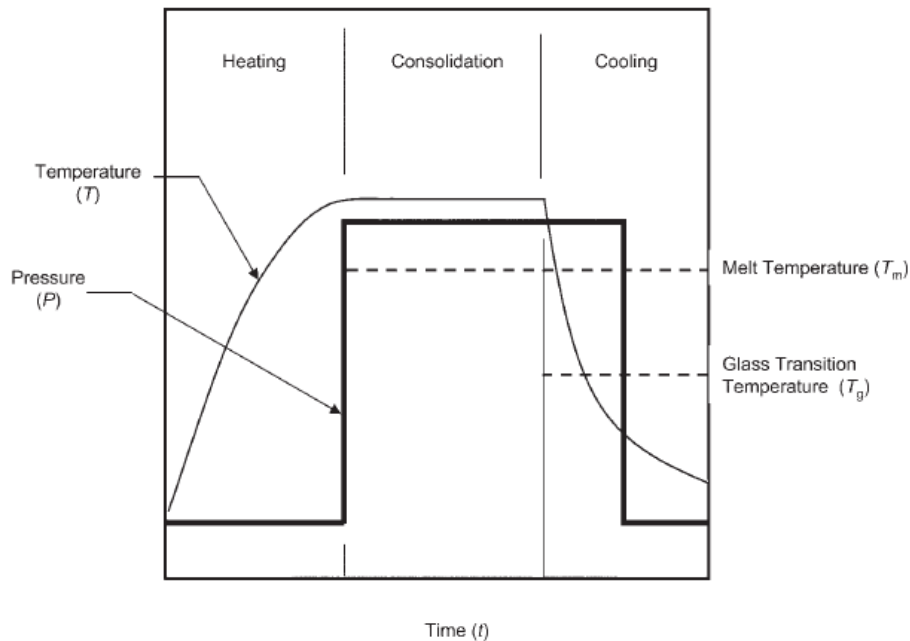


Figure 1-43 : Allure générale d'un cycle de thermocompression [126]

Lors de ces étapes, il est nécessaire de contrôler plusieurs paramètres, tels que la pression, la température et le temps de chauffage. L'application d'une trop forte pression va compresser les fibres et les désorienter de leur disposition initiale, si elles ne sont pas assez maintenues dans la structure du renfort. L'exposition des fibres naturelles à de fortes températures pendant une longue période va entraîner un changement de couleur des fibres, qui sera synonyme d'une modification esthétique du matériau, mais également source de dégradation des fibres et d'émanations d'odeurs. Pour les résines thermoplastiques, le contrôle de ces trois paramètres, permet d'obtenir un matériau composite avec une bonne imprégnation et une faible porosité tout en évitant de dégrader les fibres, maximisant ainsi les propriétés mécaniques du composite final. Dans le cas des résines thermodurcissables, la pression jouera un rôle sur la qualité de l'imprégnation des fibres et la température influera sur la réticulation de la résine et donc les propriétés du matériau composite [2,126,128,129].

5.2 Domaines d'applications des composites biosourcés

Comme abordé précédemment, les fibres naturelles sont très souvent perçues comme des alternatives avantageuses à l'utilisation de fibres synthétiques. Les fibres naturelles permettent d'amortir les vibrations, elles ont un meilleur comportement en fatigue, des propriétés acoustiques intéressantes (en termes d'absorption du bruit) et une bonne résistance à l'impact, elles sont biodégradables et transparentes aux ondes radioélectriques et permettent la réalisation de renforts hybrides avec des fibres synthétiques pour obtenir des matériaux couplant les avantages des deux natures de fibres (légèreté et bonnes performances mécaniques). Néanmoins, le principal inconvénient des fibres naturelles est leur sensibilité à l'humidité, qui peut être rédhibitoire pour de nombreuses applications

[1,6,13,51,130–132]. Leurs domaines d’application sont nombreux et se focalisent sur trois secteurs principaux : le transport, et principalement l’automobile, l’ameublement et les loisirs.



Figure 1-44 : Exemples d’applications des biocomposites dans le domaine de l'automobile [1]

Dans le domaine de l’automobile, dont certaines applications sont représentées en Figure 1-44, les biocomposites sont utilisés car ils permettent entre autre de réduire la masse des matériaux utilisés, diminuant ainsi la consommation en carburant de véhicule ainsi que les émissions de CO₂. Le prix d’achat des fibres ainsi que la possibilité de les mettre en œuvre rapidement à un faible coût rend les biocomposites compétitifs par rapport aux autres matériaux, tout en apportant les propriétés requises. De plus, les biocomposites présentent des propriétés recherchées dans le domaine de l’automobile, telles que l’isolation thermique et l’amortissement des vibrations et du bruit. Les matériaux biocomposites sont donc largement utilisés dans le milieu automobile, même si leurs utilisations dans le véhicule se limitent à des applications non structurales [1,25,133,134].



Figure 1-45 : Exemples d’applications des biocomposites dans le domaine de l'ameublement [1]

Les biocomposites sont également utilisés dans le domaine de l’ameublement, comme illustré en Figure 1-45. Les biocomposites sont recherchés en design et ameublement car, pour des applications faiblement sollicitées, ils permettent d’avoir un aspect esthétique et recyclable apprécié des consommateurs. Ils apportent légèreté au matériau et les renforts peuvent être facilement déformés et drapés pour permettre la réalisation de formes complexes [1,25,134].



Figure 1-46 : Exemples d'application des biocomposites dans le domaine des loisirs [1]

Enfin, dans le domaine des loisirs, les biocomposites sont utilisés principalement pour des applications acoustiques ou sportives, dont certaines sont présentées en Figure 1-46. En effet, les propriétés acoustiques des fibres naturelles sont particulièrement intéressantes pour la réalisation d’instruments de musique ou d’enceintes. Pour les équipements sportifs, les biocomposites sont utilisés pour alléger les matériaux et amortir les vibrations et les chocs [1,25,134].

5.3 Utilisation de renforts tissés pour la production de biocomposites

Il n’existe que très peu d’études comparatives sur l’influence du choix des renforts, à base de fibres naturelles, sur les propriétés du matériau composite [135–139]. En effet, les études précédemment citées concernent, en majorité, des composites renforcés d’unidirectionnels [61,140–145]. En comparaison des préformes non-tissées ou unidirectionnelles, les préformes tissées ont des propriétés qui permettent de mieux répondre au cahier des charges de certaines applications structurales. Le développement de méthodes et technologies des procédés de transformation textiles (tissage, tricotage et tressage) a permis d’améliorer les performances des matériaux composites. En introduisant des renforts tissés, tressés ou tricotés, les propriétés du composite final peuvent être

améliorées relativement aux matériaux renforcés de non-tissés ou d’unidirectionnels. Les résultats présentés [1] et rassemblés en Figure 1-47 proposent une comparaison des modules en traction obtenus pour des matériaux composites renforcés de fibres naturelles (chanvre et lin), minérales et synthétiques (verre et carbone) sous forme d’unidirectionnels (Figure 1-47.A.) ou de tissus (Figure 1-47.B.). Une comparaison similaire, basée sur les valeurs de résistances à rupture, conduit aux mêmes tendances. Les propriétés des composites renforcés d’unidirectionnels sont issues d’essais réalisés dans le sens des fibres tandis que les propriétés des composites renforcés de tissus sont une moyenne des résultats obtenus à 0° et à 90°. Les biocomposites (renforcés de fibres de lin et de chanvre) élaborés avec des renforts unidirectionnels ont des propriétés mécaniques inférieures à celles des composites renforcés de fibres de verre ou de carbone. Le recours aux renforts tissés avec des fibres naturelles permet d’atteindre des propriétés à l’échelle composite quasiment similaires à celles des composites renforcés de tissus de verre. En comparant les propriétés en traction de composites renforcés d’unidirectionnels et de tissus, il apparaît qu’un renfort tissé permet d’obtenir une résistance assez élevée dans les deux directions 0° et 90°, tandis que le renfort unidirectionnel atteindra ces performances uniquement dans la direction des fibres [1,146].

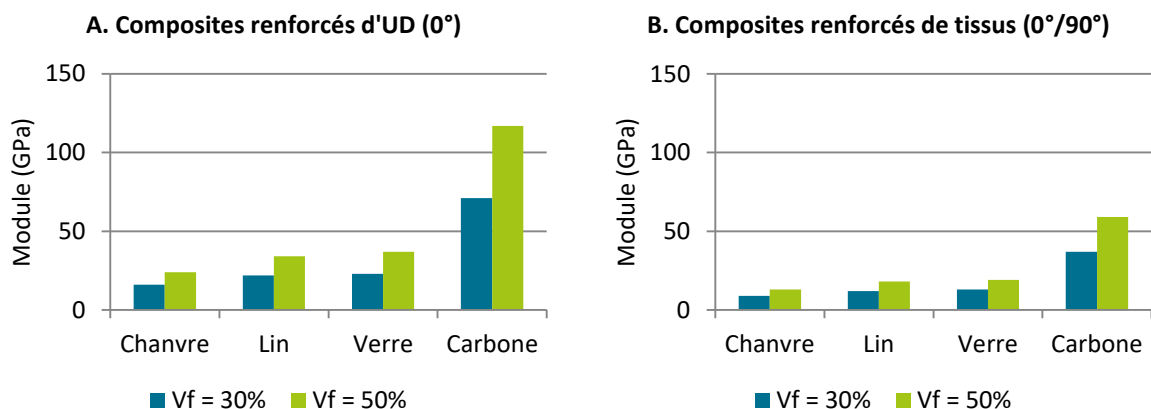


Figure 1-47 : Comparaison des modules de matériaux composites renforcés par différentes natures de fibres et types de renforts A. Unidirectionnels (UD), B. Tissus [1]

Les travaux réalisés sur des composites renforcés de structures tissées considèrent des fibres synthétiques, et notamment les fibres de carbone. Dans leur étude, M. Karahan et al. [136] ont étudié l’influence des propriétés de préformes tissées (deux toiles aux densités trames différentes et un sergé 2-2) carbone sur les propriétés en traction des matériaux composites. L’augmentation de la densité trame entraîne une fraction volumique de fibres plus élevée, bénéfique aux propriétés du composite, mais également un accroissement de l’ondulation des fils au sein de la préforme, qui serait néfaste pour les propriétés du composite. Cette augmentation de la densité trame permet également une meilleure stabilité en termes de glissements de fils et de déformation du tissu. L’armure sergé 2-2 présente un embuvage et un retrait plus faibles que pour la toile mais une meilleure stabilité dimensionnelle, les points de liages étant plus espacés, et la possibilité d’avoir des densités

chaîne et trame équilibrées. En comparaison des préformes tissées, les renforts unidirectionnels ne présentent que peu ou pas d’ondulation des fils. La complexité de la préforme tissée est due à l’entrelacement des fils de chaîne et des fils de trame, créant ainsi une ondulation des fils au sein de la structure, entrelacement qui influe sur les propriétés mécaniques du renfort. Les performances du matériau ainsi renforcé dépendent de l’armure de tissage, des fils utilisés et du volume de fibres dans chaque direction [136,147].

Certaines études portent sur le comportement de matériaux composites renforcés de préformes tissées en fibres naturelles et élaborées avec des résines pétro-sourcées (principalement époxy). Dans leurs travaux, M. Rajesh et al. [135] ont étudié les propriétés de matériaux composites renforcés par diverses préformes (une toile, un natté 2-2 et un chevron en fibres de jute et un natté 2-2 avec des fibres de jute en sens chaîne et des fibres de banane en sens trame) et fabriqués avec une résine polyester insaturée isophthalique. N. Venkateshwaran et al. [137] ont, quant à eux, étudié l’influence de l’armure (toile, sergé et natté) sur les propriétés mécaniques d’un composite banane/époxy. A. Alavudeen et al. [138] ont étudié le comportement de matériaux composites renforcés de fibres de banane et de kénaf, avec deux tissus d’armure toile et sergé 2-1 et un non-tissé pour chaque configuration (banane, kénaf, banane/kénaf), fabriqués avec une résine polyester insaturé. G.M.A. Khan et al. [139] ont comparé les propriétés de composites renforcés par une toile et un non-tissé en fibres de jute élaborés avec une matrice PLLA (acide polylactique). Dans l’étude de L.A. Pothan et al. [147] des matériaux composites fibres de banane/résine polyester insaturé, renforcés par deux types de tissus, de même armure toile mais de densités de fils différentes sont analysés. Enfin, B. Baghaei et al. [73] étudient l’influence des armures satin et basket 2-2 utilisées pour la production de renforts tissés avec des fils coméleés par guipage lin/PLA sur les propriétés du matériau composite.

Le choix de l’armure utilisée pour produire la préforme tissée est important. Pour certaines armures, par exemple le natté 2-2 [135] ou la toile [137], les fils sont mieux maintenus, ce qui implique de meilleures rigidités et résistances à rupture du matériau, et l’entrelacement vient empêcher l’élongation des fils, ce qui diminue l’allongement à rupture du composite. Au sein d’un matériau renforcé d’une préforme tissée, l’application d’une force de traction entraîne des contraintes dans le sens longitudinal mais également dans le sens transverse au niveau des points de liage. Le recours à une armure avec moins de points de liage, de type satin [73], entraîne une diminution du taux de vide et de la désorientation des fibres au sein du matériau composite, et conduit à de meilleures propriétés mécaniques (en traction, flexion, ainsi que pour la résistance à l’impact) comparativement à un matériau renforcé d’une armure de type natté 2-2. Les propriétés mécaniques du composite renforcé d’une préforme tissée sont plus élevées que celles d’un composite renforcé par un non-tissé [139]. Au sein de la préforme tissée, l’entrecroisement des fils de chaîne et des fils de trame « verrouille » la structure ce qui augmente la résistance du composite [135,137,139,147]. Par ailleurs, le module et l’allongement des matériaux composites dépendent des propriétés des

fibres, ainsi les fibres de kénaf ayant une résistance plus importante que les fibres de banane, les composites renforcés de fibres de kénaf, quel que soit le type de préformes, ont une résistance en traction plus importante [138]. Les propriétés des fibres influent également sur les propriétés en flexion des matériaux composites, ainsi la structure des fibres de kénaf étant plus dense que celle des fibres de banane, les composites renforcés de fibres de kénaf présentent de meilleures propriétés en flexion 3 points que ceux renforcés de banane [138].

Lors d’une stratification de plusieurs plis de tissus, la caractérisation mécanique montre de meilleurs résultats pour les composites à deux plis. En effet, pour un nombre de plis plus élevé, les fibres sont plus nombreuses et moins bien imprégnées, ce qui entraîne une diminution des propriétés mécaniques. De plus, en augmentant le nombre de plis de tissus, il y a plus d’espaces entre les fils et les différentes couches, qui ne seront remplis uniquement que de résine lors de l’imprégnation. L’augmentation de la densité trame lors de la réalisation de la préforme tissée confère au matériau composite de meilleures propriétés en contrainte et module. Grâce à une plus forte densité trame, le taux de fibres est plus important, ce qui crée moins d’espaces vides de fibres et le renfort est plus compact et donc plus résistant. [136,147,148].

Les propriétés en traction de matériaux composites renforcés par différents types de renforts (UD, quasi-UD et tissu) issues de la littérature [149–152] sont rassemblées en Table 1-5. Même si les masses surfaciques des renforts, le nombre de plis et la fraction volumique de fibres varient, les meilleures propriétés mécaniques sont obtenues avec les renforts unidirectionnels (UD) et quasi-unidirectionnels (quasi-UD). Au sein de ce type de renfort, les fibres sont mieux alignées dans le sens de la sollicitation mécanique, conférant ainsi de meilleures propriétés mécaniques au biocomposite. Néanmoins, les performances mécaniques des biocomposites renforcés de tissu sont proches de celles obtenues pour les biocomposites renforcés d’UD ou de quasi-UD. De plus, pour les matériaux renforcés de tissus, seuls deux sont réalisés à base de fibres de jute, et tous les autres à base de fibres de lin. Les biocomposites renforcés de jute présentent des propriétés inférieures à celles des matériaux renforcés de lin, ce qui confirme également l’influence de la nature des fibres sur les propriétés mécaniques du composite final. Ainsi, lorsque la configuration du biocomposite l’exige, notamment lorsqu’une mise en forme complexe est requise ou lorsque le renfort sera soumis à une forte maniabilité par exemple, le recours à l’utilisation de renforts tissés permet de minimiser le risque d’apparition de défauts tout en ayant de bonnes propriétés mécaniques.

Pour conclure, les performances du composite renforcé de fibres tissées dépendent donc essentiellement des performances des fibres, de leur longueur, du volume de fibres et de l’armure de tissage. Plus le volume de fibres est important, plus les contraintes sont transférées au sein du matériau. La stratification de plusieurs plis de préformes tissées peut

également être utilisée pour augmenter le volume de fibres dans la section du matériau composite, mais cette stratification a pour limite majeure l’espace laissé entre les différents plis qui va conduire à des zones riches en résine et pauvres en fibres, créant ainsi une faiblesse au sein matériau composite.

Table 1-5 : Propriétés mécaniques en traction de biocomposites issues de la littérature

Matériau	Type de renfort	Masse surfacique (g/m ²)	Nombre de plis	Fraction volumique de fibres (%)	Contrainte (MPa)	Module (GPa)	Allongement à rupture (%)
Lineo FlaxTape Lin [149]	UD	200	4 [0/90] _{2S}	40	126 ± 7	14,5 ± 0,8	1,08 ± 0,16
Lin UD 382 [150]	UD	400	8	57	260 ± 27	26,3 ± 2,1	1,58 ± 0,11
Lin UD 200 [150]	UD	223	8	60	298 ± 20	27,5 ± 2,9	1,69 ± 0,09
Lineo FlaxPly Lin [151]	Quasi-UD	180	4 [0/90] _{2S}	31	148 ± 8	8,5 ± 0,6	2,15 ± 0,10
Lin QUD 180 [150]	Quasi-UD	180	10	60	357 ± 13	33,1 ± 0,4	1,93 ± 0,10
Lin QUD 115 [150]	Quasi-UD	115	10	46	235 ± 16	23,1 ± 1,4	1,51 ± 0,12
Lineo FlaxPreg Lin [152]	Quasi-UD	154	10	45	327 ± 9,8	32,9 ± 3,2	1,45 ± 0,15
Biotex Lin Satin 7-1 [151]	Tissu	400	4	35	103 ± 3,	8,2 ± 0,6	1,70 ± 0,11
Biotex Jute Sergé 2-2 [151]	Tissu	550	4	36	63 ± 4	6,4 ± 0,6	1,21 ± 0,11
Biotex Jute Toile [151]	Tissu	500	4	40	67 ± 4	6,4 ± 0,5	1,33 ± 0,11
Libeco Lin Toile [149]	Tissu	285	4	40	135 ± 18	12,6 ± 0,4	1,69 ± 0,32
Composite Evolution Lin Sergé 2-2 [149]	Tissu	400	6	40	120 ± 2	12,8 ± 0,4	1,65 ± 0,14
Hexcel/Safilin Lin Sergé 2-2 [149]	Tissu	200	4	40	126 ± 9	12,9 ± 1,1	1,52 ± 0,13

6 Conclusion

Les fibres naturelles sont de plus en plus demandées et utilisées par les industriels dans de nombreuses applications composites. Par rapport aux fibres synthétiques traditionnellement utilisées en tant que fibres de renfort, ces fibres naturelles permettent d’alléger les matériaux, apportent de bonne isolation thermiques et acoustiques et ont des propriétés mécaniques acceptables pour la plupart des applications composites. Ainsi, l’économie des filières lin et chanvre en Europe, lieu où les conditions de production sont optimales, connaît une forte croissance ces dernières années.

Les fibres de lin et de chanvre sont issues des tiges des plantes, cultivées annuellement. De nombreuses étapes sont nécessaires après récolte en vue de l’extraction des fibres, telles qu’un éventuel rouissage, un teillage et un peignage. Les faisceaux de fibres ainsi obtenus sont composés de fibres discontinues enchevêtrées entre elles. Ces fibres doivent ensuite être parallélisées et assemblées ensemble pour obtenir un semi-produit utilisable dans les procédés de transformation textiles dont fait partie le tissage. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour conférer à cet assemblage de fibres les propriétés mécaniques nécessaires : la torsion, les traitements chimiques ou l’obtention d’un produit comélé avec des fibres thermoplastiques. Une fois ce semi-produit obtenu, les renforts sont produits par tissage, qui vise à entrelacer les fils dans deux directions orthogonales. Grâce à de nombreux paramètres de production, les propriétés de ces renforts tissés diffèrent, et un renfort le plus adapté possible peut être utilisé pour la fabrication du matériau composite. Malgré l’existence d’études sur les composites renforcés de préformes en fibres naturelles, ces dernières se focalisent sur le comportement à l’échelle composite et très peu sur le comportement à l’échelle de la préforme. De plus, les préformes en fibres naturelles sont pour la plupart produites à partir de fibres de lin, dont les procédés de production sont maîtrisés, et très peu à partir de fibres de chanvre.

Les travaux présentés dans cette thèse se focalisent sur la réalisation et la compréhension du comportement mécanique de préformes tissées à partir de fibres de chanvre. L’impact de certains procédés, tels que le recours à un traitement chimique ou le tissage est également étudié. L’ensemble de ces résultats permettra ensuite, dans le cadre du projet SSUCHY, de choisir la préforme ayant les propriétés les plus adaptées au cahier des charges du matériau composite final. La démarche générale des travaux est présentée en Figure 1-48. A l’échelle fil, les fils et mèches sont d’abord caractérisés puis, suivant les propriétés obtenues, soit optimisés en vue d’augmenter leurs propriétés mécaniques, soit utilisés directement pour la production de renforts tissés. A l’échelle fibre, ce sont les fils et mèches avec et sans amélioration qui permettent d’obtenir les propriétés des fibres par la méthode de l’IFBT. A l’échelle des tissus, les renforts sont d’abord tissés à l’échelle laboratoire, puis caractérisés et optimisés avant d’être produits à l’échelle industrielle, permettant ainsi une production de plus grande quantité afin d’alimenter les partenaires du

projet SSUCHY et d’étudier les différences entre les deux échelles de production. Après tissage, des fils sont extraits de chaque tissu dans les deux directions pour évaluer l’impact du tissage sur les propriétés des fils, et les renforts sont également utilisés pour la réalisation et la caractérisation de matériaux composites. Les échelles « fibres » et « fils » seront étudiées au Chapitre 2, l’échelle « tissu » au Chapitre 3 et l’échelle « composites » au Chapitre 4. Ces différentes échelles ainsi que les travaux associés sont schématisés dans la Figure 1-48.

Démarche générale des travaux présentés

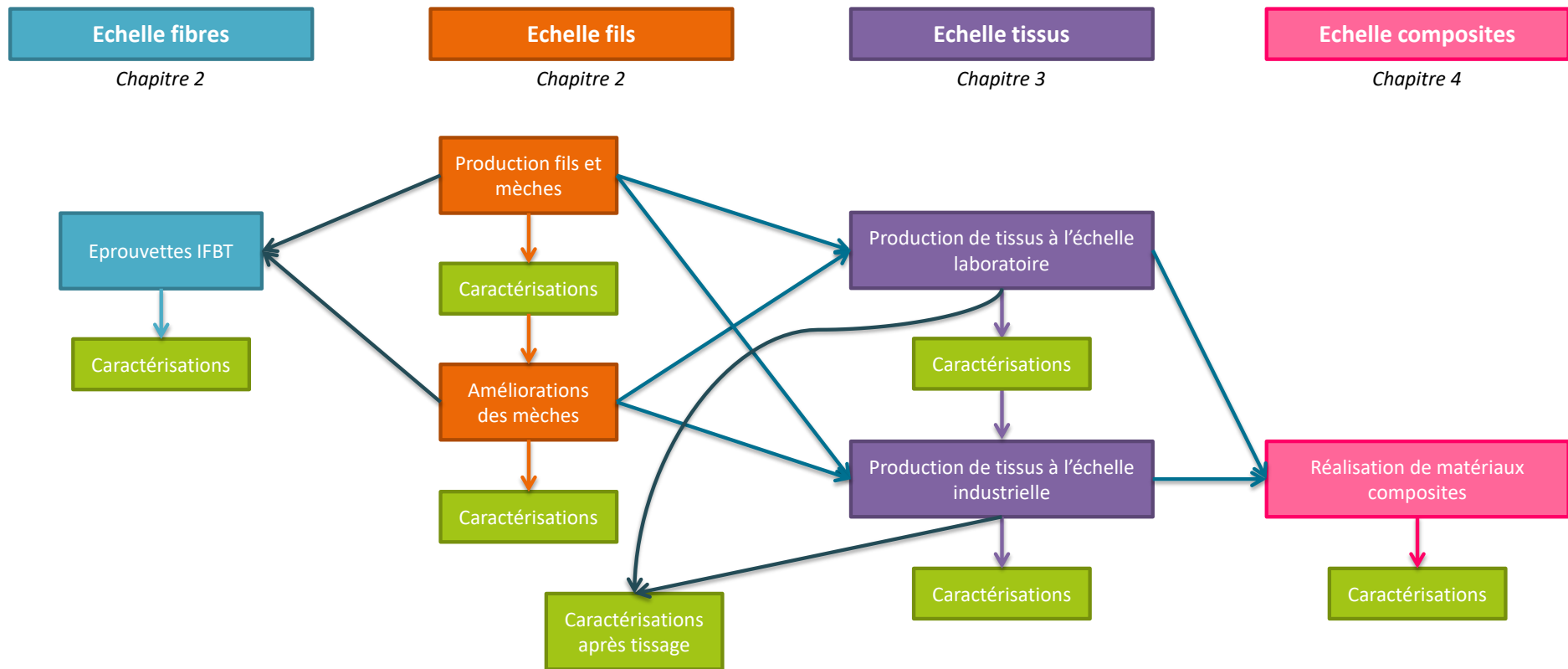


Figure 1-48 : Démarche générale des travaux présentés

Références

- [1] JEC Group, CELC, Flax and hemp fiber composites, a market reality : the biobased solutions for the industry, JEC Group, 2018.
- [2] F.C. Campbell, 1 - Introduction to Composite Materials, in: Struct. Compos. Mater., ASM International, 2010: pp. 1–29.
- [3] JEC Group, Overview of the global composites market 2018-2023 : continuing growth, JEC Group, 2019.
- [4] P. Castaing, Vieillissement des matériaux composites verre-polyester en milieu marin : délaminage d’origine osmotique, Thèse, Toulouse, INPT, 1992. <http://www.theses.fr/1992INPT016G> (accessed March 20, 2020).
- [5] D.U. Shah, Natural fibre composites: Comprehensive Ashby-type materials selection charts, Mater. Des. 1980-2015. 62 (2014) 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.002>.
- [6] A.K. Mohanty, S. Vivekanandhan, J.-M. Pin, M. Misra, Composites from renewable and sustainable resources: Challenges and innovations, Science. 362 (2018) 536–542. <https://doi.org/10.1126/science.aat9072>.
- [7] FRD, IAR, Mémento - Panorama des marchés “fibres végétales techniques matériaux (hors bois),” 2020.
- [8] Club d’intérêt projet investissement d’avenir Sinfoni, Mémento - Panorama des marchés “fibres végétales techniques matériaux (hors bois),” Sinfoni, 2016.
- [9] S. Rana, S. Pichandi, S. Parveen, R. Figueiro, Natural Plant Fibers: Production, Processing, Properties and Their Sustainability Parameters, in: S.S. Muthu (Ed.), Roadmap Sustain. Text. Cloth. Eco-Friendly Raw Mater. Technol. Process. Methods, Springer, Singapore, 2014: pp. 1–35. https://doi.org/10.1007/978-981-287-065-0_1.
- [10] Les zones de production du lin dans le monde | Le lin côté nature, (n.d.). <https://www.lelin-cotenature.fr/FR/Les-zones-de-production-41.html> (accessed March 9, 2020).
- [11] Interchanvre - La culture, (n.d.). https://www.interchanvre.org/la_culture (accessed March 9, 2020).
- [12] Le lin et le chanvre européen, (n.d.). <http://www.mastersoflinen.com/fre/lin/1-la-filiere-de-proximite> (accessed December 3, 2017).
- [13] A. Bourmaud, J. Beaugrand, D.U. Shah, V. Placet, C. Baley, Towards the design of high-performance plant fibre composites, Prog. Mater. Sci. 97 (2018) 347–408. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.05.005>.
- [14] Terre de Lin - Culture du lin, (n.d.). <http://www.terredelin.com/internet/lart-du-lin/culture-du-lin/culture-du-lin-1152.aspx> (accessed March 9, 2020).
- [15] Linen transformation steps - From seed to fiber, Eur. Linen Hemp. (n.d.). http://www.mastersoflinen.com/eng/lin/8-de-la-graine-a-la-fibre__ (accessed December 19, 2017).
- [16] Linen transformation steps - From fiber to yarn, Eur. Linen Hemp. (n.d.). http://www.mastersoflinen.com/eng/lin/9-de-la-fibre-au-fil__ (accessed December 19, 2017).
- [17] E. Capelle, Conception et fabrication de renforts tissés à base de fibres de lin pour la réalisation de pièces composites à géométries complexes, Thèse, Université d’Orléans, n.d.

- [18] V. Sadrmanesh, Y. Chen, Bast fibres: structure, processing, properties, and applications, *Int. Mater. Rev.* 64 (2019) 381–406. <https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1501171>.
- [19] B. Chabbert, J. Padovani, C. Djemiel, J. Ossemond, A. Lemaître, A. Yoshinaga, S. Hawkins, S. Grec, J. Beaugrand, B. Kurek, Multimodal assessment of flax dew retting and its functional impact on fibers and natural fiber composites, *Ind. Crops Prod.* 148 (2020) 112255. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112255>.
- [20] SSUCHY, SSUCHY - Rapports internes, n.d.
- [21] M. Lucas, Le chanvre, un produit d’exception, (2017).
- [22] Hemp transformation steps, *Eur. Linen Hemp.* (n.d.). <http://www.mastersoflinen.com/eng/chanvre/20-culture-du-chanvre> (accessed December 19, 2017).
- [23] Date de récolte du chanvre - Terres Inovia - Oléagineux, protéagineux et chanvre, (n.d.). <http://www.terresinovia.fr/chanvre/cultiver-du-chanvre/recolte-conservation/date-de-recolte/> (accessed December 19, 2017).
- [24] B. Mazian, A. Bergeret, J.-C. Benezet, L. Malhautier, A Comparative Study of the Effect of Field Retting Time on the Properties of Hemp Fibres Harvested at Different Growth Stages, *Fibers.* 7 (2019) 108. <https://doi.org/10.3390/fib7120108>.
- [25] L. Pil, F. Bensadoun, J. Pariset, I. Verpoest, Why are designers fascinated by flax and hemp fibre composites?, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 83 (2016) 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.11.004>.
- [26] H.N. Dhakal, Z. Zhang, The use of hemp fibres as reinforcements in composites, in: *Biofiber Reinf. Compos. Mater.*, Woodhead Publishing, 2015: pp. 86–103. <https://doi.org/10.1533/9781782421276.1.86>.
- [27] V. Placet, Characterization of the thermo-mechanical behaviour of Hemp fibres intended for the manufacturing of high performance composites, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 40 (2009) 1111–1118. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.04.031>.
- [28] C. Scarponi, C. s. Pizzinelli, Interface and mechanical properties of Natural Fibres reinforced composites: a review, *Int. J. Mater. Prod. Technol.* 36 (2009) 278–303. <https://doi.org/10.1504/IJMPT.2009.027837>.
- [29] D.B. Dittenber, H.V.S. GangaRao, Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 43 (2012) 1419–1429. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019>.
- [30] A. Stamboulis, C.A. Baillie, T. Peijs, Effects of environmental conditions on mechanical and physical properties of flax fibers, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 32 (2001) 1105–1115. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00032-X](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00032-X).
- [31] A. Amiri, Z. Triplett, A. Moreira, N. Brezinka, M. Alcock, C.A. Ulven, Standard density measurement method development for flax fiber, *Ind. Crops Prod.* 96 (2017) 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.11.060>.
- [32] A. Thuault, J. Bazin, S. Eve, J. Bréard, M. Gomina, Numerical study of the influence of structural and mechanical parameters on the tensile mechanical behaviour of flax fibres, *J. Ind. Text.* 44 (2014) 22–39. <https://doi.org/10.1177/1528083713481835>.
- [33] Chemical Composition Of Flax Fiber | Linen Fiber Composition | Textile Fashion Study, (n.d.). <http://textilefashionstudy.com/chemical-composition-of-flax-fiber-linen-fiber-composition/>, <http://textilefashionstudy.com/chemical-composition-of-flax-fiber-linen-fiber-composition/> (accessed December 19, 2017).

- [34] V. Placet, F. Trivaudey, O. Cisse, V. Gucheret-Retel, M.L. Boubakar, Diameter dependence of the apparent tensile modulus of hemp fibres: A morphological, structural or ultrastructural effect?, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 43 (2012) 275–287. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.10.019>.
- [35] M. Zeidman, P.S. Sawhney, Influence of Fiber Length Distribution on Strength Efficiency of Fibers in Yarn, *Text. Res. J.* 72 (2002) 216–220. <https://doi.org/10.1177/004051750207200306>.
- [36] M. Grégoire, B. Barthod-Malat, L. Labonne, P. Evon, E. De Luycker, P. Ouagne, Investigation of the potential of hemp fibre straws harvested using a combine machine for the production of technical load-bearing textiles, *Ind. Crops Prod.* (2019) 111988. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111988>.
- [37] C. Baley, C. Goudenhooft, M. Gibaud, A. Bourmaud, Flax stems: from a specific architecture to an instructive model for bioinspired composite structures, *Bioinspir. Biomim.* 13 (2018) 026007. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/aaa6b7>.
- [38] C. Baley, A. Le Duigou, C. Morvan, A. Bourmaud, 8 - Tensile properties of flax fibers, in: A.R. Bunsell (Ed.), *Handb. Prop. Text. Tech. Fibres Second Ed.*, Woodhead Publishing, 2018: pp. 275–300. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101272-7.00008-0>.
- [39] M.M. Kabir, H. Wang, K.T. Lau, F. Cardona, Tensile properties of chemically treated hemp fibres as reinforcement for composites, *Compos. Part B Eng.* 53 (2013) 362–368. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.05.048>.
- [40] C. Baley, Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 33 (2002) 939–948. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00040-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00040-4).
- [41] C. Baley, M. Gomina, J. Breard, A. Bourmaud, P. Davies, Variability of mechanical properties of flax fibres for composite reinforcement. A review, *Ind. Crops Prod.* (2019) 111984. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111984>.
- [42] M. Le Gall, P. Davies, N. Martin, C. Baley, Recommended flax fibre density values for composite property predictions, *Ind. Crops Prod.* 114 (2018) 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.01.065>.
- [43] J. Summerscales, N.P.J. Dissanayake, A.S. Virk, W. Hall, A review of bast fibres and their composites. Part 1 – Fibres as reinforcements, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 41 (2010) 1329–1335. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.06.001>.
- [44] K. Charlet, Contribution à l’étude de composites unidirectionnels renforcés par des fibres de lin : relation entre la microstructure de la fibre et ses propriétés mécaniques, Thèse, Université de Caen / Basse-Normandie, 2008. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01133091/document> (accessed October 30, 2017).
- [45] AFNOR, NF T25-501-2 - Reinforcement fibres - Flax fibres for plastics composites - Part 2 : determination of tensile properties of elementary fibres, 2015.
- [46] F. Bensadoun, I. Verpoest, J. Baets, J. Müssig, N. Graupner, P. Davies, M. Gomina, A. Kervoelen, C. Baley, Impregnated fibre bundle test for natural fibres used in composites, *J. Reinf. Plast. Compos.* 36 (2017) 942–957. <https://doi.org/10.1177/0731684417695461>.
- [47] A. Lefeuvre, A. Bourmaud, C. Morvan, C. Baley, Tensile properties of elementary fibres of flax and glass: Analysis of reproducibility and scattering, *Mater. Lett.* 130 (2014) 289–291. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.05.115>.
- [48] European Linen & Hemp, (n.d.). <http://www.mastersoflinen.com/> (accessed November 8, 2019).

- [49] J. Summerscales, Data and equations for Rule-of-Mixtures calculations, (n.d.). https://www.fose1.plymouth.ac.uk/sme/mats347/Appendix_Z_RoM.doc (accessed March 5, 2018).
- [50] A. Del Masto, F. Trivaudey, V. Guicheret-Retel, V. Placet, L. Boubakar, Investigation of the possible origins of the differences in mechanical properties of hemp and flax fibres: A numerical study based on sensitivity analysis, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 124 (2019) 105488. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105488>.
- [51] C. Baley, M. Gomina, J. Breard, A. Bourmaud, S. Drapier, M. Ferreira, A.L. Duigou, P.J. Liotier, P. Ouagne, D. Soulat, P. Davies, Specific features of flax fibres used to manufacture composite materials, *Int. J. Mater. Form.* (2018) 1–30. <https://doi.org/10.1007/s12289-018-1455-y>.
- [52] B.M. Zaidi, J. Zhang, K. Magniez, H. Gu, M. Miao, Optimizing twisted yarn structure for natural fiber-reinforced polymeric composites, *J. Compos. Mater.* (2017) 0021998317707333. <https://doi.org/10.1177/0021998317707333>.
- [53] V. Placet, C. François, A. Day, J. Beaugrand, P. Ouagne, Industrial Hemp Transformation for Composite Applications: Influence of Processing Parameters on the Fibre Properties, in: *Adv. Nat. Fibre Compos.*, R. Figueiro and S. Rana Eds, 2018: pp. 13–25. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64641-1_2 (accessed November 22, 2017).
- [54] S. Goutianos, T. Peijs, B. Nystrom, M. Skrifvars, Development of Flax Fibre based Textile Reinforcements for Composite Applications, *Appl. Compos. Mater.* 13 (2006) 199–215. <https://doi.org/10.1007/s10443-006-9010-2>.
- [55] S. Goutianos, T. Peijs, The optimisation of flax fibre yarns for the development of high-performance natural fibre composites, *Adv. Compos. Lett.* 12 (2003) 237–241.
- [56] F. Omrani, P. Wang, D. Soulat, M. Ferreira, Mechanical properties of flax-fibre-reinforced preforms and composites: Influence of the type of yarns on multi-scale characterisations, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 93 (2017) 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.11.013>.
- [57] J. Baets, D. Plastria, J. Ivens, I. Verpoest, Determination of the optimal flax fibre preparation for use in unidirectional flax–epoxy composites, *J. Reinf. Plast. Compos.* 33 (2014) 493–502. <https://doi.org/10.1177/0731684413518620>.
- [58] D.U. Shah, P.J. Schubel, M.J. Clifford, Modelling the effect of yarn twist on the tensile strength of unidirectional plant fibre yarn composites, *J. Compos. Mater.* 47 (2013) 425–436. <https://doi.org/10.1177/0021998312440737>.
- [59] Z.A. Malik, Relationship between tensile strength of yarn and woven fabric, Thèse, Mehran University of Engineering & Technology Jamshoro, 2011. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1730.6965>.
- [60] L. Zhang, M. Miao, Commingled natural fibre/polypropylene wrap spun yarns for structured thermoplastic composites, *Compos. Sci. Technol.* 70 (2010) 130–135. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.09.016>.
- [61] J. Moothoo, S. Allaoui, P. Ouagne, D. Soulat, A study of the tensile behaviour of flax tows and their potential for composite processing, *Mater. Des.* 55 (2014) 764–772. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.10.048>.
- [62] I. Van de Weyenberg, J. Ivens, A. De Coster, B. Kino, E. Baetens, I. Verpoest, Influence of processing and chemical treatment of flax fibres on their composites, *Compos. Sci. Technol.* 63 (2003) 1241–1246. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00093-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00093-9).
- [63] P.-J. Liotier, M.F. Pucci, A. Le Duigou, A. Kervoelen, J. Tirilló, F. Sarasini, S. Drapier, Role of interface formation versus fibres properties in the mechanical behaviour of bio-

- based composites manufactured by Liquid Composite Molding processes, *Compos. Part B Eng.* 163 (2019) 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.103>.
- [64] C. Baley, F. Busnel, Y. Grohens, O. Sire, Influence of chemical treatments on surface properties and adhesion of flax fibre–polyester resin, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 37 (2006) 1626–1637. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.10.014>.
- [65] R. Sepe, F. Bollino, L. Boccarusso, F. Caputo, Influence of chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites, *Compos. Part B Eng.* 133 (2018) 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.030>.
- [66] M.M. Kabir, H. Wang, K.T. Lau, F. Cardona, T. Aravinthan, Mechanical properties of chemically-treated hemp fibre reinforced sandwich composites, *Compos. Part B Eng.* 43 (2012) 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.06.003>.
- [67] M.F. Pucci, P.-J. Liotier, D. Seveno, C. Fuentes, A. Van Vuure, S. Drapier, Wetting and swelling property modifications of elementary flax fibres and their effects on the Liquid Composite Molding process, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 97 (2017) 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.02.028>.
- [68] M.F. Pucci, P.-J. Liotier, S. Drapier, Capillary wicking in a fibrous reinforcement – Orthotropic issues to determine the capillary pressure components, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 77 (2015) 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.05.031>.
- [69] E. Bozaci, K. Sever, M. Sarikanat, Y. Seki, A. Demir, E. Ozdogan, I. Tavman, Effects of the atmospheric plasma treatments on surface and mechanical properties of flax fiber and adhesion between fiber–matrix for composite materials, *Compos. Part B Eng.* 45 (2013) 565–572. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.042>.
- [70] H. Ventura, J. Claramunt, A. Navarro, M.A. Rodriguez-Perez, M. Ardanuy, Effects of Wet/Dry-Cycling and Plasma Treatments on the Properties of Flax Nonwovens Intended for Composite Reinforcing, *Materials*. 9 (2016) 93. <https://doi.org/10.3390/ma9020093>.
- [71] M.C. Seghini, F. Touchard, L. Chocinski-Arnault, V. Placet, C. François, L. Plasseraud, M.P. Bracciale, J. Tirillò, F. Sarasini, Environmentally Friendly Surface Modification Treatment of Flax Fibers by Supercritical Carbon Dioxide, *Molecules*. 25 (2020) 438. <https://doi.org/10.3390/molecules25030438>.
- [72] C. François, V. Placet, J. Beaugrand, S. Pourchet, G. Boni, D. Champion, S. Fontaine, L. Plasseraud, Can supercritical carbon dioxide be suitable for the green pretreatment of plant fibres dedicated to composite applications?, *J. Mater. Sci.* 55 (2020) 4671–4684. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-04293-y>.
- [73] B. Baghaei, M. Skrifvars, L. Berglin, Manufacture and characterisation of thermoplastic composites made from PLA/hemp co-wrapped hybrid yarn preregs, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 50 (2013) 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.03.012>.
- [74] J. Jiang, N. Chen, Preforms and composites manufactured by novel flax/polypropylene cowrap spinning method, *J. Compos. Mater.* 46 (2012) 2097–2109. <https://doi.org/10.1177/0021998311430155>.
- [75] M.D. Gilchrist, S. Svensson, R. Shishoo, Fracture and fatigue performance of textile commingled yarn composites, *J. Mater. Sci.* 33 (1998) 4049–4058. <https://doi.org/10.1023/A:1004431104540>.
- [76] M. Bar, R. Alagirusamy, A. Das, Development of flax-PP based twist-less thermally bonded roving for thermoplastic composite reinforcement, *J. Text. Inst.* 110 (2019) 1369–1379. <https://doi.org/10.1080/00405000.2019.1610997>.

- [77] N. Bernet, V. Michaud, P.-E. Bourban, J.-A.E. Månson, Commingled yarn composites for rapid processing of complex shapes, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 32 (2001) 1613–1626. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00180-9](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00180-9).
- [78] K. Friedrich, Commingled yarns and their use for composites, in: *Polypropylene*, Springer, Dordrecht, 1999: pp. 81–89. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4421-6_12.
- [79] Y. Xie, W. Oxenham, P. Grosberg, A Study of the Strength of Wrapped Yarns Part I : The Theoretical Model, *J. Text. Inst.* 77 (1986) 295–304. <https://doi.org/10.1080/00405008608658424>.
- [80] Y. Xie, W. Oxenham, P. Grosberg, A Study of the Strength of Wrapped Yarns Part II : Computation and Experimental, *J. Text. Inst.* 77 (1986) 305–313. <https://doi.org/10.1080/00405008608658425>.
- [81] Y. Xie, W. Oxenham, P. Grosberg, A Study of the Strength of Wrapped Yarns Part III : The Relationship Between Structural Parameters and Strength, *J. Text. Inst.* 77 (1986) 314–326. <https://doi.org/10.1080/00405008608658426>.
- [82] B. Baghaei, M. Skrifvars, Characterisation of polylactic acid biocomposites made from prepregs composed of woven polylactic acid/hemp–Lyocell hybrid yarn fabrics, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 81 (2016) 139–144. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.10.042>.
- [83] L. Laberge-Lebel, S.V. Hoa, Manufacturing of Braided Thermoplastic Composites with Carbon/Nylon Commingled Fibers, *J. Compos. Mater.* 41 (2007) 1101–1121. <https://doi.org/10.1177/0021998306067273>.
- [84] K.B. Katnam, H. Dalfi, P. Potluri, Towards balancing in-plane mechanical properties and impact damage tolerance of composite laminates using quasi-UD woven fabrics with hybrid warp yarns, *Compos. Struct.* 225 (2019) 111083. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111083>.
- [85] K. Jayaraman, Manufacturing sisal–polypropylene composites with minimum fibre degradation, *Compos. Sci. Technol.* 63 (2003) 367–374. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00217-8](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00217-8).
- [86] O.A. Khondker, U.S. Ishiaku, A. Nakai, H. Hamada, A novel processing technique for thermoplastic manufacturing of unidirectional composites reinforced with jute yarns, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 37 (2006) 2274–2284. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.12.030>.
- [87] R. Alagirusamy, R. Fanguero, V. Ogale, N. Padaki, Hybrid Yarns and Textile Preforming for Thermoplastic Composites, *Text. Prog.* 38 (2006) 1–71. <https://doi.org/10.1533/tepr.2006.0004>.
- [88] M. Bar, A. Das, R. Alagirusamy, Effect of interface on composites made from DREF spun hybrid yarn with low twisted core flax yarn, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 107 (2018) 260–270. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.01.003>.
- [89] H.A.V. Werf, Method for the manufacture of yarn and the yarn obtained by the application of said method, GB1380004A, 1975. <https://patents.google.com/patent/GB1380004A/en?q=GB+1380004A> (accessed March 13, 2020).
- [90] C. Bok, H.J. Selling, M.A.V.D. Boom, Method for the production of yarn and a yarn obtained by applying the said method, US3447310A, 1969. <https://patents.google.com/patent/US3447310A/en?q=U.+S.+Patent+No.+3447310> (accessed March 13, 2020).

- [91] J.M.V. Dort, Method of manufacturing twistless yarn and yarn obtained by this method, US4107914A, 1978. <https://patents.google.com/patent/US4107914A/en?q=US4107914> (accessed March 13, 2020).
- [92] S.A. Heap, W.J. Naarding, Spinning of twistless yarns by wet drafting, US4038813A, 1977. <https://patents.google.com/patent/US4038813A/en?q=US4038813> (accessed March 13, 2020).
- [93] B. Baghaei, M. Skrifvars, M. Salehi, T. Bashir, M. Rissanen, P. Nousiainen, Novel aligned hemp fibre reinforcement for structural biocomposites: Porosity, water absorption, mechanical performances and viscoelastic behaviour, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 61 (2014) 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.01.017>.
- [94] J. Müssig, K. Haag, The use of flax fibres as reinforcements in composites, in: *Biofiber Reinf. Compos. Mater.*, Woodhead Publishing, 2015: pp. 35–85. <https://doi.org/10.1533/9781782421276.1.35>.
- [95] L’atelier de Lila, apprentissage du tissage, les techniques du tisseur, (n.d.). <http://www.atelierdelila.fr/tissage.html> (accessed November 5, 2017).
- [96] F. Boussu, *Le tissage*, (2014).
- [97] AFNOR, NF G07-316 - Textiles - Tests of yarns - Determination of linear density., 1988.
- [98] N. Pan, Analysis of woven fabric strengths: Prediction of fabric strength under uniaxial and biaxial extensions, *Compos. Sci. Technol.* 56 (1996) 311–327. [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(95\)00114-X](https://doi.org/10.1016/0266-3538(95)00114-X).
- [99] M. Manins, A. Bernava, G. Strazds, 2DWoven Reinforcements of Natural Fibers, *Adv. Mater. Res.* 1064 (2015) 77–82. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1064.77>.
- [100] M.M. Hossain, E. Datta, S. Rahman, A Review on Different Factors of Woven Fabrics’ Strength Prediction, *Sci. Res.* 4 (2016) 88. <https://doi.org/10.11648/j.sr.20160403.13>.
- [101] M.I. Misnon, M.M. Islam, J.A. Epaarachchi, K.T. Lau, Analyses of woven hemp fabric characteristics for composite reinforcement, *Mater. Des.* 1980-2015. 66 (2015) 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.037>.
- [102] M.M. Haque, Effect of weft parameters on weaving performance and fabric properties, *Daffodil Int. Univ. J. Sci. Technol.* 4 (2009) 62–69. <https://doi.org/10.3329/diujst.v4i2.4369>.
- [103] S. Dhar Malingam, N. Lin Feng, A. Akmar Kamarolzaman, H. Tzy Yi, A.F. Ab Ghani, Mechanical Characterisation of Woven Kenaf Fabric as Reinforcement for Composite Materials, *J. Nat. Fibers.* (2019) 1–11. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1642827>.
- [104] P. R. Lord, M. E. Perez, The Behavior of Twistless and Low-Twist Staple Yarns in a Plain-Weave Fabric, *Text. Res. J. - TEXT RES J.* 51 (1981) 45–51. <https://doi.org/10.1177/004051758105100109>.
- [105] C. Bessette, M. Decrette, M. Tournonias, J.-F. Osselin, F. Charleux, D. Coupé, M.-A. Bueno, In-situ measurement of tension and contact forces for weaving process monitoring: Application to 3D interlock, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 126 (2019) 105604. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105604>.
- [106] C. Tephany, D. Soulat, J. Gillibert, P. Ouagne, Influence of the non-linearity of fabric tensile behavior for preforming modeling of a woven flax fabric, *Text. Res. J.* 86 (2016) 604–617. <https://doi.org/10.1177/0040517515595030>.

- [107] R. Akkerman, A continuum mechanics analysis of shear characterisation methods, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 109 (2018) 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.02.036>.
- [108] W. Lee, J. Padvoiskis, J. Cao, E. de Luycker, P. Boisse, F. Morestin, J. Chen, J. Sherwood, Bias-extension of woven composite fabrics, *Int. J. Mater. Form.* 1 (2008) 895–898. <https://doi.org/10.1007/s12289-008-0240-8>.
- [109] 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, Tz. Stoilova, X.M. Tao, I. Verpoest, A. Willems, J. Wiggers, T.X. Yu, B. Zhu, Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 39 (2008) 1037–1053. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.02.016>.
- [110] P. Boisse, N. Hamila, E. Guzman-Maldonado, A. Madeo, G. Hivet, F. dell'Isola, The bias-extension test for the analysis of in-plane shear properties of textile composite reinforcements and preregs: a review, *Int. J. Mater. Form.* 10 (2017) 473–492. <https://doi.org/10.1007/s12289-016-1294-7>.
- [111] J. Pourtier, B. Duchamp, M. Kowalski, P. Wang, X. Legrand, D. Soulat, Two-way approach for deformation analysis of non-crimp fabrics in uniaxial bias extension tests based on pure and simple shear assumption, *Int. J. Mater. Form.* (2019). <https://doi.org/10.1007/s12289-019-01481-8>.
- [112] P. Harrison, M.F. Alvarez, D. Anderson, Towards comprehensive characterisation and modelling of the forming and wrinkling mechanics of engineering fabrics, *Int. J. Solids Struct.* (2017). <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.11.008>.
- [113] K. Bilisik, Bending behavior of multilayered and multidirectional stitched aramid woven fabric structures, *Text. Res. J.* 81 (2011) 1748–1761. <https://doi.org/10.1177/0040517511411974>.
- [114] T. Matsuo, Bending of Woven Fabrics, *J. Text. Mach. Soc. Jpn.* 21 (1969) 260–274. <https://doi.org/10.4188/jte1955.15.19>.
- [115] P. Boisse, N. Hamila, E. Vidal-Sallé, F. Dumont, Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses, *Compos. Sci. Technol.* 71 (2011) 683–692. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.01.011>.
- [116] P. Ouagne, D. Soulat, G. Hivet, S. Allaoui, D. Duriatti, Analysis of Defects during the Preforming of a Woven Flax Reinforcement, *Adv. Compos. Lett.* 20 (2011) 096369351102000403. <https://doi.org/10.1177/096369351102000403>.
- [117] P. Ouagne, D. Soulat, J. Moothoo, E. Capelle, S. Gueret, Complex shape forming of a flax woven fabric; analysis of the tow buckling and misalignment defect, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 51 (2013) 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.03.017>.
- [118] E. Capelle, P. Ouagne, D. Soulat, D. Duriatti, Complex shape forming of flax woven fabrics: Design of specific blank-holder shapes to prevent defects, *Compos. Part B Eng.* 62 (2014) 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.02.007>.
- [119] P. Ouagne, D. Soulat, C. Tephany, J. Gillibert, Measurement of the Appearance and Growth of Tow Buckling Defect in the Frame of Complex Shape Manufacturing Process by Using Fringe Projection Technique, *Strain.* 52 (2016) 559–569. <https://doi.org/10.1111/str.12206>.
- [120] C. Tephany, J. Gillibert, P. Ouagne, G. Hivet, S. Allaoui, D. Soulat, Development of an experimental bench to reproduce the tow buckling defect appearing during the complex

- shape forming of structural flax based woven composite reinforcements, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 81 (2016) 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.10.011>.
- [121] R. Picciotto, S.P. Hersh, The Tensile Fatigue Behavior of a Warp Yarn and its Influence on Weaving Performance, *Text. Res. J.* 42 (1972) 512–522. <https://doi.org/10.1177/004051757204200902>.
- [122] S. Rudov-Clark, A.P. Mouritz, L. Lee, M.K. Bannister, Fibre damage in the manufacture of advanced three-dimensional woven composites, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 34 (2003) 963–970. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(03\)00213-6](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(03)00213-6).
- [123] L. Lee, S. Rudov-Clark, A.P. Mouritz, M.K. Bannister, I. Herszberg, Effect of weaving damage on the tensile properties of three-dimensional woven composites, *Compos. Struct.* 57 (2002) 405–413. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00108-3](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00108-3).
- [124] A.-C. Corbin, F. Boussu, M. Ferreira, D. Soulat, Influence of 3D warp interlock fabrics parameters made with flax rovings on their final mechanical behaviour, *J. Ind. Text.* (2018) 1528083718808790. <https://doi.org/10.1177/1528083718808790>.
- [125] F.C. Campbell, 5 - Thermoset Composite Fabrication Processes, in: *Struct. Compos. Mater.*, ASM International, 2010: pp. 119–182.
- [126] F.C. Campbell, 6 - Thermoplastic Composite Fabrication Processes, in: *Struct. Compos. Mater.*, ASM International, 2010: pp. 183–200.
- [127] Y. Lebaupin, M. Chauvin, T.-Q.T. Hoang, F. Touchard, A. Beigbeder, Influence of constituents and process parameters on mechanical properties of flax fibre-reinforced polyamide 11 composite, *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 30 (2017) 1503–1521. <https://doi.org/10.1177/0892705716644669>.
- [128] I. Derbali, S. Terekhina, L. Guillaumat, P. Ouagne, Rapid manufacturing of woven comingled flax/polypropylene composite structures, *Int. J. Mater. Form.* 12 (2019) 927–942. <https://doi.org/10.1007/s12289-018-01464-1>.
- [129] Y. Dobah, I. Zampetakis, C. Ward, F. Scarpa, Thermoformability characterisation of Flax reinforced polypropylene composite materials, *Compos. Part B Eng.* 184 (2020) 107727. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107727>.
- [130] G. Koolen, J. Soete, A.W. van Vuure, Interface modification and the influence on damage development of flax fibre – Epoxy composites when subjected to hygroscopic cycling, *Mater. Today Proc.* (2020). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.183>.
- [131] S. Réquillé, A. Le Duigou, A. Bourmaud, C. Baley, Deeper insights into the moisture-induced hygroscopic and mechanical properties of hemp reinforced biocomposites, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 123 (2019) 278–285. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.05.006>.
- [132] F.P. La Mantia, M. Morreale, Green composites: A brief review, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 42 (2011) 579–588. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.01.017>.
- [133] G. Koronis, A. Silva, M. Fontul, Green composites: A review of adequate materials for automotive applications, *Compos. Part B Eng.* 44 (2013) 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.004>.
- [134] M.P.M. Dicker, P.F. Duckworth, A.B. Baker, G. Francois, M.K. Hazzard, P.M. Weaver, Green composites: A review of material attributes and complementary applications, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 56 (2014) 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.10.014>.
- [135] M. Rajesh, S.P. Singh, J. Pitchaimani, Mechanical behavior of woven natural fiber fabric composites: Effect of weaving architecture, intra-ply hybridization and stacking

- sequence of fabrics, *J. Ind. Text.* 47 (2018) 938–959. <https://doi.org/10.1177/1528083716679157>.
- [136] M. Karahan, N. Karahan, Influence of weaving structure and hybridization on the tensile properties of woven carbon-epoxy composites, *J. Reinf. Plast. Compos.* 33 (2014) 212–222. <https://doi.org/10.1177/0731684413504019>.
- [137] N. Venkateshwaran, A. ElayaPerumal, R.H. Arwin Raj, Mechanical and Dynamic Mechanical Analysis of Woven Banana/Epoxy Composite, *J. Polym. Environ.* 20 (2012) 565–572. <https://doi.org/10.1007/s10924-011-0410-5>.
- [138] A. Alavudeen, N. Rajini, S. Karthikeyan, M. Thiruchitrambalam, N. Venkateshwaren, Mechanical properties of banana/kenaf fiber-reinforced hybrid polyester composites: Effect of woven fabric and random orientation, *Mater. Des.* 1980–2015. 66 (2015) 246–257. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.067>.
- [139] G.M.A. Khan, M. Terano, M.A. Gafur, M.S. Alam, Studies on the mechanical properties of woven jute fabric reinforced poly(l-lactic acid) composites, *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.* 28 (2016) 69–74. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.12.002>.
- [140] C. Gourier, A. Bourmaud, A. Le Duigou, C. Baley, Influence of PA11 and PP thermoplastic polymers on recycling stability of unidirectional flax fibre reinforced biocomposites, *Polym. Degrad. Stab.* 136 (2017) 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.12.003>.
- [141] T. Cadu, M. Berges, O. Sicot, V. Person, B. Piezel, L. Van Schoors, V. Placet, S. Corn, R. Léger, L. Divet, P. Ienny, S. Fontaine, What are the key parameters to produce a high-grade bio-based composite? Application to flax/epoxy UD laminates produced by thermocompression, *Compos. Part B Eng.* 150 (2018) 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.059>.
- [142] A. Moudood, A. Rahman, H.M. Khanlou, W. Hall, A. Öchsner, G. Francucci, Environmental effects on the durability and the mechanical performance of flax fiber/bio-epoxy composites, *Compos. Part B Eng.* 171 (2019) 284–293. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.032>.
- [143] M. Bar, A. Das, R. Alagirusamy, Influence of flax/polypropylene distribution in twistless thermally bonded rovings on their composite properties, *Polym. Compos.* 0 (2019). <https://doi.org/10.1002/pc.25291>.
- [144] M. Khalfallah, B. Abbès, F. Abbès, Y.Q. Guo, V. Marcel, A. Duval, F. Vanfleteren, F. Rousseau, Innovative flax tapes reinforced Acrodur biocomposites: A new alternative for automotive applications, *Mater. Des.* 64 (2014) 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.029>.
- [145] A. Bourmaud, A. Le Duigou, C. Gourier, C. Baley, Influence of processing temperature on mechanical performance of unidirectional polyamide 11–flax fibre composites, *Ind. Crops Prod.* 84 (2016) 151–165. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.02.007>.
- [146] T.S. Lemmi, M. Barburski, B.T. Samuel, Analysis of Mechanical Properties of Unidirectional Flax Roving and Sateen Weave Woven Fabric-Reinforced Composites, *Autex Res. J.* 1 (2020). <https://doi.org/10.2478/aut-2020-0001>.
- [147] L.A. Pothan, P. Potschke, R. Habler, S. Thomas, The Static and Dynamic Mechanical Properties of Banana and Glass Fiber Woven Fabric-Reinforced Polyester Composite, *J. Compos. Mater.* 39 (2005) 1007–1025. <https://doi.org/10.1177/0021998305048737>.
- [148] T. Grieser, P. Mitschang, Investigation of the compaction behavior of carbon fiber NCF for continuous preforming processes, *Polym. Compos.* 38 (2017) 2609–2625. <https://doi.org/10.1002/pc.23854>.

- [149] F. Bensadoun, In-service behaviour of flax fibre reinforced composites for high performance applications, Thèse, KU Leuven, 2016.
- [150] C. Poilâne, Z.E. Cherif, F. Richard, A. Vivet, B. Ben Doudou, J. Chen, Polymer reinforced by flax fibres as a viscoelastoplastic material, *Compos. Struct.* 112 (2014) 100–112. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.01.043>.
- [151] J.P. Torres, L.-J. Vandi, M. Veidt, M.T. Heitzmann, The mechanical properties of natural fibre composite laminates: A statistical study, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 98 (2017) 99–104. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.03.010>.
- [152] M. Berges, R. Léger, V. Placet, V. Person, S. Corn, X. Gabrion, J. Rousseau, E. Ramasso, P. Ienny, S. Fontaine, Influence of moisture uptake on the static, cyclic and dynamic behaviour of unidirectional flax fibre-reinforced epoxy laminates, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 88 (2016) 165–177. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.05.029>.

Chapitre 2 : Tissabilité des fibres naturelles

Table des matières

1	Introduction.....	92
2	Présentation des matières	94
2.1	Panorama des matières disponibles.....	94
2.2	Propriétés mécaniques des fils.....	96
3	Amélioration de la tissabilité.....	100
3.1	Réalisation de traitements chimiques sur les mèches	100
3.2	Production de fils guipés chanvre/thermoplastique	103
3.2.1	Mise en place de la technologie de guipage	103
3.2.2	Etude des propriétés des fils guipés.....	106
4	Etude des propriétés des fibres	109
4.1	Mise en place de l' « Impregnated Fibre Bundle Test »	109
4.1.1	Préparation des éprouvettes	109
4.1.2	Observations à la loupe binoculaire.....	111
4.2	Détermination de la composition et des propriétés mécaniques.....	112
4.2.1	Détermination de la composition des éprouvettes	112
4.2.2	Détermination des propriétés des fibres par la loi des mélanges	113
4.3	Analyse des résultats	116
4.3.1	Influence de la torsion et de la porosité dans la loi des mélanges	116
4.3.2	Impact du traitement chimique à l'échelle des fibres	120
5	Influence du procédé de tissage sur les propriétés des fils et des fibres	123
5.1	Impact sur les propriétés textiles des fils	124
5.2	Impact sur les propriétés mécaniques des fils	129
5.3	Impact sur les propriétés des fibres	135
6	Conclusion	138
	Références.....	142

1 Introduction

L'une des principales caractéristiques des fibres naturelles est leur discontinuité, ce qui rend plus complexe leur utilisation directe pour la production de renforts aux propriétés optimisées dans une ou plusieurs directions. Ainsi, comme expliqué dans le chapitre précédent, il est nécessaire de les rassembler sous une forme alignée et continue avant de pouvoir les utiliser en tissage, procédé retenu dans ces travaux pour la production des renforts pour matériaux composites. De plus, du fait de la complexité des étapes de préparation et du procédé de tissage en lui-même, des propriétés mécaniques suffisantes sont requises pour les fils/mèches à base de fibres naturelles. L'ensemble des étapes et méthodes de transformation appliqués aux fibres naturelles en vue d'obtenir des fils aux propriétés optimales pour le tissage est appelé « tissabilité » et sera détaillé dans ce chapitre.

Dans un premier temps, les différents types de produits (fils/mèches) fournis par Linificio e Canapificio Nazionale (LCN), partenaire du projet SSUCHY, seront présentés. Ces produits sont soit des fils retordus, soit des mèches, composés à 100% de fibres naturelles. Cependant, ces produits disponibles peuvent ne pas répondre aux conditions optimales souhaitées pour la production de préformes tissées, soit du fait de leur torsion, de leur pilosité, ou de leur ténacité. Dans une deuxième partie, deux méthodes seront proposées pour s'assurer de la tissabilité de ces produits à base de fibres naturelles. La première est l'utilisation d'un traitement chimique, classiquement utilisé dans l'industrie textile, en vue d'améliorer les propriétés mécaniques des mèches. La seconde méthode consiste à effectuer un guipage des mèches à l'aide d'un multifilament thermoplastique, qui viendra augmenter les performances de la mèche à base de fibres naturelles et servira ensuite de matrice lors de la mise en œuvre du matériau composite. Ces deux méthodes permettront de diminuer la pilosité et d'atteindre la ténacité requise pour le tissage sans recourir à un niveau de torsion trop élevé, permettant ainsi une meilleure imprégnation à l'échelle composite. La troisième partie se focalisera sur l'étude des propriétés des fibres au moyen de la méthode dite de l'« Impregnated Fibre Bundle Test » (IFBT), pour laquelle les mèches à base de fibres naturelles sont utilisées pour la réalisation d'éprouvettes composites à partir desquelles les propriétés des fibres seront ensuite obtenues par calcul inverse de la loi des mélanges. Cette loi des mélanges sera détaillée, avec notamment l'utilisation de facteurs de corrections permettant de prendre en compte l'influence de la torsion des mèches et de la porosité contenue dans les éprouvettes. Grâce à cette méthode, l'impact du traitement chimique sur les propriétés des fibres sera étudié, puisque celui-ci est connu dans la littérature pour entraîner des modifications sur les propriétés des fibres. Enfin, dans une quatrième et dernière partie, le procédé de tissage ayant tendance à modifier les performances des fils, son impact sera analysé tant sur les propriétés textiles que mécaniques à cette échelle des fils, ainsi que sur les propriétés des fibres issues de certains renforts, identifiées par l'IFBT. Les différentes conditions de tissage, réalisées à l'échelle laboratoire ou industrielle, seront

considérées dans ce suivi des performances des fils. Les données issues des caractérisations textile et mécanique des fils, ainsi que des caractérisations mécaniques des essais d'IFBT sont présentées en Annexe B.

2 Présentation des matières

2.1 Panorama des matières disponibles



Figure 2-1 : Fils retordus et mèches sans traitement (ST)

Parmi les différentes fibres naturelles utilisées comme renfort de matériaux composites, seules les fibres de lin et de chanvre seront étudiées dans ces travaux. L'objectif final du projet SSUCHY étant l'utilisation de fibres de chanvre, ces dernières seront majoritairement utilisées. L'ensemble des fils en lin et en chanvre ont été fournis par Linificio e Canapificio Nazionale, partenaire du projet SSUCHY. Les premières matières disponibles sans traitement particulier sont présentées en Figure 2-1. Deux types de matières sont disponibles, des fils retordus (AMBRA, à base de lin et CANAPA, à base de chanvre) et des mèches (LINO ST, à base de lin et CANAPA ST, à base de chanvre). Pour les mèches de chanvre, il existe deux références qui diffèrent par leur année de production (2017 pour les mèches CANAPA ST1 et 2019 pour les mèches CANAPA ST2). Les propriétés textiles de ces différents matériaux sont données en Table 2-1. Le titre a été mesuré selon la norme NF G07-316 [1] en pesant et mesurant des échantillons de fils, la torsion selon la norme NF G07-079 [2] sur un torsiomètre Zweigle® à l'aide de la méthode de la « double contre épreuve », méthode dans laquelle le fil subit trois opérations de détorsion-retorsion pour une extrapolation de la torsion moyenne avec une meilleure précision des résultats, et la régularité et la pilosité sur un appareil Uster®. L'expression du titre, en numéro métrique, et sa conversion en Tex sont données dans l'équation (2-1). La régularité du titre, définie avec le coefficient $CVM\%$, et la pilosité, mesurée avec le coefficient H et son écart-type sH , sont également deux paramètres importants pour la réalisation de préformes tissés. En effet, un fil peu régulier sera source de zones plus riches que d'autres en fibres ou exhibera une forte présence d'impuretés, ce qui créera des propriétés inhomogènes à l'échelle composite. Ainsi, plus le $CVM\%$ mesuré est élevé, plus le fil est irrégulier. La pilosité, quant à elle, représente la longueur moyenne des fibrilles présentes à la surface du fil rapportée à une longueur de 1 cm. La pilosité est un critère très important pour les fils destinées à former la chaîne du tissu. Plus cette pilosité sera élevée, plus les frottements induits par le peigne vont

avoir tendance à l'aggraver, comme visible en Figure 2-2, et plus il y aura un risque que les fils s'accrochent entre eux, entraînant à terme une rupture des fils de chaîne [3].

$$Titre [Nm] = \frac{L [m]}{m [g]} = \frac{1000}{Titre [Tex]} \quad (2-1)$$



Figure 2-2 : Pilosité des fils pendant le tissage

D'après la Table 2.1, en comparaison des mèches, les fils retordus ont un titre, en numéro métrique (Nm), et une torsion beaucoup plus élevés. Les fils ont donc moins de fibres en section et ces dernières sont moins alignées dans la direction longitudinale du fait de la torsion. Les fils retordus sont plus irréguliers que les mèches, le CVM% des fils retordus est 56% plus élevé que celui des mèches. Lors des différentes étapes nécessaires à la préparation du fil, les rubans sont étirés et affinés, ce qui fait que les impuretés liées au fait que les fibres soient des fibres libériennes sont plus présentes à la surface du fil retordu, créant ainsi de nombreuses irrégularités au niveau de la section du fil. Les mèches ayant un diamètre plus gros et des fibres moins compactées dans la section, les impuretés sont pour la plupart emprisonnées à l'intérieur de la structure, ce qui les rend moins apparentes en surface. La différence de pilosité entre les fils retordus et les mèches est très importante, cette dernière est environ 70% plus élevée pour les mèches par rapport aux fils retordus. L'effet du fort taux de torsion appliqué au niveau du continu à filer (utilisé dans la production du fil retordu) confère aux fibres un mouvement hélicoïdal. De ce fait, les fibres sont entraînées vers le cœur de la structure et sont moins libres à la surface du fil, ce qui réduit la pilosité de ce dernier. Les images des fils retordus et mèches sans traitement présentées en Figure 2-3 mettent en évidence ce phénomène : il y a beaucoup plus de fibrilles à la surface des mèches LINO ST et CANAPA ST et les fils AMBRA et CANAPA sont plus fins avec une structure plus compacte.

Table 2-1 : Présentation des fils retordus et mèches sans traitement

Fils	Type de fibre	Titre (Nm)	Torsion (tours/m)	Régularité CVm%	Pilosité H $\pm$ sh
Fils retordus					
AMBRA	100% Lin	5,8 $\pm$ 0,5	231,1 $\pm$ 17,8	27,89	7,42 $\pm$ 3,43
CANAPA	100% Chanvre	6,5 $\pm$ 0,6	221,9 $\pm$ 13,2	29,83	4,24 $\pm$ 2,58
Mèches					
LINO ST	100% Lin	2,8 $\pm$ 0,3	31,6 $\pm$ 2,5	18,81	21,93 $\pm$ 7,81
CANAPA ST1	100% Chanvre	3,0 $\pm$ 0,3	32,0 $\pm$ 4,4	18,01	17,71 $\pm$ 7,93
CANAPA ST2	100% Chanvre	3,2 $\pm$ 0,2	37,2 $\pm$ 2,2	18,68	18,96 $\pm$ 3,31

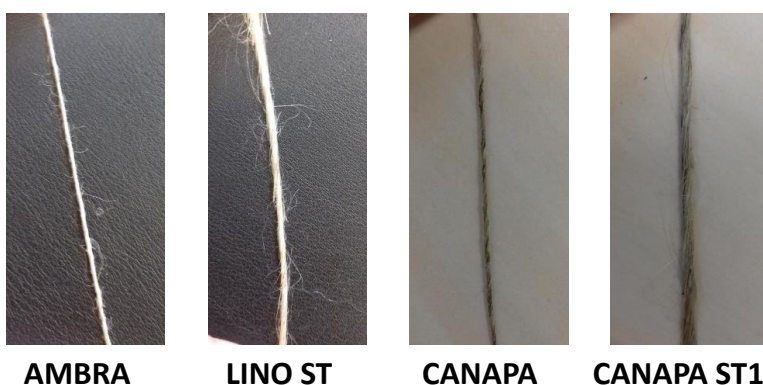


Figure 2-3 : Aspect visuel des fils retordus et mèches sans traitement

2.2 Propriétés mécaniques des fils

Les propriétés mécaniques de ces produits, fils retordus ou mèches, sont identifiées à l'aide d'essais de traction selon la norme NF EN ISO 2062 [4]. L'étude en traction des fils constitués de fibres naturelles est plus complexe que celle conduite sur des produits à base de fibres synthétiques du fait de leur discontinuité. En effet, les fils ne doivent pas être écrasés par une pression trop importante dans les mors mais ces derniers doivent néanmoins maintenir suffisamment les fils dans l'axe de la sollicitation en traction pour éviter les phénomènes de glissement des fibres proche des mors. Les challenges lors des essais de traction sur des matériaux en fibres naturelles sont donc nombreux : les faisceaux de fibres doivent rester alignés dans le sens de la sollicitation mécanique, les frictions entre les mors du banc et les fibres doivent être évitées et les faisceaux de fibres doivent tous être soumis à la même charge sinon ces derniers peuvent se rompre à des instants différents lors de l'essai [5].

Lors des essais de traction sur les fils [6,7], une différence significative de valeur pour la contrainte maximale peut être attribuée à des différences d'angles microfibrillaires, de longueurs de fibres ou de taux de cristallinité. La courbe-type de réponse en traction d'un fil de chanvre, mais qui est représentative du comportement des fils de fibres naturelles, est présentée en Figure 2-4. La première partie de la réponse en traction, en vert sur la Figure 2-4, est non linéaire et est due à la réorientation des fibres dans le sens de la sollicitation. La

réponse devient ensuite linéaire, phase délimitée en orange sur la Figure 2-4, et correspond à la réponse de la structure fibreuse une fois les fibres alignées dans le sens de la sollicitation. Il est alors possible de définir deux modules, un premier au début de la courbe, dans la zone correspondant à la phase 1 repérée sur la Figure 2-4, et un second avant la rupture, dans la zone correspondant à la phase 2 repérée sur la Figure 2-4. Par ailleurs, les courbes de réponse en traction peuvent présenter, dans la zone de décharge, une rupture du fil qui n'est pas nette mais progressive, phénomène repéré en violet sur la Figure 2-4. Ce phénomène est attribué à la variabilité des fils à base de fibres naturelles, qui présentent des variations de longueurs de fibres, d'angles microfibrillaires et d'éventuels endommagements naturels ou provoqués par les procédés de transformation depuis la récolte de la plante jusqu'à la formation du fil. Les propriétés mécaniques moyennes calculées présentent alors une variabilité relativement élevée, qui est accentuée par les approximations réalisées pour déterminer la section des fils lorsque les propriétés sont exprimées en termes de contrainte ou de module.

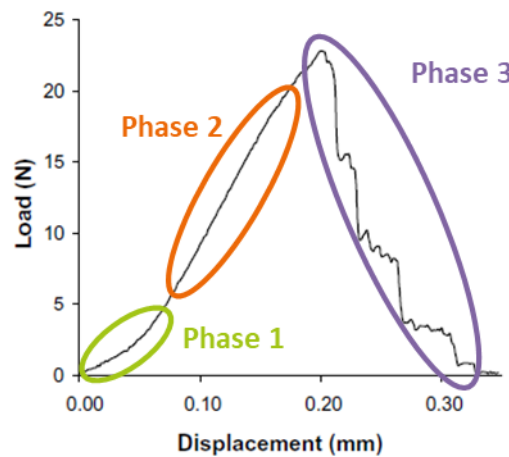


Figure 2-4 : Réponse en traction d'un fil de chanvre [6]

Dans le cadre des travaux présentés, les essais de traction sont réalisés sur un banc de traction MTS Criterion®. Les conditions d'essais (longueur de jauge, vitesse et précharge) seront à chaque fois précisées dans les fiches techniques. Les conditions standards sont une longueur de 200 mm, une vitesse de 200 mm/min et une précharge de 0,5 cN/Tex. Pour chaque fil étudié, dix échantillons sont testés. Sur la courbe de réponse « effort – déformation » les données extraites sont l'effort à rupture, la déformation à rupture, les pentes (une première au début de la réponse, correspondant à la phase 1 sur la Figure 2-4, et une seconde avant la rupture, correspondant à la phase 2 sur la Figure 2-4) et la ténacité à rupture, la ténacité correspondant à l'effort enregistré rapporté au titre du fil caractérisé. Pour évaluer la rigidité des fils, seule la pente 2 sera étudiée. Ces paramètres sont présentés en Figure 2-5.

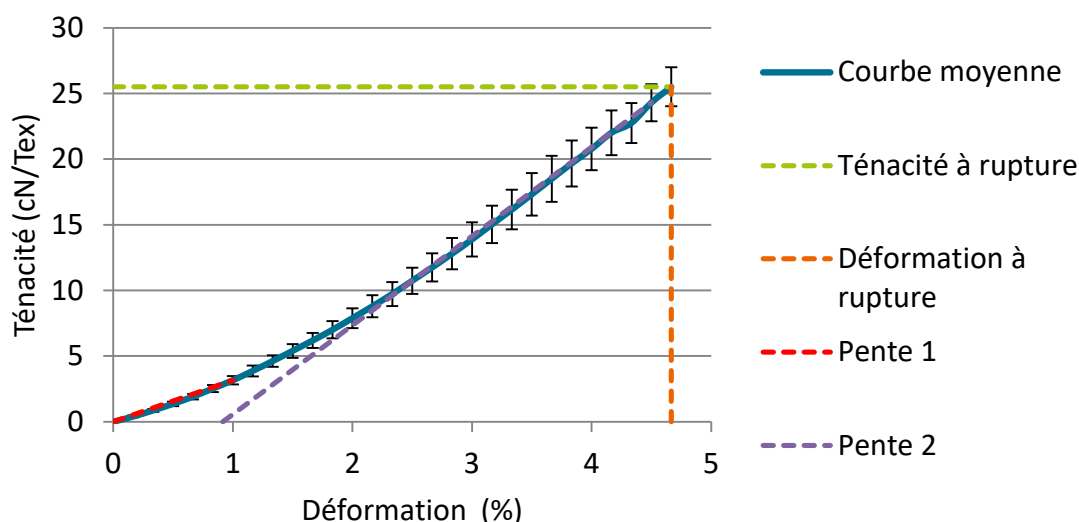


Figure 2-5 : Paramètres étudiés sur les courbes de traction des fils

Les courbes moyennes (et les écarts-types) des propriétés en traction des produits sans traitement sont présentées en Figure 2-6, en termes de ténacité pour comparer les caractéristiques de ces produits. Un zoom a été effectué sur les faibles déformations pour permettre de distinguer l'évolution des courbes dans la phase 1. Les fils retordus (AMBRA en lin et CANAPA en chanvre), présentent une ténacité à rupture, une déformation à rupture et des pentes élevées. Les mèches (LINO ST pour la mèche de lin et CANAPA ST1 et CANAPA ST2 pour les mèches de chanvre) ont quant à elles des propriétés mécaniques beaucoup plus faibles, voire quasi-nulles en ce qui concerne la mèche de lin. L'application d'un fort taux de torsion permet donc d'obtenir de meilleures propriétés mécaniques, ce qui avait déjà été observé dans la littérature [8,9]. Ces essais de traction mettent également en évidence la variabilité due aux conditions de production des fibres de chanvre qui diffèrent d'une année sur l'autre : les mèches produites en 2019 (CANAPA ST2) ont une déformation à rupture similaire mais une ténacité à rupture et des pentes supérieures à celles des mèches produites en 2017 (CANAPA ST1). Cette variabilité entre deux années distinctes de production sera également observée à l'échelle fibres au paragraphe 4.3.1.

Dans le chapitre précédent, il a été évoqué que des propriétés mécaniques suffisantes sont requises pour pouvoir transformer les fils en renforts au moyen du procédé de tissage. Du fait des nombreuses sollicitations imposées au fil, la principale propriété est une ténacité minimale de l'ordre de 10 – 15 cN/Text. En effet, en dessous de 10 cN/Text, il sera difficile de manipuler le fil sans l'endommager ou le casser. Un fil avec une si faible ténacité ne pourra alors qu'être utilisé en sens trame, et principalement du fait que le métier utilisé soit un métier manuel (sur métier à tisser industriel, l'insertion de la trame se fait directement depuis la bobine et une certaine force lui est appliquée). Entre 10 et 15 cN/Text, il faut s'attendre à avoir de multiples casses lors de la préparation au tissage et lors du tissage. Au-delà de 15 cN/Text, ces casses sont nettement diminuées, et le fil est alors considéré comme assez résistant. Ainsi, parmi les cinq produits sans traitement étudiés en Figure 2-6, seuls les

files retordus AMBRA et CANAPA peuvent être utilisés en l'état dans les deux directions principales du tissage. Les mèches LINO ST, CANAPA ST1 et CANAPA ST2 ne peuvent, quant à elles, être utilisées que dans la direction trame, sur métier manuel. Néanmoins la forte torsion appliquée sur ces files retordus pourra être source de difficultés d'imprégnation. Il est donc nécessaire de prioriser l'utilisation des mèches, et donc de recourir à une amélioration de leurs propriétés mécaniques au moyen par exemple de traitements chimiques ou de guipage.

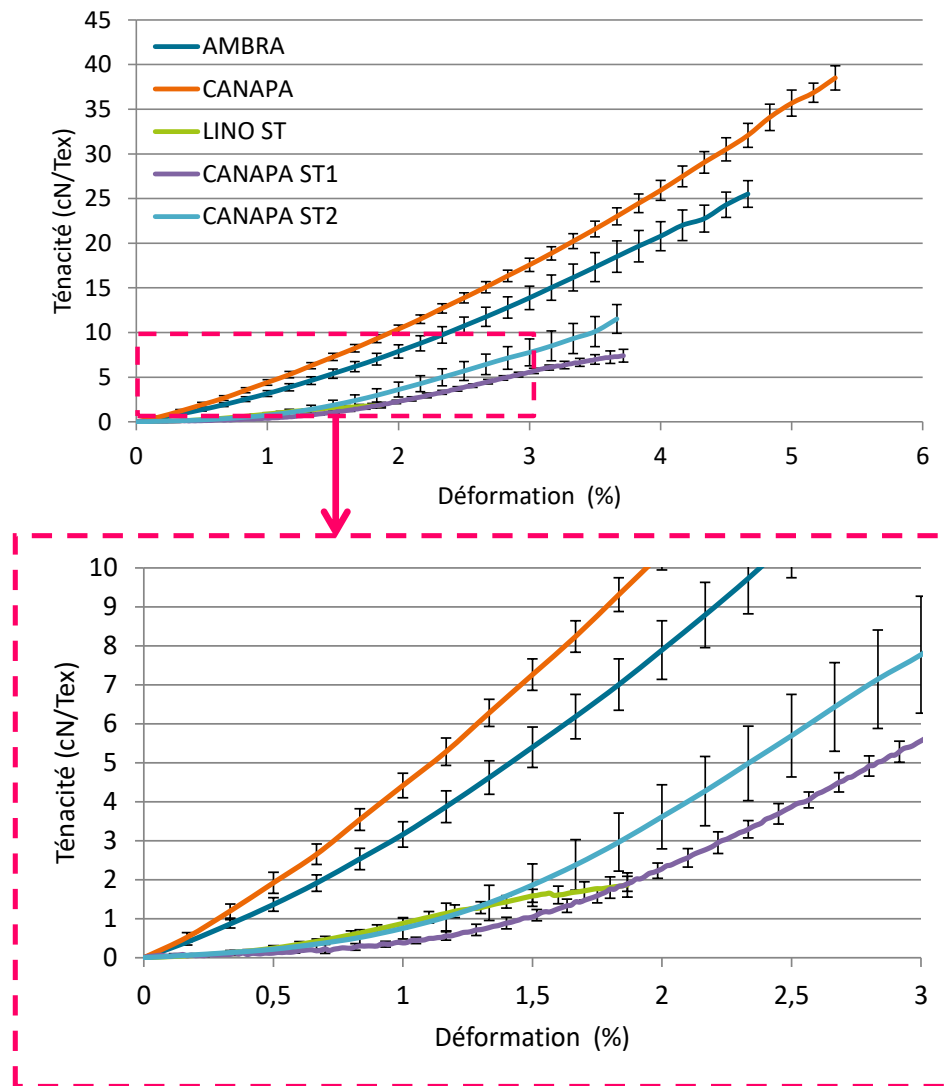


Figure 2-6 : Propriétés mécaniques des fils sans traitement

3 Amélioration de la tissabilité

3.1 Réalisation de traitements chimiques sur les mèches

La première méthode envisagée pour améliorer les performances en traction des mèches en vue de leur utilisation en tissage est le recours à un traitement chimique. Ce traitement chimique a été réalisé au sein de l'entreprise Linificio e Canapificio Nazionale (LCN), partenaire du projet SSUCHY. Pour des raisons de confidentialité, la composition chimique de ce traitement ne sera pas détaillée mais ce traitement est similaire à un traitement de mercerisation (traitement à la soude). L'objectif de ce traitement est d'améliorer la cohésion inter-fibres au sein des mèches, et ainsi les performances mécaniques de ces dernières. Ce traitement a été réalisé une fois sur les mèches de lin (LINO) et à trois reprises sur les mèches de chanvre (CANAPA) à différentes périodes des travaux. Les propriétés de ces différentes mèches, identifiées avec les mêmes protocoles que ceux décrits précédemment (au paragraphe 2.2), sont présentées en Table 2-2. En comparaison des mèches sans traitement (Table 2-1), les mèches ayant subi un traitement chimique présentent un titre, en numéro métrique, plus élevé. Cette augmentation est synonyme de la perte, en masse, de certains constituants, et notamment des impuretés, au contact des composés chimiques du traitement. A l'issue du traitement chimique, les mèches sont légèrement plus irrégulières, les impuretés ne sont pas retirées uniformément. Néanmoins, les mèches avec traitement restent plus régulières que les fils retordus présentés précédemment. L'impact du traitement chimique est plus notable au niveau de la pilosité, puisque cette dernière diminue en moyenne de 23% grâce au traitement. Ainsi, les composés chimiques viennent détruire certaines fibrilles présentes en surface des mèches. La Figure 2-7 propose une comparaison de l'aspect visuel des mèches avec et sans traitement. Quelle que soit la nature des fibres constituant ces mèches (lin pour les mèches LINO et chanvre pour les mèches CANAPA), les mèches avec traitement (T1) sont moins pileuses que les mèches sans traitement (ST). De plus, les mèches avec traitement chimique ont une torsion légèrement supérieure, qui n'est pas due à l'action du traitement chimique mais aux paramètres de production des mèches. Cette torsion à peine plus élevée entraîne également une légère diminution de la pilosité des mèches. Ce phénomène, déjà montré lors de la comparaison entre fils retordus et mèches au paragraphe précédent (2.1), est corrélée en Figure 2-8 pour l'ensemble des mèches avec et sans traitement : une torsion élevée entraîne une plus faible pilosité. En effet, en retordant les fibres les unes sur les autres, les fibrilles sont mieux maintenues au sein de la structure interne de la mèche et celle-ci est moins pileuse.

Table 2-2 : Présentation des mèches avec traitement chimique

Mèches	Type de fibre	Titre (Nm)	Torsion (tours/m)	Régularité CVm%	Pilosité H $\pm$ sh
LINO T1	100% Lin	3,3 $\pm$ 0,2	35,8 $\pm$ 3,8	19,96	18,78 $\pm$ 8,52
CANAPA T1	100% Chanvre	3,9 $\pm$ 0,2	36,1 $\pm$ 2,8	23,30	14,01 $\pm$ 6,49
CANAPA T2	100% Chanvre	3,6 $\pm$ 0,3	38,5 $\pm$ 2,5	20,36	9,25 $\pm$ 4,27
CANAPA T3	100% Chanvre	3,8 $\pm$ 0,3	37,2 $\pm$ 2,0	20,18	10,26 $\pm$ 4,38

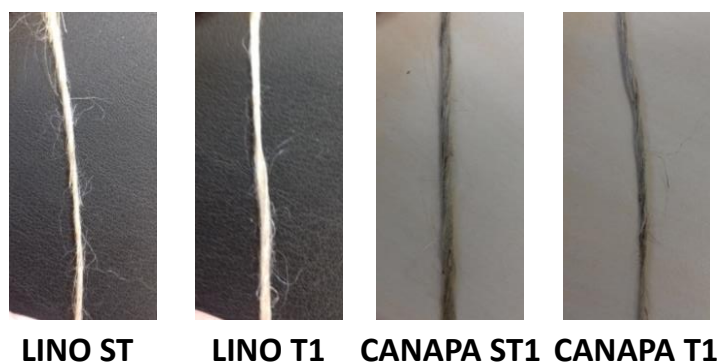


Figure 2-7 : Aspect visuel des mèches sans (ST) et avec (T1) traitement chimique

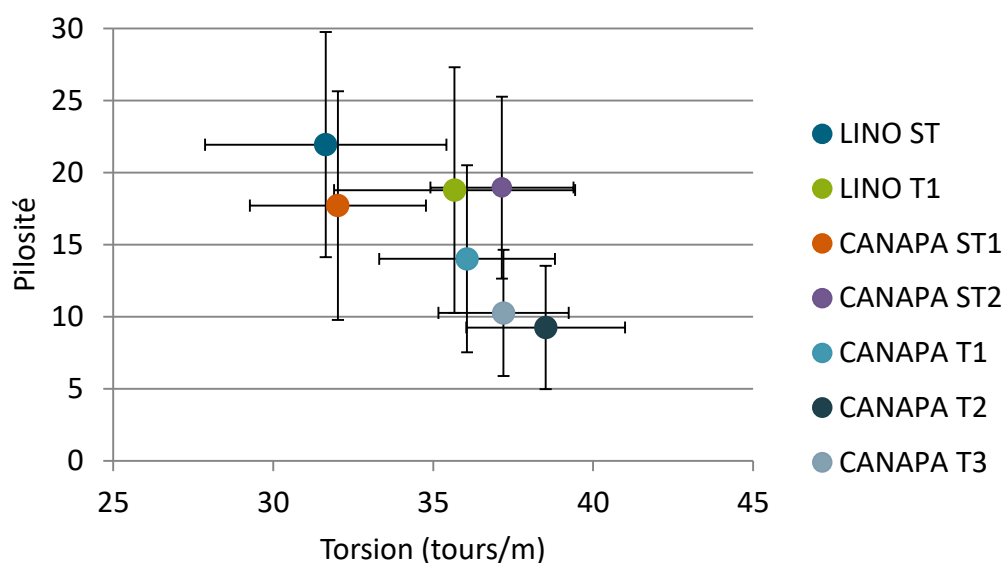


Figure 2-8 : Influence de la torsion des mèches sur leur pilosité

L'influence du traitement chimique sur les propriétés mécaniques des mèches est ensuite étudiée au moyen d'essais en traction. En effet, ce traitement est réalisé dans le but d'améliorer la ténacité des mèches pour atteindre la valeur requise pour envisager leur utilisation en tissage. Ainsi, lorsque les mèches ont une ténacité suffisante pour les étapes de préparation au tissage, elles pourront être utilisées en sens chaîne et en sens trame, et ainsi permettre de produire des renforts tissés entièrement à base de mèches faiblement retordues, ce qui est bénéfique pour la production de matériaux composites. Les courbes moyennes, « ténacité – déformation », issues des essais de traction, sont présentées en Figure 2-9 pour les mèches de lin et en Figure 2-10 pour celles de chanvre. Pour ces

matières, les propriétés des mèches après traitement sont comparées à celles identifiées précédemment pour les mèches sans traitement chimique. Grâce au traitement chimique, la ténacité à rupture des mèches est triplée : en améliorant la cohésion inter-fibres au sein des mèches, le traitement chimique a bien contribué à l'augmentation de la ténacité des mèches. La rigidité des fibres extraite dans la partie linéaire (phase 2 de la Figure 2-4) est quant à elle doublée. La déformation à rupture reste majoritairement inchangée, à l'exception des mèches CANAPA T1 et CANAPA T2, où elle augmente de 1%. Du fait de la faible ténacité d'origine des mèches de lin, malgré le recours au traitement chimique, les mèches LINO T1 ne présentent pas la ténacité requise pour pouvoir être utilisées dans le sens chaîne lors du procédé de tissage. Les mèches de chanvre deviennent utilisables dans les deux directions du tissage après traitement chimique.

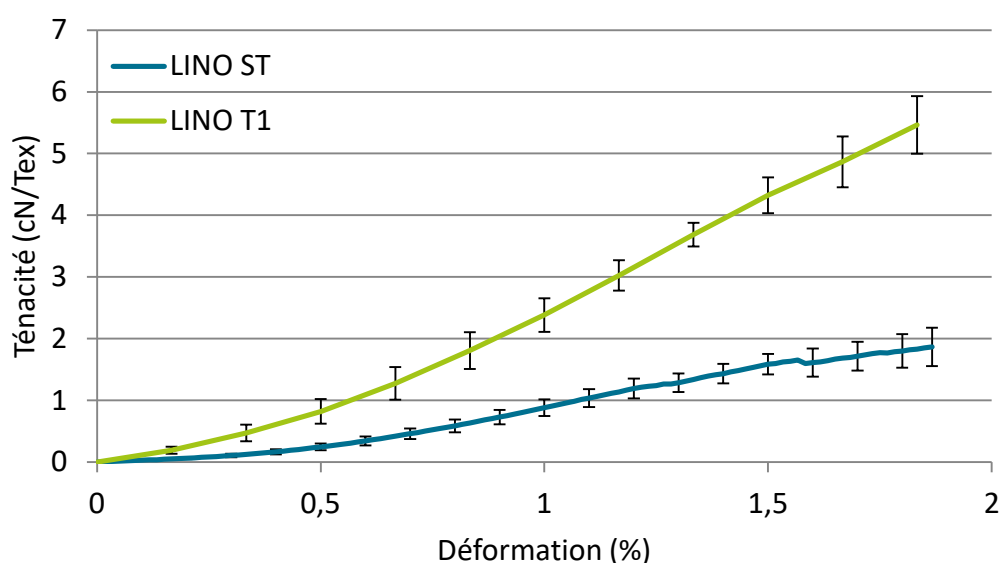


Figure 2-9 : Propriétés mécaniques des mèches LINO

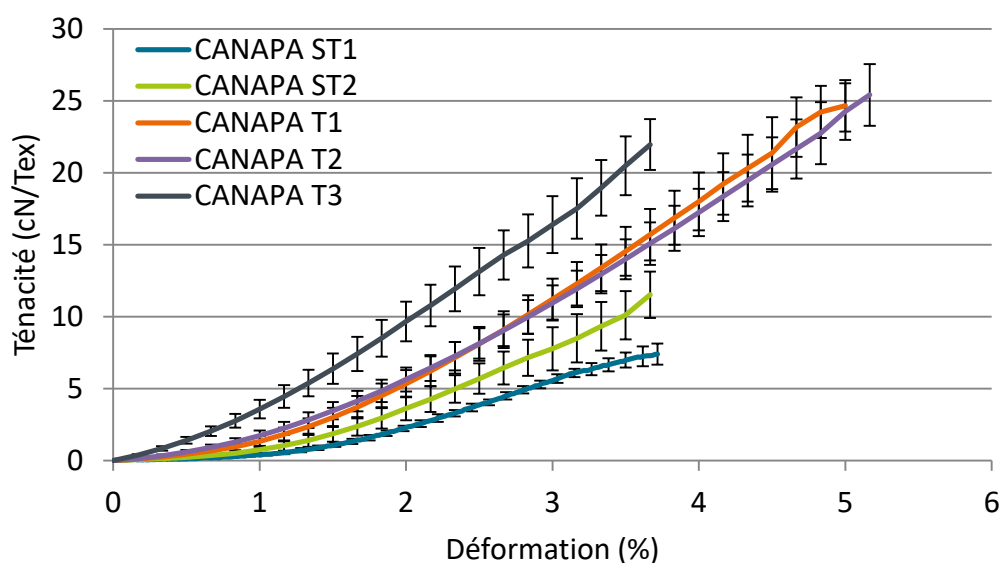


Figure 2-10 : Propriétés mécaniques des mèches CANAPA

3.2 Production de fils guipés chanvre/thermoplastique

3.2.1 Mise en place de la technologie de guipage

Le guipage est la deuxième méthode retenue pour améliorer la ténacité des mèches de chanvre en vue de leur utilisation en tissage. Grâce à l'enroulement par un fil de guipage, la mèche de chanvre positionnée en âme devrait voir sa ténacité augmentée. Le polymère choisi pour la réalisation du multifilament utilisé comme fil de guipage est le polyamide 12 (PA12). Ce polymère a été choisi principalement pour ses bonnes propriétés thermiques, en accord avec les applications pour lesquelles le produit final est destiné, avec une température de transition vitreuse de 40°C et une température de fusion de 178°C [10,11]. Ce polymère n'étant pas biosourcé, des développements seront également réalisés avec du Polyamide 11, obtenu à partir d'huile de ricin, mais qui ne seront pas exposés dans ce manuscrit. Le fil guipé chanvre/PA12 sera par la suite utilisé en tissage pour produire des préformes dites comélées (contenant le fibreux et la résine), à partir desquelles des plaques composites seront ensuite réalisées par thermocompression, procédé présenté au chapitre précédent. La méthode proposée ici, par guipage, cumulerait deux avantages, d'une part augmenter la ténacité des mèches sans avoir recours à la torsion, pour rendre possible les étapes de tissage et d'autre part de disposer à cette échelle de produits comélés pour fabriquer des plaques par thermocompression.

Du fait de la température de fusion du PA12 de 178°C, les préformes devront être chauffées aux alentours de 220°C pour obtenir une bonne viscosité du polymère permettant d'atteindre une imprégnation optimale du chanvre. Les fibres de chanvre étant connues pour avoir une tenue limitée aux fortes températures, une analyse thermogravimétrique (ATG) a été réalisée pour s'assurer que les fibres de chanvre ne soient pas détériorées lors de cette mise en œuvre. Lors de cette analyse, la perte de masse de l'échantillon est évaluée en fonction de l'augmentation progressive de la température. Lorsque la masse de l'échantillon atteint 95% de sa masse initiale, c'est-à-dire lorsqu'il y a eu 5% de perte de masse, l'échantillon est considéré comme dégradé. Pour les fibres de chanvre, issues des mèches CANAPA ST1, la Figure 2-11 indique que cette dégradation débute aux environs de 275°C. Ainsi, pour la température de mise en œuvre du composite qui est de 220°C, les fibres de chanvre ne sont pas encore dégradées. Afin de vérifier si cette température de mise en œuvre ne modifie pas le comportement mécanique des mèches de chanvre, ces dernières ont été placées dans la presse chauffante à 220°C pendant 5 minutes (durée envisagée pour la réalisation de la plaque composite) puis testées en traction dans les mêmes conditions d'essais. La courbe de la réponse en traction, en Figure 2-12, compare le comportement avant et après chauffage à 220°C. Outre une légère diminution de la déformation à rupture le comportement reste similaire entre les deux courbes, avec une rigidité et une ténacité à rupture semblables. Sous l'effet de la chaleur, certains constituants des fibres de chanvre vont légèrement fondre et coller les fibres entre elles, ce qui confèrera

à la mèche une capacité d'allongement légèrement plus faible mais n'aura aucune influence sur la ténacité à rupture. Ainsi, le fait de placer les mèches de chanvre à 220°C pendant une période d'environ 5 minutes n'entraîne pas de dégradation irréversible des mèches de chanvre. Le guipage des mèches de chanvre par un polymère tel que le PA12 peut donc être envisagé pour améliorer la ténacité de mèches, tout en ayant l'assurance que les fibres de chanvre ne soient pas dégradées lors de la mise en œuvre du composite.

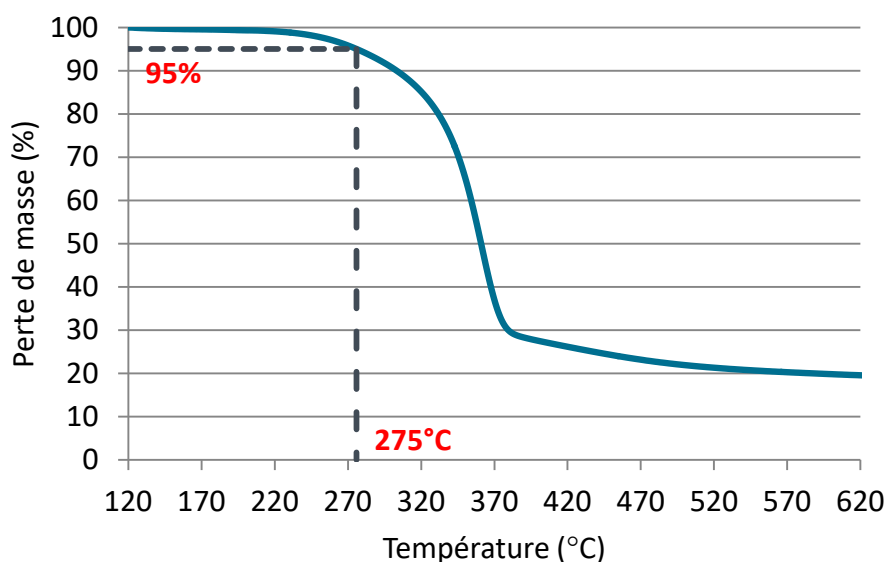


Figure 2-11 : Analyse ATG des fibres issues des mèches de chanvre (CANAPA ST1)

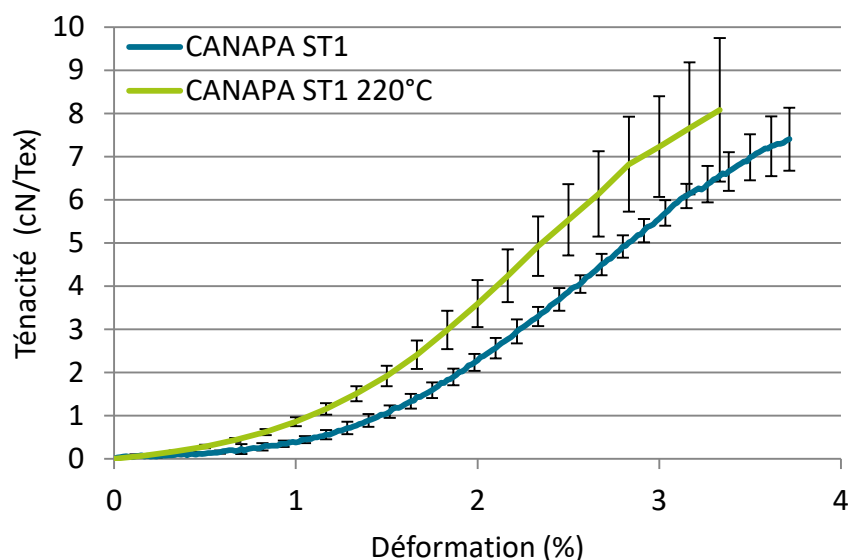


Figure 2-12 : Propriétés mécaniques des mèches CANAPA ST1 avant et après chauffage à 220°C

A partir des granulés de PA12 Rilsamid® AMNO TLD, fournis par Arkema® [12], un multifilament de 100 Tex est filé grâce à un pilote de filage Spinboy® présent dans les locaux de l'ENSAIT (Figure 2-13). Les granulés sont introduits dans une trémie et entraînés par une vis d'extrusion chauffée au-dessus de la température de fusion du PA12, puis le polymère

fondu passe ensuite dans des filières composées de 80 trous, permettant ainsi l'obtention d'un multifilament de 80 brins. Ces monofilaments vont ensuite être étirés entre deux rouleaux chauffants pour obtenir le titrage désiré ainsi qu'une orientation maximale des chaînes macromoléculaires dans l'axe du multifilament pour favoriser de meilleures propriétés mécaniques, puis ce multifilament est ensuite bobiné. Le multifilament de PA12 ainsi obtenu possède un titre de 98 ± 12 Tex. Ce multifilament ainsi que la mèche de chanvre ont ensuite été utilisées sur la broche creuse de la marque Gualchieri & Gualchieri[®], selon le procédé Fantaroc, présentée en Figure 2-14. La mèche est introduite verticalement par le haut de la machine et passe au centre de la bobine sur laquelle se trouve le multifilament de PA12. Par rotation de cette bobine, le multifilament va venir s'enrouler autour de la mèche de chanvre pour la recouvrir, la comprimer et constituer le fil guipé. La mèche de chanvre étant toujours verticale au sein de la machine, elle ne subit pas de torsion supplémentaire, et garde donc sa torsion initiale. Le fil guipé est ensuite bobiné pour pouvoir être caractérisé et utilisé en tissage. Deux versions de fils guipés ont été développées, avec des paramètres de production différents. Le premier, nommé CAPA121, se compose de la mèche CANAPA ST1 en fil d'âme et du multifilament de PA12 en fil de guipage. Un second fil guipé, nommé CAPA122, a été élaboré jouant sur l'étirage des fibres de chanvre et le taux de couverture par le PA12.

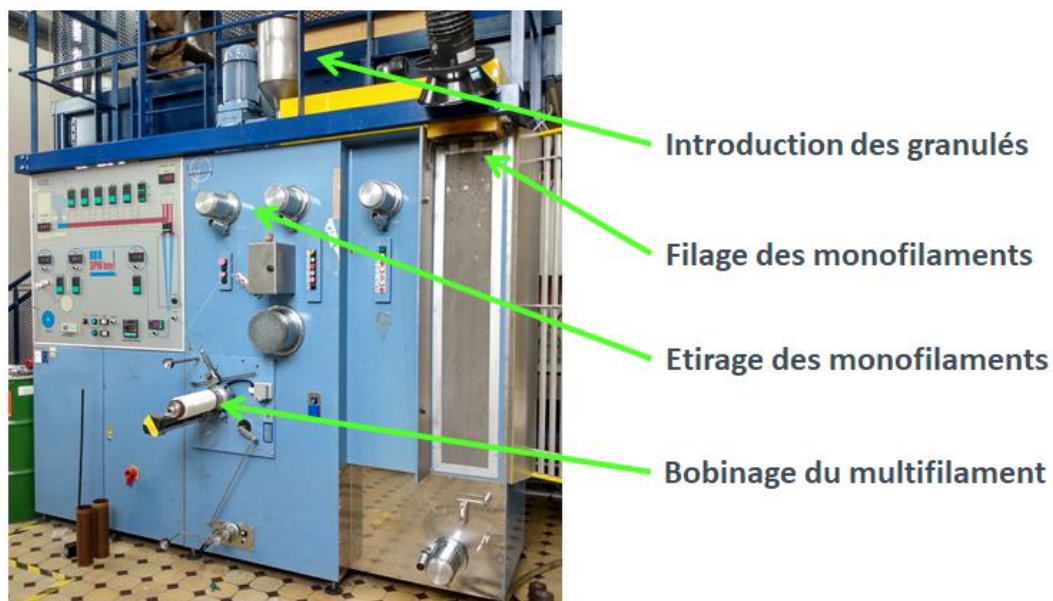


Figure 2-13 : Pilote de filage

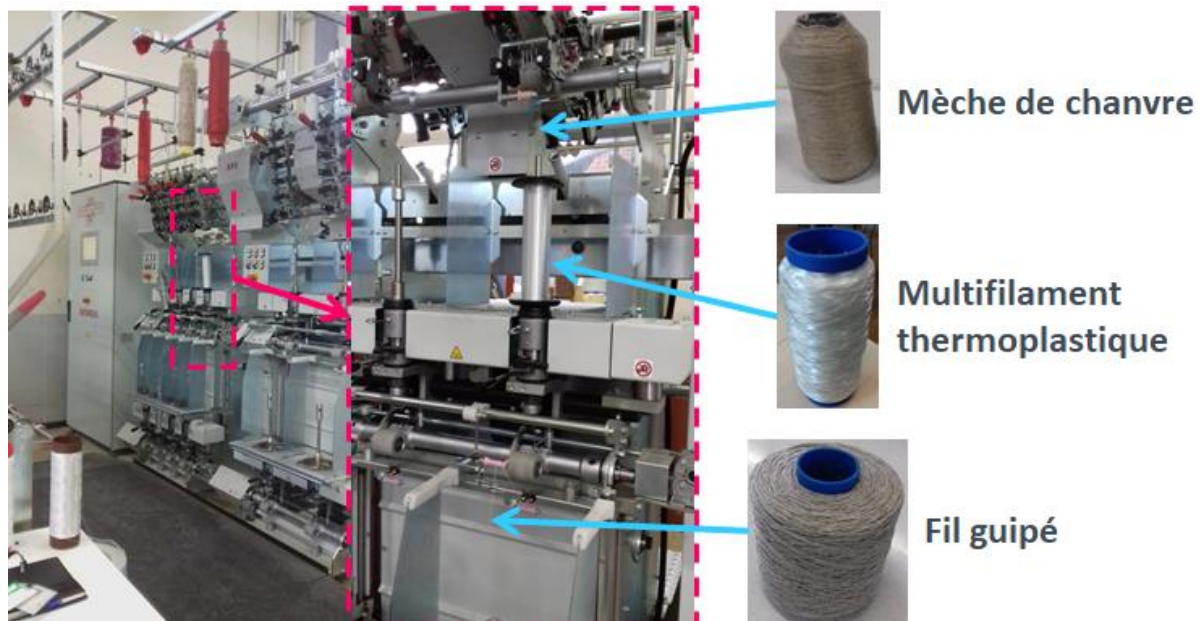


Figure 2-14 : Présentation de la broche creuse utilisée pour la production de fils guipés

3.2.2 Etude des propriétés des fils guipés

Les fils guipés, réalisés grâce à la technologie de guipage décrite précédemment (paragraphe 3.2.1), ont dans un premier temps été soumis à une analyse ATG afin de déterminer leur composition. Les courbes issues des analyses ATG des mèches de chanvre, des filaments de PA12 et des deux fils guipés sont rassemblées en Figure 2-15. La dégradation des fibres de chanvre et du PA12 a lieu à deux plages de température différentes, entre 275°C et 395°C pour le chanvre, et au-delà de 405°C pour le PA12. Etant donné qu'il n'y a pas de résidu final pour le PA12, mais qu'il y en a pour le chanvre, le résidu final pour les fils guipés sera considéré comme un résidu de chanvre. Le pourcentage massique de fibres de chanvre présent dans le fil guipé est donc déterminé à l'aide de l'équation (2-2) et le pourcentage massique de PA12 en est déduit grâce à l'équation (2-3). Pour les fils guipés produits dans le cadre des travaux présentés, le fil CAPA121 est composé, en masse, de 48% de chanvre et de 52% de PA12 et le fil CAPA122 est composé de 65% de chanvre et 35% de PA12.

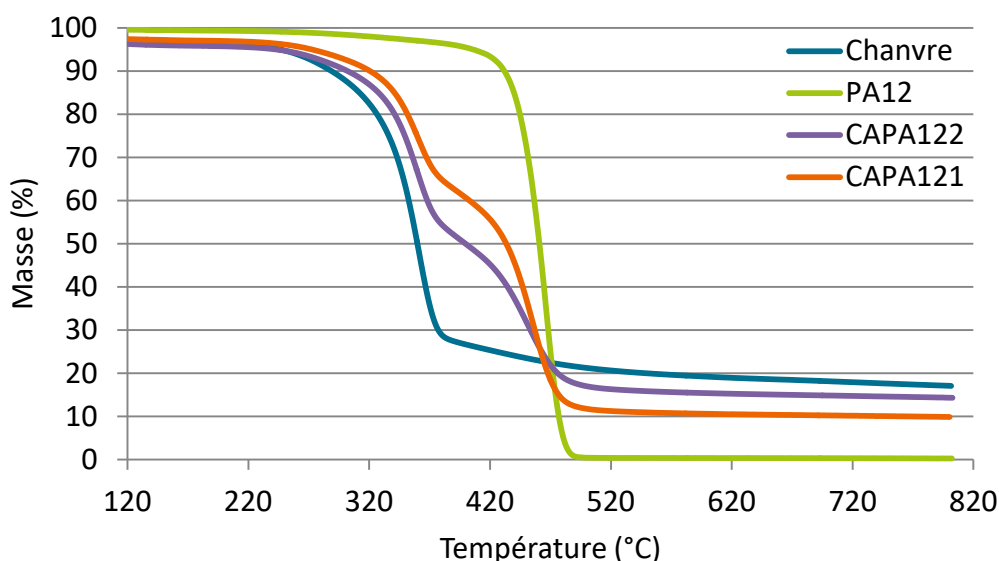


Figure 2-15 : Analyse ATG des fils guipés

$$\% \text{ chanvre} = (100 - \text{masse restante à } 395^{\circ}\text{C}) + \text{résidu final} \quad (2-2)$$

$$\% \text{ PA12} = 100 - \% \text{ chanvre} \quad (2-3)$$

Les propriétés textiles de ces deux fils guipés sont rassemblées dans la Table 2-3. Le numéro métrique des fils guipés est plus faible que celui des mèches de chanvre CANAPA ST1 et CANAPA ST2 (Table 2-1) du fait de l'ajout du multifilament de PA12. En termes de régularité et pilosité, ces deux paramètres sont diminués, notamment grâce à la couverture par le multifilament. Les fibrilles se retrouvent comme « emprisonnées » au sein de la structure interne du fil guipé et ne sont plus présentes en surface ce qui entraîne une diminution de près de plus de 50% de la pilosité. Cette diminution de pilosité, associée au fait que la plupart des impuretés présentes dans la mèche de chanvre sont retirées lors de son passage entre les différents rouleaux de la broche creuse, confère au fil une meilleure régularité. La Figure 2-16 permet une comparaison de l'aspect visuel d'une mèche de chanvre sans traitement, en l'occurrence CANAPA ST1, avec celui d'un fil guipé, le fil CAPA121 dont le cœur est composé de cette même mèche CANAPA ST1. Après guipage, les fibrilles présentes à la surface de la mèche ont quasiment disparu, et le fil guipé est plus fin avec une section plus circulaire en comparaison de celle de la mèche, ce qui laisse supposer que le fil guipé est plus compact que la mèche sans traitement. Les fils guipés CAPA121 et CAPA122 ont des propriétés textiles (titre, régularité et pilosité) similaires, le fil CAPA122 étant légèrement plus léger que le fil CAPA121.

Table 2-3 : Présentation des fils guipés

Fil guipé	Mèche d'âme	Titre (Nm)	Régularité CV%	Pilosité H ± sh
CAPA121	CANAPA ST1	1,9 ± 0,4	13,25	10,49 ± 2,01
CAPA122	CANAPA ST2	2,0 ± 0,1	14,56	9,94 ± 1,76

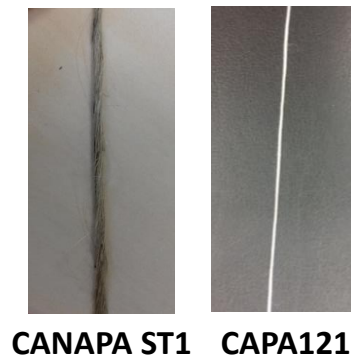


Figure 2-16 : Aspect visuel d'une mèche de chanvre (CANAPA ST1) et d'un fil guipé (CAPA121)

Les propriétés mécaniques en traction des fils guipés sont comparées à celles des mèches de chanvre en Figure 2-17. D'un point de vue macroscopique, la rupture du fil guipé se caractérise par la rupture de la mèche de chanvre. Au-delà de la rupture, la cohésion du fil est maintenue par le multifilament qui continue à se dérouler mais il n'y a plus de fibres de chanvre à l'intérieur. Grâce au guipage, la ténacité à rupture des mèches a été améliorée, par la compression des fibres de chanvre par le multifilament de PA12, pour atteindre la cible de 15cN/Tex permettant leur tissabilité. Par ce même phénomène, la déformation à rupture est légèrement augmentée. La rigidité du fil guipé, quant à elle reste similaire à celle des mèches de chanvre. D'autres essais de guipage ont été réalisés avec des fils plus fins, pour essayer d'alléger le fil, mais ces derniers ne présentaient pas la ténacité requise pour le tissage.

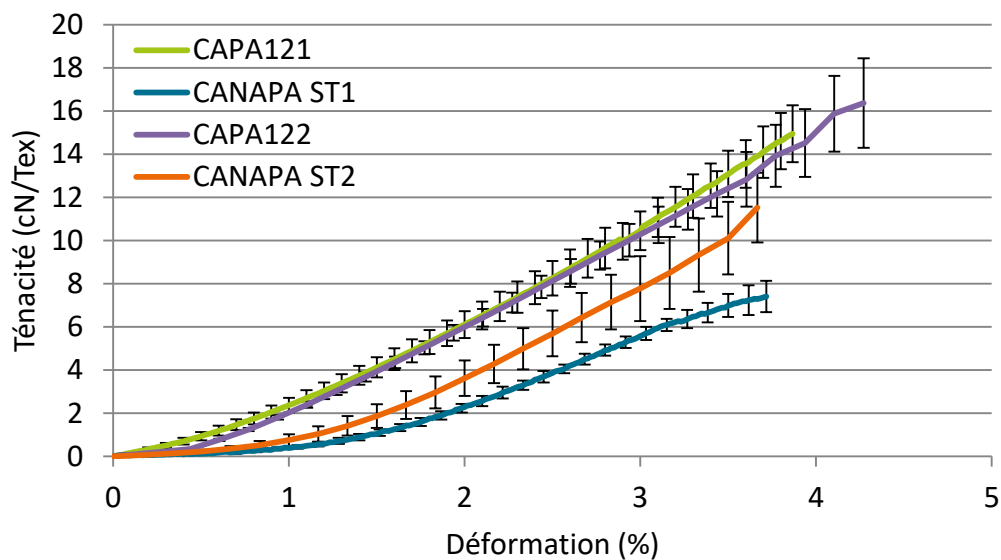


Figure 2-17 : Propriétés mécaniques des fils guipés et comparaison avec les mèches d'âme

4 Etude des propriétés des fibres

4.1 Mise en place de l'« Impregnated Fibre Bundle Test »

4.1.1 Préparation des éprouvettes

Les propriétés des fibres de lin et de chanvre sont déterminées grâce à la méthode de l'« Impregnated Fibre Bundle Test » développée par la CELC (Confédération Européenne du Lin et du Chanvre) [13]. Ces essais d'IFBT sont réalisés uniquement sur les fils retordus et les mèches avec et sans traitement. Un moule a été conçu sur mesure pour réaliser les éprouvettes d'IFBT. Dans ce moule, il est possible de fabriquer 5 éprouvettes composites de 250 mm de longueur, 10 mm de largeur et 2 mm d'épaisseur, avec un volume de fibres au plus près des 50%. Ainsi, dans un premier temps, le calcul du nombre de mèches nécessaires pour remplir 50% du volume de chaque éprouvette est à réaliser. Le volume total d'une éprouvette étant de $V_{total} = 250 \times 10 \times 2 = 5000 \text{ mm}^3$, il faut donc utiliser un volume de fibres de $V_f = 2,5 \text{ cm}^3$. La masse volumique du lin et du chanvre étant considérée égale à $\rho_f = 1,504 \text{ g.cm}^{-3}$ (voir chapitre 1, paragraphe 2.3.4), le poids de fibres à introduire dans chaque éprouvette est de $m_f = \rho_f \times V_f = 1,504 \times 2,5 = 3,76 \text{ g}$. Ainsi le nombre de fils coupés à une longueur de 250 mm pour chaque matière est présenté en Table 2-4. Pour compléter le volume de l'éprouvette, 2,5 mL de résine sont nécessaires. Afin de s'assurer une bonne imprégnation, entre 5 et 10 mL de résine sont introduits à l'aide d'une seringue en vérifiant visuellement que tous les fils sont imprégnés. Le surplus de résine débordera du moule lors de la cuisson du passage du moule dans la presse chauffante. La résine utilisée est la résine GreenPox56 associée au durcisseur SD SurfClear, disponibles chez Sicomin®, avec un rapport de 100g de résine pour 37g de durcisseur. Les mèches sont stockées à température ambiante avant la réalisation des éprouvettes, dans des conditions similaires à celles dans lesquelles sont réalisées les éprouvettes.

Table 2-4 : Quantités de fibres nécessaires à la réalisation des éprouvettes IFBT

Matière	Nm	Longueur totale (m)	Nombre de fils de 25 cm
Mèches			
LINO ST	2,75	10,34	41
LINO T1	3,29	12,37	49
CANAPA ST1	3,01	11,32	45
CANAPA ST2	3,21	13,54	54
CANAPA T1	3,87	14,55	58
CANAPA T2	3,60	13,54	54
CANAPA T3	3,76	14,13	56
Fils retordus			
AMBRA	5,81	21,85	87
CANAPA	6,60	24,82	99

Pour chaque éprouvette, un morceau de bâche, suffisamment grand pour dépasser aux extrémités et sur le dessus du moule est inséré. Au fond du moule, 2 mL de résine sont d'abord introduits puis environ la moitié du nombre de mèches nécessaire est déposé. Ces mèches sont ensuite recouvertes avec de la résine tout en s'assurant de la bonne imprégnation de celles-ci. Lorsqu'elles sont bien imprégnées, le reste des mèches est ajouté, puis suffisamment de résine pour imprégner l'ensemble (Figure 2-18). Des cales de 2 mm d'épaisseur sont placées aux extrémités du moule, afin d'obtenir une épaisseur homogène de 2 mm lors du passage sous presse, et des morceaux de non-tissés d'absorption sont également introduits aux extrémités pour absorber le surplus de résine. Le morceau de bâche est ensuite fermé et une barre est ajoutée pour fermer le moule (Figure 2-19). Lorsque les cinq éprouvettes sont préparées, des barres plus larges, également posées sur des cales de 2 mm, sont disposées entre chaque éprouvette pour augmenter la surface de contact avec la presse. Un morceau de non-tissé d'absorption, pour absorber le surplus de résine pouvant déborder par le dessus, et un morceau de tissu téflonné, pour ne pas mettre de résine dans la presse, sont ensuite déposés sur le dessus du moule.

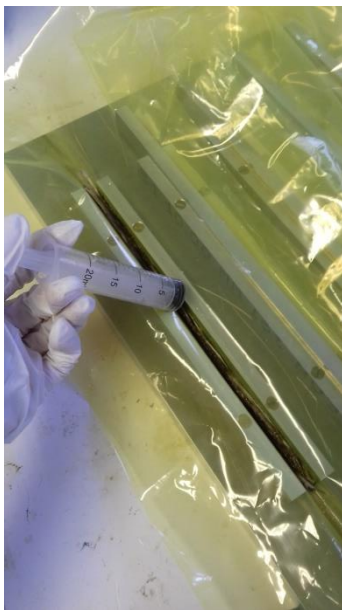


Figure 2-18 : Fabrication des éprouvettes IGBT



Figure 2-19 : Moule IGBT en cours de fabrication

Une fois le moule préparé, ce dernier est placé dans une presse chauffante de la marque DOLOUETS® à 60°C (Figure 2-20) sous une pression de 10 bars, pour avoir une pression de 2 bars sur chaque éprouvette (rapport entre la section de vérin et la surface sous pression). Après 8h sous presse, le moule est déplacé dans une étuve, de la marque MEMMERT®, chauffée à 60°C. Après 16h en étuve, soit 24h après avoir mis le moule à une température de 60°C, les éprouvettes sont démoulées, pesées et mesurées afin de calculer les différents volumes de fibres, de matrices et de porosités. Les éprouvettes sont ensuite maintenues à température ambiante pendant au minimum une semaine avant de procéder aux essais de traction, qui sont réalisés à température ambiante dans une pièce non conditionnée. Ces essais de traction sont effectués sur un banc de traction INSTRON® 5985,

à une vitesse de 1 mm/min, avec une longueur de jauge de 150 mm. Pour chaque essai, des points sont marqués sur les éprouvettes et des photos sont prises toutes les secondes à l'aide d'une caméra afin d'obtenir le déplacement réel de l'échantillon par suivi de points sur le logiciel ImageJ® au moyen du plugin TrackMate [14].

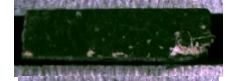
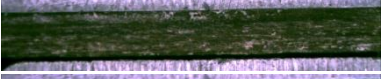


Figure 2-20 : Moule IFBT en cuisson dans la presse chauffante

4.1.2 Observations à la loupe binoculaire

Les éprouvettes IFBT des mèches sans traitement et des fils retordus à base de fibres de chanvre et de lin sont découpées et polies afin d'observer leurs sections longitudinales et transversales avec une loupe binoculaire Novex®. Ces vues sont rassemblées en Table 2-5. Pour les coupes réalisées sur les échantillons composés de fils retordus (en lin et en chanvre), les fils sont nettement visibles et bien distincts. Dans le cas des coupes réalisées sur éprouvettes contenant des mèches, les fibres sont mieux mélangées puisque les mèches sont plus difficilement distinguables. Ces vues de coupe mettent en évidence la difficulté d'imprégner et de réaliser des composites avec des fils retordus. Les mèches présentent l'avantage de rendre la répartition des fibres plus homogène au sein du composite et par conséquent de diminuer le nombre de zones riches en résine et de zones sèches (excessives en fibres).

Table 2-5 : Coupes longitudinales et transversales des éprouvettes IGBT

Matériau		Coupe longitudinale	Coupe transversale
Chanvre	Mèche		
	Fil retordu		
Lin	Mèche		
	Fil retordu		

4.2 Détermination de la composition et des propriétés mécaniques

4.2.1 Détermination de la composition des éprouvettes

Dans un premier temps, la composition des éprouvettes est déterminée à l'aide des équations (2-4) à (2-8) pour, respectivement, la fraction volumique de fibres, la fraction massique de fibres, la fraction volumique de matrices et la fraction volumique de porosités.

$$v_f = \frac{m_f / \rho_f}{V_c} \quad (2-4)$$

$$m_f = v_f \times V_c \times \rho_f \quad (2-5)$$

$$w_f = \frac{m_f}{m_c} \quad (2-6)$$

$$v_m = (1 - w_f) \times \frac{\rho_c}{\rho_m} \quad (2-7)$$

$$v_p = 1 - v_f - v_m \quad (2-8)$$

Avec : v_f : Fraction volumique de fibres

w_f : Fraction massique de fibres

v_m : Fraction volumique de matrice

v_p : Fraction volumique de porosités

V_c : volume de composite [cm^3]

m_f : masse de fibres [g]

m_c : masse de l'éprouvette composite [g]

ρ_f : masse volumique des fibres [g.cm^{-3}]

ρ_m : masse volumique de la matrice [g.cm^{-3}]

ρ_c : masse volumique de l'éprouvette composite [g.cm^{-3}]

Comme exposé précédemment, la masse volumique des fibres de lin et de chanvre est considérée comme égale à $\rho_f = 1,504 \text{ g.cm}^{-3}$ et la masse volumique de la matrice (mélange résine GreenPox56 et durcisseur SD SurfClear) égale à $\rho_m = 1,16 \text{ g.cm}^{-3}$.

4.2.2 Détermination des propriétés des fibres par la loi des mélanges

L'objectif de la méthode IFBT est d'obtenir les propriétés des fibres, pour ce faire la loi des mélanges est utilisée afin de les calculer à partir de celles identifiées à l'échelle composite par calcul inverse (ou « back-calculated »). Seuls les modules seront étudiés dans le cadre de ces travaux. La loi classiquement utilisée pour obtenir le module des fibres est présentée en équation (2-9). Pour chaque matière, deux modules de fibres seront déduits, dans la gamme de déformations entre 0,01% et 0,1 % pour le module E_{f1} (module 1) et dans la gamme de déformations entre 0,3% et 0,5% pour le module E_{f2} (module 2). A l'échelle des éprouvettes composites de l'IFBT, l'allure générale d'une courbe « contrainte – déformation » obtenue par l'essai de traction est présentée en Figure 2-21. Cette courbe met en évidence le comportement non linéaire caractéristique des composites renforcés de fibres naturelles qui se traduit par l'existence de deux modules différents, un premier (E_{c1}) entre 0,01% et 0,1% de déformation puis un second (E_{c2}), entre 0,3% et 0,5% de déformation. Le second module est plus faible du fait des réorganisations au sein de la structure interne des fibres (comme par exemple une rotation des microfibrilles et des ruptures des parois cellulaires) [15,16]. Les valeurs des modules composites des éprouvettes d'IFBT E_{c1} et E_{c2} sont données en Annexe B.

$$E_c = v_f E_f + (1 - v_f) E_m \quad (2-9)$$

Avec : E_c : module du composite [GPa]

E_f : module des fibres [GPa]

E_m : module de la matrice [GPa]

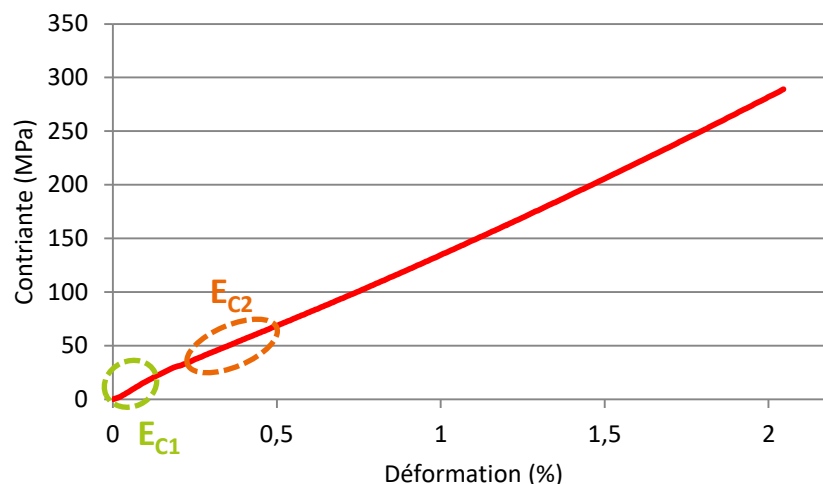


Figure 2-21 : Allure d'une courbe de traction composite d'une éprouvette d'IFBT

Cependant, les produits utilisés pour la réalisation des éprouvettes composites d'IFBT présentent une certaine torsion, même si celle-ci est minime lorsque les éprouvettes sont réalisées avec des mèches (environ 30 tours par mètre) et par ailleurs la porosité des

échantillons n'est pas prise en compte. Une loi des mélanges, issue de la littérature [9,17–20] et dite « modifiée », est par conséquent étudiée à l'aide de l'équation (2-10).

$$E_c = (\eta_0 \eta_1 v_f E_f + v_m E_m) (1 - v_p)^n \quad (2-10)$$

Avec : η_0 : facteur d'orientation des fibres

η_1 : facteur de longueur des fibres

n : facteur de porosité

Le facteur de porosité n permet de prendre en compte l'effet de concentration de contraintes dû à la porosité présente dans l'échantillon. B. Madsen [19,21] a montré qu'un coefficient $n = 2$ permet d'obtenir des résultats prédits relativement proches des résultats expérimentaux dans le cadre des composites renforcés de fibres naturelles. Cette valeur sera donc choisie dans le cadre de ces travaux.

Le facteur de longueur des fibres η_1 est défini par l'équation (2-11) selon un modèle développé par Cox [22], en considérant que les fibres sont soumises à une charge selon leur axe longitudinal et que la contrainte élastique est bien transférée entre les fibres et la matrice.

$$\eta_1 = 1 - \frac{\tanh \frac{\beta L}{2}}{\frac{\beta L}{2}} \text{ avec } \frac{\beta L}{2} = 2 \frac{L}{D} \sqrt{\frac{G_m}{E_f \ln(\frac{\kappa}{v_f})}} \quad (2-11)$$

Avec : L : longueur des fibres [m]

D : diamètre des fibres [m]

G_m : module de cisaillement de la matrice

κ : constante liée à la compaction des fibres présentée dans [23]

Dans son étude [19], B. Madsen a montré qu'en utilisant des valeurs classiques issues de la littérature concernant les composites renforcés de fibres naturelles, le facteur η_1 peut se relier à un rapport L/D (longueur/diamètre) selon la courbe présentée en Figure 2-22. Les fibres naturelles présentant un rapport L/D supérieur à 50, le facteur de longueur des fibres η_1 peut être considéré comme constant et égal à 1, valeur qui sera choisie pour cette étude [19,20].

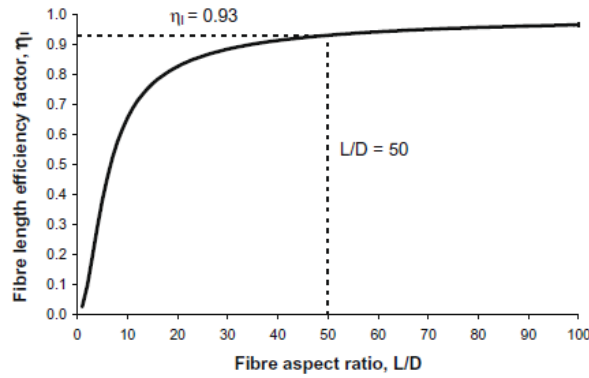


Figure 2-22 : Relation entre le facteur de longueur des fibres η_l et le rapport L/D [19]

Le facteur d'orientation des fibres η_0 , défini par l'équation (2-12), permet quant à lui de modéliser la torsion des fils utilisés au sein des éprouvettes IFBT. Cette torsion entraîne un désalignement des fibres relativement à la direction de la sollicitation mécanique et ce coefficient permet de le prendre en compte.

$$\eta_0 = \cos^2(2\alpha) \quad (2-12)$$

Avec : α : angle de torsion de surface des fibres

Il existe dans la littérature deux modèles différents pour estimer la valeur de l'angle de torsion de surface des fibres, qui sont donnés dans les équations (2-13) et (2-14) [9].

$$\alpha = \tan^{-1}(2\pi rT) \quad (2-13)$$

Avec : r : rayon du fil [m]

T : torsion du fil [tours/m]

$$\alpha = \tan^{-1}\left(10^{-3} \cdot T \cdot \sqrt{4\pi \frac{kTex}{\rho_f \phi}}\right) \text{ avec } \phi = 0.71(1 - 0.78e^{-0.195T}) \quad (2-14)$$

Avec : $kTex$: titre du fil [kTex]

ϕ : coefficient de compaction du fil

Les deux modèles prennent en compte la désorientation des fibres mais à deux échelles différentes. Le modèle présenté dans l'équation (2-13) reste à l'échelle fil (avec le rayon et la torsion du fil) tandis que le modèle présenté dans l'équation (2-14) est plus développé, avec notamment la prise en compte de la compaction des fibres au sein de la structure du fil. Ces deux modèles seront utilisés et comparés dans le cadre de ces travaux.

4.3 Analyse des résultats

4.3.1 Influence de la torsion et de la porosité dans la loi des mélanges

Afin d'étudier l'influence de la torsion des mèches utilisées lors de la préparation des éprouvettes IGBT ainsi que celle de la porosité emprisonnée dans ces éprouvettes, des essais ont été réalisés avec des matières 100% chanvre présentant différents taux de torsion. Parmi les matières 100% chanvre fournies par LCN, les deux mèches de chanvre sans traitement (CANAPA ST1 et CANAPA ST2) ont été choisies pour leur faible taux de torsion initial, ainsi que le fil (CANAPA) pour avoir une torsion très élevée. Des torsions intermédiaires ont été obtenues en retordant la mèche CANAPA ST2 avec le procédé Fantaspin de la machine Gualchieri & Gualchieri® de l'ENSAIT, avec une consigne de 45 tours/m et une autre de 90 tours/m. Cette nouvelle torsion pour ces mèches a ensuite été fixée en autoclave, pendant 15 minutes à 70°C. Pour ces 2 matières, notées CANAPA ST2+45 et CANAPA ST2+90, les titres et torsions ont été remesurés après applications de ces niveaux additionnels. Les propriétés des différentes matières utilisées sont données en Table 2-6. Les légères variations du titre (en Nm) entre les mèches CANAPA ST2, CANAPA ST2 +45 sont dues à la présence initiale plus ou moins importante d'impuretés dans la mèche CANAPA ST2 (Table 2-1) et non à un phénomène d'étirage qui viendrait affiner les mèches, puisque ces dernières sont juste retordues sans être étirées. Ces impuretés étant présentes de façon inhomogène entre différentes bobines, le titre des mèches peut varier d'une bobine à l'autre. De plus, pendant l'ajout de la torsion, ces impuretés sont plus ou moins enlevées lors du passage de la mèche dans la machine, et ceci n'est pas contrôlé, ce qui fait que les mèches avec ajout de torsion peuvent avoir également un titre qui varie par rapport à la mèche initiale.

Table 2-6 : Matières utilisées en IGBT dans l'étude de l'influence de la torsion et de la porosité

Matière	Type de fil	Titre (Nm)	Torsion (tours/m)
CANAPA ST1	Mèche	3,01 ± 0,24	32,02 ± 4,38
CANAPA ST2	Mèche	3,21 ± 0,21	37,15 ± 2,24
CANAPA ST2 +45	Mèche	3,46 ± 0,20	77,46 ± 7,52
CANAPA ST2 +90	Mèche	2,94 ± 0,14	130,38 ± 6,33
CANAPA	Fil retordu	6,60 ± 0,63	221,85 ± 13,22

Les fractions volumiques de fibres, matrices et porosités ainsi que la fraction massique de fibres des différentes éprouvettes fabriquées pour l'IGBT sont rassemblées en Table 2-7. Les fractions volumiques de fibres et de matrices, déterminées à l'aide des équations (2-4) et (2-7), sont situées aux alentours de respectivement 40% et 50%. Ainsi, même si le volume de fibres est inférieur au volume espéré (environ 50%), le surplus de résine ajouté lors de la fabrication des éprouvettes s'est bien échappé comme prévu lors de la mise sous presse. Le complément aux fibres et à la résine correspond à la porosité. Ce volume de porosités, compris entre 5% et 9% selon les matières, est peu élevé. Cependant, un lien peut être établi entre le volume de porosités et la torsion des fils utilisés lors de la

fabrication. Comme en témoigne la Figure 2-23, l'augmentation de la torsion fil entraîne une augmentation de la fraction volumique de porosités au sein de l'éprouvette composite. En effet, plus la torsion est élevée, plus il sera difficile pour la résine de pénétrer au sein de la structure du fil. Ainsi le vide présent entre les fibres et au cœur de celles-ci (dans le lumen) ne sera pas comblé par la résine, augmentant ainsi la porosité finale de l'éprouvette.

Table 2-7 : Composition des éprouvettes IFBT pour l'étude de l'influence de la torsion et de la porosité

Matière	V_f (%)	V_m (%)	V_p (%)	W_f (%)
CANAPA ST1	$43,4 \pm 1,1$	$51,5 \pm 1,6$	$5,1 \pm 1,1$	$52,2 \pm 1,3$
CANAPA ST2	$38,3 \pm 1,7$	$54,3 \pm 1,3$	$7,4 \pm 1,3$	$47,7 \pm 1,6$
CANAPA ST2 +45	$39,2 \pm 3,0$	$53,8 \pm 3,2$	$7,0 \pm 2,2$	$48,6 \pm 3,2$
CANAPA ST2 +90	$44,0 \pm 2,0$	$47,3 \pm 3,6$	$8,7 \pm 2,8$	$54,7 \pm 2,8$
CANAPA	$40,4 \pm 1,5$	$50,3 \pm 3,2$	$9,3 \pm 1,9$	$51,0 \pm 1,2$

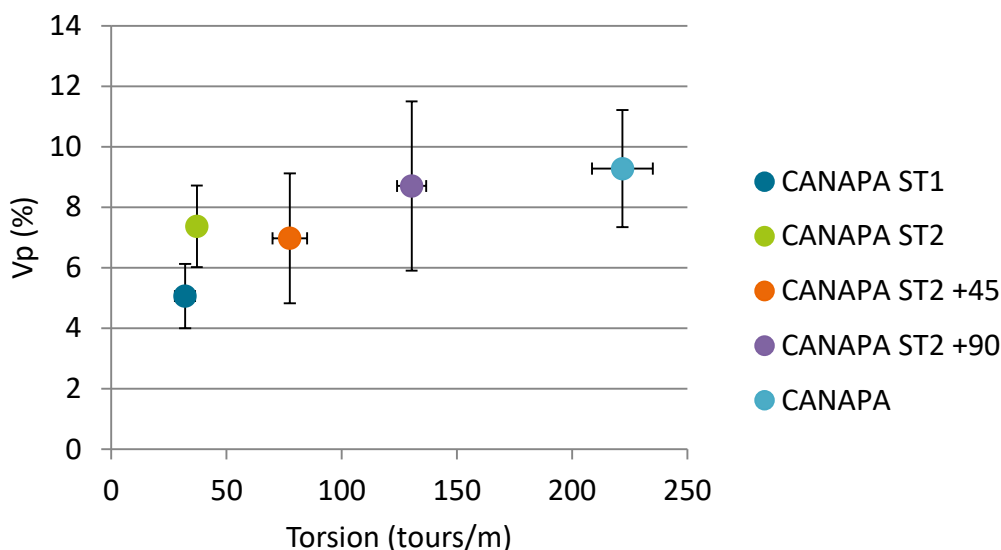


Figure 2-23 : Relation entre la torsion des fils et la porosité dans les éprouvettes d'IFBT

Afin de mettre en évidence l'influence des différents facteurs intervenant dans la loi des mélanges, les modules des fibres sont calculés en utilisant les différents modèles introduits précédemment. Ces résultats sont présentés en Figure 2-24 pour le module E_{f1} et en Figure 2-25 pour le module E_{f2} , avec les notations suivantes :

- « (2-9) » pour les résultats calculés la loi dite « classique » présentée à l'équation (2-9)
- « (2-9) + porosité » pour les résultats prenant en compte dans cette loi classique le facteur associé à la porosité, c'est-à-dire en multipliant l'équation (2-9) par $(1 - V_p)^n$
- « (2-13) » pour les résultats calculés à partir de la loi modifiée présentée dans l'équation (2-10) et utilisant l'équation (2-13) pour déterminer l'angle α de torsion de surface des fibres

- « (2-14) » pour les résultats calculés à partir de la loi modifiée présentée dans l'équation (2-10) et utilisant l'équation (2-14) pour déterminer l'angle α de torsion de surface des fibres
- « (2-13) sans porosité » pour les résultats obtenus à l'aide de la loi modifiée de l'équation (2-10) couplée à l'équation (2-13) pour déterminer l'angle α de torsion de surface des fibres sans le facteur relatif à la porosité $(1 - V_p)^n$
- « (2-14) sans porosité » pour les résultats obtenus à l'aide de la loi modifiée de l'équation (2-10) couplée à l'équation (2-14) pour déterminer l'angle α de torsion de surface des fibres sans le facteur relatif à la porosité $(1 - V_p)^n$

Ainsi, les résultats « (2-9) » ne prennent en compte ni l'influence de la porosité, ni celle de la torsion des fibres. Les résultats « (2-9) + porosité » prennent en compte uniquement l'influence de la porosité. Les résultats « (2-13) sans porosité » et « (2-14) sans porosité » prennent en compte uniquement l'influence de la torsion des fibres en comparant deux modèles différents. Les résultats « (2-13) » et « (2-14) » prennent en compte l'influence de la porosité ainsi que de la torsion toujours en comparant deux modèles. Que ce soit pour le module E_{f1} (Figure 2-24) ou pour le module E_{f2} (Figure 2-25), l'évolution de la tendance est similaire en fonction des différents modèles et pour les différents niveaux de torsion. Par contre les gammes de valeurs diffèrent, le module E_{f1} étant plus élevé que le module E_{f2} .

Dans l'ensemble, le module des fibres (E_{f1} ou E_{f2}) estimé par méthode inverse n'est pas constant, ce qui signifie que la torsion des produits utilisés influe bien sur le module des fibres. A titre de comparaison, des modules de fibres de chanvre issus de la littérature sont rappelés en Table 2-8. Pour les travaux référencés [24–26], il n'est pas précisé si les valeurs correspondent au module E_{f1} ou E_{f2} . Néanmoins, par comparaison avec celles issues de la référence [15], il est fort probable que ces valeurs correspondent plutôt au second module E_{f2} . Dans tous les cas, les modules des fibres de chanvre étudiées ici, et ce quel que soit le fil dont elles sont issues, se positionnent dans cette même gamme de valeur de module. Comme dans [15], le premier module E_{f1} est supérieur au second module E_{f2} . En effet, plus la déformation est élevée, plus la structure interne des fibres de chanvre est fragilisée, ce qui entraîne une diminution du module.

Table 2-8 : Modules de fibres de chanvre issus de la littérature

Méthode	E_{f1} (GPa)	E_{f2} (GPa)	Référence
Traction fibre unitaire		$30,0 \pm 15,5$	[24,25]
Traction fibre unitaire		$42,0 \pm 29,0$	[26]
Traction fibre unitaire	57 ± 13	$44,5 \pm 14$	[15]
IFBT	$59,8 \pm 2,4$	$40,8 \pm 3,5$	[15]

Les fibres étudiées, sont issues de trois lots différents, correspondant à trois réceptions de matière différant dans le temps, un premier pour les mèches CANAPA ST1, un second pour les mèches CANAPA ST2 et un troisième pour les fils retordus CANAPA.

Pour le premier lot (CANAPA ST1) les six modèles donnent des valeurs de module (E_{f1} ou E_{f2}) quasiment identiques, avec des valeurs légèrement plus élevées lorsqu'elles sont calculées par les modèles prenant en compte la porosité. A l'inverse pour les fibres issues du fil avec le niveau de torsion le plus élevé (CANAPA), autrement dit les fibres issues du troisième lot, les différences entre les valeurs des modules issues des six modèles sont nettement significatives (avec un écart de 30 GPa entre les valeurs extrêmes du module E_{f1}). Pour ce lot de fibres, les modèles issus de la loi modifiée, avec porosité, et tenant compte de la torsion donnent les valeurs les plus élevées des modules. A l'inverse les modules (E_{f1} ou E_{f2}) calculés par la loi classique (« (2-9) ») exhibent des valeurs très faibles. Enfin pour le second lot (CANAPA ST2), plus le niveau de torsion augmente, plus les valeurs des modules calculées par les six modèles diffèrent. Pour ce second lot, l'augmentation du niveau de torsion conduit à une augmentation des modules des fibres, lorsqu'ils sont calculés par les modèles prenant en compte cette torsion (« (2-13) », « (2-14) »). A l'inverse la loi classique, même avec prise en compte de la porosité (« (2-9) », « (2-9) + porosité »), conduit à des valeurs constantes puis décroissantes en fonction du niveau de torsion.

De manière générale la prise en compte de la porosité (« (2-9) + porosité », « (2-13) » et « (2-14) ») conduit à une estimation des modules plus élevée que lorsqu'elle n'est pas prise en compte (« (2-9) », « (2-13) sans porosité » et « (2-14) sans porosité »). Si la différence reste peu significative pour les fibres issues des mèches CANAPA ST1, dont la porosité des éprouvettes IFBT s'élève à 5%, plus le taux de porosités augmente (Table 2-7), plus la prise en compte du facteur associé à la porosité dans la loi des mélanges a une influence sur les valeurs des modules.

Deux modèles (« (2-13) » et « (2-14) ») sont utilisés pour estimer la valeur de l'angle de torsion de surface des fibres, dans la loi modifiée. Dès que le niveau de torsion atteint 70 tours/m (avec la mèche CANAPA ST2 +90) ces modèles se dissocient, via les valeurs des modules calculées. La simplification apportée par l'équation (2-13) pour prendre en compte l'influence de la torsion des fibres entraîne une sous-estimation des modules pour des niveaux de torsion élevés. Pour ces deux modèles, sans prise en compte de la porosité (« (2-13) sans porosité », « (2-14) sans porosité »), on constate cette même tendance.

La loi classique (2-9), établie pour des fibres parfaitement alignées et ne prenant pas en compte la porosité, montre au travers de cette étude, ses limites, avec une chute significative du module des fibres. Le correctif apporté par le facteur de porosité (« (2-9) + porosité »), pour des torsions plus importantes (CANAPAST2 +90 ou CANAPA), permet seulement de converger vers les plus faibles valeurs des modules calculées par les modèles, prenant en compte la torsion, et sans porosité. La prise en compte des facteurs correctifs pour la porosité des éprouvettes ainsi que la torsion de matières utilisées est donc un paramètre important à prendre en compte. Pour la suite de l'étude IFBT, le coefficient α

choisi pour déterminer les modules des fibres sera celui présenté dans l'équation (2-14), puisqu'il est le plus précis au niveau de la description de la structure interne de la matière.

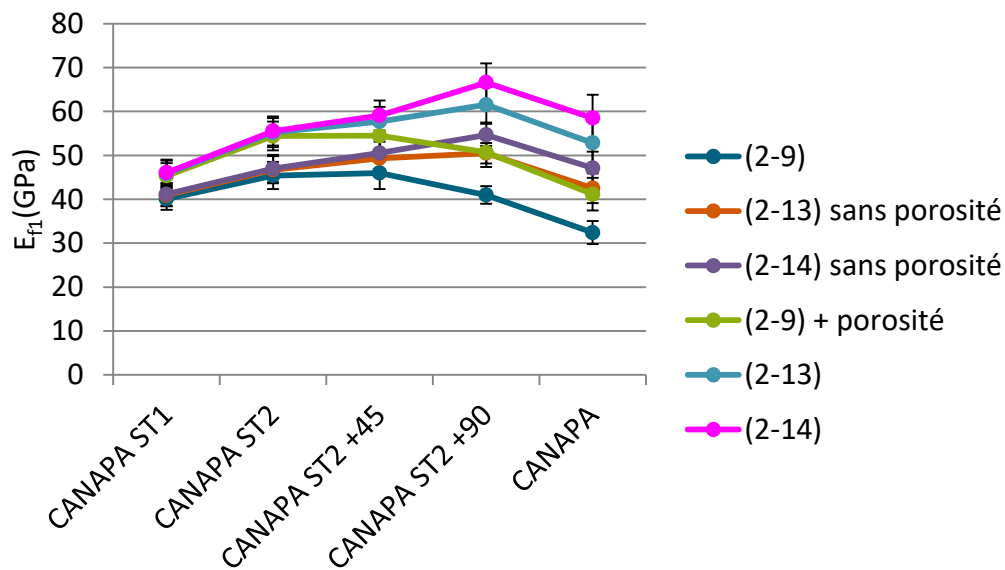


Figure 2-24 : Comparaison des modèles pour le module E_{f1} (0,01% – 0,1% de déformation)

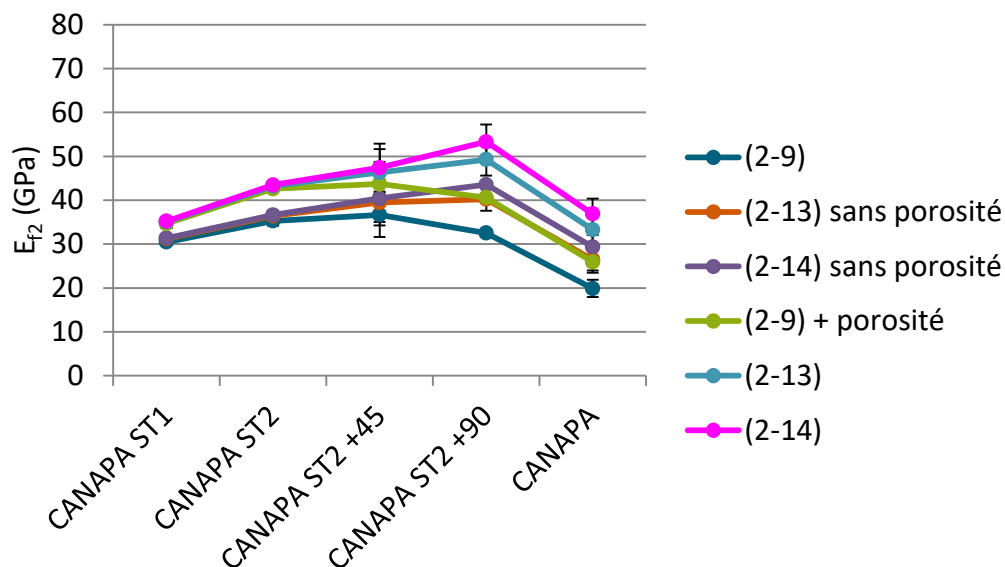


Figure 2-25 : Comparaison des modèles pour le module E_{f2} (0,3% - 0,5% de déformation)

4.3.2 Impact du traitement chimique à l'échelle des fibres

Le traitement chimique réalisé sur les mèches de chanvre et de lin afin d'améliorer leur tissabilité, présenté précédemment au paragraphe 3.1, est connu dans la littérature pour avoir une tendance à dégrader et endommager les propriétés des fibres de ces mèches traitées [6,27,28]. Afin de vérifier l'impact du traitement réalisé sur les mèches utilisées dans ces travaux, des essais d'IFBT ont été réalisés sur les mèches avec et sans traitement. Les mèches utilisées sont les mèches de chanvre CANAPA ST1, CANAPA ST2, CANAPA T1,

CANAPA T2 et CANAPA T3 ainsi que les mèches de lin LINO ST et LINO T1. Pour rappel, les produits suivis des lettres « ST » n'ont pas subi de traitement chimique, à l'inverse des produits avec la lettre « T ». Les chiffres indiqués derrière les lettres témoignent des différentes productions reçues, sur des années différentes, ou, pour les produits avec traitement, pour une différence de traitement. Pour rappel, la torsion des mèches utilisées dans ce paragraphe est similaire (voir Table 2-1 et Table 2-2). Les fractions volumiques de fibres, matrices et porosités ainsi que la fraction massique de fibres des différentes éprouvettes ainsi fabriquées sont rassemblées en Table 2-9. Comme pour la première étude IFBT (paragraphe 4.3.1), la fraction volumique de fibres obtenue dans les éprouvettes réalisées à partir de mèches sans et avec traitement chimique oscille autour de 40% tandis que la fraction volumique de matrices est légèrement supérieure à 50%. La fraction volumique de porosités, quant à elle, varie entre 2,5% et 9%, ce qui reste faible et acceptable, à l'exception des éprouvettes réalisées avec les mèches CANAPA T2, qui contiennent un volume de près de 12% de porosités. Ce taux élevé est certainement dû à l'aspect externe des mèches CANAPA T2. En effet, contrairement aux mèches ayant subi les traitements n°1 et n°3, les mèches issues du traitement n°2 possèdent des fibres beaucoup plus collées entre elles. Cet effet collé est à l'origine de plus grande difficulté pour la résine à pénétrer au cœur des fibres et laissant ainsi des zones sèches (entre les fibres et au sein de leur lumen).

Table 2-9 : Composition des éprouvettes IFBT pour l'étude de l'influence du traitement chimique sur les propriétés des fibres

Matière	V_f (%)	V_m (%)	V_p (%)	W_f (%)
CANAPA ST1	43,4 ± 1,1	51,5 ± 1,6	5,1 ± 1,1	52,2 ± 1,3
CANAPA ST2	38,3 ± 1,7	54,3 ± 1,3	7,4 ± 1,3	47,7 ± 1,6
CANAPA T1	39,8 ± 2,1	57,7 ± 4,0	2,5 ± 2,2	47,3 ± 3,0
CANAPA T2	38,6 ± 2,9	49,7 ± 2,2	11,7 ± 4,2	50,2 ± 1,2
CANAPA T3	35,1 ± 1,3	59,5 ± 1,4	5,4 ± 0,7	43,3 ± 1,5
LINO ST	37,4 ± 0,9	54,4 ± 1,1	8,6 ± 1,1	47,2 ± 0,9
LINO T1	40,3 ± 1,3	50,4 ± 1,6	9,3 ± 2,2	50,9 ± 1,1

Les valeurs des modules des fibres issues des mèches avant et après traitement sont présentées en Figure 2-26. La loi des mélanges utilisée pour déterminer ces propriétés fibres à partir des propriétés composites est celle de l'équation (2-14). Que ce soit pour les mèches de chanvre ou de lin, les modules des fibres avant et après traitement sont similaires, à l'écart-type près. Le traitement n°2 réalisé sur les mèches de chanvre, qui avait conduit à coller les fibres entre elles, n'a pas diminué pour autant leur module, contrairement à ce qui aurait pu être attendu. Le traitement chimique ainsi effectué ne dégrade pas les propriétés des fibres, à l'opposé de ce qui a été constaté dans la littérature [6,27,28]. Les modules E_{f1} des fibres de lin sont légèrement supérieurs aux modules E_{f1} des fibres de chanvre, mais cette tendance n'est pas vérifiée pour les modules E_{f2} . Dans les données issues de la littérature (voir Table 1-2 dans le Chapitre 1), les modules des fibres de lin et de chanvre se chevauchent en termes de plages de valeurs, ce qui est également le cas ici. D'autre part, les

modules des fibres issues des mèches CANAPA ST1, produites en 2017, sont inférieurs à ceux des fibres issues des mèches CANAPA ST2, produites en 2019. Ces résultats à l'échelle fibre corréleront les résultats obtenus à l'échelle mèche (Figure 2-6), où la ténacité et les pentes des mèches CANAPA ST2 étaient supérieures à celles des mèches CANAPA ST1. Ainsi, d'une année sur l'autre, les propriétés des fibres naturelles peuvent varier. Pour conclure, le recours à ce traitement chimique, de type mercerisation, n'a pas entraîné de dégradation des propriétés des fibres, que ce soit de chanvre et de lin, tout en améliorant les propriétés à l'échelle des fils (paragraphe 3.1), permettant ainsi leur tissabilité.

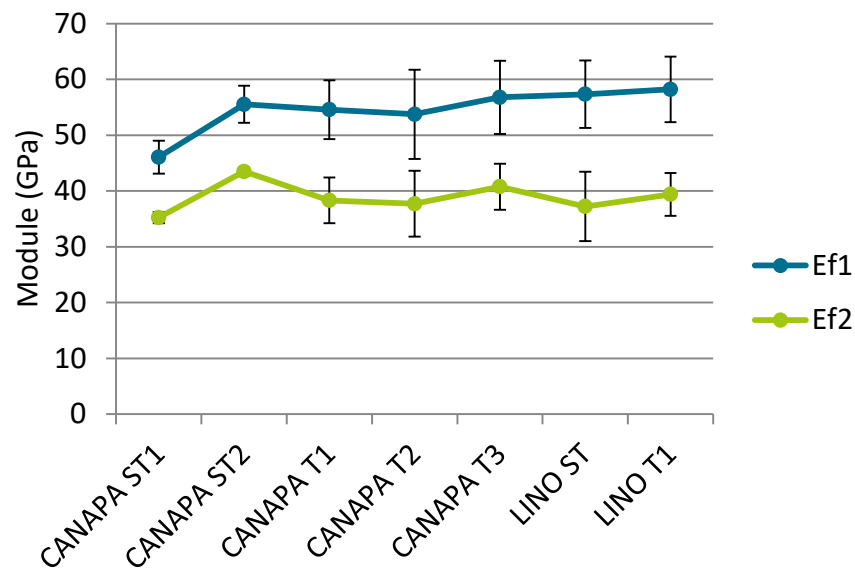


Figure 2-26 : Modules (E_{f1} et E_{f2}) des fibres sans et avec traitement chimique

5 Influence du procédé de tissage sur les propriétés des fils et des fibres

Le procédé de tissage entraîne des dégradations sur les fils, comme expliqué au chapitre précédent (au paragraphe 4.4). Ces dégradations sont étudiées dans un premier temps sur les propriétés textiles (titre, torsion, embuvage et retrait) puis dans un second temps sur les propriétés mécaniques (ténacité à rupture et allongement à rupture). Pour certains renforts, les propriétés des fibres après tissage sont également étudiées avec la méthode de l'IFBT. Les caractéristiques des différentes préformes tissées, élaborées à l'échelle laboratoire (dans les locaux de l'ENSAIT) ou à l'échelle industrielle (dans les ateliers de LCN), sont données en Table 2-10. Les choix de production de ces préformes ainsi que leurs propriétés seront présentés dans le chapitre suivant. Dans ce paragraphe, les propriétés des fils avant tissage, c'est-à-dire des fils situés sur les bobines ayant servi au tissage des préformes, sont comparées aux propriétés des fils après tissage, où des fils sont prélevés des préformes tissées dans les deux directions, en prenant soin de ne pas les endommager lors de l'extraction. Dans les différents histogrammes présentant les résultats, les valeurs obtenues avant tissage seront présentées en bleu, les valeurs issues des préformes élaborées à l'échelle laboratoire en orange et les valeurs issues des préformes produites à l'échelle industrielle en vert.

Table 2-10 : Présentation des préformes tissées étudiées

Tissu	Armure	Fils de chaîne	Fils de trame	Densité chaîne (fils/cm)	Densité trame (fils/cm)
Echelle laboratoire					
FLAX1	Toile	AMBRA	LINO ST	6	6
FLAX2	Toile	AMBRA	LINO T1	6	5,8
HEMP1	Toile	CANAPA T1	CANAPA T1	6	5
HEMP2	Satin de 6	CANAPA T1	CANAPA T1	6	9,5
HEMP3	Satin de 6	CANAPA T1	CANAPA T1	6	9,5
QUASI-UD	Toile	CANAPA	CANAPA T2	0,6	20
HPA121	Satin de 6	CAPA121	CAPA121	6	7,3
HPA122	Satin de 4	CAPA122	CAPA122	6	6,6
Echelle industrielle					
PRST1	Toile	AMBRA	LINO T1	6,5	5,5
TELA	Toile	CANAPA T2	CANAPA T2	6,5	4,7
SPINA	Sergé de 4	CANAPA T2	CANAPA T2	6,5	8,5
HEMP4	Satin de 6	CANAPA T3	CANAPA T3	6,5	6
HEMP5	Satin de 6	CANAPA T3	CANAPA T3	6,5	8,7
HEMP6	Sergé de 6	CANAPA T3	CANAPA T3	6,5	6
HEMP7	Sergé de 6	CANAPA T3	CANAPA T3	6,5	9,5

5.1 Impact sur les propriétés textiles des fils

L'impact du procédé de tissage sur les propriétés textiles des fils est étudié dans un premier temps sur le titre en Figure 2-27 pour les fils de lin (AMBRA, LINO T1, LINO ST), en Figure 2-28 pour les fils de chanvre (CANAPA T1, CANAPA T2, CANAPA T3) et en Figure 2-29 pour les fils guipés (CAPA121, CAPA122). Dans un second temps, l'évolution du taux de torsion suite au tissage est caractérisée en Figure 2-30 pour les fils de lin et en Figure 2-31 pour les fils de chanvre. Enfin, l'embuvage (pour les fils de chaîne) et le retrait (pour les fils de trame) sont mesurés et présentés respectivement dans les Figure 2-32 et Figure 2-33. Les mèches de chanvre étant recouvertes par le fil de guipage, la torsion des fils guipés (CAPA121, CAPA122) ne varie pas pendant le tissage, et ne sera par conséquent pas étudiée. La torsion des fils utilisés pour la réalisation de la préforme quasi-unidirectionnelle QUASI-UD n'est également pas étudiée pour deux raisons distinctes : en sens chaîne, les fils étant très espacés, il faudrait détruire trop de renfort pour obtenir un nombre de fils suffisant à caractériser, et en sens trame, les mèches CANAPA T2 utilisées sont trop « collées » par le traitement chimique pour pouvoir être détordues sur le torsiomètre.

Les histogrammes présentant les résultats obtenus pour la mesure du titre sur les fils de lin (Figure 2-27) et les fils de chanvre (Figure 2-28) ne montrent pas d'évolution du numéro métrique avant et après tissage. Lors du tissage, à cause notamment des frottements avec les autres fils ou avec les éléments des métiers, la génération de fibrilles ou de pertes de fibres aurait pu conduire à une augmentation du numéro métrique, ce qui n'est pas le cas ici. Ainsi, cette absence de modification du titre des fils après tissage témoigne du fait que le procédé de tissage est contrôlé aux deux échelles, laboratoire et industrielle, pour endommager le moins possible la structure des fils. Pour les fils guipés (Figure 2-29), le fil CAPA122 ne montre pas d'évolution du titre, contrairement au fil CAPA121 dont le titre (en Nm) diminue après tissage. Pour rappel, le fil CAPA121 se compose à cœur d'une mèche CANAPA ST1 et le fil CAPA122 d'une mèche CANAPA ST2, ces mèches étant toutes les deux recouvertes d'un multifilament de PA12. La mèche de chanvre CANAPA ST1 étant moins retordue que la mèche de chanvre CANAPA ST2 (environ 32 tours/m pour la première contre 37 tours/m pour la seconde, voir Table 2-1), les fibres et les impuretés sont moins bien maintenues dans la section de la mèche et sont donc plus facilement dégradées, ce qui rend le guipage de la mèche CANAPA ST1 plus irrégulier que celui de la mèche CANAPA ST2. Ainsi, il est possible que le fil CAPA121 utilisé comme « référence » pour les résultats avant tissage possède moins d'impuretés que les fils utilisés pendant le tissage, expliquant alors la diminution du numéro métrique après tissage dans le cas du fil CAPA121. Lors du tissage, le multifilament de PA12 utilisé comme fil de guipage peut également glisser par endroits et créer ainsi des zones avec des accumulations de PA12 et d'autres zones avec moins de matière.

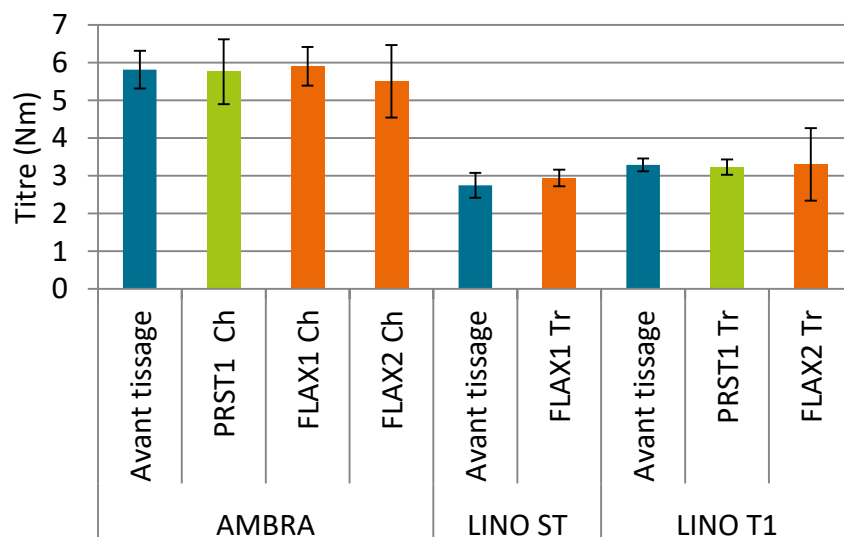


Figure 2-27 : Evolution du titre des fils de lin pendant le tissage

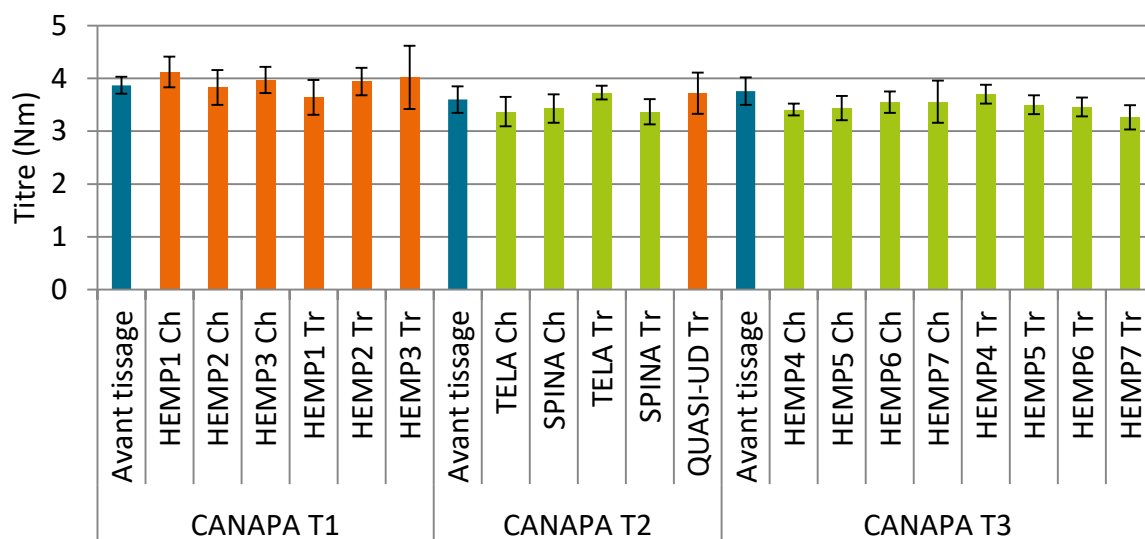


Figure 2-28 : Evolution du titre des fils de chanvre pendant le tissage

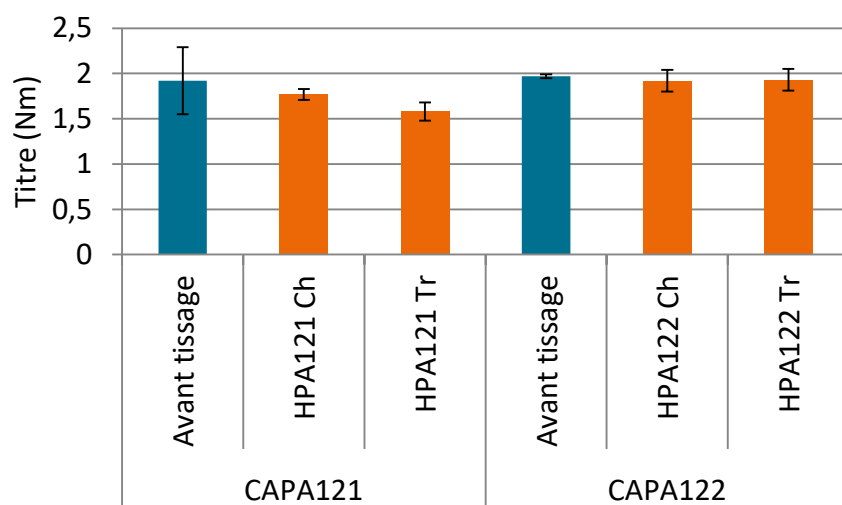


Figure 2-29 : Evolution du titre des fils guipés pendant le tissage

La comparaison des valeurs de torsion mesurées avant et après tissage pour les fils utilisés en sens chaîne, qu'ils soient composés de fibres de lin (Figure 2-30) ou de fibres de chanvre (Figure 2-31), démontre que ce paramètre n'est pas modifié par le tissage. Durant la production de la préforme, les étapes préalables au tissage, telles que l'ourdissage ou la mise sous tension des fils, ainsi que le tissage n'impactent pas sur les niveaux de torsion des fils utilisés en sens chaîne. Dans la direction trame, deux phénomènes sont observés, suivant que la préforme ait été produite à l'échelle laboratoire (valeurs oranges sur les histogrammes) ou industrielle (valeurs vertes sur les histogrammes). Pour les fils extraits des préformes produites à l'échelle industrielle, la torsion est similaire avant et après tissage. L'insertion de la trame directement depuis la bobine de fil ne modifie pas le taux de torsion. A l'inverse, dans le cas des fils extraits des préformes élaborées à l'échelle laboratoire, sur le métier Leclerc WeaveBird de l'ENSAIT présenté au chapitre précédent, la torsion des fils de trame est diminuée après tissage. Lors de la production de ces préformes à l'échelle laboratoire, le fil est préalablement enroulé sur une canette pour pouvoir être inséré à l'aide d'une navette. Cette étape supplémentaire de bobinage entraîne alors une détorsion du fil de trame. Lorsqu'il passe entre deux points de contact avec un mouvement de rotation, une légère torsion ou détorsion peut être induite, suivant le sens de torsion initial des fils. Ainsi, entre le moment où le fil est dévidé de la bobine, par un mouvement circulaire, et celui où il est enroulé sur la canette les mèches ayant une faible torsion sont plus sensibles à ce phénomène. Pour les préformes produites à l'échelle industrielle, les mèches sont alors détordues lors de la préparation des canettes. Ce phénomène peut être voulu ou non, permettant ainsi de détordre les mèches pour réaligner les fibres dans le sens longitudinal du fil. Néanmoins, cette détorsion peut entraîner une décohésion de la structure macroscopique du fil, le rendant plus vulnérable à des ruptures lors de l'insertion de la trame. Pour les fils utilisés à l'échelle laboratoire, le seul fil utilisé en sens trame n'ayant pas vu sa torsion diminuer mais augmenter après tissage est la mèche LINO ST utilisée pour le tissage de la préforme FLAX1. Du fait de l'absence de traitement chimique, la détorsion engendrée lors de la préparation de la canette était trop importante et conduisait à une rupture de la mèche entre la bobine et la canette. La bobine de mèche a alors été retournée, et le fait de la dévider dans l'autre sens a entraîné une légère augmentation de la torsion, permettant ainsi d'éviter une rupture de la mèche. Néanmoins, cette légère augmentation subsiste après tissage, entraînant une désorientation des fibres plus importante que dans le fil initialement fourni.

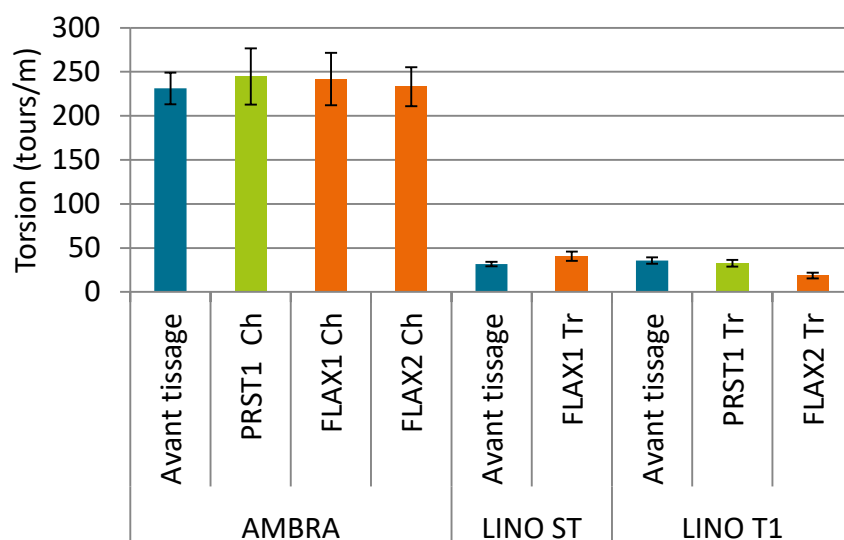


Figure 2-30 : Evolution de la torsion des fils de lin pendant le tissage

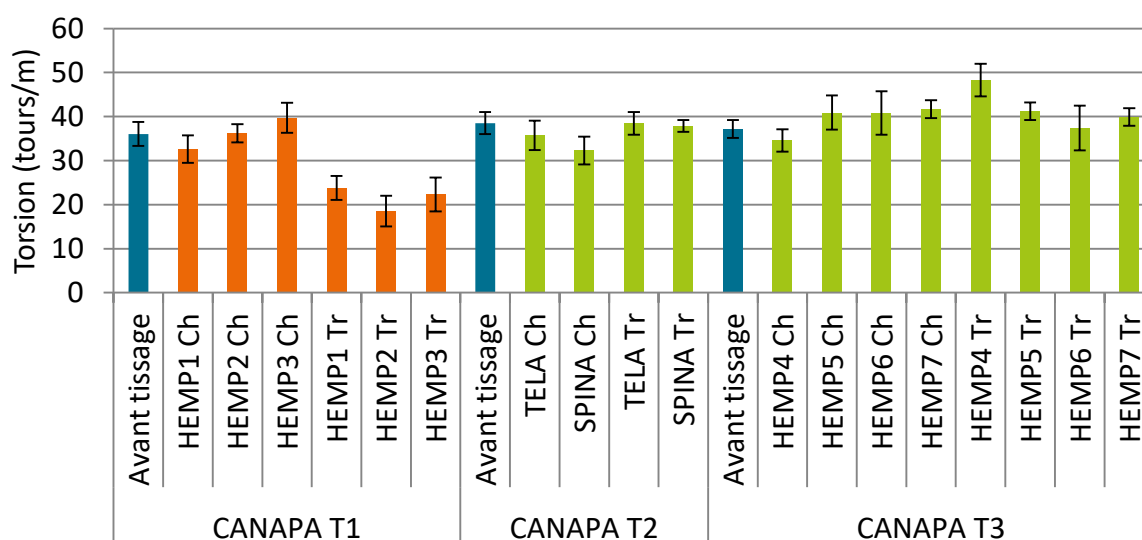


Figure 2-31 : Evolution de la torsion des fils de chanvre pendant le tissage

La consommation de fils au sein des tissus est étudiée en Figure 2-32 pour l'embuvage, et en Figure 2-33 pour le retrait. Dans l'ensemble la consommation de fil est plus importante en sens chaîne (caractérisée par l'embuvage) qu'en sens trame (identifiée par le retrait). Durant le procédé de tissage, le rabattage du peigne force les fils de chaîne à s'onduler autour de la trame insérée, ce qui entraîne une surconsommation de fil, et donc un embuvage relativement conséquent. Néanmoins, les densités de fils étant peu élevées au regard de ce qui est habituellement tissé dans l'industrie textile conventionnelle, les fils de trame vont avoir tendance à rester plus droit au sein des tissus et donc à avoir une plus faible ondulation, qui se traduit par un retrait peu élevé. A l'échelle laboratoire, à l'exception des fils guipés, les embuvages mesurés, ainsi que les retraits, sont similaires, tandis que ces derniers varient plus à l'échelle industrielle entre les différents tissus. A l'échelle laboratoire, la tension exercée sur les fils est moins importante, ce qui fait que la consommation de fils

est homogène quels que soient les paramètres de tissage utilisés tandis qu'à l'échelle industrielle les fils sont beaucoup plus tendus et leur ondulation varie en fonction des contraintes imposées par les paramètres de production. L'embuage et le retrait des fils guipés sont plus élevés que ceux des fils et mèches 100% fibres naturelles. Les fils retordus et mèches étant moins rigides que les fils guipés, les fibres qui les composent ont une plus grande capacité à s'étaler autour des fils de la direction transverse et peuvent donc s'aplanir au sein de la structure tissée, diminuant ainsi leur ondulation. Les fils guipés n'ont pas cette capacité, et gardent donc la forte ondulation imposée par l'entrelacement dû au tissage. Le renfort quasi-unidirectionnel QUASI-UD présente bien les caractéristiques d'un quasi-unidirectionnel : le retrait en direction trame est quasi-nul.

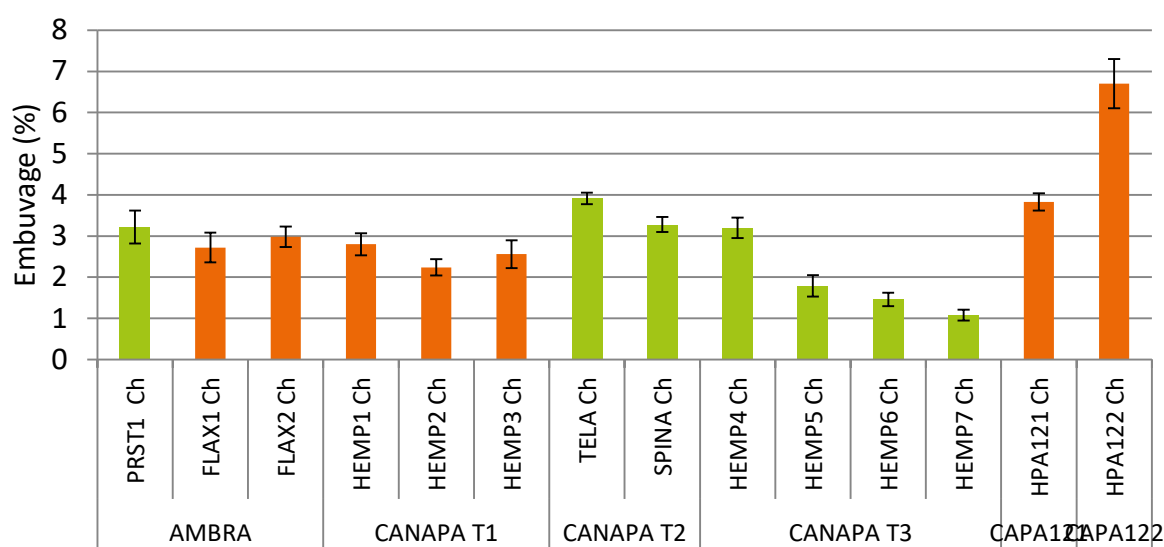


Figure 2-32 : Embuage des fils au sein des tissus

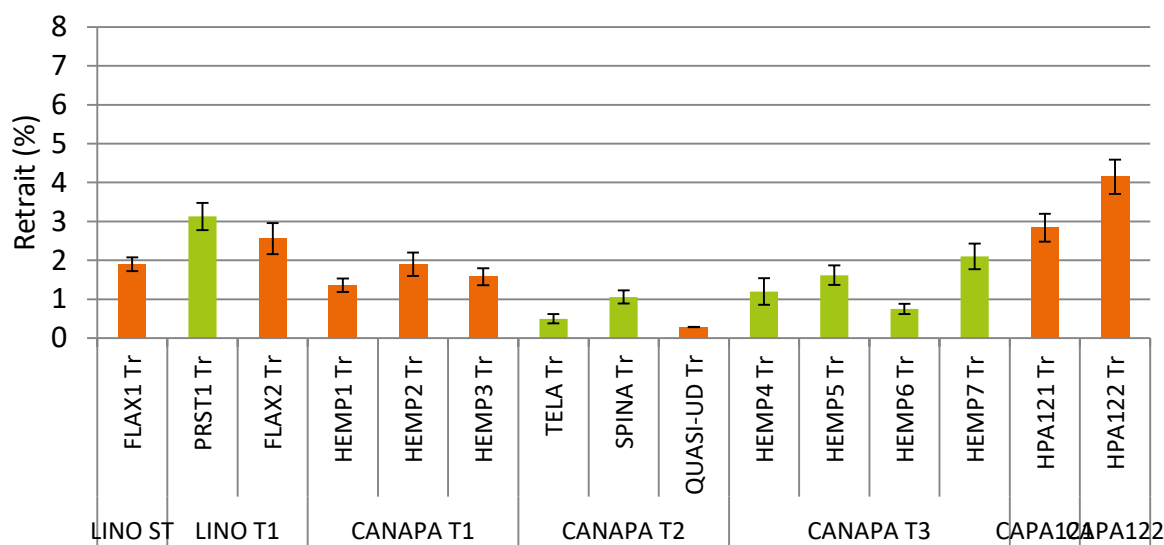


Figure 2-33 : Retrait des fils au sein des tissus

5.2 Impact sur les propriétés mécaniques des fils

L'impact du procédé de tissage sur les propriétés mécaniques des fils est étudié par des essais de traction sur des fils retirés des préformes tissées. Des courbes « ténacité-déformations », sont extraits les valeurs de ténacité à rupture, de déformation à rupture et de pente, dans la zone linéaire (pour quantifier la rigidité).

La ténacité à rupture des fils avant et après tissage est présentée en Figure 2-34 pour les fils de lin, en Figure 2-35 pour les fils de chanvre et en Figure 2-36 pour les fils guipés. L'écart relatif entre la ténacité des fils avant et après tissage est également représenté à la Figure 2-37, pour l'ensemble de ces matières. En direction chaîne, les fils utilisés, quel que soit leur type (fil retordu ou mèche) ou la nature des fibres (lin ou chanvre), présentent une ténacité à rupture similaire avant et après tissage. En effet, à l'exception de la mèche CANAPA T3 utilisée en chaîne dans HEMP4, l'écart relatif entre la valeur de ténacité à rupture avant tissage et après tissage est inférieur ou égal à 10%. Ainsi, contrairement à ce qui a été observé dans la littérature pour d'autres procédés de tissage [29–31], les fils subissant les étapes de préparation au tissage ainsi que la mise sous tension ne sont pas impactés en termes de ténacités à rupture. L'augmentation de la ténacité à rupture des fils utilisés pour la chaîne du tissu HEMP4 est très certainement due à une inhomogénéité des mèches au sein des bobines, puisque cette tendance n'est pas retrouvée pour cette même matière CANAPA T3 utilisée en chaîne dans les tissus HEMP5, HEMP6 et HEMP7.

Les fils utilisés dans la direction trame montrent, quant à eux, une perte de ténacité à rupture plus ou moins conséquente selon les paramètres de tissage. Plusieurs phénomènes sont à l'origine de cette dégradation. Tout d'abord, pour les fils extraits des tissus à l'échelle laboratoire (en orange), la détorsion engendrée par la préparation de la navette crée une décohérence entre les fibres ce qui entraîne une diminution de la ténacité à rupture. De plus, les mouvements du peigne lorsque le fil de trame est rabattu pour former le tissu induisent des frottements entre les fils qui peuvent être à l'origine de la dégradation de la ténacité des fils de trame. L'écart relatif entre la ténacité des fils utilisés en sens trame avant et après tissage est compris entre 10% et 40% pour les fils ayant subi un traitement chimique, et qui, pour la moitié d'entre eux, ont subi une détorsion pendant le procédé de mise en œuvre textile. Le seul fil utilisé en sens trame et qui n'a pas subi de traitement chimique (LINO ST), utilisé pour la production du tissu FLAX1, présente un écart relatif entre sa ténacité avant et après tissage aux alentours de 70%, correspondant à une forte perte de ténacité alors qu'en termes de torsion après tissage, la valeur était plus élevée. Ceci démontre qu'en plus d'améliorer la cohésion interfibres et de conférer une meilleure ténacité au fil, le traitement chimique effectué protège le fil des agressions induites lors du procédé de tissage et notamment des nombreux frottements entre fils ou avec les organes du métier à tisser.

Concernant l'évolution de la ténacité à rupture des fils guipés pendant le tissage, le comportement n'est pas le même selon que le fil utilisé soit le fil CAPA121 ou CAPA122. Pour le fil CAPA121, les valeurs de ténacité à rupture avant et après tissage sont similaires, à l'écart-type près. Ainsi, le guipage ajouté sur la mèche de chanvre permet de protéger le fil

de la plupart des agressions engendrées par le procédé de tissage, et les fibres de chanvre ont une cohésion suffisante au sein de la structure du fil pour ne pas engendrer de ruptures lors de la mise sous tension de la chaîne ou de l'insertion de la trame. Le fil CAPA122, présente lui une ténacité à rupture inférieure à celle relevée avant tissage pour les fils utilisés en sens chaîne et similaire, voire légèrement supérieure, pour les fils utilisés en sens trame. En comparaison du fil CAPA121, le fil CAP122 contient moins de PA12 en proportion massique (35% contre 52% pour le fil CAPA121), ce qui laisse supposer que la compaction des fibres de chanvre au sein de la structure du fil tissé est moins importante. Ainsi, la cohésion interfibres est moins bien assurée, et lors de la mise sous tension de l'ensouple de fils de chaîne, des ruptures prématurées de la mèche de chanvre peuvent avoir lieu au sein du fil guipé. Ce dernier étant totalement recouvert de PA12, son aspect extérieur ne sera pas modifié, ce qui empêche de remarquer visuellement ces éventuelles ruptures. Pour les fils CAP122 utilisés en sens trame, la force appliquée sur ces derniers est moins importante, et ils ne vont pas s'endommager pendant le tissage.

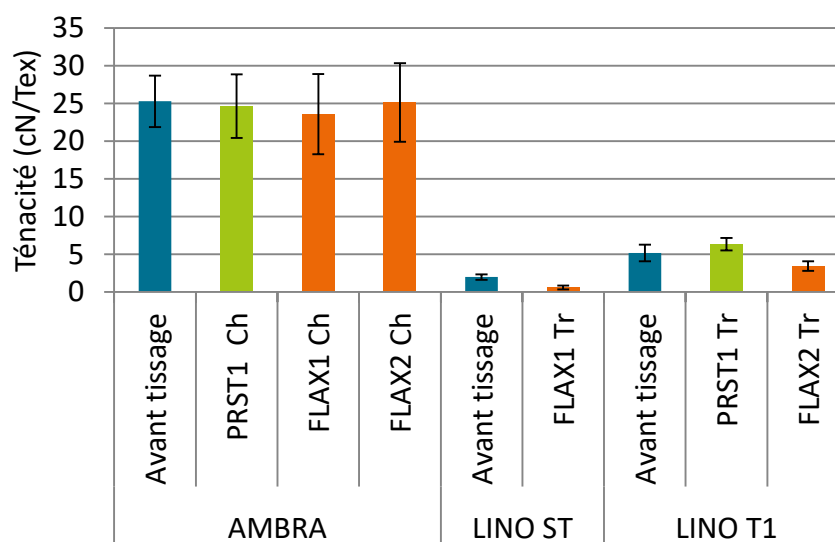


Figure 2-34 : Evolution de la ténacité à rupture des fils de lin pendant le tissage

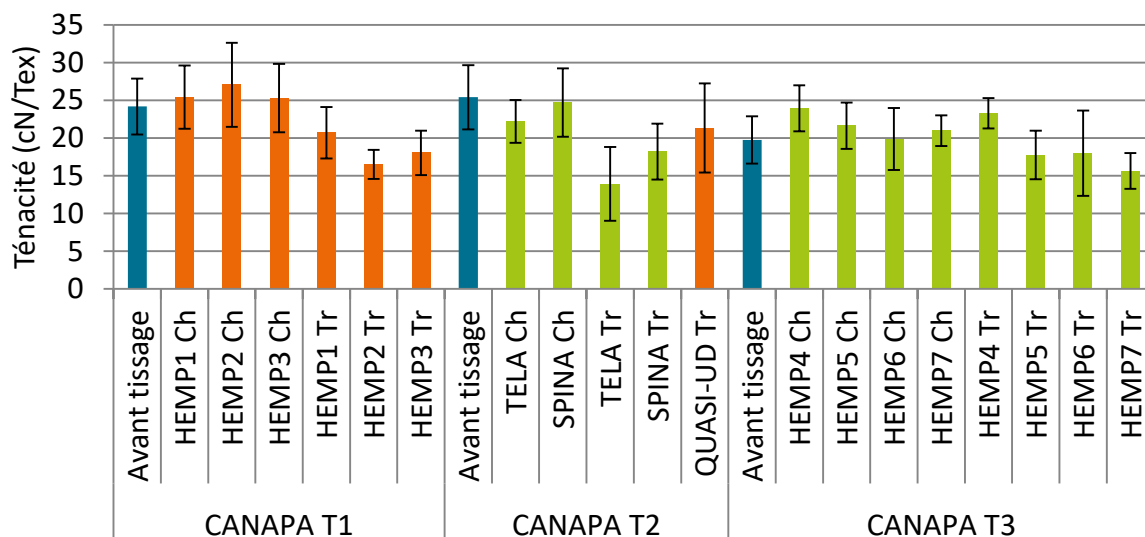


Figure 2-35 : Evolution de la ténacité à rupture des fils de chanvre pendant le tissage

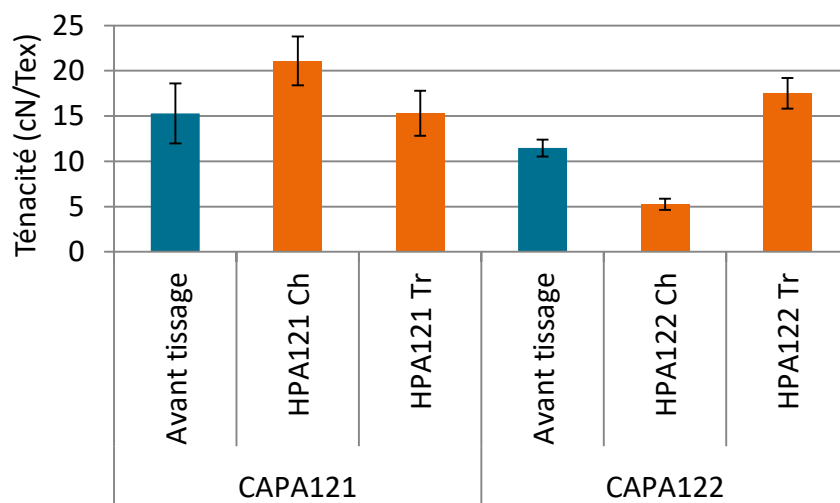


Figure 2-36 : Evolution de la ténacité à rupture des fils guipés pendant le tissage

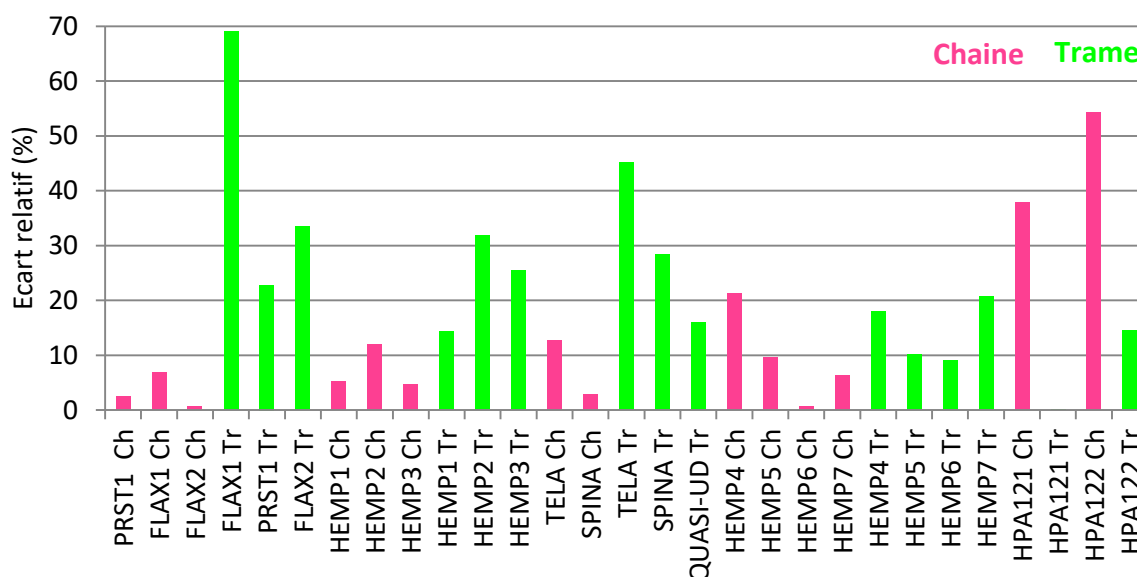


Figure 2-37 : Ecart relatif entre la ténacité avant et après tissage

L'impact du procédé de tissage sur la déformation à rupture des fils est analysé en Figure 2-38, Figure 2-39 et Figure 2-40 pour, respectivement, les fils de lin, de chanvre et les fils guipés. Pour les fils de lin et de chanvre, la déformation à rupture des fils utilisés en sens chaîne est semblable à celle mesurée avant tissage voir légèrement augmentée. Cette augmentation de la déformation correspond à la déformation permanente des fils, puisqu'ils sont sollicités en fatigue pendant le tissage, lors du mouvement des cadres.

Dans la direction trame, l'évolution de la déformation à rupture après tissage dépend de l'échelle utilisée pour la production de la préforme. En effet, pour les préformes produites à l'échelle laboratoire (en orange), la déformation à rupture est réduite après tissage. Comme pour la perte de ténacité après tissage, cette diminution est due à la détorsion des fils lors de leur enroulement sur la canette de la navette. La cohésion interfibres étant plus faible, elles vont se dissocier plus rapidement que lorsque la torsion du fil est plus importante. Dans le cas d'une production à l'échelle industrielle, la déformation à rupture est similaire avant et après tissage pour les fils utilisés dans les tissus HEMP4 à HEMP7. Cependant, elle est diminuée pour les fils utilisés en trame pour les tissus TELA et SPINA et augmentée pour la trame du tissu PRST1. Pour ces trois derniers tissus (TELA, SPINA et PRST1), il n'existe pas de certitude selon laquelle la bobine de « référence », utilisée pour les valeurs avant tissage, soit issue du même lot que celles utilisées pour la réalisation de la préforme, ce qui pourrait expliquer ces différences.

Enfin, dans le cas des fils guipés, que ce soit pour le fil CAPA121 ou le fil CAP122, la déformation à rupture est dans l'ensemble supérieure ou égale à celle mesurée avant tissage. Outre l'irrégularité du fil produit, qui pourrait expliquer ces différences, la compression du fil au sein de la structure tissée va permettre au multifilament de s'enchevêtrer avec les fibres de chanvre, entraînant une augmentation de la déformation à rupture. L'ondulation des fils guipés au sein des tissus étant plus importante que celle des

autres fils (voir Figure 2-32 et Figure 2-33), cet enchevêtrement multifilament/fibres de chanvre est favorisé par les différentes courbures du fil.

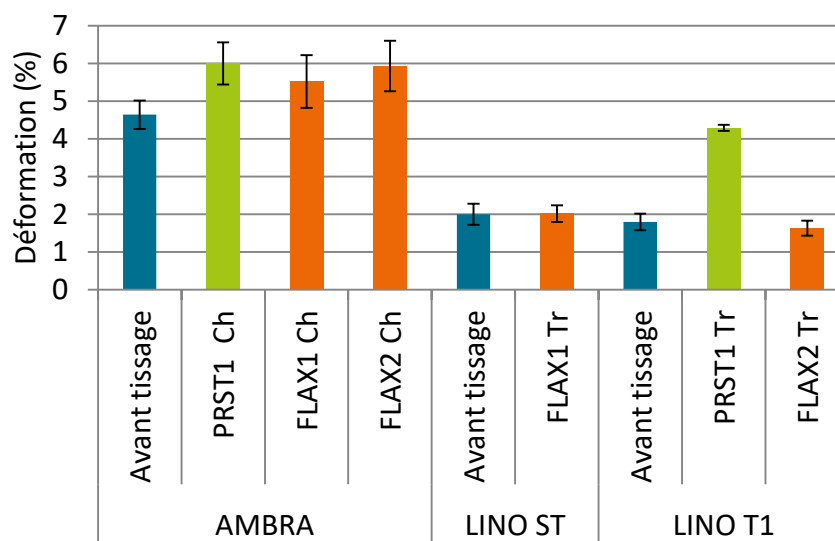


Figure 2-38 : Evolution de la déformation à rupture des fils de lin pendant le tissage

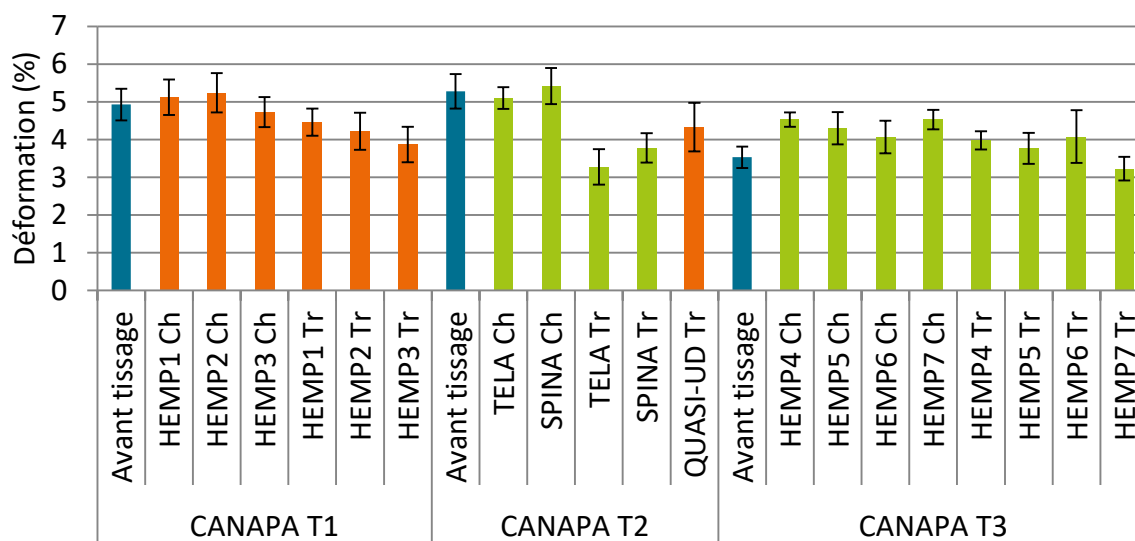


Figure 2-39 : Evolution de la déformation à rupture des fils de chanvre pendant le tissage

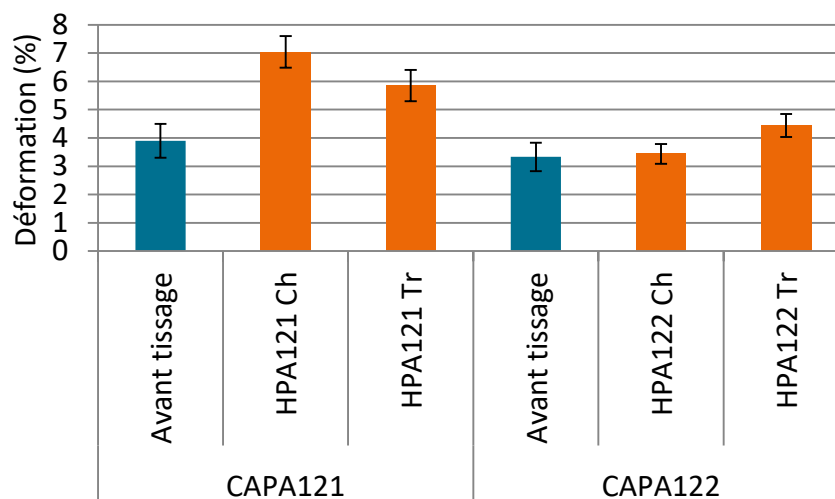


Figure 2-40 : Evolution de la déformation à rupture des fils guipés pendant le tissage

Le dernier paramètre étudié dans l'étude de l'impact du procédé de tissage sur les fils utilisés est la rigidité, au travers de l'analyse de la pente 2 (dans la zone linéaire) de la courbe « effort-déformation ». Les valeurs de pente sont rassemblées en Figure 2-41 pour les fils de lin, en Figure 2-42 pour les fils de chanvre et en Figure 2-43 pour les fils guipés. La déformation à rupture n'étant pas significativement impactée par le procédé de tissage, en comparaison de la ténacité à rupture, l'évolution de la rigidité des fils au cours du tissage suit les observations avancées pour la ténacité à rupture avec un effet moins prononcé pour les fils de trame utilisés à l'échelle laboratoire. En effet, la déformation à rupture ayant également diminué pour ces fils, la diminution de la rigidité est moins importante. Les deux paramètres mécaniques les plus impactés par le procédé de tissage sont donc la ténacité à rupture des fils et leur rigidité.

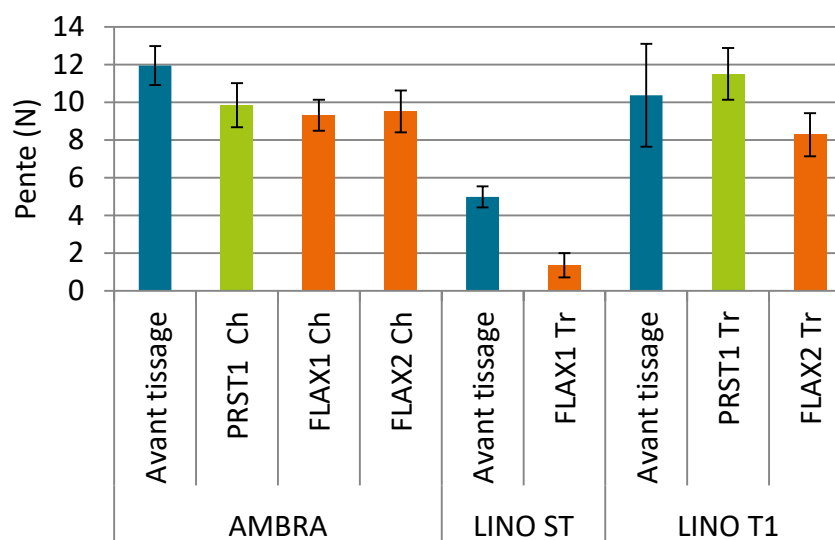


Figure 2-41 : Evolution de la pente des fils de lin pendant le tissage

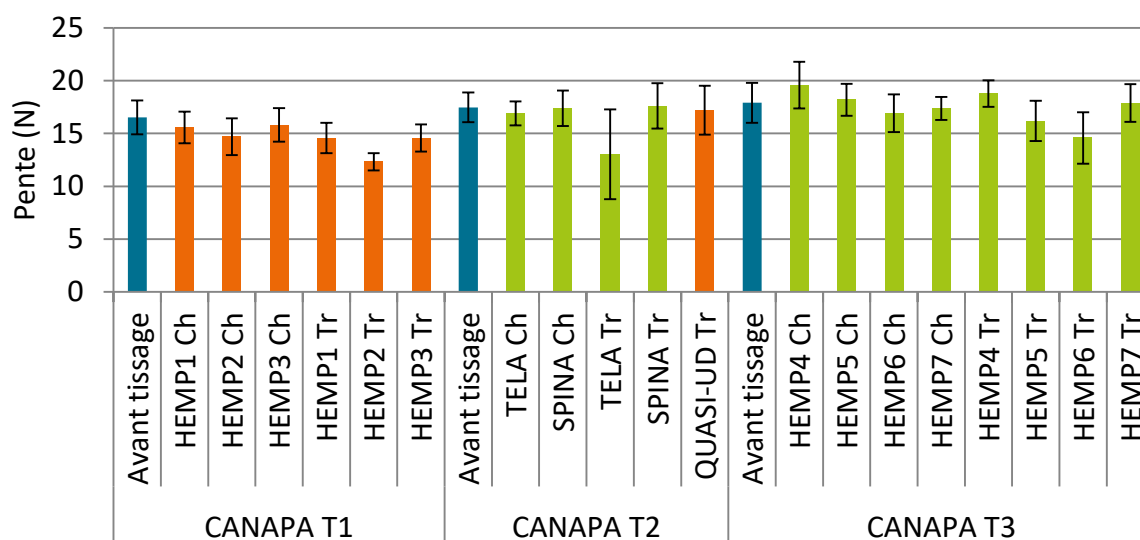


Figure 2-42 : Evolution de la pente des fils de chanvre pendant le tissage

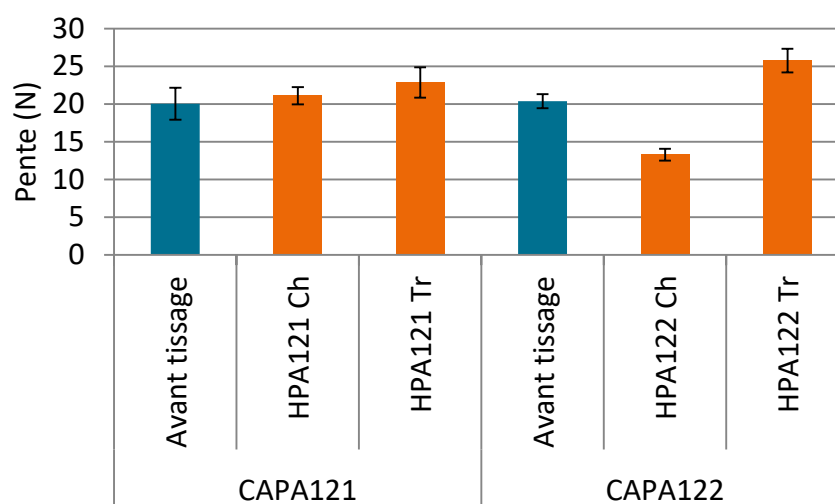


Figure 2-43 : Evolution de la pente des fils guipés pendant le tissage

5.3 Impact sur les propriétés des fibres

L'impact du procédé de tissage est également évalué à l'échelle des fibres grâce à des essais d'IFBT effectués sur certains fils extraits des renforts tissés en chanvre HEMP1, HEMP2 et HEMP3 ainsi que du renfort quasi-unidirectionnel QUASI-UD. Les essais IFBT sur les mèches CANAPA T1 (utilisées en sens chaîne et trame pour les renforts HEMP1, HEMP2 et HEMP3) avant tissage et CANAPA T2 (utilisées en trame pour le renfort QUASI-UD) avant et après tissage ont été réalisés à l'ENSAIT tandis que ceux réalisés sur les mèches CANAPA T1 après tissage ont été réalisés à l'Institut FEMTO-ST, de l'Université de Franche-Comté, partenaire du projet SSUCHY. La fabrication des éprouvettes et le protocole de caractérisation sont similaires entre les deux laboratoires. La composition des éprouvettes IFBT est présentée en Table 2-11. Dans l'ensemble les volumes de fibres sont acceptables, compris entre environ 31% et 41%, tout comme les volumes de porosités compris entre 1,3%

et 5,5%. Néanmoins, les éprouvettes réalisées avec les mèches CANAPA T2 possèdent une porosité plus élevée, de 11,7% pour les mèches avant tissage et 8% pour les mèches après tissage. Cette porosité plus importante a été précédemment attribuée (au paragraphe 4.3.2) au traitement chimique appliqué sur les mèches CANAPA T2. La loi des mélanges utilisée est la loi modifiée identifiée « (2-14) » au paragraphe 4.2.2.

Table 2-11 : Composition des éprouvettes IGBT pour l'étude de l'influence du procédé de tissage sur les propriétés des fibres

Matière		V _f (%)	V _m (%)	V _p (%)	W _f (%)
CANAPA T1	Avant tissage	39,8 ± 2,1	57,7 ± 4,0	2,5 ± 2,2	47,3 ± 3,0
	HEMP1 Ch	36,0 ± 3,1	60,9 ± 3,6	3,1 ± 0,7	43,3 ± 3,5
	HEMP1 Tr	38,1 ± 1,3	56,4 ± 1,6	5,5 ± 0,8	46,7 ± 1,5
	HEMP2 Ch	40,2 ± 1,4	58,8 ± 3,0	1,3 ± 1,4	47,0 ± 2,1
	HEMP2 Tr	30,9 ± 1,0	67,5 ± 1,5	1,6 ± 0,7	37,2 ± 1,3
	HEMP3 Ch	37,3 ± 2,3	58,5 ± 3,5	4,2 ± 1,5	45,3 ± 3
	HEMP3 Tr	39,5 ± 2,8	58,5 ± 3,4	2,0 ± 1,5	46,7 ± 3,1
CANAPA T2	Avant tissage	38,6 ± 2,9	49,7 ± 2,2	11,7 ± 4,9	50,2 ± 1,2
	QUASI-UD Tr	39,0 ± 1,0	53,0 ± 1,7	8,0 ± 1,7	48,9 ± 1,2

Les valeurs des modules E_{f1} et E_{f2} des fibres avant et après tissage sont comparées en Figure 2-44. Leur évolution selon les différentes directions est similaire entre E_{f1} et E_{f2} . Pour le renfort quasi-unidirectionnel QUASI-UD, les modules des fibres après tissage (issues des mèches CANAPA T2) est identique avant et après production du renfort. Ainsi, les fibres ne sont pas endommagées par le procédé de tissage, ce qui est un des critères recherché avec le recours à un renfort quasi-unidirectionnel. Dans le cas des renforts tissés, la variation de module dépend de la direction dans laquelle les mèches CANAPA T1 ont été utilisées. Dans la direction chaîne des renforts tissés, les modules des fibres sont inchangés pour HEMP2 et légèrement diminués après tissage pour les renforts HEMP1 et HEMP3. Cette diminution de module est la conséquence d'un léger endommagement des mèches pendant le tissage et de l'ondulation résiduelle des fils après tissage, illustrée sur la Figure 2-45 et quantifiée par un embuvage un peu plus important que pour le renfort HEMP2 (Figure 2-32). Cette ondulation résiduelle, non prise en compte dans la loi des mélanges, entraîne une légère désorientation des fibres pouvant conduire à une diminution du module recalculé.

Dans la direction trame, les modules des fibres restent inchangés après tissage pour les renforts HEMP1 et HEMP3 mais sont supérieurs pour le tissu HEMP2 après tissage. Cette augmentation de module peut être attribuée à une rigidification des fibres du fait des charges répétées occasionnées pendant le tissage. Ce phénomène, déjà observé dans la littérature par Placet et al. [32], peut permettre d'atténuer les effets dus à la désorientation des fibres entraînée par l'ondulation résiduelle des fils. Ainsi, le procédé de tissage entraîne dans la majeure partie des cas une faible dégradation des propriétés mécaniques des fibres pour les renforts tissés. Le tissage d'un renfort quasi-unidirectionnel, comme attendu, ne dégrade pas les propriétés des mèches.

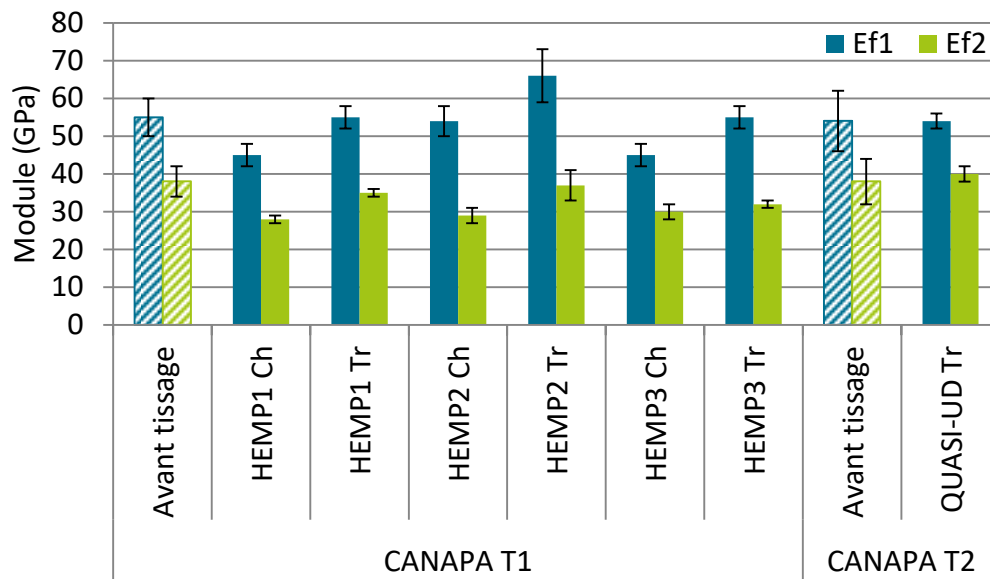


Figure 2-44 : Modules (Ef1 et Ef2) des fibres avant et après tissage (renforts HEMP1, HEMP2, HEMP3 et QUASI-UD)



Figure 2-45 : Ondulation résiduelle des fils après tissage

6 Conclusion

Dans ce chapitre, la tissabilité des fibres naturelles a été tout d’abord étudiée. Le terme tissabilité désigne le fait de pouvoir rassembler et aligner les fibres naturelles avec une ténacité suffisante, une pilosité la plus réduite possible pour pouvoir réaliser des préformes par tissage.

Les premières matières disponibles au démarrage du projet SSUCHY étaient des fils retordus et des mèches sans traitement chimique. Les fils retordus présentent les conditions requises pour être utilisés en tissage, mais ont un fort taux de torsion qui pourra être problématique en terme d’imprégnation lors de la mise en œuvre du matériau composite. Les mèches sans traitement chimiques, même si elles ont une torsion plus faible que les fils, permettant une meilleure imprégnation à l’échelle composite, ont une forte pilosité et une trop faible ténacité pour pouvoir être utilisées en tissage. Il a donc fallu envisager une amélioration de leurs propriétés pour permettre leur tissabilité, et notamment leur utilisation dans la direction chaîne, la direction trame n’étant pas aussi exigeante en terme de ténacité appliquée sur le fil.

L’optimisation des propriétés des mèches, et notamment l’amélioration de leur ténacité et la diminution de leur pilosité, a été d’abord envisagée avec le recours à un traitement chimique similaire à un traitement de mercerisation classiquement utilisé en industrie textile. Grâce à ce traitement, les mèches de chanvre ont obtenu les propriétés mécaniques suffisantes pour pouvoir être tissées. Les mèches de lin ont, elles aussi, vu leurs propriétés améliorées, mais pas suffisamment pour permettre la réalisation d’une préforme constituée que de mèches de lin. Le traitement chimique permettant d’améliorer la tissabilité des fibres de chanvre, il devra être optimisé en termes de temps et températures de mise en œuvre afin de diminuer son impact environnemental. La technologie de guipage a également été étudiée pour améliorer la tissabilité des mèches de chanvre. L’enroulement des mèches de chanvre par un multifilament de polyamide 12 (PA12) a permis de réduire de manière conséquente la pilosité des mèches de chanvre et d’augmenter leur ténacité pour le tissage. Outre l’amélioration de la tissabilité des fibres de chanvre sans avoir recours à un traitement chimique, le guipage permet également de produire un fil comélé avec un polymère qui deviendra par la suite matrice du matériau composite. Le choix du polymère utilisé pour le guipage doit donc se faire en accord avec le cahier des charges de la pièce composite finale, mais également en fonction des propriétés des fibres naturelles pour ne pas les dégrader si une température trop importante est requise lors de la thermocompression. Par la suite, cette technologie de guipage pourra être optimisée en envisageant l’utilisation d’un polymère thermoplastique biosourcé, tel que le polyamide 11 (PA11) par exemple.

Ce chapitre s'est également focalisé sur l'identification expérimentale des propriétés des produits élaborés, en développant une approche multi-échelle, qui à ce stade du manuscrit, se limite au suivi des propriétés, des fils/mèches et des fibres les constituant, lors des différentes étapes d'élaboration des renforts.

A l'échelle des fibres, les propriétés sont déterminées grâce à la méthode dite de l'« Impregnated Fibre Bundle Test ». Les essais mis en place ont permis d'établir le suivi, à cette échelle des fibres, du module en fonction de la torsion, des traitements chimiques mais également du tissage. La détermination du module des fibres s'effectuant par l'utilisation de la loi des mélanges, cette dernière a été modifiée par l'ajout de facteurs permettant de considérer les effets de la torsion, entraînant une désorientation des fibres, et de la porosité des éprouvettes composites. Si la prise en compte de la porosité a été étudiée dans la littérature, par la loi modifiée, l'influence de la torsion des fibres au sein de mèches/fils eux-mêmes retordus demeure plus complexe. Ce travail a permis d'étudier plus finement les deux modèles considérant ce facteur d'orientation des fibres et de les appliquer aux différentes matières supports de ce travail. A de faibles taux de torsion, les deux méthodes pour calculer le facteur d'orientation des fibres donnent des estimations similaires, mais la méthode la plus précise des deux, décrivant la structure interne de la mèche, donne de meilleurs résultats pour des forts taux de torsions. Ainsi, pour éviter de sous-estimer les propriétés des fibres obtenues par la méthode de l'IFBT, il est nécessaire de prendre en compte les effets de la porosité des éprouvettes composites et de la torsion des mèches. Une fois cette méthode mise en place, elle a été utilisée pour évaluer l'impact du traitement chimique appliqué sur les mèches sur les propriétés des fibres. En effet, les traitements du type de ceux appliqués dans ces travaux sont connus dans la littérature pour dégrader les propriétés des fibres. Néanmoins, il a été montré que les propriétés des fibres issues des mèches traitées sont similaires à celles des fibres issues des mèches sans traitement. Ainsi, le recours au traitement chimique pour améliorer la tissabilité des fibres de lin et de chanvre est validé, puisqu'il permet d'améliorer la ténacité des mèches et de diminuer leur pilosité sans pour autant dégrader les propriétés des fibres. A cette échelle les modules des fibres après tissage ont également été étudiés pour quelques renforts tissés et le renfort quasi-unidirectionnel. Le procédé de tissage entraîne dans la plupart des cas une faible diminution des modules, principalement due aux dégradations suite aux frottements lors de la mise en œuvre du procédé textile et à la désorientation des fibres causée par l'ondulation des fils au sein du tissu. Dans le cas du renfort quasi-unidirectionnel, les fibres ne sont pas endommagées. Les propriétés analysées se sont focalisées pour les fibres aux modules. Les perspectives seraient d'étendre ce suivi aux propriétés géométriques (finesse, longueur) mais également en termes de résistances en traction. Le travail d'analyse des paramètres prenant en compte la torsion, dans la loi des mélanges, et leurs influences sur les modules pourra être prolongé en termes de contraintes.

A l'échelle des fils/mèches la caractérisation des propriétés, textiles et mécaniques a nécessité la mise en place d'une chaîne d'identification de ces caractéristiques qui a été

déployée pour un grand nombre de fils/mèches élaborés à l'échelle industrielle et/ou laboratoire. Ces propriétés concernent les caractéristiques textiles (finesse, régularité, torsion, embuvage/retrait) mais également mécaniques en traction. Cette démarche expérimentale dans le cadre du projet SSUCHY a permis l'établissement de fiches techniques associées à chaque produit. Tout comme à l'échelle des fibres, cette approche expérimentale a permis d'analyser le suivi des propriétés des fils/mèches lors des différentes étapes, traitement/guipage pour la tissabilité, évoquée ci-dessus, mais également lors du procédé de tissage afin de comparer ces propriétés avant et après tissage, et par conséquent d'identifier les dégradations issues de cette technologie textile. Quelque que soit la direction du tissu (chaîne ou trame) ou la matière du fil (lin, chanvre ou guipé), le titre du fil ne varie pas, ou s'il varie, ce n'est pas une conséquence du procédé de tissage. En revanche, la torsion des fils est modifiée ou non par le tissage suivant la direction et le procédé utilisé. Dans tous les cas, les fils utilisés en direction chaîne ne subissent pas de modification de leur torsion. Pour les fils utilisés en sens trame, ceux ayant été utilisés à l'échelle laboratoire (tissage manuel et non automatique) ont vu leur torsion diminuée, ou augmentée pour l'un d'entre eux, du fait de la nécessité de préparer une canette pour l'insertion de la trame au moyen d'une navette, tandis que les fils utilisés sur un procédé automatique (à l'échelle industrielle) n'ont pas subi de modification de leur torsion. Enfin, en termes de propriétés mécaniques (ténacité à rupture, déformation à rupture et rigidité), les fils de chaîne ainsi que les fils de trame utilisés à l'échelle industrielle n'ont pas subi de grosses dégradations. Les fils de trame utilisés à l'échelle laboratoire ont, quant à eux, subi une diminution de leurs performances en traction, principalement liée à l'évolution de la torsion. Il a également été mis en évidence que le traitement chimique et le guipage permettent une meilleure protection du fil face aux agressions du tissage. Ainsi, les fils sont, pour la plupart, peu endommagés par le procédé de tissage, et lorsqu'ils le sont, il s'agit principalement d'un phénomène de détorsion qui peut être bénéfique lors du passage à l'échelle composite, puisque les fibres seront réalignées dans le sens longitudinal du fil. L'évolution de la torsion de la mèche utilisée en âme des fils guipés pourra, par la suite, être étudiée, dans l'objectif de voir si cette dernière est modifiée ou non par le guipage et/ou le tissage. Des essais de traction en fatigue pourront également être réalisés, afin de simuler les effets du tissage sur les fils et de prédire leur comportement après tissage.

Ainsi, au travers des diverses méthodes présentées, la tissabilité des fibres naturelles a été étudiée et le recours au traitement chimique et au guipage ont été explicités. Les matières supports de cette étude ont été analysées afin de disposer des caractéristiques requises pour permettre la réalisation de préformes pour matériaux composites par le procédé de tissage. Dans le chapitre suivant, différentes préformes seront tissées à l'échelle laboratoire et industrielle, puis analysées afin d'étudier l'influence des paramètres de tissage sur leurs propriétés. Différentes caractérisations seront menées, de l'étude de leurs propriétés textiles jusqu'à leur déformabilité en passant par leur comportement en traction

et en cisaillement plan. A terme, il sera possible de choisir les préformes les mieux adaptées au cahier des charges de chaque pièce composite finale.

Références

- [1] AFNOR, NF G07-316 - Textiles - Tests of yarns - Determination of linear density., 1988.
- [2] AFNOR, NF G07-079 - Textiles - Testing threads - Determining the twisting of threads by untwisting/re-twisting with a double re-test, 2011.
- [3] F. Omrani, Caractérisation de la variabilité des propriétés mécaniques aux échelles fils, renforts et composites à base de lin, Thèse, Université de Lille 1, 2017. <http://www.theses.fr/2017LIL10085> (accessed December 21, 2018).
- [4] AFNOR, NF EN ISO 2062 - Textiles - Yarns from packages - Determination of single-end breaking force and elongation at break using constant rate of extension (CRE) tester, 2010.
- [5] A. Barbulée, J.-P. Jernot, J. Bréard, M. Gomina, Damage to flax fibre slivers under monotonic uniaxial tensile loading, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 64 (2014) 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.04.024>.
- [6] B. Madsen, P. Hoffmeyer, A.B. Thomsen, H. Lilholt, Hemp yarn reinforced composites – I. Yarn characteristics, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 38 (2007) 2194–2203. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.06.001>.
- [7] J.M.F.A. Blanchard, A.J. Sobey, J.I.R. Blake, Multi-scale investigation into the mechanical behaviour of flax in yarn, cloth and laminate form, *Compos. Part B Eng.* 84 (2016) 228–235. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.086>.
- [8] S. Goutianos, T. Peijs, The optimisation of flax fibre yarns for the development of high-performance natural fibre composites, *Adv. Compos. Lett.* 12 (2003) 237–241.
- [9] D.U. Shah, P.J. Schubel, M.J. Clifford, Modelling the effect of yarn twist on the tensile strength of unidirectional plant fibre yarn composites, *J. Compos. Mater.* 47 (2013) 425–436. <https://doi.org/10.1177/0021998312440737>.
- [10] CAMPUSplastics | Fiche technique Rilsamid® AMNO TLD, (n.d.). https://www.campusplastics.com/campus/fr/datasheet/Rilsamid%C2%AE+AMNO+TLD/AR_KEMA/179/d6aedf80 (accessed February 6, 2020).
- [11] L. Marischal, A. Cayla, G. Lemort, C. Campagne, É. Devaux, Influence of melt spinning parameters on electrical conductivity of carbon fillers filled polyamide 12 composites, *Synth. Met.* 245 (2018) 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2018.08.003>.
- [12] Arkema, Rilsamid® Polyamide 12, (n.d.). <https://www.arkema.com/en/products/product-finder/product-viewer/Rilsamid-Polyamide-12-Resin/> (accessed February 6, 2020).
- [13] European Linen & Hemp, (n.d.). <http://www.mastersoflinen.com/> (accessed November 8, 2019).
- [14] J.-Y. Tinevez, N. Perry, J. Schindelin, G.M. Hoopes, G.D. Reynolds, E. Laplantine, S.Y. Bednarek, S.L. Shorte, K.W. Eliceiri, TrackMate: An open and extensible platform for single-particle tracking, *Methods.* 115 (2017) 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2016.09.016>.
- [15] F. Bensadoun, I. Verpoest, J. Baets, J. Müssig, N. Graupner, P. Davies, M. Gomina, A. Kervoelen, C. Baley, Impregnated fibre bundle test for natural fibres used in composites, *J. Reinf. Plast. Compos.* 36 (2017) 942–957. <https://doi.org/10.1177/0731684417695461>.
- [16] F. Bensadoun, In-service behaviour of flax fibre reinforced composites for high performance applications, Thèse, KU Leuven, 2016.
- [17] J. Summerscales, N. Dissanayake, A. Virk, W. Hall, A review of bast fibres and their composites. Part 2 – Composites, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 41 (2010) 1336–1344. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.05.020>.
- [18] B. Madsen, A. Thygesen, H. Lilholt, Plant fibre composites – porosity and volumetric interaction, *Compos. Sci. Technol.* 67 (2007) 1584–1600. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.07.009>.

- [19] B. Madsen, A. Thygesen, H. Lilholt, Plant fibre composites – porosity and stiffness, *Compos. Sci. Technol.* 69 (2009) 1057–1069. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.01.016>.
- [20] M. Aslan, S. Mehmood, B. Madsen, Effect of consolidation pressure on volumetric composition and stiffness of unidirectional flax fibre composites, *J. Mater. Sci.* 48 (2013) 3812–3824. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7182-3>.
- [21] B. Madsen, *Properties of Plant Fiber Yarn Polymer Composites: An Experimental Study*, Thèse, Technical University of Denmark, 2004.
- [22] H.L. Cox, The elasticity and strength of paper and other fibrous materials, *Br. J. Appl. Phys.* 3 (1952) 72–79. <https://doi.org/10.1088/0508-3443/3/3/302>.
- [23] C.L. Tucker III, E. Liang, Stiffness predictions for unidirectional short-fiber composites: Review and evaluation, *Compos. Sci. Technol.* 59 (1999) 655–671. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(98\)00120-1](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(98)00120-1).
- [24] A. Bourmaud, J. Beaugrand, D.U. Shah, V. Placet, C. Baley, Towards the design of high-performance plant fibre composites, *Prog. Mater. Sci.* 97 (2018) 347–408. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.05.005>.
- [25] J. Summerscales, N.P.J. Dissanayake, A.S. Virk, W. Hall, A review of bast fibres and their composites. Part 1 – Fibres as reinforcements, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 41 (2010) 1329–1335. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.06.001>.
- [26] M. Grégoire, B. Barthod-Malat, L. Labonne, P. Evon, E. De Luycker, P. Ouagne, Investigation of the potential of hemp fibre straws harvested using a combine machine for the production of technical load-bearing textiles, *Ind. Crops Prod.* (2019) 111988. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111988>.
- [27] R. Sepe, F. Bollino, L. Boccarusso, F. Caputo, Influence of chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites, *Compos. Part B Eng.* 133 (2018) 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.030>.
- [28] H.N. Dhakal, Z. Zhang, The use of hemp fibres as reinforcements in composites, in: *Biofiber Reinf. Compos. Mater.*, Woodhead Publishing, 2015: pp. 86–103. <https://doi.org/10.1533/9781782421276.1.86>.
- [29] L. Lee, S. Rudov-Clark, A.P. Mouritz, M.K. Bannister, I. Herszberg, Effect of weaving damage on the tensile properties of three-dimensional woven composites, *Compos. Struct.* 57 (2002) 405–413. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00108-3](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00108-3).
- [30] S. Rudov-Clark, A.P. Mouritz, L. Lee, M.K. Bannister, Fibre damage in the manufacture of advanced three-dimensional woven composites, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 34 (2003) 963–970. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(03\)00213-6](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(03)00213-6).
- [31] F. Omrani, P. Wang, D. Soulat, M. Ferreira, Mechanical properties of flax-fibre-reinforced preforms and composites: Influence of the type of yarns on multi-scale characterisations, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 93 (2017) 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.11.013>.
- [32] V. Placet, O. Cissé, M. Lamine Boubakar, Nonlinear tensile behaviour of elementary hemp fibres. Part I: Investigation of the possible origins using repeated progressive loading with in situ microscopic observations, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 56 (2014) 319–327. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.11.019>.

Chapitre 3 : Caractérisation des renforts en fibres naturelles

Table des matières

1	Introduction.....	146
2	Panorama des différents renforts	147
2.1	Production des renforts par tissage	147
2.2	Propriétés textiles des renforts	152
2.2.1	Masse surfacique des renforts	152
2.2.2	Epaisseur des renforts.....	153
2.2.3	Perméabilité à l'air des renforts.....	154
2.2.4	Conclusion	155
3	Etude des propriétés en traction des renforts.....	156
3.1	Présentation de l'essai de traction des renforts	156
3.2	Caractérisation en traction des renforts	158
3.2.1	Effort maximal en traction des renforts.....	158
3.2.2	Rigidité en traction des renforts	161
3.2.3	Perte d'ondulation des renforts.....	162
3.2.4	Déformation à l'effort maximal des renforts	164
3.2.5	Conclusion	165
4	Etude de la tenue en flexion à l'état sec	166
4.1	Présentation du dispositif de caractérisation.....	166
4.2	Etude de la flexion des tissus à l'état sec	167
5	Etude du comportement en cisaillement dans le plan au moyen de l' « Uniaxial Bias-Extension test »	169
5.1	Mise en place de l'« Uniaxial Bias-Extension test »	169
5.2	Résultats obtenus	172
5.2.1	Force normalisée de cisaillement.....	173
5.2.2	Point d'inflexion de la courbe « Effort – Déplacement ».....	174
5.2.3	Angles de blocage.....	175

5.2.4	Conclusion	177
6	Etude de la mise en forme des renforts.....	178
6.1	Présentation du banc d'emboutissage	178
6.2	Etude du comportement des renforts lors d'un emboutissage par diverses formes	182
6.2.1	Force maximale d'emboutissage.....	182
6.2.2	Avancement des renforts lors des essais d'emboutissage	185
6.2.3	Angles de cisaillement.....	189
6.2.4	Défauts lors de la mise en forme	190
6.2.5	Conclusion	194
6.3	Etude de l'influence de l'armure et de la densité trame lors de l'emboutissage par divers poinçons.....	194
6.3.1	Force maximale d'emboutissage.....	195
6.3.2	Avancement des renforts lors des essais d'emboutissage	196
6.3.3	Angles de cisaillement.....	202
6.3.4	Défauts lors de la mise en forme	203
6.3.5	Conclusion	207
7	Conclusion	208
	Références.....	210

1 Introduction

Suite à l'étude de la tissabilité des fibres naturelles, soit par la réalisation de fils retordus, de fils comélées ou par le traitement chimique de mèches, l'élaboration de renforts tissés peut être effectuée. De nombreux paramètres peuvent être choisis lors du tissage des renforts, et notamment en termes de natures de fils, d'armures ou de densités de fils en sens chaîne ou trame. Ces différents paramètres auront une incidence sur les propriétés des renforts identifiées à l'échelle sèche, dans le cadre de ce chapitre, mais également à l'échelle composite. En fonction des différentes propriétés pour chaque configuration de renfort, il est ensuite possible de choisir le renfort le mieux adapté au cahier des charges de la pièce composite finale.

Pour débiter ce chapitre, les différents renforts tissés seront présentés, avec le détail des choix de paramètres effectués, et leurs propriétés textiles seront étudiées. Dans le cadre de la démarche du WP5 du programme SSUCHY, dans lequel se positionnent ces travaux, ces renforts sont, pour la plupart, élaborés dans un premier temps, à une échelle laboratoire pour étudier la faisabilité de leur réalisation, puis caractérisés et enfin leur production est industrialisée dans les usines de Linificio e Canapificio Nazionale (LCN). Suite à cette production, à l'échelle industrielle, il est possible de comparer les propriétés des produits issus des 2 échelles de production, mais également d'alimenter en renforts tissés les partenaires du projet SSUCHY, pour leurs développements dans les différents WP. L'étude des propriétés textiles (masse surfacique, épaisseur et perméabilité à l'air) de l'ensemble des renforts permet d'établir les caractéristiques générales de chaque renfort, utilisé notamment pour la mise en œuvre du composite. Puis le comportement en traction des renforts est analysé. Le comportement en flexion à l'état sec est ensuite étudié, pour identifier la souplesse des tissus, relativement à son influence sur la génération de plis lors de l'étape de préformage. Par la suite, le comportement en cisaillement plan des renforts est caractérisé au moyen d'essais de traction sur des éprouvettes coupées à 45°, dans le cadre de l'« Uniaxial Bias-Extension Test ». La capacité des renforts tissés à cisailer est l'une des propriétés majeures pour la déformabilité sur des formes complexes relativement à d'autres structures de renforts, comme les non-tissés ou les unidirectionnels par exemple. Ces premières caractérisations mécaniques permettent d'étudier de manière indépendante le comportement des renforts lors des principales sollicitations lors de la mise en œuvre des renforts pour la fabrication de matériaux composites. Enfin des essais d'emboutissage, permettant de combiner l'ensemble des sollicitations déjà évoquées (traction, cisaillement, aptitude à résister aux défauts) et de reproduire au mieux la mise en forme des renforts avec des formes plus ou moins complexes (hémisphérique et cubiques dans le cadre de cette étude) sont menés.

2 Panorama des différents renforts

2.1 Production des renforts par tissage

Avec les fils présentés dans le chapitre précédent et dont la tissabilité a été analysée, différents renforts ont été élaborés. La démarche générale de production des renforts tissés dans le cadre du projet SSUCHY est la suivante. Les tissus sont d’abord réalisés à une échelle laboratoire sur un métier manuel dans les locaux de l’ENSAIT, présenté au paragraphe 4.2.1 du Chapitre 1, pour évaluer la possibilité de tisser à une échelle d’échantillonnage. Une fois la faisabilité démontrée (grâce à la production de tissu et l’indentification des propriétés), les paramètres de production (principalement le choix des fils, l’armure et les densités de fils) sont transmis pour une production à une échelle industrielle dans les ateliers de Linificio e Canapificio Nazionale (LCN). Cette production industrielle permet de valider les choix effectués en laboratoire, d’analyser si le changement de métier à tisser et d’échelle de production influe sur les propriétés des tissus, mais également d’alimenter les partenaires du projet SSUCHY en renforts, pour la réalisation de plaques composites et de démonstrateurs. Les renforts élaborés à l’échelle laboratoire seront nommés renforts « ENSAIT » et les renforts produits à l’échelle industrielle renforts « LCN ». Les différents tissus ainsi réalisés sont présentés en Table 3-1 pour la production à l’échelle laboratoire et en Table 3-2 pour la production à l’échelle industrielle. Des images de la face supérieure de chaque renfort sont également associées, respectivement, en Figure 3-1 et Figure 3-2 selon l’échelle de production. Pour tous les tissus élaborés à l’échelle laboratoire, une densité chaîne de 6 fils/cm a été choisie, tandis que pour les tissus à l’échelle industrielle, cette densité est de 6,5 fils/cm. Les densités trame, quant à elles, diffèrent entre les deux productions. En fonction des types et des densités de fils choisis, la fraction massique de fibres dans chaque direction par conséquent varie. En fonction de l’application souhaitée, il peut être bénéfique, ou non, de disposer d’un renfort équilibré, c’est-à-dire avec environ le même ratio de fibres dans les deux directions. Les fractions massiques de fibres dans les deux directions des tissus sont détaillées en Figure 3-3.

Les premières matières disponibles étant le fil retordu de lin (AMBRA) et les mèches de lin sans traitement (LINO ST), il a d’abord été envisagé un premier tissage 100% lin (FLAX1) avec l’utilisation de fils retordus en sens chaîne et l’insertion en trame de la mèche de lin sans traitement. La première armure choisie est une armure toile, armure la plus simple. Cependant, du fait de sa très faible ténacité (développée au chapitre précédent), l’utilisation de la mèche sans traitement (LINO ST) entraîne environ 50% de casses de fils de trame lors de son insertion. En plus d’être long et fastidieux, le tissage de cette mèche est inenvisageable à l’échelle industrielle. Un deuxième essai (FLAX2) a donc été réalisé après traitement chimique de cette mèche (LINO T1), avec toujours le fil retordu (AMBRA) en sens chaîne, diminuant ainsi le nombre de ruptures en production aux alentours de 1%, ce qui est nettement plus acceptable. Le tissu correspondant à ce produit, FLAX2, élaboré à l’échelle

industrielle est le tissu PRST1, réalisé avec des fils retordus dans la direction chaîne (AMBRA) et des mèches avec traitement dans la direction trame (LINO T1). Que ce soit à l'échelle laboratoire ou industrielle, la combinaison des fils retordus en sens chaîne et des mèches en sens trame associée à une armure toile permet d'obtenir une densité trame entre 5,5 et 6 fils/cm. L'utilisation de fils retordus en sens chaîne et de mèches en sens trame conduit à l'obtention de renforts déséquilibrés, avec une plus forte proportion de fibres en sens trame (Figure 3-3), du fait que le nombre de fibres en section de la mèche est plus important que dans le fil retordu (voir Chapitre 2). Ces trois tissus (FLAX1, FLAX2, PRST1) peuvent être utilisés en tant que renfort de matériaux composites, même si l'utilisation de fils retordus dans la direction chaîne entraîne une désorientation des fibres et pourra être source de défauts d'imprégnation lors de la mise en œuvre du matériau composite.

Avec la disponibilité de mèches de chanvre et leur traitement chimique (CANAPA T1), une campagne de tissage a été élaborée pour des renforts 100% chanvre en faisant varier l'armure de tissage. Trois tissus ont été produits, le premier (HEMP1) avec une armure toile, le second (HEMP2) avec une armure satin de 6 et le troisième (HEMP3) avec une armure sergé de 6, dans le but d'étudier l'influence de l'armure sur les propriétés des renforts. En variant l'armure, le nombre de points de liage pour un même nombre de fils diffère, et il est alors possible d'insérer plus ou moins de fils en direction trame pour une même unité de longueur. Avec l'armure toile, le fil de chaîne est lié tous les deux fils de trame tandis qu'avec une armure satin de 6 ou sergé de 6, le même fil de chaîne est lié tous les six fils de trame. Ainsi, la densité trame obtenue avec l'armure toile (HEMP1) est de 5 fils/cm, tandis qu'elle s'élève à 9,5 fils/cm pour les tissus HEMP2 et HEMP3. L'armure toile, du fait de l'utilisation des mêmes mèches et de sa densité de fils similaires entre les deux directions, permet d'obtenir un renfort équilibré (Figure 3-3). A l'inverse, avec les armures sergé et satin, les renforts sont plus déséquilibrés, avec environ 40% de fibres en sens chaîne et 60% de fibres en sens trame. A l'échelle industrielle, une première série de renforts 100% chanvre est réalisée avec une armure toile (TELA), en vue d'une comparaison avec le tissu HEMP1, et une armure sergé de 4 (SPINA). Malgré un nombre de points de liage situé juste entre celui obtenu pour une armure toile et celui obtenu pour une armure sergé de 6, la densité trame obtenue pour le sergé de 4 (8,5 fils/cm) est plus proche de celle obtenue pour le sergé de 6 (HEMP3). A l'échelle industrielle, la densité trame obtenue avec l'armure toile (TELA) est plus faible qu'à l'échelle laboratoire (HEMP1), ce qui conduit à l'obtention d'un renfort déséquilibré avec plus de fibres en sens chaîne (60%) qu'en sens trame (40%). Le déséquilibre obtenu avec l'armure sergé de 4 est semblable à celui obtenu à l'échelle laboratoire avec les armures satin de 6 et sergé de 6. Une seconde campagne de tissage 100% chanvre, à l'échelle industrielle est ensuite effectuée, avec des armures satin de 6 et sergé de 6, et en faisant varier la consigne de la densité trame introduite sur le métier automatique. Des renforts aux fortes densités trame, proches de celles obtenues sur métier manuel, ont été obtenus pour un satin de 6 (HEMP5) avec 8,7 fils/cm en trame et pour un sergé de 6 avec 9,5 fils/cm en trame (HEMP7). Des renforts aux densités trame plus faibles, 6

fils/cm, ont également été produits pour avoir des tissus plus équilibrés, avec un satin de 6 (HEMP4) et un sergé de 6 (HEMP6). Ainsi, pour les renforts HEMP4 et HEMP6, le ratio massique chaîne/trame de fibres s'approche de 50%/50% tandis qu'il est plus proche de 60%/40% avec les renforts HEMP5 et HEMP7 (Figure 3-3).

A l'échelle laboratoire, un tissu quasi-unidirectionnel (QUASI-UD), 100% chanvre, a été élaboré en utilisant un fil de chanvre (CANAPA) en sens chaîne pour lier les mèches de chanvre (CANAPA T2) insérées en sens trame. L'objectif de ce renfort est d'obtenir le maximum de fibres possible dans une direction privilégiée, ici la trame du fait des contraintes liées au métier utilisé, avec un choix de 20 mèches/cm. Une densité chaîne de 0,6 fils/cm est choisie pour permettre un maintien de la structure tout en introduisant le moins de fibres possibles dans cette direction. Ainsi le taux massique de fibres dans le renfort quasi-unidirectionnel est de 2% en chaîne pour 98% en trame (Figure 3-3). Ce renfort quasi-unidirectionnel étant un premier développement, il n'existe pas de renfort similaire, à ce jour, à l'échelle industrielle.

Enfin, toujours à l'échelle laboratoire, deux renforts comelés ont été réalisés avec les fils guipés dont la production a été présentée au chapitre précédent. Le tissu HPA121, correspond au premier essai réalisé avec le fil guipé CAPA121 et le second tissu HPA122 correspond à la solution optimisée pour le cahier des charges de l'application automobile du projet SSUCHY. Le renfort initial (HPA121) étant trop lourd et les essais réalisés lors du guipage n'ayant pas permis de réduire de manière conséquente la masse du fil guipé sans détériorer ses propriétés mécaniques, l'armure de tissage a été changée (satin de 4 au lieu d'un satin de 6) afin d'avoir plus de points de liage et réduire le nombre de fils insérés en sens trame. La densité trame est ainsi diminuée de 7,3 à 6,6 fils/cm. Du fait de la présence de chanvre et de PA12 dans les fils, le rapport massique de fibres chaîne/trame (non présenté en Figure 3-3) s'élève à 21%/27% pour le renfort HPA121 et 31%/34% pour le renfort HPA122. Ainsi, en termes de proportions de fibres, le renfort optimisé est plus équilibré que le renfort initial. Ces renforts n'ont pas encore fait l'objet d'une industrialisation, le tissu HPA122 a donc été réalisé en quantité plus importante pour pouvoir alimenter certains partenaires.

Table 3-1 : Renforts produits à l'échelle laboratoire

Tissu	Fils de chaîne	Fils de trame	Type de fil de chaîne	Type de fil de trame	Matière	Armure	Densité chaîne (fils/cm)	Densité trame (fils/cm)
FLAX1	AMBRA	LINO ST	Fil retordu	Mèche sans traitement	100% Lin	Toile	6	6
FLAX2	AMBRA	LINO T1	Fil retordu	Mèche avec traitement	100% Lin	Toile	6	5,8
HEMP1	CANAPA T1	CANAPA T1	Mèche avec traitement	Mèche avec traitement	100% Chanvre	Toile	6	5
HEMP2	CANAPA T1	CANAPA T1	Mèche avec traitement	Mèche avec traitement	100% Chanvre	Satin de 6	6	9,5
HEMP3	CANAPA T1	CANAPA T1	Mèche avec traitement	Mèche avec traitement	100% Chanvre	Sergé de 6	6	9,5
QUASI-UD	CANAPA	CANAPA T2	Fil retordu	Mèche avec traitement	100% Chanvre	Toile	0,6	20
HPA121	CAPA121	CAPA121	Fil guipé	Fil guipé	48% Chanvre 52% PA12	Satin de 6	6	7,3
HPA122	CAPA122	CAPA122	Fil guipé	Fil guipé	65% Chanvre 35% PA12	Satin de 4	6	6,6



Figure 3-1 : Images des renforts produits à l'échelle laboratoire

Table 3-2 : Renforts produits à l'échelle industrielle

Tissu	Fils de chaîne	Fils de trame	Type de fil de chaîne	Type de fil de trame	Matière	Armure	Densité chaîne (fils/cm)	Densité trame (fils/cm)
PRST1	AMBRA	LINO T1	Fil retordu	Mèche avec traitement	100% Lin	Toile	6,5	5,5
TELA	CANAPA T2	CANAPA T2	Mèche avec traitement	Mèche avec traitement	100% Chanvre	Toile	6,5	4,7
SPINA	CANAPA T2	CANAPA T2	Mèche avec traitement	Mèche avec traitement	100% Chanvre	Sergé de 4	6,5	8,5
HEMP4	CANAPA T3	CANAPA T3	Mèche avec traitement	Mèche avec traitement	100% Chanvre	Satin de 6	6,5	6
HEMP5	CANAPA T3	CANAPA T3	Mèche avec traitement	Mèche avec traitement	100% Chanvre	Satin de 6	6,5	8,7
HEMP6	CANAPA T3	CANAPA T3	Mèche avec traitement	Mèche avec traitement	100% Chanvre	Sergé de 6	6,5	6
HEMP7	CANAPA T3	CANAPA T3	Mèche avec traitement	Mèche avec traitement	100% Chanvre	Sergé de 6	6,5	9,5



Figure 3-2 : Images des renforts produits à l'échelle industrielle

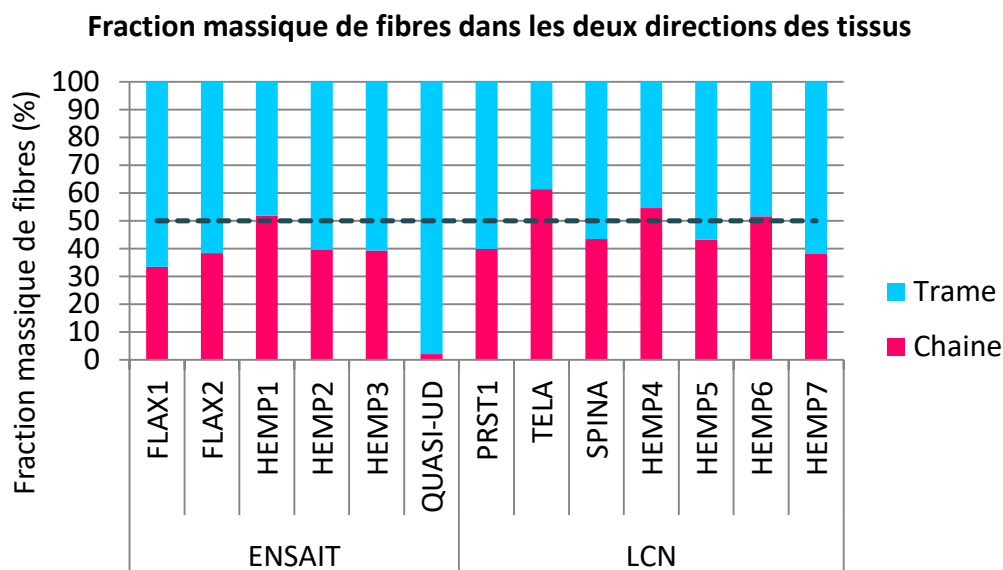


Figure 3-3 : Fraction massique de fibres dans les deux directions des tissus

2.2 Propriétés textiles des renforts

2.2.1 Masse surfacique des renforts

La masse surfacique est une caractéristique des renforts qui influe sur le taux de fibres pouvant être obtenu avec un pli. Pour chaque tissu, la masse surfacique est déterminée selon la norme NF EN 12127 [1], présentée en Figure 3-4, et comparée avec la densité trame. Les densités chaîne étant similaires (6,5 fils/cm pour les renforts produits à l'échelle industrielle et 6 fils/cm pour ceux issus de l'échelle laboratoire), la masse surfacique dépend essentiellement de la densité trame choisie, qui elle-même dépend de l'armure. En revanche, l'échelle de production (laboratoire ou industrielle) n'influe pas sur la masse surfacique des renforts, comme illustré sur la Figure 3-4. Lorsque des fils retordus sont utilisés en sens chaîne, ceux-ci étant plus fins, plus de fils peuvent être insérés en sens trame pour une même armure (armure toile) ce qui conduit à des masses surfaciques similaires entre des structures tissées avec des fils retordus en sens chaîne (PRST1, FLAX1 et FLAX2) et celles tissées avec des mèches en sens chaîne (TELA et HEMP1). Lorsque le choix d'armure entraîne une augmentation de la densité trame (HEMP2 et HEMP3 en comparaison de HEMP1) ou lorsque pour une même armure la densité trame augmente (HEMP4 et HEMP6 avec une plus faible densité que HEMP5 et HEMP7) la masse surfacique est elle aussi augmentée, du fait de l'augmentation de la masse des fils. De même, le renfort quasi-unidirectionnel QUASI-UD possédant un très grand nombre de mèches en sens trame, sa masse surfacique sera supérieure à celle des renforts tissés. Les deux renforts comelés (HPA121 et HPA122) possèdent également une masse surfacique plus élevée que celle des renforts 100% lin ou 100% chanvre, puisqu'ils sont constitués de fils guipés plus lourds que les fils 100% fibres naturelles. Néanmoins, le changement d'armure effectué lors du tissage du renfort HPA122 a permis de diminuer de près de 20% sa masse surfacique. Ainsi, en fonction de l'armure

utilisée pendant le tissage et de la densité trame choisie, il est possible de faire varier le taux massique de fibres des renforts.

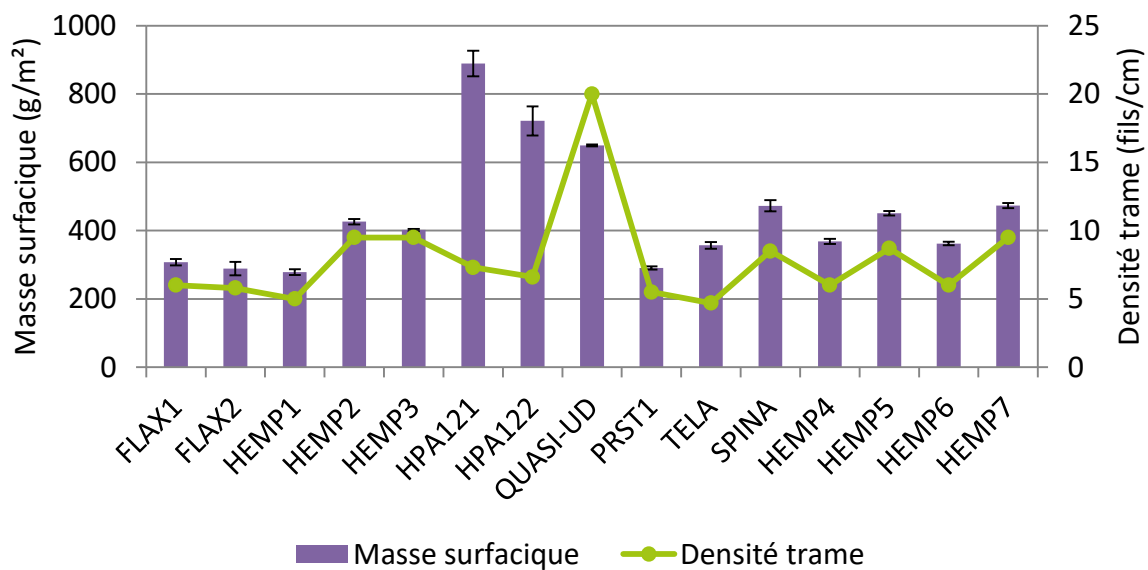


Figure 3-4 : Masse surfacique et densité trame des renforts

2.2.2 Épaisseur des renforts

L'épaisseur des différents renforts est déterminée selon la norme NF EN ISO 5084 [2] et présentée en Figure 3-5. A masse surfacique similaire, un renfort présentant une épaisseur plus élevée sera plus difficile à compacter, à imprégner et pourra être source d'une plus grande probabilité d'apparition de vide dans le matériau composite. En comparaison des renforts produits à l'échelle laboratoire, les renforts élaborés à l'échelle industrielle ont une épaisseur légèrement inférieure. Sur un métier à tisser manuel (échelle laboratoire), l'avance du tissu n'est pas continue, les fils vont avoir tendance à plus se tasser les uns sur les autres alors que sur un métier industriel, les fils de trame vont venir se positionner côte à côte lors du tassage, ce qui génère des tissus moins épais. Sur le même principe, lorsque l'armure choisie est une armure toile, les fils de trame vont avoir tendance à se positionner côte à côte du fait du fort nombre de points de liages. Pour les autres armures, sergé et satin, la présence de grands flottés rend possible la superposition des fils lorsque leur densité est importante. Ainsi, les structures tissées avec une armure toile (PRST1, TELA, FLAX1, FLAX2 et HEMP1) ont une épaisseur plus faible que celle des renforts sergé (SPINA, HEMP6, HEMP7 et HEMP3) et satin (HEMP4, HEMP5 et HEMP2). Ce phénomène est similaire pour le tissu quasi-unidirectionnel QUASI-UD : les nombreux fils insérés par unité de longueur, 20 fils/cm, se superposent les uns sur les autres, ce qui confère à ce renfort l'épaisseur la plus élevée parmi l'ensemble des renforts. Enfin, les fils guipés ayant une section plus ronde et une moins grande souplesse que les mèches ou les fils, ils rencontrent de plus grandes difficultés à s'onduler et s'aplatir dans la structure tissée, c'est pourquoi l'épaisseur des tissus HPA121 et HPA122 est plus élevée que celles des

renforts tissés 100% fibres naturelles. Ainsi, en fonction de l'armure et du type de fil utilisé, les fils ont plus ou moins de capacités à s'entrelacer et à se superposer conduisant ainsi à des différences d'épaisseurs.

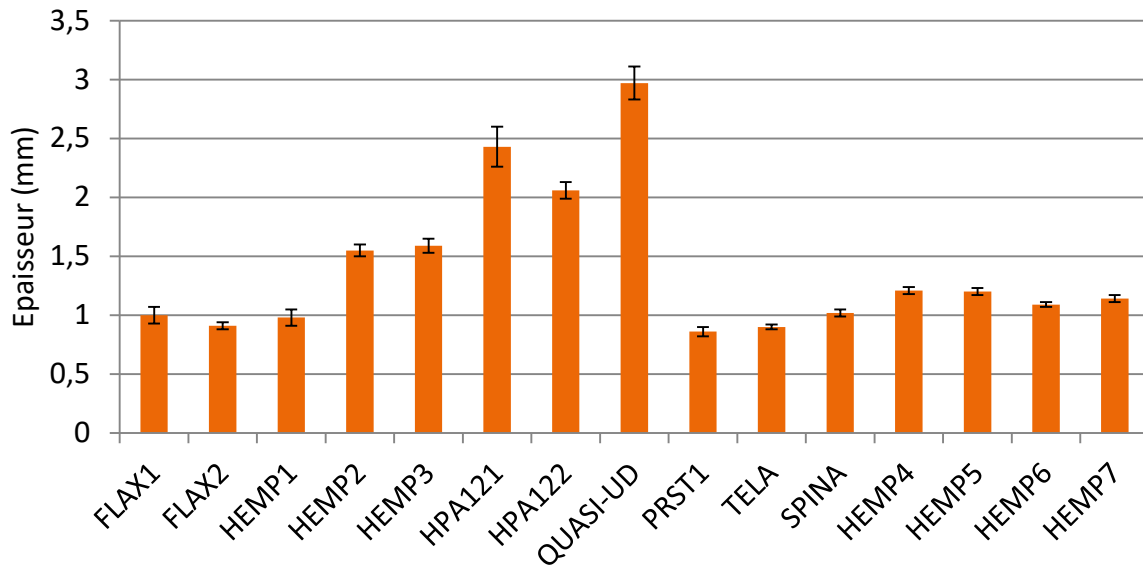


Figure 3-5 : Epaisseur des renforts

2.2.3 Perméabilité à l'air des renforts

L'étude de la perméabilité à l'air donne des informations sur la porosité des renforts à l'état sec. Plus ces derniers seront poreux, plus ils laisseront passer l'air. Une forte perméabilité à l'air sera donc synonyme d'espaces, et de vides entre les fils ou à l'intérieur de ces derniers. La perméabilité à l'air est déterminée selon la norme NF EN ISO 9237 [3] et les résultats sont présentés en Figure 3-6. En comparaison des renforts tissés avec des mèches dans les deux directions, les renforts constitués de fils retordus en sens chaîne et de mèches en sens trame ont une perméabilité à l'air deux à quatre fois supérieure. Les densités de fils en sens chaîne étant les mêmes, il y a plus d'espace entre les fils retordus qu'entre les mèches, ce qui facilite le passage de l'air au travers de la structure. A même armure et même fils de chaîne, l'utilisation de mèches sans traitement en sens trame (FLAX1) conduit à une plus faible perméabilité à l'air que lorsque des mèches avec traitement (FLAX2) sont utilisées. Avec le traitement chimique, les fibres sont comme collées entre elles et la structure tissée est moins compacte. Pour une même armure, produite dans les mêmes conditions mais avec une densité trame qui varie (HEMP4 vs. HEMP5 et HEMP6 vs. HEMP7), l'augmentation de la densité trame entraîne une diminution de la perméabilité à l'air. Avec plus de fils dans la même unité de surface, il est plus difficile pour l'air de traverser le renfort. Ce phénomène se confirme pour le renfort quasi-unidirectionnel (QUASI-UD) qui, avec sa forte densité de mèches insérées en sens trame, atteint une perméabilité à l'air similaire à celle des tissus les plus denses. Pour les renforts comelés, le renfort HPA121 présente une perméabilité à l'air proche de celle des renforts tissés avec des

armures et densités similaires. Le renfort HPA122 a une perméabilité à l'air beaucoup plus élevée : les fils guipés étant moins souples, l'entrelacement entre la chaîne et la trame se fait plus difficilement, ce qui laisse plus d'espace entre les fils pour laisser passer l'air. La perméabilité à l'air est principalement fonction du type de fil utilisé et de leur densité.

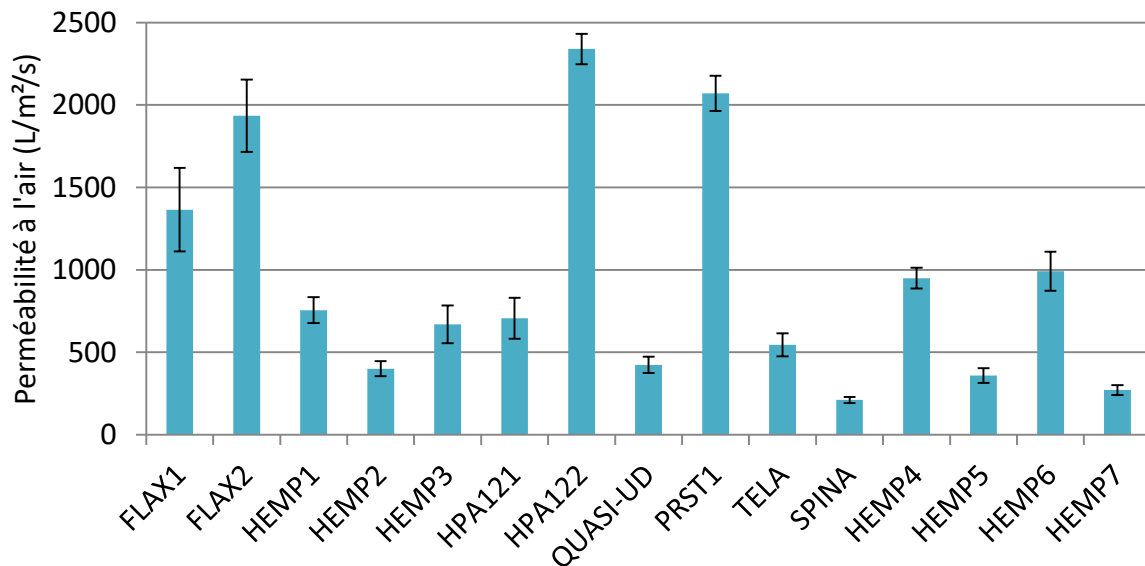


Figure 3-6 : Perméabilité à l'air des renforts

2.2.4 Conclusion

Pour conclure sur cette étude des propriétés textiles des renforts (masse surfacique, épaisseur et perméabilité à l'air), ces caractéristiques dépendent principalement de l'armure choisie (qui influe sur la densité trame) et du type de fil utilisé (fil retordu ou mèche). Ces paramètres sont contrôlables lors de la mise en place de la production, tant sur le choix des matières que sur celui des machines à utiliser.

3 Etude des propriétés en traction des renforts

3.1 Présentation de l'essai de traction des renforts

La réponse de tissus en lin [4] et en chanvre [5] à une sollicitation en traction uniaxiale se décompose en trois phases, illustrées sur la Figure 3-7 sur une courbe « contrainte-déformation » : la première phase (en vert) correspond à la partie non linéaire du début de la courbe, la seconde (en orange) correspond à la partie linéaire jusqu'à la rupture du tissu et la troisième phase (en violet) à la décharge. La première phase correspond aux phénomènes de désondulation des fils dans la direction de sollicitation qui s'accompagne également d'une réorganisation des fibres dans l'axe du fil. A l'inverse, les fils dans la direction perpendiculaire (et libre de sollicitations, en traction uniaxiale) vont voir leur ondulation augmenter [6]. Une compaction, dans le sens de l'épaisseur, survient lors de ce phénomène. Plus les fils sont ondulés, paramètre quantifié par l'embuvage et le retrait (voir paragraphe 5.1 du Chapitre 2), plus cette première phase sera grande. La deuxième phase (phase linéaire) se caractérise par un allongement du tissu proportionnel à l'effort appliqué, puis par une ou plusieurs ruptures, localisées au niveau des faiblesses des fils. Plus la torsion appliquée sur les fils au moment de leur fabrication sera importante, plus leur résistance sera importante en deçà du seuil de torsion critique, au-delà duquel la résistance du fil diminuera. Les principaux facteurs influant sur la résistance du tissu en traction sont la longueur, le nombre et la densité des fibres, ainsi que le titre du fil. De plus, dans le cadre des fibres naturelles, plus la quantité de cellulose dans les fibres est importante, meilleure sera la résistance mécanique. Ces tendances sont similaires pour l'étude de la rigidité, calculée dans la phase 2 (zone linéaire) [4,5].

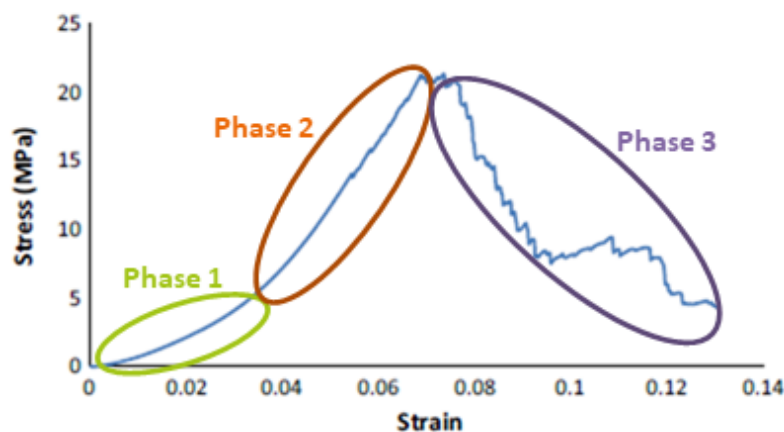


Figure 3-7: Allure générale d'une courbe "contrainte - déformation" d'un tissu toile en chanvre [5]

Les propriétés en traction des tissus sont identifiées selon la norme NF EN ISO 13934-1 [7]. Dans le cadre des travaux présentés ici, les essais sont réalisés sur un banc de traction MTS Criterion 45 (Figure 3-8), à une vitesse de 20 mm/min et avec une précharge de 5N. Les échantillons sont découpés dans les deux directions du tissu, au nombre de cinq en sens

chaîne et cinq en sens trame, et de dimensions 300 mm x 50 mm, de manière à avoir une longueur de jauge de 200 mm. Pour pallier au phénomène de glissement dans les mors du banc de traction, du papier de verre est utilisé. L'évolution de la section transverse des tissus étant difficile à suivre lors de l'essai, les résultats ne seront pas exprimés en contrainte mais en effort. Par ailleurs pour comparer les résistances des différents produits, ces efforts peuvent être pondérés par la densité et la finesse (et donc exprimés en cN/fil/Tex), afin de s'affranchir de l'influence des différentes densités et du titrage [4]. Les autres paramètres déduits de la courbe « effort – déformation » acquise par le banc de traction, et présentés en Figure 3-9, sont la déformation à l'effort maximal, la pente de la partie linéaire de la courbe (phase 2 sur la Figure 3-7) et la perte d'ondulation. La perte d'ondulation est le paramètre qui va séparer les phases 1 et 2, décrites précédemment, et est déterminée comme l'intersection entre la pente de la partie linéaire et l'axe des abscisses. Ce paramètre correspond à la fin de la désondulation des fils au sein de la structure tissée.



Figure 3-8 : Banc de traction MTS Criterion 45

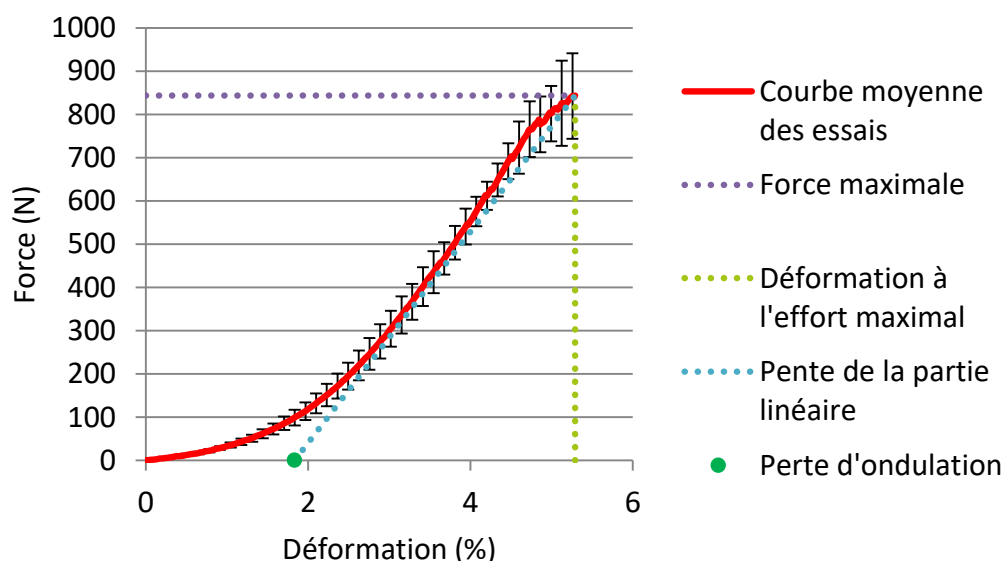


Figure 3-9 : Paramètres étudiés sur les courbes de traction des renforts

3.2 Caractérisation en traction des renforts

3.2.1 Effort maximal en traction des renforts

Le premier paramètre étudié sur la réponse en traction des renforts est l'effort maximal, en N, présenté en Figure 3-10, dont la valeur diffère entre les renforts de par la densité utilisée.

Pour les renforts composés du même type de fil dans les deux directions et dont les densités chaîne et trame sont similaires ou légèrement différentes (HEMP1, TELA, HEMP4 ou HEMP6), l'effort maximal global à rupture en traction est légèrement supérieur en direction chaîne par rapport à la direction trame. Ce n'est qu'avec une densité trame nettement supérieure à la densité chaîne (HEMP2, HEMP3, SPINA, HEMP5 et HEMP7) que l'effort maximal à rupture global de l'échantillon en sens trame est supérieur à celui mesuré en sens chaîne. Les fils de trame ayant tendance à être endommagés pendant le procédé de tissage, leur contribution est légèrement diminuée au sein de la structure tissée et ils doivent être en nombre plus conséquent pour conférer au tissu un effort global maximal similaire à celui de la direction chaîne. Pour un tissu constitué de fils retordus en sens chaîne et de mèches en sens trame (FLAX1, FLAX2 et PRST1) la contribution globale de la direction trame n'est que légèrement plus faible en comparaison de la direction chaîne, alors que les densités de fils sont similaires et que la ténacité des fils retordus en lin est bien plus élevée que celles des mèches en lin (voir Annexe B). Ainsi, le fait qu'il y ait plus de fibres en section d'une mèche que dans celle d'un fil permet de rééquilibrer les efforts supportés par chacune des deux directions. Les deux renforts comelés (HPA121 et HPA122) ont quant à eux des efforts maximaux globaux équilibrés entre les deux directions, du fait de densités chaîne et trame et de taux de fibres de chanvre similaires entre les deux directions.

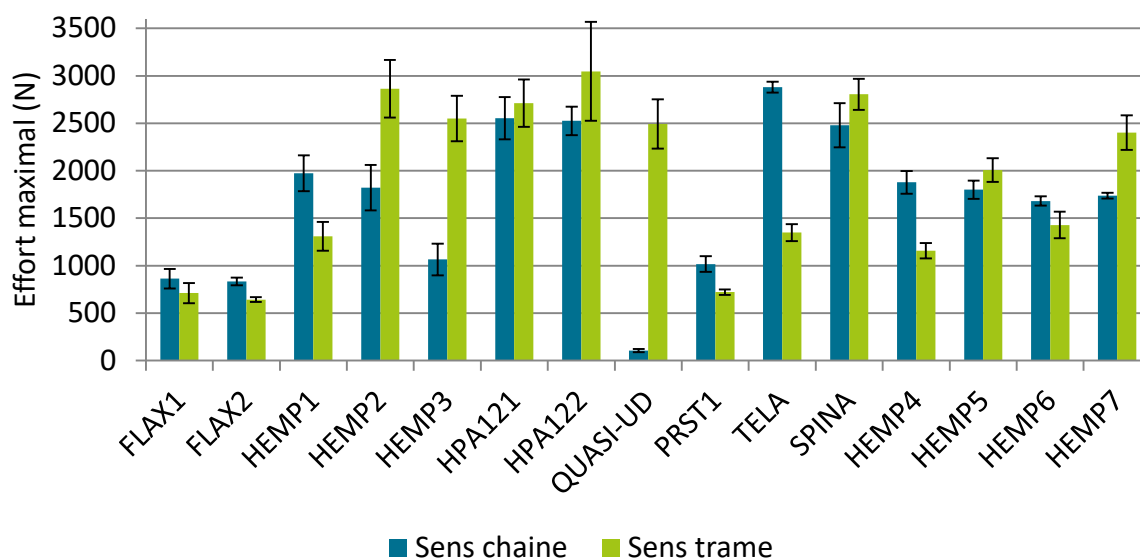


Figure 3-10 : Effort maximal global en traction des renforts

Afin de comparer les renforts indépendamment des densités de fils et des finesses utilisées, l'effort maximal par fil des renforts, exprimé en cN/fil/Tex, est étudié. Ce paramètre met en évidence la contribution des fils au sein du tissu. L'ensemble des valeurs pour chaque renfort et chaque direction (chaîne et trame) est rassemblé en Figure 3-11. Les trois renforts 100% lin (PRST1, FLAX1 et FLAX2) présentent des efforts maximaux par fil dans la direction chaîne plus faibles que ceux des renforts 100% chanvre (HEMP1, HEMP2, HEMP3, HEMP4, HEMP5, HEMP6, HEMP7), alors que les fils retordus (AMBRA) qui les composent en sens chaîne ont une ténacité bien supérieure à celles des mèches utilisées (CANAPA T1 ou CANAPA T3) pour les tissus en chanvre (voir Annexe B). Cet écart est encore plus important en sens trame, où tous les fils utilisés dans cette direction, que ce soit pour les tissus de lin et de chanvre, sont des mèches. A l'échelle des fils, les produits en lin présentaient une ténacité à rupture plus faible que les produits en chanvre. Ainsi, à l'échelle des tissus, la tendance est similaire, les renforts tissés en chanvre ont un effort maximal par fil supérieur à celui des renforts tissés en lin. Le seul renfort en chanvre présentant des propriétés similaires aux renforts tissés en lin avec un écart important de ténacité entre la direction chaîne et la direction trame est le renfort quasi-unidirectionnel. Le point commun entre tous ces renforts est la présence en direction chaîne de fils retordus, aux propriétés bien différentes des mèches utilisées en direction trame, quand l'ensemble des autres renforts tissés est produit avec le même type de fil (mèches ou fils guipés) dans les deux directions. La surface de contact au niveau des points de liage entre un fil retordu et une mèche est plus petite qu'entre deux mèches, ce qui fait que les fibres contenues dans les mèches sont moins bien maintenues lors d'une sollicitation dans la direction trame que si elles étaient maintenues par des mèches. Dans les renforts contenant des mèches dans les deux directions, les fibres sont maintenues d'une manière similaire quelle que soit la direction de la sollicitation, ce qui réduit l'écart d'effort à rupture entre les différentes directions. Par ailleurs, pour la plupart des tissus étudiés, l'effort maximal par fil dans le sens chaîne est supérieur à celui dans le sens trame. Comme

étudié au chapitre précédent (dans le paragraphe 5), les fils de trame sont plus impactés et dégradés par le procédé de tissage, ils présentent une ténacité à rupture après tissage plus faible que les fils de chaîne, ce qui entraîne une plus faible résistance, dans cette direction, à l'échelle des tissus. Lorsqu'un même type de fil est utilisé dans les deux directions, mais que le choix d'armure implique une augmentation de la densité trame (HEMP2 et HEMP3 au regard de HEMP1 ; HEMP5 et HEMP7 au regard de HEMP4 et HEMP6), cette tendance est moins prononcée dans le cas des renforts élaborés à l'échelle industrielle (l'écart d'effort maximal par fil entre la direction chaîne et la direction trame est moins important pour HEMP5 et HEMP7 que pour HEMP4 et HEMP6) voire s'inverse pour les renforts développés à l'échelle laboratoire (où l'effort maximal par fil est plus important en direction trame qu'en direction chaîne pour HEMP2 et HEMP3 contrairement à HEMP1). Une forte densité trame diminue la contrainte appliquée sur chaque fil, puisqu'ils sont plus nombreux pour répondre à la sollicitation mécanique de traction imposée, ce qui fait que malgré leur dégradation, ces fils auront une meilleure réponse, traduite par un effort par fil plus important. Les renforts réalisés avec des fils guipés (HPA121 et HPA122) font partie des rares renforts à présenter des efforts à ruptures par fil équilibrés entre les deux directions. Enfin, si le traitement chimique avait impacté l'effort à rupture du tissu, il y aurait une différence de résultats entre la direction trame du tissu FLAX1 (mèche sans traitement) et celle du tissu FLAX2 (mèche avec traitement), ce qui n'est pas le cas ici. Ainsi, le traitement chimique utilisé pour permettre la tissabilité des fibres naturelles à l'échelle des fils n'a pas d'influence à l'échelle des tissus, tout comme il n'avait pas d'influence à l'échelle des fibres (voir chapitre précédent, paragraphe 4.3.2).

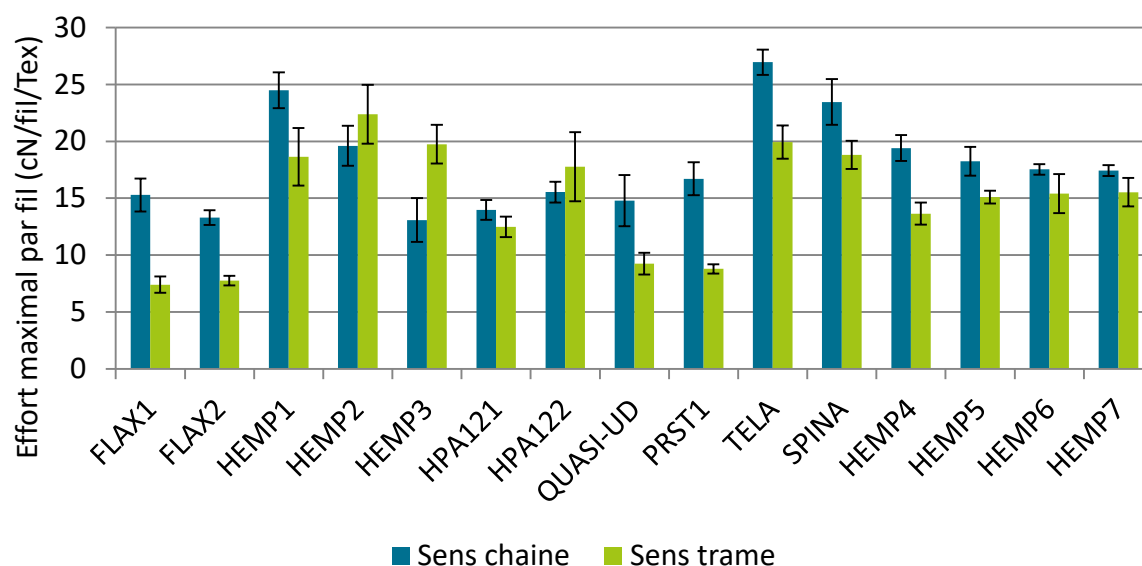


Figure 3-11 : Effort maximal par fil en traction des renforts

3.2.2 Rigidité en traction des renforts

L'étude de la pente dans la partie linéaire de la réponse en traction des renforts (phase 2) permet d'étudier la rigidité des renforts, lorsque les fils sont tendus au sein de la structure tissée. Comme pour l'étude de l'effort maximal, cette étude de la rigidité peut se faire soit avec la pente globale, en Figure 3-12, soit avec la pente par fil, pour étudier la contribution des fils au sein de la structure, en Figure 3-13. Les renforts à base de fibres de chanvre (TELA, SPINA, HEMP4, HEMP5, HEMP6, HEMP7, HEMP1, HEMP2 et HEMP3) présentent une meilleure rigidité que les renforts à base de fibres de lin (FLAX1, FLAX2 et PRST1). La rigidité des renforts secs est principalement influencée par les propriétés des fils utilisés pour les produire. Les mèches de chanvre, avec traitement ont de meilleures propriétés que les fils et mèches de lin, ce qui entraîne une rigidité plus importante des renforts en chanvre. De même que pour l'effort maximal, la pente est, dans la plupart des cas, plus importante dans le sens chaîne que dans le sens trame, puisque les propriétés des fils utilisées sont meilleures dans cette direction. Les renforts comelés ont, quant à eux, des pentes avec des valeurs relativement équilibrées, comme pour la ténacité. Pour la quasi-totalité des renforts, leur rigidité en cN/fil/Tex est inférieure à celles des fils pris seuls (que ce soit avant ou après tissage, voir Chapitre 2 paragraphe 5.2). Cette diminution de rigidité par fil est due à l'entrelacement des fils du fait de l'armure de tissage imposée ainsi qu'aux dégradations imposées par le tissage. Pour le renfort quasi-unidirectionnel, la rigidité par fil est beaucoup plus importante dans la direction chaîne, où il y a peu de fils retordus, que dans la direction trame. Dans la direction trame, la forte diminution de rigidité liée à l'entrelacement avec les fils retordus utilisés dans la direction perpendiculaire est compensée par le grand nombre de fils utilisés, ce qui entraîne une bien meilleure rigidité de l'ensemble de la structure tissée en direction trame. Ainsi, pour une même dimension de tissu, la rigidité du renfort quasi-unidirectionnel en sens trame sera semblable à celle des renforts tissés (en sens chaîne ou en sens trame).

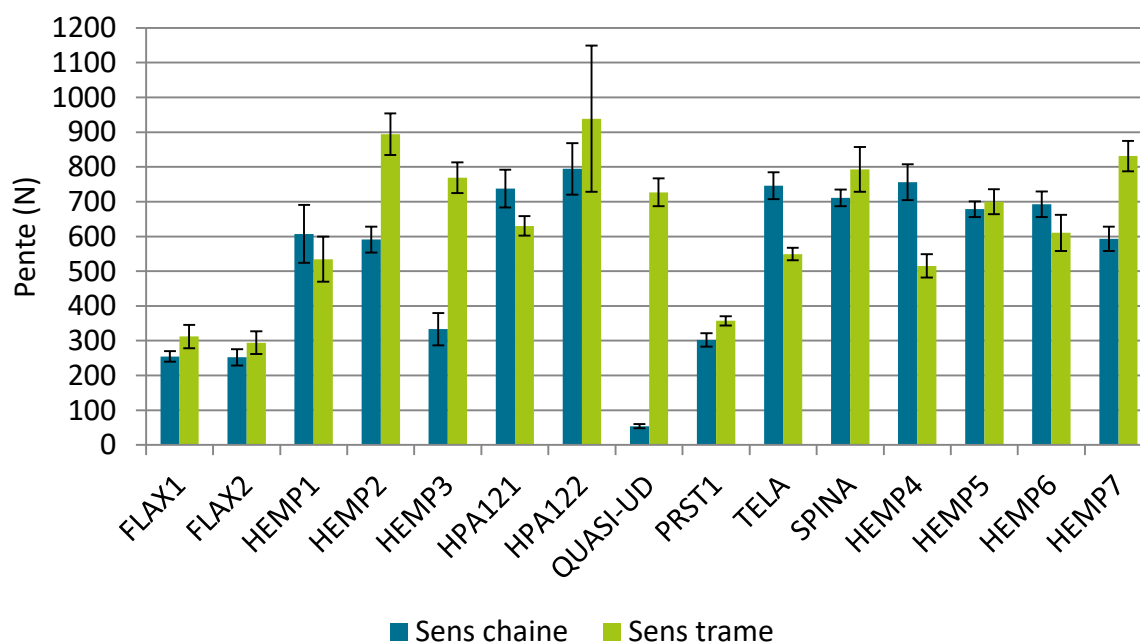


Figure 3-12 : Pente globale de la réponse en traction des renforts

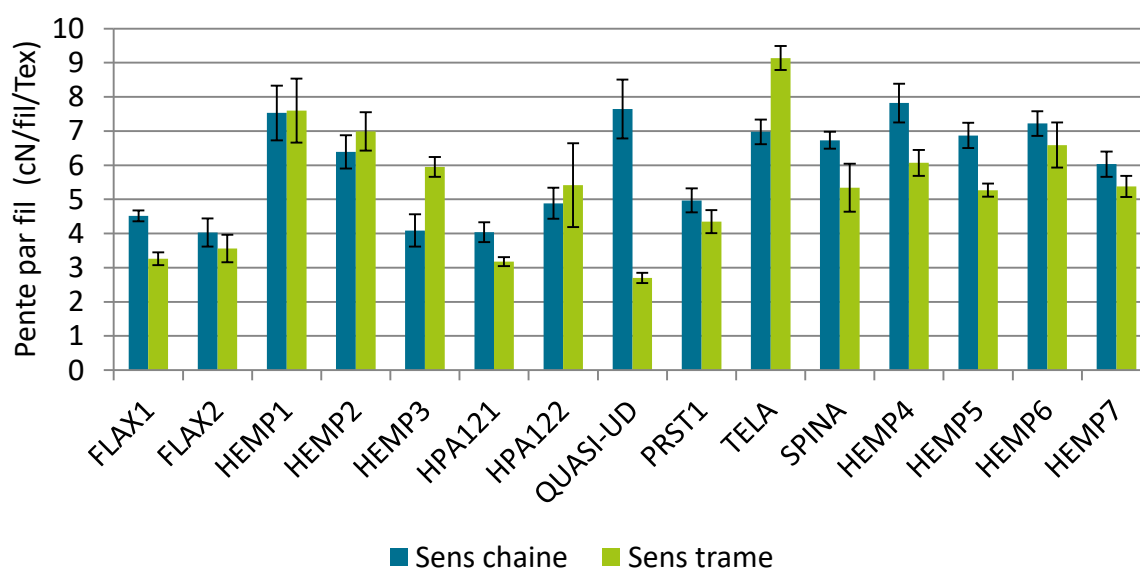


Figure 3-13 : Pente par fil de la réponse en traction des renforts

3.2.3 Perte d'ondulation des renforts

Comme décrit précédemment, au paragraphe 3.1, la courbe de réponse en traction d'un tissu sec peut se décomposer en plusieurs phases, dont une première phase non linéaire. Pour de faibles efforts en traction, les fils se désondulent dans le sens de cette sollicitation et ce phénomène est lié à la consommation de fil au sein de la structure tissée, quantifiée par l'embuvage (pour la direction chaîne) ou le retrait (pour la direction trame) déterminés selon la norme NF ISO 7211-3 [8]. Les valeurs d'embuvage et de retrait ont été présentées précédemment au paragraphe 5.1 du Chapitre 2. La Figure 3-14 met en évidence

cette relation entre la perte d'ondulation (quantifiée en déformation) et l'embuvage ou le retrait : l'évolution de la perte d'ondulation dans une direction suit plus ou moins la même évolution que celle de la consommation de fil dans cette même direction, à l'exception du renfort PRST1 qui présente une perte d'ondulation en sens chaîne beaucoup plus importante qu'en sens trame, malgré une consommation de fil similaire dans les deux directions. Pour les structures tissées avec des mèches dans les deux directions, la perte d'ondulation en sens chaîne et l'embuvage sont plus élevés que la perte d'ondulation en sens trame et le retrait. Etant donné que la densité chaîne imposée (6 fils/cm ou 6,5 fils/cm selon l'échelle utilisée pour la production) n'est pas très élevée relativement aux tissus pour l'industrie textile classique, les fils de trame ont tendance à rester plus droits dans la structure et donc à moins onduler. Ainsi, le retrait est plus faible, et puisque qu'il y a moins de fils disponibles à l'allongement dans cette direction, la perte d'ondulation en sens trame est plus faible. Les tissus composés de fils retordus en sens chaîne et de mèches en sens trame (FLAX1 et FLAX2) ont, quant à eux, un comportement qui diffère. En effet, même si l'embuvage est plus élevé que le retrait, de manière peu importante dans le cas de FLAX1, la perte d'ondulation est plus faible en sens chaîne qu'en sens trame. Lors de la désondulation des fils sous l'effet de la sollicitation en traction, les fils vont également avoir tendance à s'allonger grâce au déboitement des fibres. Le fort taux de torsion appliqué sur les fils retordus empêche cet allongement supplémentaire, ce qui réduit la phase d'allongement des fils au sein de la structure tissée et conduit à une perte d'ondulation plus petite. En comparaison des autres renforts tissés composés de mèches dans les deux directions, les renforts TELA et SPINA possèdent une différence plus importante entre l'embuvage et le retrait, entraînant ainsi également un plus grand écart entre les valeurs de perte d'ondulation mesurées entre la direction chaîne et la direction trame. Ce phénomène est très certainement lié au métier utilisé pour la production de ces renforts à l'échelle industrielle, mais les informations sur ces métiers sont peu nombreuses. Comme énoncé au chapitre précédent (au paragraphe 5.1), les fils guipés ont un embuvage et un retrait plus élevé que les autres fils du fait de leur faible souplesse. Ceci se traduit alors par des pertes d'ondulation au sein des renforts comelés plus importantes que pour la plupart des renforts 100% fibres naturelles. Dans le cas du renfort quasi-unidirectionnel QUASI-UD, l'embuvage n'a pas été mesuré du fait du trop peu de fils utilisés pour réaliser la chaîne. Néanmoins, la faible perte d'ondulation en sens chaîne permet de déduire que l'embuvage des fils retordus utilisés pour lier la structure en sens chaîne doit être relativement faible. En sens trame de ce renfort QUASI-UD, la perte d'ondulation et le retrait sont également très faibles, voir quasi-nuls, ce qui témoigne du fait que les mèches sont très fortement alignées. Cet alignement est particulièrement recherché lors de la réalisation des renforts quasi-unidirectionnels et est un des atouts de ce type de renfort en comparaison des renforts tissés dont les fils sont plus ondulés.

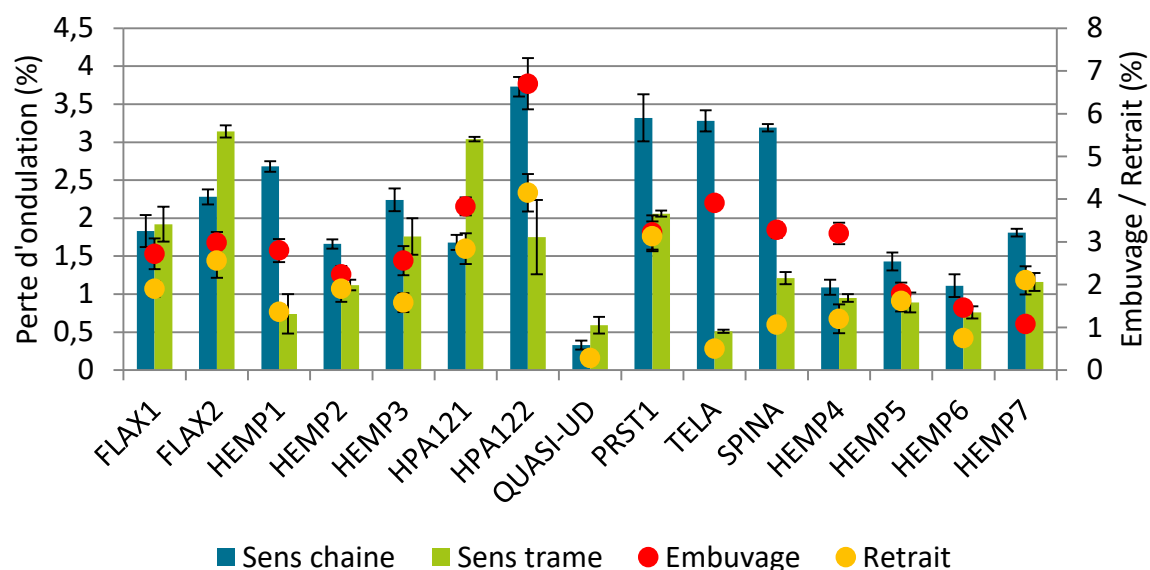


Figure 3-14 : Perte d'ondulation, embuvement et retrait

3.2.4 Déformation à l'effort maximal des renforts

Les valeurs de déformation associées à l'effort maximal, des tissus dans les deux directions, présentées en Figure 3-15, suivent la même évolution que les valeurs de perte d'ondulation (Figure 3-14). A partir d'une valeur de déformation correspondant à la perte d'ondulation, l'allongement du tissu est proportionnel à l'effort appliqué. Quel que soit le type de fil retordu ou de mèche utilisés lors du tissage, l'allongement à rupture de ces fils est similaire (voir Annexe B). Ainsi, leur capacité d'extension au-delà de la valeur de la perte d'ondulation est identique, ce qui entraîne une évolution semblable pour la déformation à l'effort maximal et la perte d'ondulation. Par ailleurs, pour un même type de fils dans les deux directions, en l'occurrence des mèches, le recours à une armure toile (HEMP1 et TELA) entraîne un plus grand écart de déformation entre la direction chaîne et la direction trame, ainsi qu'une déformation dans l'ensemble plus élevée, que les armures satin et sergé, à l'exception des tissus comelés et SPINA.

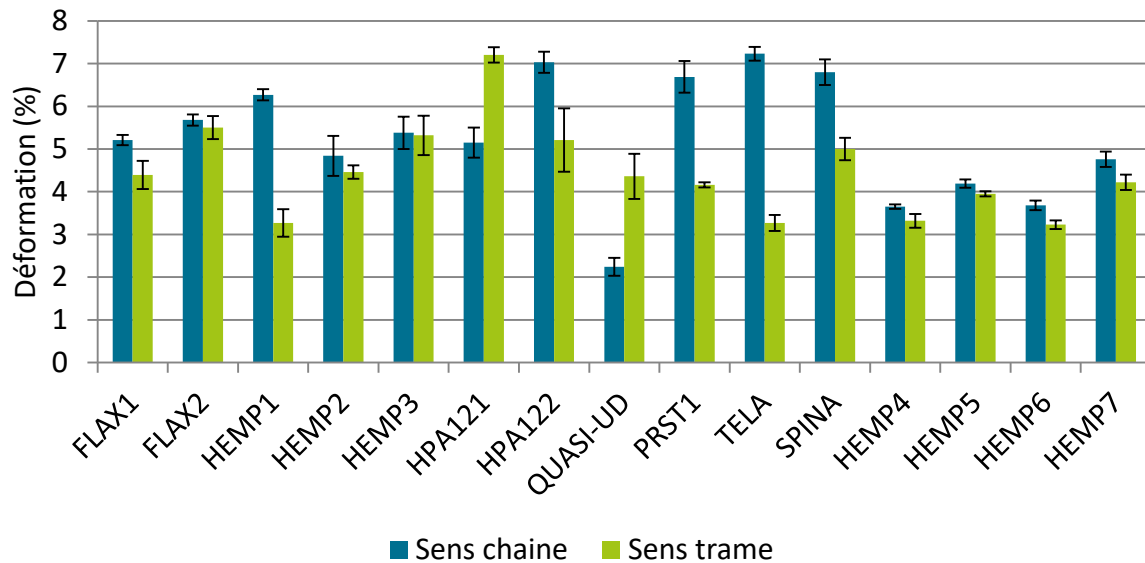


Figure 3-15 : Déformation à rupture des renforts

3.2.5 Conclusion

L'étude de l'ensemble des paramètres issus des essais de traction permet de quantifier la rigidité, la résistance et la déformation maximale, ainsi que la perte d'ondulation des renforts tissés. Ainsi, suivant leur composition en termes de matières premières (mèches/fils, lin/chanvre), d'armures ou de densités choisies, le comportement en traction diffère. Les renforts comelés (à base de fils guipés) présentent un comportement en traction similaire à celui des renforts tissés avec 100% de fibres naturelles. A ce stade, ce type de renfort est donc compétitif par rapport à un renfort plus traditionnel, et ce peut être un avantage pour réduire les temps de production à l'échelle composite, puisque sa mise en œuvre par thermocompression est plus rapide. Cette étude a également permis de mettre en évidence les avantages et inconvénients d'un renfort quasi-unidirectionnel par rapport à un renfort tissé : même si les fils sont moins ondulés et les fibres mieux alignées dans les deux directions principales du renfort avec le recours à un quasi unidirectionnel, il faudra réaliser une stratification, à minima, de deux plis (un pli à 0° et un pli à 90°) pour atteindre une résistance et une rigidité similaires à celles d'un pli de tissu.

4 Etude de la tenue en flexion à l'état sec

4.1 Présentation du dispositif de caractérisation

Les renforts tissés ont des capacités de déformabilité dans les deux directions majeures du plan, grâce à l'entrecroisement des fils et notamment sur des géométries non-développables. Cette aptitude au préformage est analysée par des tests élémentaires de traction dans les deux directions chaîne et trame ainsi que par des essais de cisaillement plan. Cependant, et associées à ces caractéristiques membranaires, les propriétés en flexion jouent un rôle significatif dans l'apparition des défauts lors des étapes de préformage [9–11]. Le premier test de caractérisation du comportement en flexion des étoffes, le cantilever test, a été développé par Peirce en 1930 [12] et est toujours utilisé dans les normes actuelles [13–16], dont la norme ISO 4604 concernée dans ces travaux. Dans cette méthode, dont le banc d'essai est présenté en Figure 3-16 et le principe en Figure 3-17, le renfort est déposé sur la partie horizontale du banc d'essai et le tissu est progressivement avancé. Sous l'effet de la gravité, il va fléchir et venir toucher le pan incliné à $41,5^\circ$. A ce stade, l'essai est arrêté et la longueur d'avance du tissu est mesurée. Un coefficient de rigidité en flexion est alors calculé, à l'aide de l'équation (3-1), puis un module de rigidité en flexion est obtenu à l'aide de l'épaisseur, grâce à l'équation (3-2) [13]. Les essais sont réalisés avec cinq échantillons découpés dans chaque direction (cinq en sens chaîne et cinq en sens trame).



Figure 3-16 : Banc d'essai du cantilever test pour la tenue en flexion à l'état sec

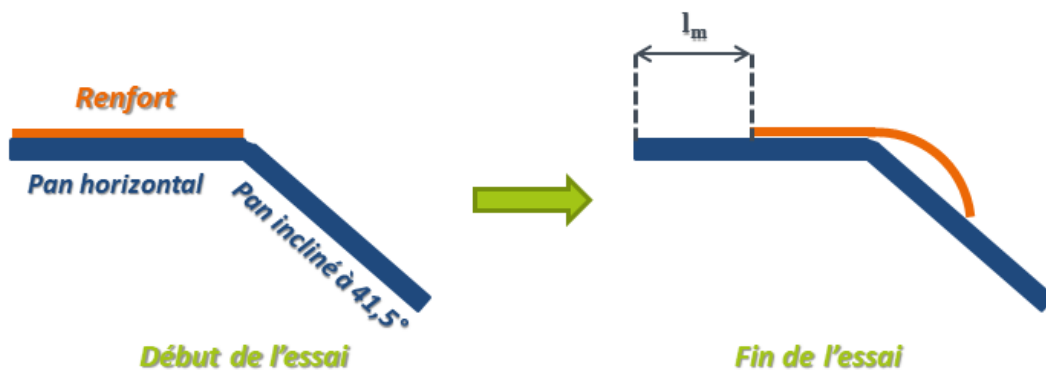


Figure 3-17: Principe du cantilever test

$$G = 9.81 \times m_s \times \left(\frac{l_m}{2}\right)^3 \quad (3-1)$$

$$G_{MPa} = \frac{12}{e^3} \times G \quad (3-2)$$

Avec : G : coefficient de rigidité en flexion [N.mm]
 m_s : masse surfacique de l'étoffe [g/m²]
 l_m : longueur mesurée à la fin de l'essai [m]
 G_{MPa} : module de rigidité en flexion [MPa]
 e : épaisseur de l'étoffe [mm]

4.2 Etude de la flexion des tissus à l'état sec

Pour l'ensemble des renforts étudiés, les coefficients et modules de rigidité en flexion sont calculés dans les deux directions à l'aide des équations (3-1) et (3-2), et de la longueur d'avancement mesurée. Les valeurs des coefficients de rigidité en flexion sont rassemblées en Figure 3-18 et celles des modules en Figure 3-19. Les renforts ayant une épaisseur supérieure à 1,5 mm (HEMP2, HEMP3, HPA121, HPA122 et QUASI-UD, voir Figure 3-5), possèdent un coefficient de rigidité en flexion supérieur aux autres tissus, hormis pour le tissu HPA122. Le module de rigidité en flexion, grâce à l'équation (3-2), permet de s'affranchir de cet effet de l'épaisseur. A l'exception du tissu HEMP4, les renforts présentent des modules de rigidité en flexion plus importants dans la direction trame que dans la direction chaîne. Dans le sens trame, l'ensemble des tissus est composé de mèches dont les densités sont plus importantes en comparaison du sens chaîne. Le taux de fibres présent en sens trame est donc plus élevé, ce qui entraîne une rigidité en flexion plus importante. Les tissus produits avec des fils en sens chaîne et des mèches en sens trame (PRST1, FLAX1 et FLAX2) présentent des propriétés en flexion plus faibles que celles des tissus composés de mèches dans les deux directions. La présence de fils fins et retordus assouplit la structure du renfort et lui confère une rigidité en flexion plus faible. Le tissage d'une armure toile avec des mèches dans les deux directions (TELA et HEMP1) permet d'obtenir un renfort présentant des propriétés en flexion plus homogènes entre les deux directions (à l'écart-type près) par rapport aux autres tissus réalisés également avec des mèches dans les deux directions mais d'armures différentes. L'armure toile permettant l'obtention de densités chaîne et trame relativement proches, cela entraîne une rigidité en flexion similaire dans les deux directions. L'utilisation d'armures sergé et satin, toujours avec le même type de mèches dans les deux directions, permet au tissu d'avoir un module de rigidité en flexion beaucoup plus élevé en sens trame qu'en sens chaîne, à l'exception du tissu HEMP4. Cette différence pourrait être attribuée à la différence de densité, mais le tissu HEMP6 présente également une rigidité en flexion en sens trame plus élevée que celle en sens chaîne, avec pourtant une densité trame légèrement plus faible (6 fils/cm) que la densité chaîne (6,5 fils/cm). Par ailleurs l'augmentation de densité trame entre les tissus HEMP6 (6 fils/cm) et HEMP7 (9,5 fils/cm) n'entraîne pas d'augmentation significative du module de rigidité en flexion. Du fait du choix de l'armure, les flottés des fils visibles sur la face supérieure du tissu

(Figure 3-1et Figure 3-2) se situent dans la direction trame. Ces flottés confèrent au tissu une meilleure rigidité en flexion dans la direction trame. Par conséquent, le module de rigidité en flexion des renforts secs dépend du type de fil utilisé, des densités de fils utilisées en sens chaîne et en sens trame ainsi que de l'armure de tissage.

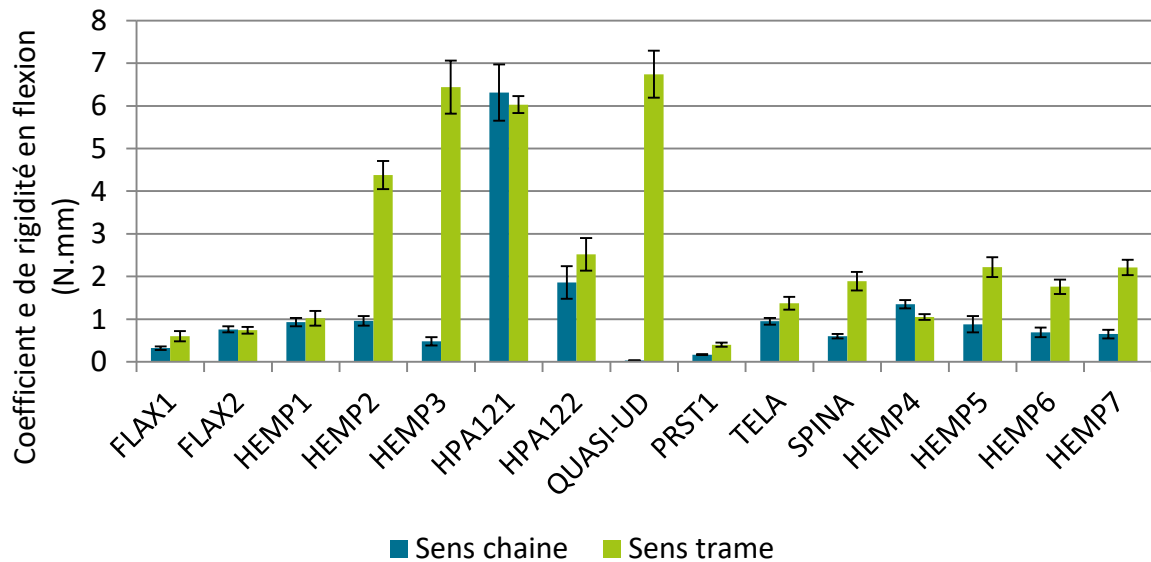


Figure 3-18 : Coefficient de rigidité en flexion des renforts

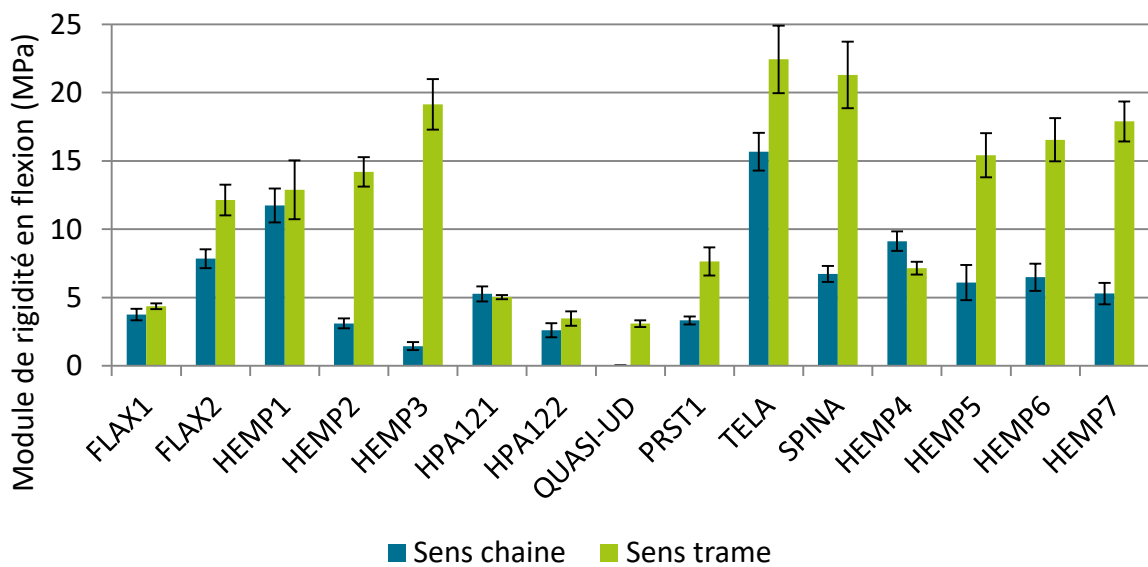


Figure 3-19 : Module de rigidité en flexion des renforts

5 Etude du comportement en cisaillement dans le plan au moyen de l'« Uniaxial Bias-Extension test »

5.1 Mise en place de l'« Uniaxial Bias-Extension test »

Lors de la mise en œuvre des matériaux composites, et plus spécifiquement lors des étapes de préformage, les renforts doivent s'adapter à des formes plus ou moins complexes. Lors de cette étape de fabrication, les déformations en cisaillement dans le plan sont considérées dans la littérature [17,18] comme prépondérantes. Afin de caractériser le comportement en cisaillement dans le plan des étoffes textiles, plusieurs tests ont été développés [19], dont l'« Uniaxial Bias-Extension test », (nommé dans la suite, UBE test), qui a été choisi pour étudier le comportement en cisaillement plan des renforts tissés analysés dans le cadre de la thèse.

Les éprouvettes sont prélevées dans les renforts à un angle de 45° , pour étudier le comportement en cisaillement entre les fils de chaîne et de trame. Le rapport longueur/largeur de l'échantillon doit être supérieur ou égal à deux [20]. Ce rapport permet de distinguer dans l'échantillon trois zones A, B et C présentées en Figure 3-20. La zone C, au centre de l'échantillon, est une zone de cisaillement pur, dans laquelle les fils sont libres aux deux extrémités, car non pris dans les mors et non assujettis à de la traction. La zone B est appelée zone de demi-cisaillement, l'angle de cisaillement dans cette zone sera alors égal à la moitié de l'angle de cisaillement, mesuré dans la zone C. Enfin, dans la zone A, il n'y a pas de phénomène de cisaillement, les fils étant pris dans les mors du banc de traction [19–22].

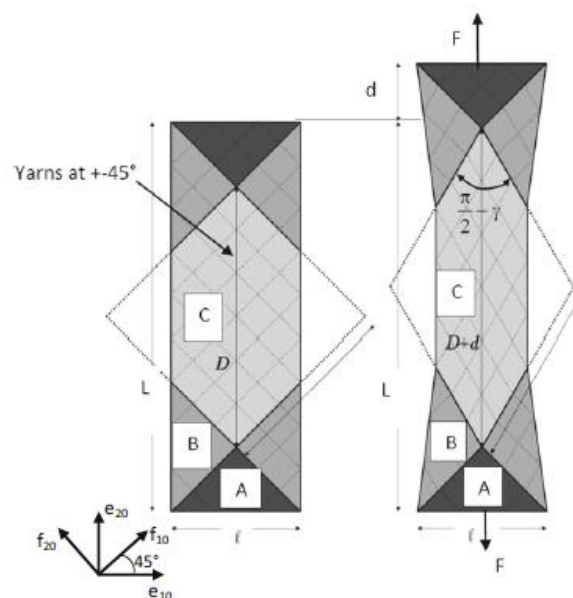


Figure 3-20 : Représentation schématique d'un échantillon d'UBE test [19]

L'« Uniaxial Bias-Extension test » est réalisé sur un banc de traction MTS Criterion 45 (Figure 3-8), avec une vitesse de 20 mm/min et sans précharge. Comme lors des essais de

traction réalisés précédemment (voir paragraphe 3.1), du papier abrasif est utilisé pour éviter les glissements dans les mors. Les différentes phases de l'essai sont présentées en Figure 3-21. Les échantillons sont prélevés à 45° dans les tissus, avec une largeur de 50 mm et une longueur de 250 mm, ainsi la longueur de jauge est de 150 mm. Le rapport longueur/largeur est donc supérieur à 2, assurant ainsi l'existence d'une zone de cisaillement pur au centre de l'éprouvette.

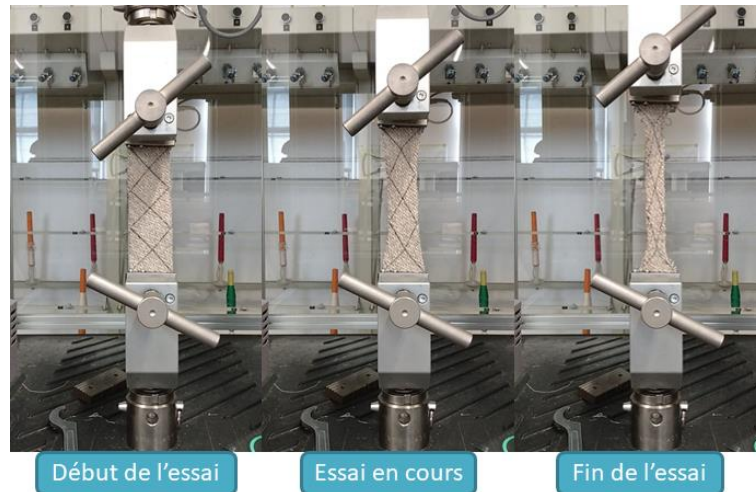


Figure 3-21 : Différentes étapes de l'UBE test

A l'aide des données enregistrées par le banc de traction, une courbe « Effort – Déformation » est tracée, dont l'allure générale est présentée en Figure 3-22. Le comportement du tissu pendant l'essai de traction se décompose en deux phases, séparées par un point d'inflexion sur la courbe. Durant la première phase, en vert sur la Figure 3-22, sous faibles efforts, le champ de déplacement au sein des mèches, montre que les mèches ne sont soumises qu'à de la rotation. Les efforts restent faibles car la seule résistance au cisaillement est due au frottement entre les mèches de chaîne et de trame. La zone intermédiaire entre les deux phases correspond à une valeur d'angle de cisaillement proche de l'angle dit de blocage, les mèches commencent à être en contact et sont comprimées, partiellement, puis totalement dans la seconde phase ce qui explique l'augmentation rapide de l'effort et par conséquent de la rigidité en cisaillement [17]. Lorsque l'effort continue à augmenter, le tissu présente un mode de déformation, hors-plan, par plissement, comme illustré sur la photo « fin de l'essai » de la Figure 3-21.

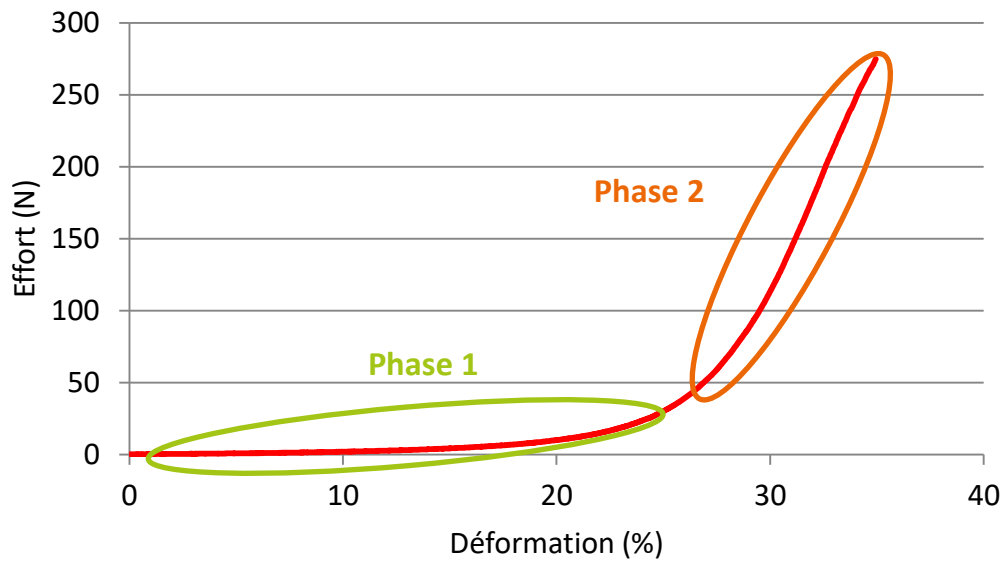


Figure 3-22 : Exemple de courbe « Effort – Déformation » (UBE test)

Durant l'essai, l'angle de cisaillement est déterminé, d'une part analytiquement, à partir du relevé du déplacement (noté d), comme présenté en équation (3-3) mais également expérimentalement, à l'aide de marqueurs positionnés sur l'éprouvette dans la zone C en cisaillement pur, pour mesurer l'angle entre les fils de chaîne et de trame. Pour cette deuxième méthode, des images sont enregistrées, à différents instants de l'essai et les mesures d'angles sont effectuées sur ces images à l'aide du logiciel On-Screen Protractor®. Les valeurs de l'angle de cisaillement, théoriques et mesurées, sont rassemblées sur un même graphe en fonction du déplacement, dont un exemple est présenté en Figure 3-23. Au début les deux courbes se superposent, puis à partir d'un certain angle, elles se séparent. L'angle relevé au niveau de cette séparation est considéré comme « angle de blocage » : au-delà de cet angle, les fils de chaîne et de trame n'ont plus assez d'espace pour tourner au sein de la structure et ils sont alors compactés.

$$\gamma_{th} = \frac{\pi}{2} - 2\cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\left(1 + \frac{d}{L-l}\right)\right) \quad (3-3)$$

Avec : γ_{th} : Angle de cisaillement théorique [rad]
 d : Déplacement de la traverse [mm]
 L : Longueur de jauge [mm]
 l : Largeur de l'éprouvette [mm]

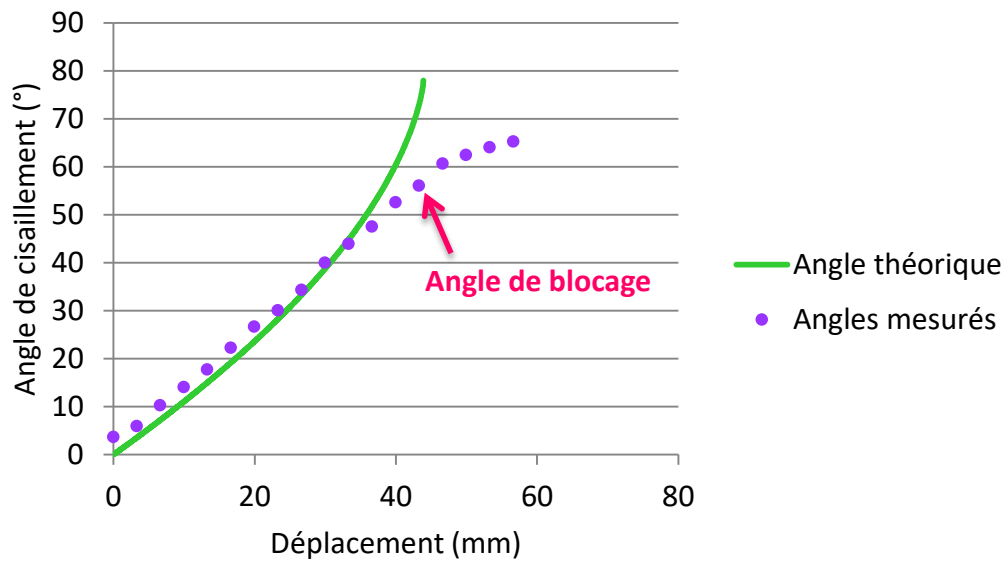


Figure 3-23 : Exemple de courbe « Angle de cisaillement – Déplacement » (UBE test)

Afin d'obtenir une force adimensionnée dans la zone C de cisaillement pur, et de l'associer, dans la même zone, à l'angle de cisaillement, une force normalisée de cisaillement peut être déterminée à l'aide de l'équation (3-4). Cette équation se base sur plusieurs hypothèses : l'angle entre les fils de chaîne et les fils de trame au démarrage de l'essai est initialement de 90°, la zone A ne présente aucune déformation de cisaillement, les angles de cisaillement mesurés dans la zone C de cisaillement pur sont le double de ceux mesurés dans la zone B de demi-cisaillement et les angles de cisaillement sont uniformes dans chaque zone. [19,21,23]

$$F_{sh} = \frac{FD}{l(2D-l)\cos\gamma} \left(\cos\frac{\gamma}{2} - \sin\frac{\gamma}{2} \right) - \frac{l\cos\gamma/2}{(2D-l)\cos\gamma} F_{sh} \left(\frac{\gamma}{2} \right) \quad (3-4)$$

Avec : F_{sh} : Force normalisée de cisaillement [N/mm]

F : Force enregistrée par la machine [N]

l : Largeur de l'éprouvette [mm]

D : Longueur de la zone C de cisaillement pur [mm]

γ : angle de cisaillement (mesuré sur les images) [rad]

5.2 Résultats obtenus

L'étude du comportement en cisaillement des renforts, au moyen de l'UBE test, est réalisée sur tous les renforts tissés, sauf le quasi-unidirectionnel (QUASI-UD). Pour l'analyse des résultats, les différentes armures de tissage sont rappelées en Figure 3-24. Les carrés noirs symbolisent les « pris », c'est-à-dire les fils de chaîne situés au-dessus des fils de trame, tandis que les carrés blancs symbolisent les « laissés », c'est-à-dire les fils de trame situés au-dessus des fils de chaîne. Les points de liage correspondent à l'entrelacement des fils de chaîne et des fils de trame, au niveau des « pris ».



Figure 3-24 : Rappel des différentes armures de tissage utilisées

5.2.1 Force normalisée de cisaillement

La force normalisée de cisaillement, calculée à partir des données enregistrées par le banc de traction et de l'équation (3-4), est utilisée pour comparer le comportement des différents tissus dans leur zone de cisaillement pur (Figure 3-25). Si l'allure des courbes pour l'ensemble des tissus étudiés, est identique, on constate que l'augmentation de la force normalisée de cisaillement survient à des valeurs d'angles de cisaillement différentes. Cette augmentation intervenant lorsque les mèches commencent à venir en contact, soit pour un angle compris entre 30° et 60° pour l'ensemble des renforts avec des pentes qui varient. Le tissu comélé HPA121 est celui pour lequel l'augmentation survient pour un angle le plus faible. Ce tissu étant très dense avec des fils plus rigides (du fait de la présence des 52% de PA12 guipés autour des fibres de chanvre), sa capacité de cisaillement est réduite en comparaison des autres renforts.

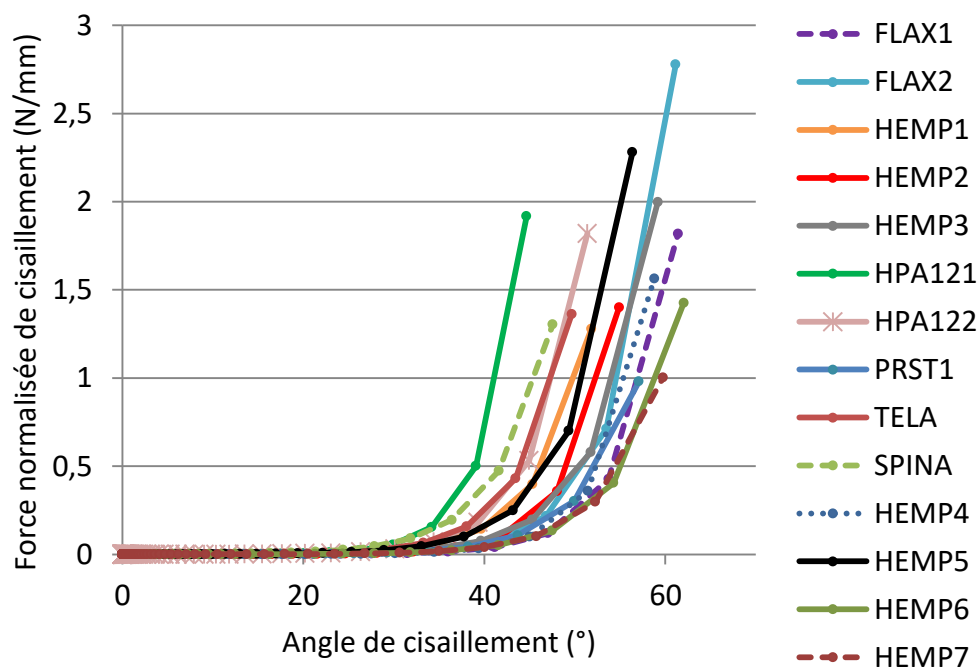


Figure 3-25 : Force normalisée de cisaillement des renforts tissés (UBE test)

5.2.2 Point d'inflexion de la courbe « Effort – Déplacement »

A partir des données enregistrées par le banc de traction, la courbe « Effort – Déplacement » est tracée pour tous les tissus en Figure 3-26, en se focalisant sur le début de l'essai. Suivant le renfort tissé, le point d'inflexion délimitant les deux phases décrites en Figure 3-22 arrive plus ou moins rapidement, phénomène constaté également précédemment (voir la Figure 3-25). La plupart des renforts tissés présentent un point d'inflexion situé aux alentours d'un allongement de l'échantillon de 30 mm à 35 mm. Quatre renforts présentent un comportement qui diffère des autres tissus : un avec un point d'inflexion qui apparaît plus rapidement (SPINA) et trois autres qui se distinguent avec un point d'inflexion plus tardif (HPA122, HEMP4, HEMP6). Pour le tissu SPINA, du fait de l'armure sergé de 4 et de la forte densité de fils en sens trame, l'espace entre les fils au sein de la structure tissée est réduit et le tissu SPINA aura une capacité de cisaillement moindre avant l'état de compaction des fils. Le renfort HPA122, qui possède, comme le tissu SPINA, un point de liage tous les quatre fils, est tissé avec une densité de fils en trame quasiment similaire à celle utilisée en sens chaîne (6,6 fils/cm en trame pour le tissu HPA122 contre 8,5 pour le tissu SPINA). Cette diminution du nombre de fils inséré en sens trame crée plus d'espace entre les fils et leur donne plus de liberté. Le tissu HPA122 a donc une plus grande capacité à se cisiller, et le point d'inflexion entre la phase de cisaillement et la phase de compaction intervient beaucoup plus tard dans l'essai, au-delà d'une valeur d'allongement de 40 mm. Deux autres tissus présentent cette capacité de cisaillement aussi importante: il s'agit des tissus HEMP4 et HEMP6, tissés respectivement avec une armure satin de 6 et sergé de 6 ainsi que des densités trames similaires aux densités chaîne. L'espace disponible entre les fils, dû à une densité trame réduite et des points de liage espacés, confère au renfort une plus grande capacité de cisaillement avant la compaction des fils au sein de la structure tissée.

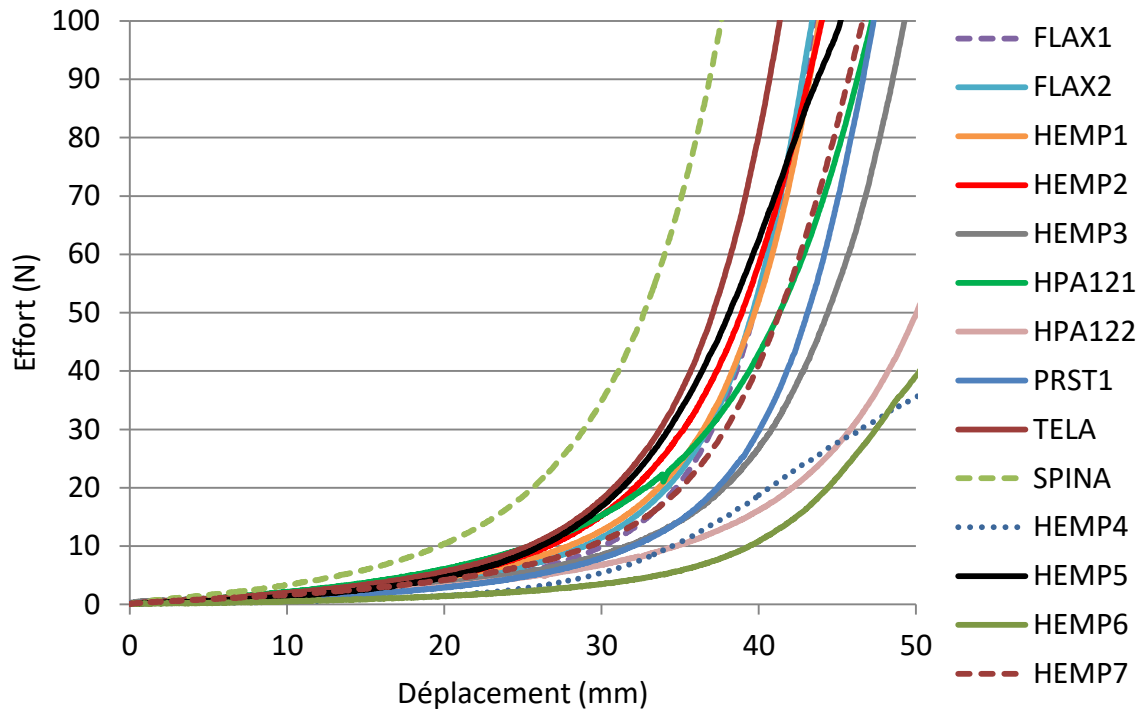


Figure 3-26 : Relation Force vs. Déplacement des renforts tissés (UBE test)

5.2.3 Angles de blocage

Les valeurs des angles de blocages des différents tissus étudiés sont présentées en Figure 3-27. Comme défini sur la Figure 3-23, ces valeurs sont déduites du point de séparation entre les valeurs analytiques (déterminées avec l'équation (3-3)) et les valeurs mesurées des angles de cisaillement. En fonction des fils constituant les renforts tissés, trois ensembles de tissus se distinguent. Les tissus constitués de fils retordus en sens chaîne et de mèches en sens trame (FLAX1, FLAX2 et PRST1), en bleu sur la Figure 3-27, possèdent un angle de blocage très élevé, aux alentours de 60°. Les tissus constitués de mèches dans les deux directions (HEMP1, HEMP2, HEMP3, TELA, SPINA, HEMP4, HEMP5, HEMP6 et HEMP7), en fuchsia sur la Figure 3-27, présentent un angle de blocage plus faible, entre 46° à 52°. Enfin, les tissus constitués de fils comelés dans les deux directions (HPA121 et HPA12), en vert sur la Figure 3-27, ont les plus petits angles de blocage de l'ensemble des renforts étudiés, entre 39° et 45°. Les densités chaîne étant quasiment identiques quel que soit le type de fil utilisé en sens chaîne (6,5 fils/cm pour les tissus à l'échelle industrielle LCN et 6 fils/cm pour les tissus à l'échelle laboratoire ENSAIT), il y a plus d'espace entre les fils retordus qu'entre les mèches, ce qui entraîne une plus forte capacité à bouger au sein de la structure avant d'arriver à la compaction. L'utilisation de mèches dans les deux directions conduit ainsi à une plus faible mobilité des fils entre eux et donc à un angle de blocage plus faible. Enfin, avec l'utilisation de fils guipés, composés de mèches recouvertes de PA12, les fils sont moins souples du fait de l'ajout du fil de guipage, ce qui rend le phénomène de cisaillement au sein du tissu encore plus difficile, conduisant à un angle de blocage réduit.

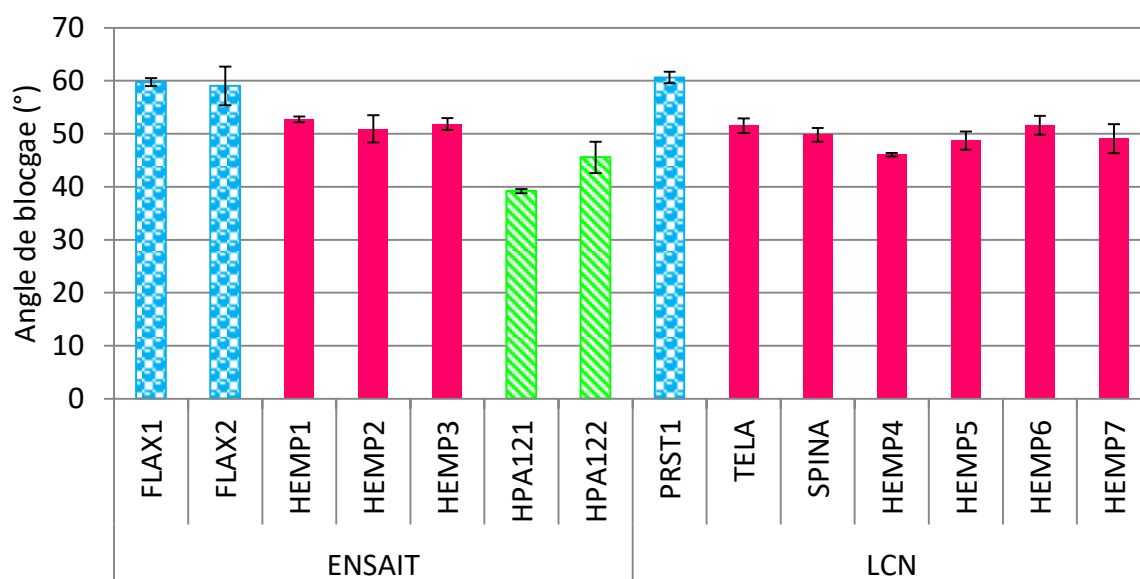


Figure 3-27 : Angles de blocages (UBE test)

Afin de confirmer l'influence de l'espace entre les fils sur le comportement en cisaillement, et plus particulièrement au niveau de l'angle de blocage, la perméabilité à l'air, mesurée préalablement pour l'ensemble des tissus (Figure 3-6), est comparée avec l'angle de blocage en Figure 3-28. La perméabilité à l'air des tissus est principalement due à des espaces au sein des fils mais également entre les fils. L'ensemble des couples de données est rassemblé en Figure 3-28, avec les mêmes couleurs que les groupements présentés en Figure 3-27. Ce graphe met en évidence l'existence d'une relation entre la perméabilité à l'air et la valeur de l'angle de blocage : plus la perméabilité à l'air est élevée au sein d'un même groupe, plus l'angle de blocage est important. En effet, une forte perméabilité à l'air signifie que l'air passe facilement au travers du tissu, notamment grâce à l'espace libre entre les fils. C'est cet espace disponible qui permet à l'air de traverser le tissu mais également aux fils de bouger au sein de la structure lors d'une sollicitation en cisaillement.

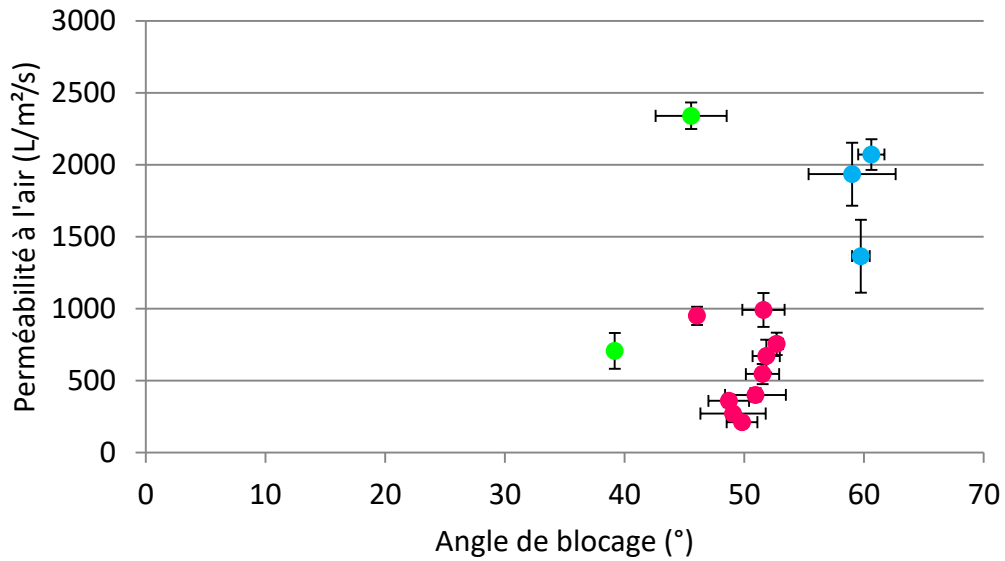


Figure 3-28 : Relation entre la perméabilité à l'air sur l'angle de blocage

5.2.4 Conclusion

Pour conclure, le comportement en cisaillement plan des renforts tissés, caractérisé au moyen de l'UBE test, dépend des paramètres de production textiles. En effet, en fonction du type de fil utilisé, de l'armure choisie et de la densité de fils sélectionnée, le tissu aura plus ou moins de possibilités de cisiller avant d'atteindre la compaction des fils le constituant et l'angle maximal formé entre les fils de chaîne et les fils de trame sera alors plus ou moins élevé.

6 Etude de la mise en forme des renforts

6.1 Présentation du banc d'emboutissage

Les essais de préformage des renforts sont réalisés, à température ambiante, sur le banc d'emboutissage du laboratoire GEMTEX, présenté en Figure 3-29. Le poinçon, de la forme souhaitée, est fixé sur un vérin pneumatique ascendant à une vitesse constante, de 45 mm/s, pour venir emboutir le renfort. Un capteur d'acquisition Sensel Measurement®, d'une capacité de 100 daN, est disposé sur ce vérin pour enregistrer la force d'emboutissage. Le renfort est placé au-dessus du poinçon, entre une matrice ouverte qui possède la contre forme du poinçon, et un serre-flanc sur lequel est appliquée une pression permettant le contrôle de la tension membranaire du renfort lors de la mise en forme. Les deux plaques sont en plexiglas d'une épaisseur de 20 mm ce qui permet d'assurer une distribution homogène de la pression sur le renfort. La pression sur le serre-flanc est appliquée grâce à un cadre métallique qui vient s'appuyer sur le contour du serre-flanc à l'aide de quatre vérins pneumatiques. Un enregistrement vidéo de l'essai est réalisé à l'aide d'une caméra GoPro Hero4, avec une résolution de 2.7K et une acquisition de 24 images par seconde, fixée au-dessus de l'échantillon [24–30].

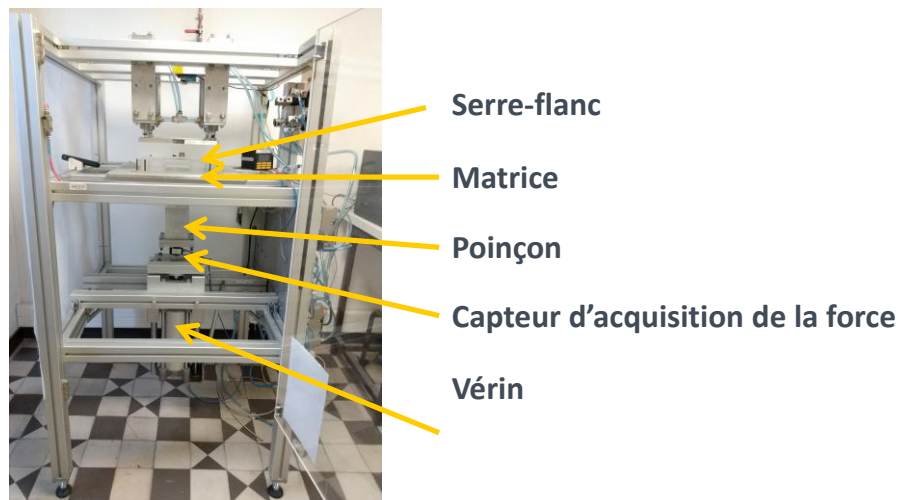


Figure 3-29 : Présentation du dispositif d'emboutissage

Pour tous les essais d'emboutissage, la pression appliquée sur le serre-flanc est constante et égale à 0,2 MPa. Trois types de poinçons, présentés en Figure 3-30, sont utilisés, un poinçon hémisphérique de diamètre 150 mm, un poinçon cubique de côté 100 mm et un poinçon cubique de 100 mm de côté également mais avec des arrêtes arrondies. Des schémas explicatifs des dispositifs avant et après emboutissage sont présentés en Figure 3-31. La course totale du vérin lors de l'emboutissage est de 230 mm. En fin d'essai, les renforts sont emboutis sur une hauteur de 70 mm, pour le poinçon hémisphérique, ou de 100 mm pour les poinçons cubiques. Pour chaque essai, un pli de renfort de dimensions initiales 300 x 300 mm, est considéré. Deux types d'orientations, relativement aux poinçons

sont analysés : à $0^\circ/90^\circ$ (désignée par la suite 0°) et à $\pm 45^\circ$ (désignée par la suite 45°). Les différentes étapes de l'essai d'emboutissage sont présentées avec des photos prises du dessus du banc d'essai en Table 3-3, avec l'exemple de l'emboutissage d'un renfort tissé avec le poinçon hémisphérique.

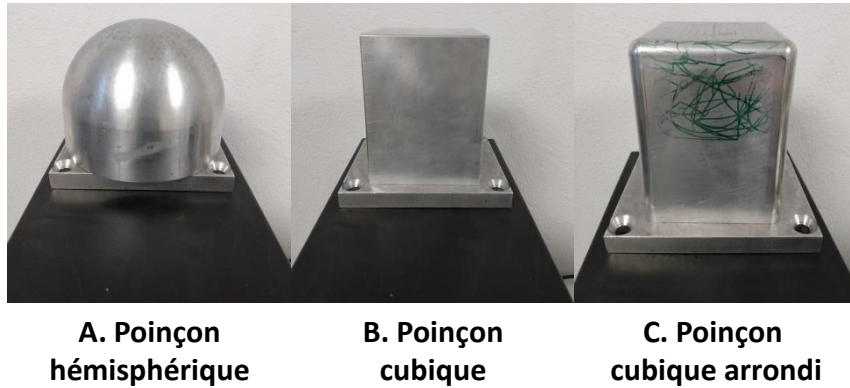


Figure 3-30 : Présentation des différents types de poinçons utilisés A. Hémisphérique B. Cubique C. Cubique arrondi

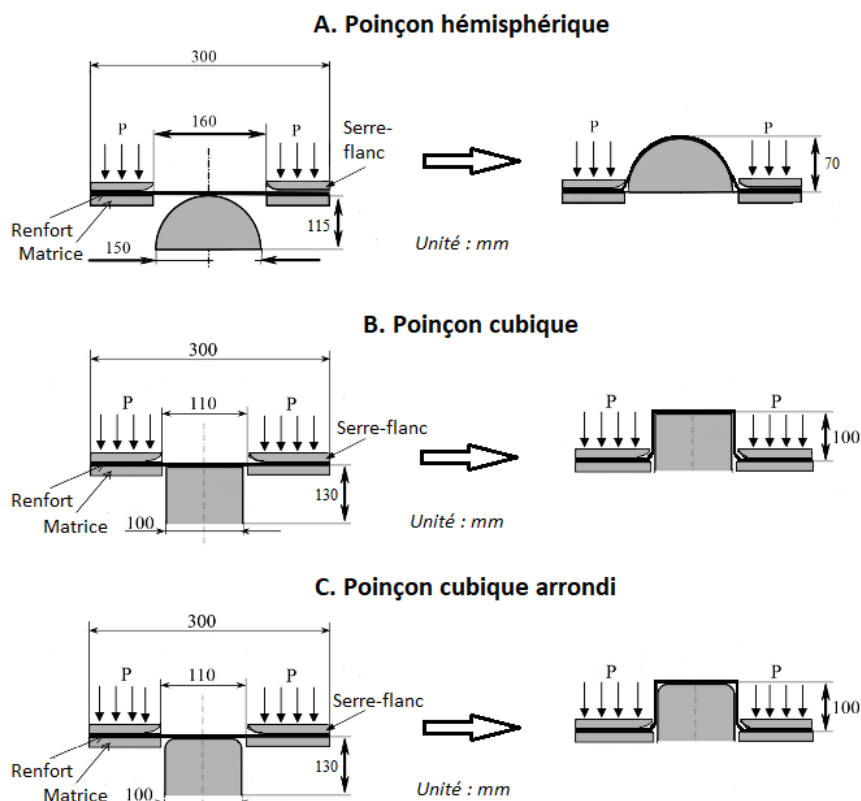
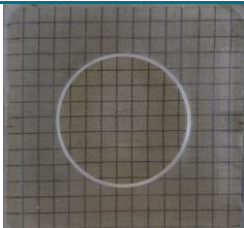
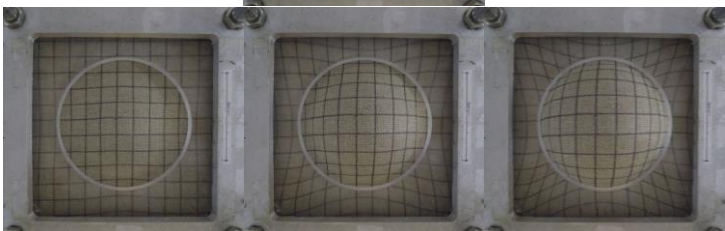
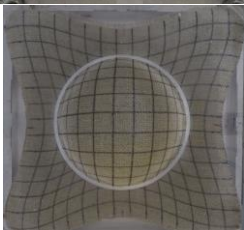


Figure 3-31 : Schémas descriptifs de l'emboutissage avec différents poinçons A. Hémisphérique B. Cubique C. Cubique arrondi

Table 3-3 : Différentes étapes d'un essai d'emboutissage (exemple avec le poinçon hémisphérique)

Etape	Image
Début de l'essai	
Application de la pression avec les serre-flancs	
Emboutissage du renfort	
Fin de l'essai	

Les échantillons sont marqués à l'aide d'un quadrillage de 20 x 20 mm, représenté Figure 3-32. La déformabilité des renforts est analysée grâce à quatre paramètres : la force d'emboutissage, l'avalement, l'angle de cisaillement entre les fils de chaîne et les fils de trame et les défauts observés. L'avalement représente la quantité de tissu absorbée lors du procédé pour que le renfort s'adapte à la forme du poinçon. Ce critère est lié à des paramètres procédés tels que la forme et la course du poinçon, la pression serre-flanc, l'orientation et la forme initiale de l'échantillon, mais également à des paramètres propres au tissu qui régissent le comportement en traction mais également de frottement avec les outils du renfort et qui influent sur cet avalement. L'avalement est mesuré, comme expliqué sur la Figure 3-32, dans les deux directions, et aux différents points des marqueurs le long des bords du renfort. Pour les échantillons orientés à 45°, les mesures sont effectuées aux 4 endroits où les valeurs sont maximales, comme présenté en Figure 3-33. Seul un essai est réalisé par type de renfort et par type de poinçon, raison pour laquelle il n'y a pas d'écart-types sur les valeurs de force d'emboutissage et d'avalement. L'angle de cisaillement est déduit de l'angle mesuré entre les fils de chaîne et les fils de trame à l'aide de l'Equation (3-5). Ces angles sont mesurés dans chaque zone du marquage appliqué sur le renfort, puis une moyenne par zone est effectuée. Lors de l'emboutissage de renforts, des défauts peuvent être observés visuellement, tels que des glissements entre les fils, l'apparition de plis,

l'écartement des fils ou la formation de boucles [31–33]. Ces défauts engendrent des zones où la densité fibreuse est inhomogène. Ainsi, à l'échelle composite, la fraction volumique de fibre en sera affectée. Pour les trois types de poinçons (hémisphérique, cubique et cubique arrondi), des images ciblées ont été prises pour mettre en évidence d'éventuels défauts.

$$\text{Angle de cisaillement } (^{\circ}) = 90^{\circ} - \text{angle mesuré } (^{\circ}) \quad (3-5)$$

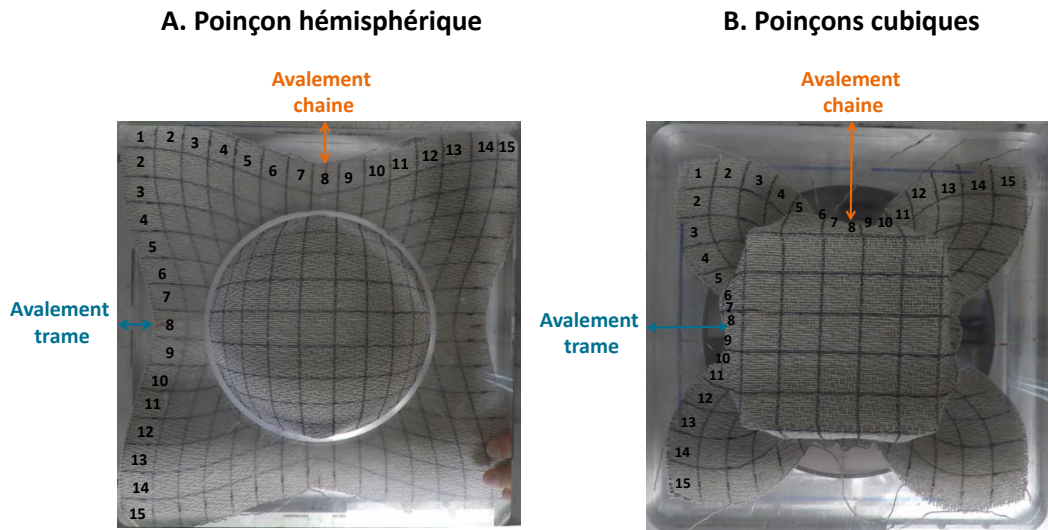


Figure 3-32 : Mesure de l'avalement pour les renforts à 0° avec les poinçons A. Hémisphérique B. Cubiques

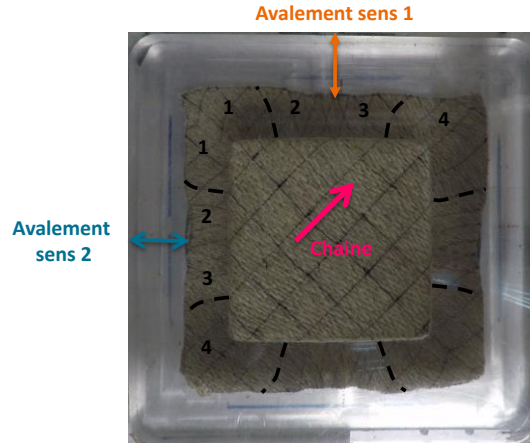


Figure 3-33 : Mesure de l'avalement pour les renforts à 45° avec les poinçons cubiques

Deux études sur la déformabilité des renforts à l'aide de ces essais d'emboutissage sont effectuées. Dans la première, on ne considère que 2 des 3 poinçons (hémisphérique et cubique) ainsi qu'une orientation à 0°/90° pour l'ensemble des renforts produits à l'échelle laboratoire ainsi que deux des renforts de l'échelle industrielle. Dans la seconde étude, les 3 poinçons seront utilisés (hémisphérique, cubique et cubique arrondi) ainsi que deux orientations 0°/90° et ±45° pour les quatre renforts élaborés à l'échelle industrielle avec les mèches de chanvre (HEMP4, HEMP5, HEMP6, HEMP7).

6.2 Etude du comportement des renforts lors d'un emboutissage par diverses formes

Dans un premier temps, les renforts produits à l'échelle laboratoire (présentés en Table 3-1) ainsi que deux des renforts produits à l'échelle industrielle (TELA et SPINA) sont mis en forme à l'aide du poinçon hémisphérique et du poinçon cubique.

6.2.1 Force maximale d'emboutissage

Le premier paramètre étudié est la force nécessaire au poinçon pour emboutir le renfort, aussi appelée force d'emboutissage. Cet effort croît avec la course du poinçon et dépend des chargements engendrés notamment par les frottements du renfort sur les outils ou de la pression serre-flan [30]. Un exemple de courbe d'évolution de la force d'emboutissage en fonction de la course du poinçon est proposé en Figure 3-34. Cette courbe met en évidence l'existence d'un pic de cette force d'emboutissage qui se stabilise ensuite à une valeur légèrement plus faible, après relâchement du renfort. Les valeurs des forces maximales enregistrées pour chaque tissu et pour chaque poinçon sont présentées en Figure 3-35 (sans écart-type puisqu'un seul essai a été réalisé par tissu et par poinçon). Pour les renforts tissés 100% fibres naturelles (FLAX1, FLAX2, HEMP1, HEMP2, HEMP3, TELA et SPINA), la force maximale requise pour l'emboutissage par le poinçon cubique est environ 3,5 fois supérieure à celle requise pour le poinçon hémisphérique. Pour les renforts tissés comélés (HPA121 et HPA122) ce rapport est d'environ 2,7 tandis que pour le renfort quasi-unidirectionnel (QUASI-UD) il est de 1,8. Le poinçon cubique, pour sa forme complexe et par ces efforts d'emboutissage, sollicite la drapabilité des renforts de manière beaucoup plus conséquente en comparaison du poinçon hémisphérique. Quatre comportements peuvent se distinguer entre tous les renforts, en fonction du type de fil utilisé (mèches, fils guipés, ou mèches et fils retordus) ou du type de renfort (tissé ou quasi-unidirectionnel). Pour les deux poinçons utilisés, la force requise pour la mise en forme des renforts tissés comélés (HPA121, HPA122), entourés en vert sur la Figure 3-35, est la plus importante. Du fait de la présence de PA12 à l'extérieur du fil guipé, les fils sont plus rigides et le tissu est alors plus difficile à mettre en forme. De plus, cette présence de PA12 entraîne des frottements importants lors de la mise en forme, ce qui nécessite une force d'emboutissage élevée. La deuxième gamme de tissus qui requiert une force relativement élevée regroupe les tissus réalisés avec des mèches dans les deux directions (HEMP1, HEMP2, HEMP3, TELA, SPINA), entourés en bleu sur la Figure 3-35. La présence de fibrilles à la surface des mèches, caractérisée précédemment par la pilosité (voir Annexe B), est source de frottements importants entre le renfort et le banc d'emboutissage, demandant ainsi une certaine force pour la mise en forme des renforts. En utilisant des fils retordus dans une direction et des mèches dans l'autre direction, cette présence de fibrilles est diminuée et la force nécessaire pour emboutir les renforts (FLAX1 et FLAX2) est moins importante, repérée en fuchsia sur la Figure 3-35. Le renfort quasi-unidirectionnel requiert de très faibles efforts lors de sa mise

en œuvre, de l'ordre d'environ 2 et 3,5 fois moins respectivement pour le poinçon hémisphérique et cubique, comparativement aux autres renforts tissés. Le comportement de ce renfort quasi-unidirectionnel est majoritairement lié au comportement de sa direction trame composée d'un fort taux de mèches, sa direction chaîne n'étant constituée que de très peu de fils retordus. Ainsi du fait de sa structure, le renfort QUASI-UD est très souple, ce qui facilite sa mise en forme. De plus, les mèches utilisées en trame sont des mèches CANAPA T2 qui possèdent une faible pilosité (voir Annexe B), diminuant ainsi les frottements du renfort avec les outils du banc d'essai. La force maximale requise lors des essais d'emboutissage est mise en regard de la masse surfacique des renforts, en Figure 3-36, uniquement pour les renforts tissés. Pour les deux types de poinçon utilisés, à des degrés moindres, une tendance linéaire entre ces deux paramètres semble se dégager : plus la masse surfacique du renfort est élevée, plus la force requise pour son emboutissage est importante. Si cette relation de linéarité est significative pour le poinçon hémisphérique, avec un coefficient de détermination de 0,9356, avec le poinçon cubique le seul paramètre de la masse surfacique ne peut justifier l'effort d'emboutissage (avec un coefficient de détermination de 0,5181). L'influence de la masse surfacique sur l'effort d'emboutissage a été mise en exergue dans le cadre du préformage de non-tissés de lin [25]. Concernant l'emboutissage avec le poinçon hémisphérique, vu la faible complexité de cette forme, le comportement, en termes d'effort, pour l'ensemble des renforts, semble être gouverné par la masse surfacique. Dans le cas du poinçon cubique, la forme à emboutir étant plus complexe avec une surface de contact plus grande, les frottements sont plus importants et influent également sur l'effort d'emboutissage en plus de la masse surfacique des renforts.

Ainsi, en fonction du type de fil (fils retordus, mèches ou fils guipés) les frottements entre le renfort et le banc d'emboutissage sont plus ou moins importants ce qui nécessite une force plus ou moins importante. De plus, la masse surfacique du renfort joue un rôle sur la force requise lors de l'emboutissage. Si la forme à épouser est peu complexe, comme c'est le cas avec un poinçon hémisphérique, la force d'emboutissage sera principalement influencée par la masse surfacique. Lorsqu'une forme plus complexe est utilisée, les frottements entre le renfort et le banc d'emboutissage sont également à prendre en considération en plus de la masse surfacique des renforts.

3 – Caractérisation des renforts en fibres naturelles

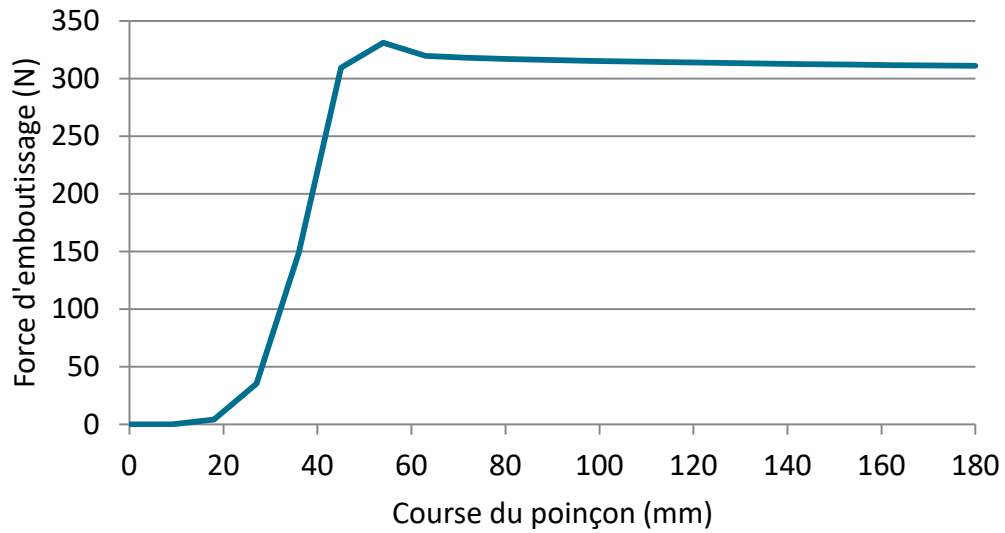


Figure 3-34 : Exemple de courbe « Force d'emboutissage – Course du poinçon »

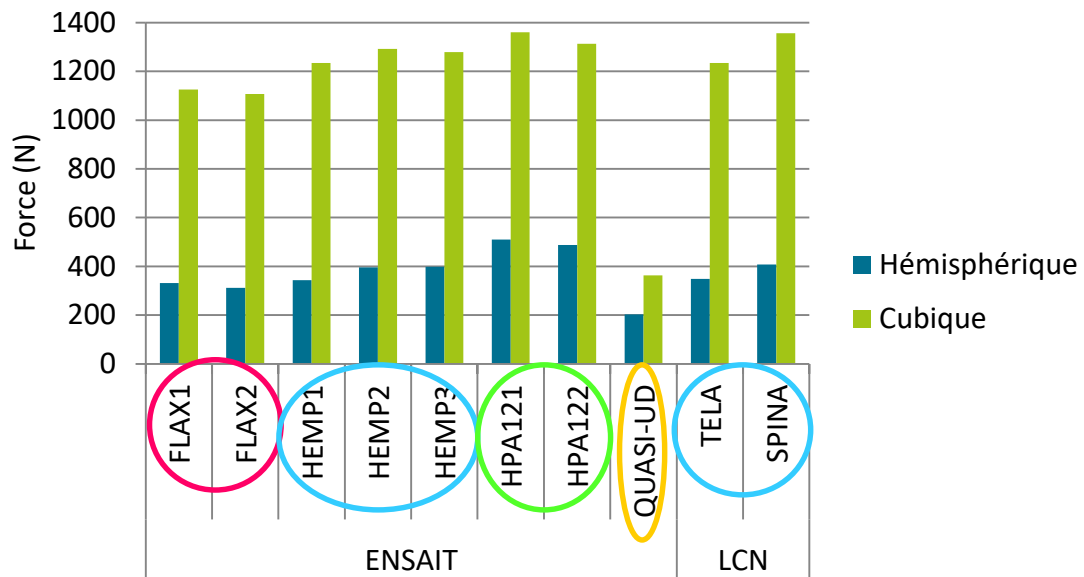


Figure 3-35 : Force maximale d'emboutissage des renforts

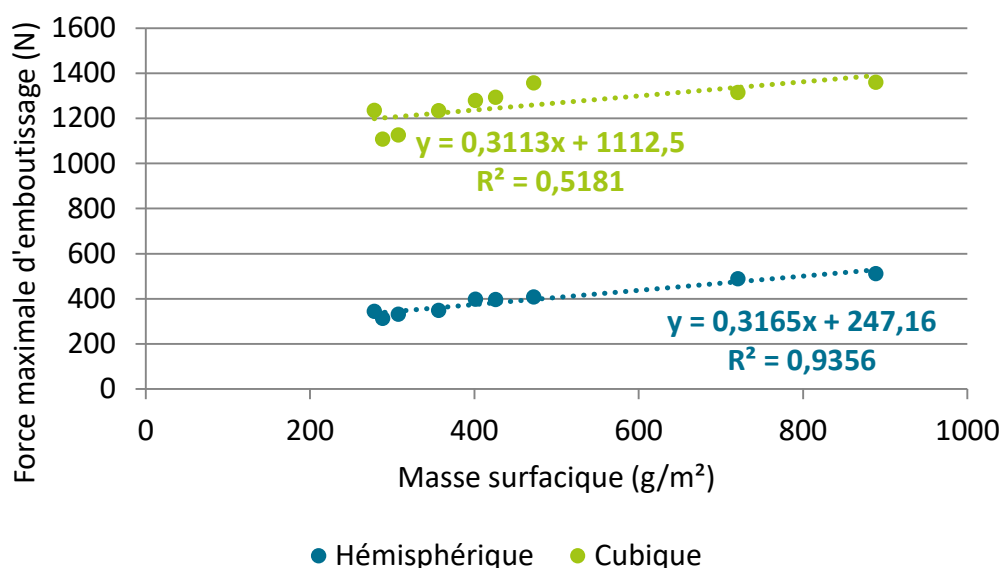


Figure 3-36 : Relation entre la masse surfacique et la force maximale d'emboutissage pour les renforts tissés

6.2.2 Avalement des renforts lors des essais d'emboutissage

L'avalement des renforts lors de l'emboutissage est étudié, selon la méthode présentée en Figure 3-32, et les mesures sont rassemblées :

- pour le poinçon hémisphérique en sens chaîne en Figure 3-37 ;
- pour le poinçon hémisphérique en sens trame en Figure 3-38 ;
- pour le poinçon cubique en sens chaîne en Figure 3-39 ;
- pour le poinçon cubique en sens trame en Figure 3-40.

Les points de mesures sur les axes des abscisses de ces figures correspondent à la position des marqueurs indiquée en Figure 3-32. Pour chaque type de poinçon, l'évolution de l'avalement le long de chaque échantillon de renfort suit le profil illustré en Figure 3-32. Pour l'orientation considérée (0°), dans les quatre coins de l'échantillon, le renfort reste en place et l'avalement est quasi-nul (à la précision de mesure près). L'emboutissage par une forme hémisphérique entraîne un avalement qui augmente progressivement jusqu'au milieu des arêtes du renfort puis diminue de manière symétrique. Avec le poinçon cubique les valeurs maximales sont atteintes en plusieurs points, définissant ainsi un plateau au milieu des arêtes du renfort. L'avalement est significativement plus important avec le poinçon cubique, ses dimensions étant, en surface déployée, plus importantes que celles du poinçon hémisphérique.

Pour les deux types de poinçons, l'avalement en sens chaîne est globalement similaire pour l'ensemble des renforts tissés. Les densités chaîne étant identiques dans cette direction, le comportement des différents tissus est semblable, notamment pour le poinçon cubique, hormis pour le renfort quasi-unidirectionnel qui ne présente pas d'avalement en sens chaîne, dû au faible nombre de fils retordus, insérés en chaîne (0,6 fils/cm). En sens trame, pour les deux types de poinçons utilisés, l'évolution de l'avalement a également

tendance à être similaire pour l'ensemble des renforts tissés 100% fibres naturelles. Pour certains renforts emboutis par le poinçon hémisphérique, un avalement plus important est observé pour des tissus présentant un comportement en traction uniaxiale plus faible : par exemple les renforts FLAX1 et FLAX2 possèdent un plus grand avalement (Figure 3-37 et Figure 3-38) et de plus faibles effort et déformation à rupture (Figure 3-10 et Figure 3-15) que les tissus HEMP1, HEMP2 et HEMP3. Sur le même principe, les renforts comelés à partir de fils guipés (HPA121 et HPA122) ont un avalement plus faible que celui des autres renforts tissés et présentaient des propriétés en traction relativement élevées parmi l'ensemble des renforts tissés. Ainsi, les renforts ayant un comportement en traction assez élevé seront plus aptes à subir des contraintes fortes, telles que celles engendrées par l'emboutissage, sans trop s'avaloir. Avec le poinçon cubique, ce phénomène est moins prononcé : la forme imposée est plus complexe et l'emboutissage est alors plus violent pour les renforts. Le renfort quasi-unidirectionnel présente un avalement en sens trame similaire à celui des renforts tissés, contrairement à l'avalément en sens chaîne qui était nul. Dans cette direction, le renfort quasi-unidirectionnel semble apte à se déformer, du fait de sa grande quantité de mèches qui sont bien maintenues par les fils retordus.

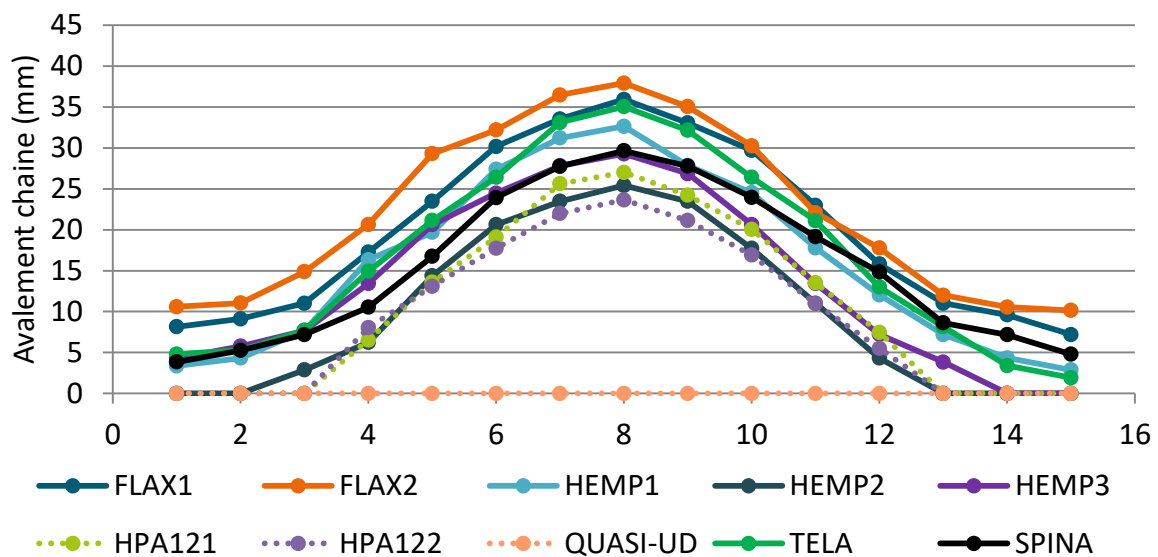
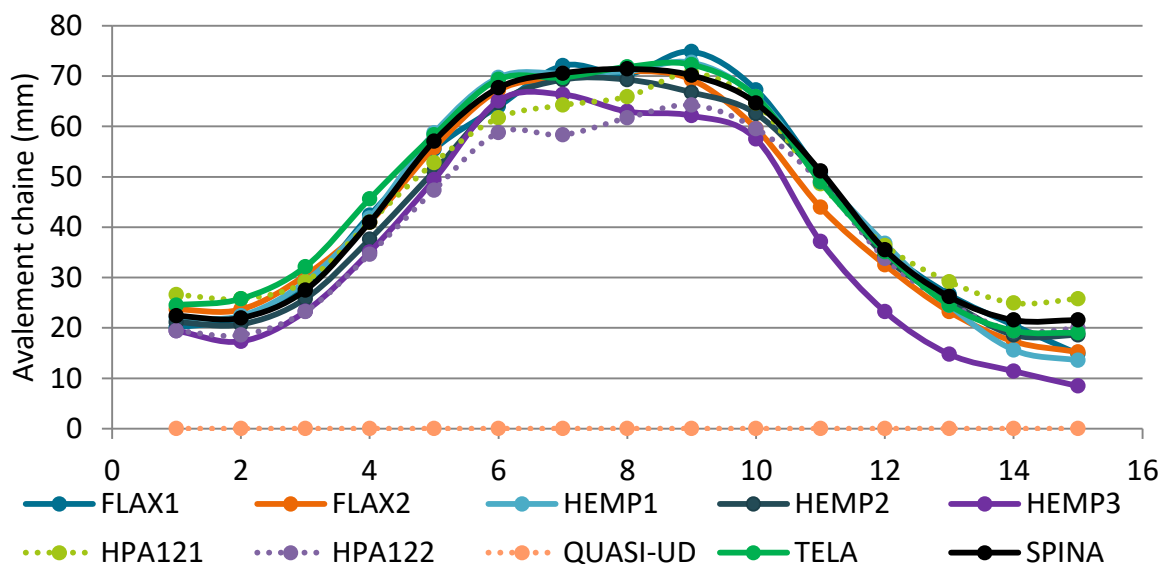
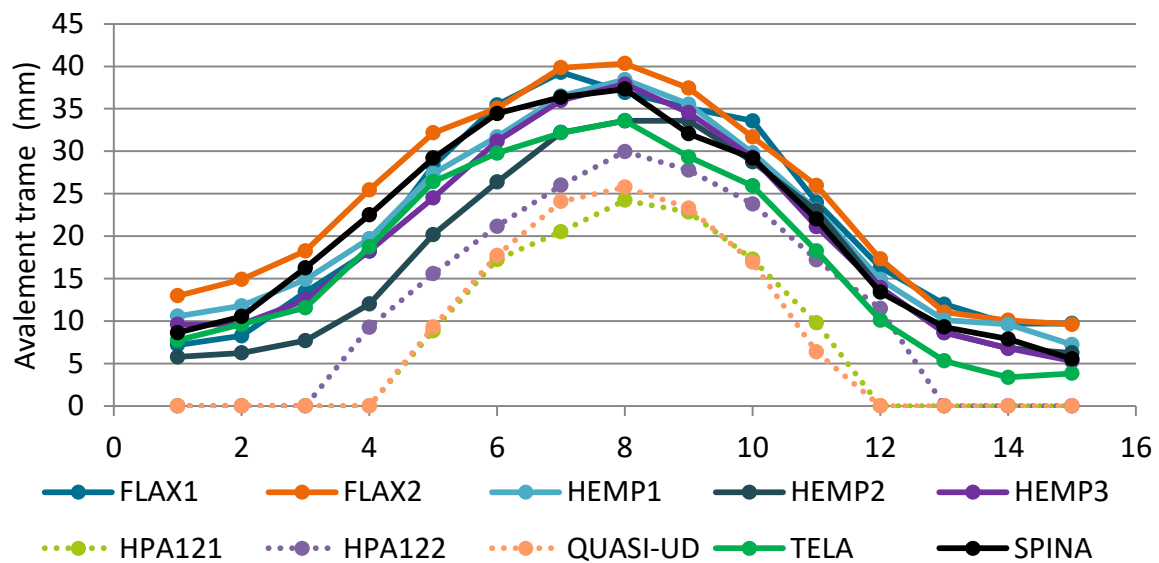


Figure 3-37 : Avalément en sens chaîne des renforts avec le poinçon hémisphérique



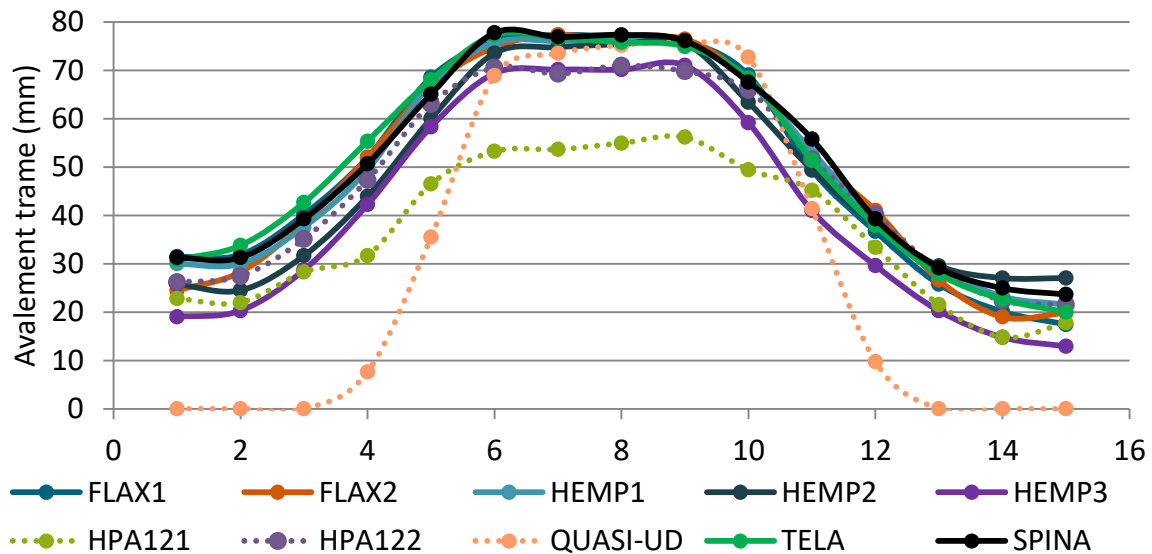


Figure 3-40 : Avenement en sens trame des renforts avec le poinçon cubique

La valeur maximale de l'avenement de chaque renfort est présentée en Figure 3-41 pour les deux directions et les deux types de poinçons. L'avenement observé avec le poinçon hémisphérique est environ deux fois plus faible que celui observé pour le poinçon cubique. De plus, comme observé précédemment, l'avenement des renforts comelés est légèrement plus faible que celui des renforts tissés 100% fibres naturelles. Le renfort quasi-unidirectionnel reste un cas à part qui, du fait de sa faible cohésion, ne présente pas d'avenement en sens chaîne, et un avenement semblable à celui des renforts tissés en sens trame.

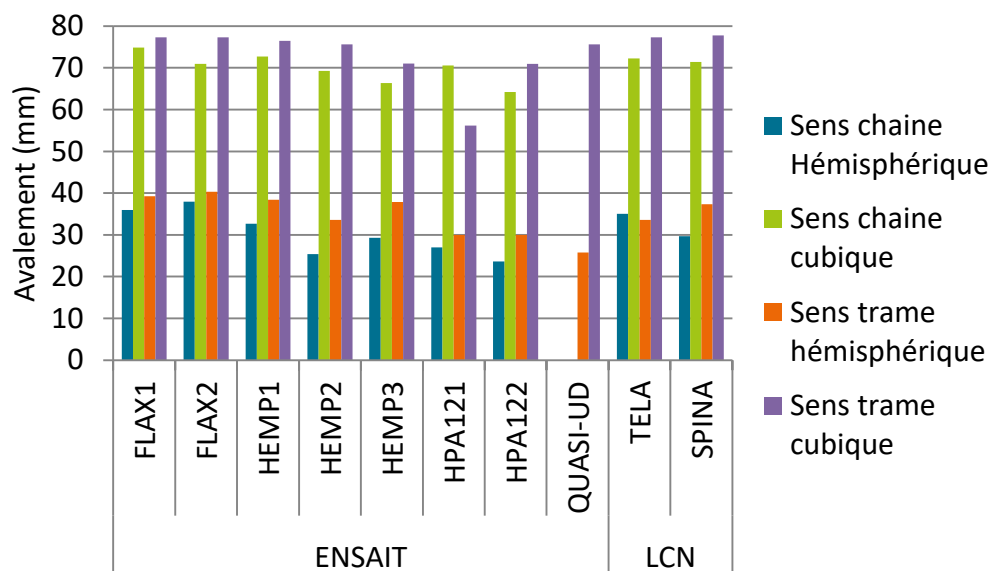


Figure 3-41 : Avenement maximal lors des essais d'emboutissage

Ainsi, pour conclure, l'avenement des renforts est lié à leur capacité de déformation. Si ces derniers ont de faibles propriétés mécaniques en traction uniaxiale, ils seront plus

déformables lors de la mise en forme et auront un avalement plus important. A l'inverse, pour les renforts ayant des propriétés en traction plus importantes, ils seront plus à même de résister lors de la mise en forme et leur avalement sera plus faible. Lorsque la forme à emboutir devient plus complexe, d'autres phénomènes, tels que des frottements avec le banc d'essai, viennent également influencer l'avalement.

6.2.3 Angles de cisaillement

Les angles de cisaillement sont mesurés pour l'ensemble des renforts tissés, comme décrit précédemment au paragraphe 6.1. Les valeurs sont rassemblées par zones, pour lesquelles les valeurs d'angles sont du même ordre, et présentées en Annexe D. Les valeurs d'angles de cisaillement maximum, dont la localisation diffère selon le type de renfort comme indiqué en Figure 3-42, sont rassemblées pour l'ensemble des renforts tissés et pour les deux types de poinçons en Figure 3-43. Du fait de la faible densité de fils en direction transverse, les angles de cisaillement ne sont pas mesurés sur le renfort quasi-unidirectionnel.

Sur le dessus du poinçon, hémisphérique ou cubique, l'angle de cisaillement est nul, les renforts n'étant pas assujettis à du cisaillement. Les zones où le cisaillement est maximal sont localisées à l'entrée du tissu sur le poinçon, et plus particulièrement dans les coins. A ces endroits, le renfort subi en effet les contraintes de traction et de cisaillement les plus importantes pour s'adapter au mieux à la forme imposée. Le poinçon hémisphérique entraîne un plus grand cisaillement entre les fils de chaîne et les fils de trame des renforts tissés, les angles maximum sont plus élevés pour le poinçon hémisphérique que pour le poinçon cubique. Si le poinçon cubique sollicite plus le comportement en traction (par l'avalement), le poinçon hémisphérique sollicite plus le comportement en cisaillement.

Les renforts comelés (HPA121 et HPA122) présentent des angles de cisaillement plus faibles lors de leur mise en forme que les renforts 100% fibres naturelles. Les fils comelés étant plus gros et moins souples, du fait de la présence du guipage, leurs mouvements au sein de la structure tissée sont moins aisés, et les angles de cisaillement sont ainsi plus faibles. Dans le cadre de ces essais, avec ces poinçons hémisphérique et cubique, le recours à l'utilisation de fils retordus et non de mèches en sens chaîne (ce qui est le cas pour les renforts FLAX1 et FLAX2) ne montre pas de différences en termes de valeurs d'angles de cisaillement maximum comparativement aux tissus composés de mèches en sens chaîne. Pour un même type de fil dans les deux directions, une légère différence de comportement peut être attribuée en fonction de l'armure choisie : les renforts tissés avec des armures satin et sergé (HEMP2/HEMP3 et SPINA) présentent des angles de cisaillement légèrement plus faibles, pour les deux types de poinçons étudiés ici, que les renforts tissés avec des armures toiles (respectivement HEMP1 et TELA). Du fait de l'espacement des points de liage plus important dans des armures de type sergé et satin (voir Figure 3-24 pour l'emplacement

des points de liage en fonction de l'armure), les fils sont moins bloqués au sein de la structure tissée et ont plus de capacité à se mouvoir en présence d'une forme imposée à épouser. Ainsi, le comportement en cisaillement lors de la mise en forme du renfort est majoritairement induit par la nature du fil (100% fibres naturelles ou comélé) et de l'armure choisie lors du tissage.

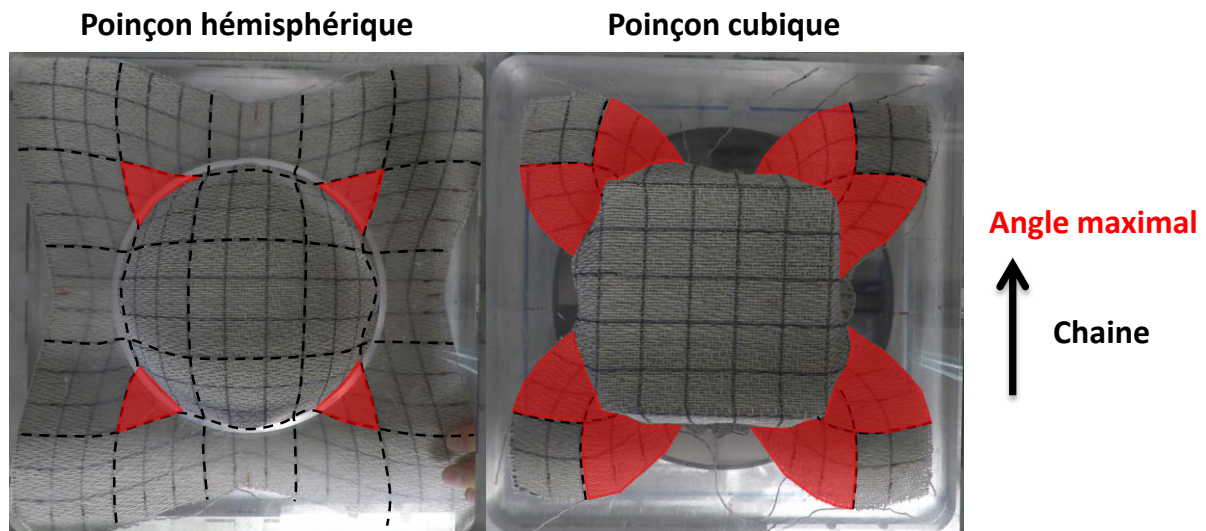


Figure 3-42 : Localisation des zones d'angles maximum pour les deux types de poinçon (hémisphérique et cubique)

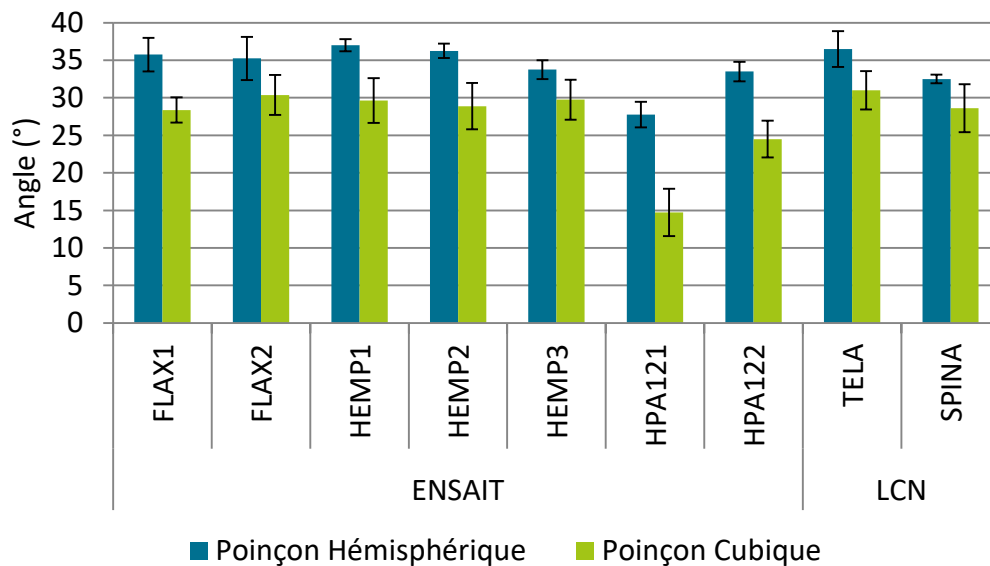


Figure 3-43 : Angles de cisaillement maximum lors de l'emboutissage des renforts tissés

6.2.4 Défauts lors de la mise en forme

A l'issue des essais d'emboutissage, des photos des renforts emboutis sont prises pour observer les défauts. L'aspect des renforts tissés étant similaire pour l'ensemble des renforts étudiés dans ce paragraphe 6.2, une seule photo est présentée pour le

comportement de l'ensemble des renforts tissés. Par ailleurs, les défauts observés sur les renforts tissés 100% fibres naturelles et les renforts comelés sont similaires. Les Figure 3-44 et Figure 3-45 présentent respectivement les renforts tissés et quasi-unidirectionnel après emboutissage avec le poinçon hémisphérique et les Figure 3-46 et Figure 3-47 présentent respectivement les renforts tissés et quasi-unidirectionnel après emboutissage avec le poinçon cubique.

Lors de l'emboutissage par le poinçon hémisphérique, les renforts tissés ne sont pas assujettis à des défauts de types plis, boucles ou de glissements du réseau. La Figure 3-44 ne montre en effet aucun défaut visuel après emboutissage. Par ailleurs la répartition de matière après préformage semble bien homogène, ce qui influera sur un taux de fibres bien réparti dans les renforts. Les renforts tissés peuvent donc supporter une mise en forme avec ce poinçon hémisphérique sans être endommagés.

Après emboutissage, le renfort quasi-unidirectionnel présente quant à lui des glissements entre certaines mèches, entourés pour exemple en vert sur la Figure 3-45. Un zoom de ce défaut est effectué sur cette même Figure 3-45 sur lequel l'espacement entre les mèches est bien visible. Du fait du peu de fils retordus utilisés en sens chaîne, la structure du renfort n'est que faiblement maintenue lorsque les mèches de trame épousent la courbure du poinçon. Ces glissements apparaissent du côté du poinçon dans la direction chaîne pour laquelle l'avalement du renfort était nulle (Figure 3-37). Les fils de chaîne se sont avalés au sein de la structure pour s'adapter à la forme imposée, mais en raison d'une très forte densité, les mèches de trame sont restées en place sous les serres flancs, conduisant ainsi à l'espacement des mèches sur les côtés du poinçon. Dans la direction trame (repérée par une flèche bleue sur la Figure 3-45) un avalement avait été mesuré (Figure 3-38) et il n'y a pas de défauts apparents. Les fils de trame ont été correctement entraînés par le poinçon et le renfort quasi-unidirectionnel semble apte à épouser la forme imposée dans la direction où son taux de fibres est très élevé. Cet exemple montre que la déformabilité sur forme non développable, comme l'hémisphère, de renforts UD (ou quasi-UD) ne peut s'opérer sans défauts. Pour ce type d'emboutissage il est nécessaire de disposer de deux directions de renforts fibreux pour leur aptitude à cisailer.

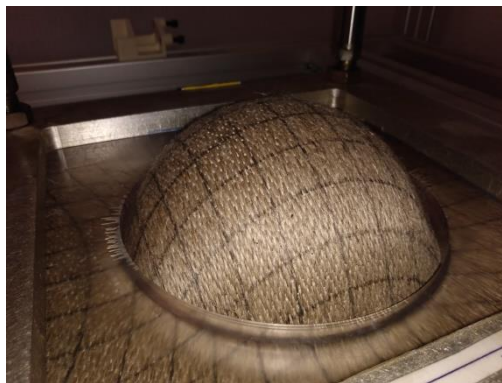


Figure 3-44 : Renfort tissé après emboutissage avec le poinçon hémisphérique

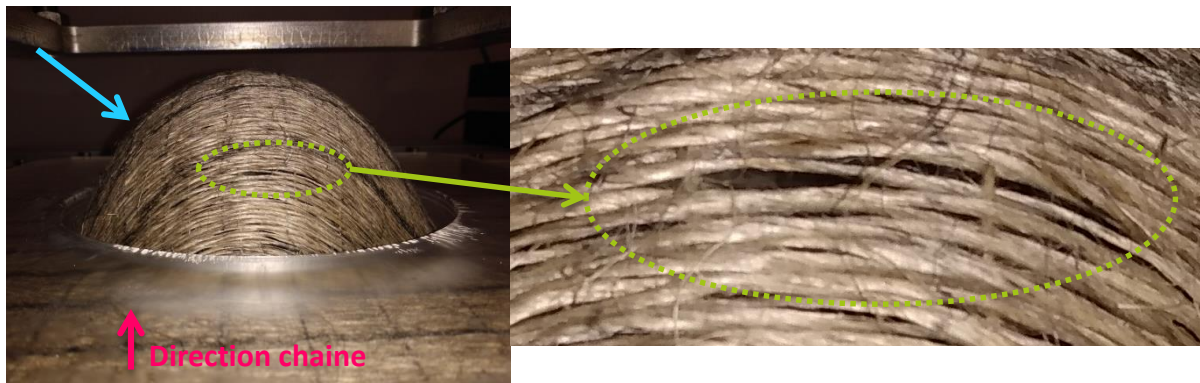


Figure 3-45 : Renfort quasi-unidirectionnel après emboutissage avec le poinçon hémisphérique

L'emboutissage par le poinçon cubique entraîne des défauts sur les deux types de renforts étudiés. Pour les renforts tissés, ces défauts se caractérisent tout d'abord par des plis sur les côtés du cube à la sortie de la matrice, entourés en orange sur la Figure 3-46. Ces plis, localisés sur les quatre faces du poinçon cubique, entraînent des légères variations d'avalement, aussi visibles sur la Figure 3-46, mais il n'y a pas de plis sous les serres flancs, la pression de 0,2 MPa appliquée sur ces derniers permet de maintenir le renfort à plat. Ce phénomène est observé pour l'ensemble des renforts tissés étudiés. Des espacements des fils et des mèches au niveau des quatre sommets du poinçon sont également observés et entourés en vert sur la Figure 3-46. Ces espacements apparaissent pour l'ensemble des renforts tissés, et sont localisés uniquement au niveau des sommets du cube qui sont donc trop saillants pour les renforts tissés et viennent les transpercer quelque soient les paramètres choisis lors de la production du renfort.

Dans le cas du renfort quasi-unidirectionnel, les défauts diffèrent selon la direction chaîne ou trame. Dans la direction trame, repérée par la flèche bleue sur la Figure 3-47, les mèches épousent les deux faces latérales et la face supérieure du cube sans défauts majeurs grâce à leur avalement (voir paragraphe 6.2.2.). Dans l'autre direction, tout comme pour le poinçon hémisphérique, les fils retordus ne suffisent pas à maintenir la structure et les mèches s'écartent pour permettre au renfort de répondre à la forme imposée. La forme d'emboutissage étant plus agressive et la surface à draper plus grande qu'avec le poinçon hémisphérique, le glissement entre les mèches est conséquent, (zone entourée en vert sur la Figure 3-47), et il n'y a quasiment plus de renfort sur les deux autres faces latérales du poinçon. La présence des mèches sur les côtés du cube en sens chaîne étant pratiquement inexistante, les fils retordus utilisés en chaîne sont bien visibles et paraissent détendus. Ainsi, il y a donc eu un déplacement des fils de chaîne lors de la mise en forme, sans pour autant générer d'avalement du tissu du fait de la trop forte densité de mèches de la direction transverse, comme ce qui avait déjà été évoqué pour le poinçon hémisphérique. Dans le cas des renforts quasi-unidirectionnels, la cohésion dans le sens chaîne est très faible, ce qui fait que lors de la mise en forme les fils retordus glissent au sein de la structure sans entraîner les mèches de trame dans leur mouvement. Ainsi, les mèches restent en place entre la matrice et le serre-flanc sans s'avalier, mais les fils de chaîne ne les maintiennent plus. Dans

la direction trame, le renfort quasi-unidirectionnel est beaucoup plus rigide du fait de la forte densité trame, et les mèches s'avalent pour épouser la forme du poinçon. Ce phénomène, particulièrement observé au niveau du poinçon cubique, est similaire dans une moindre mesure avec le poinçon hémisphérique.

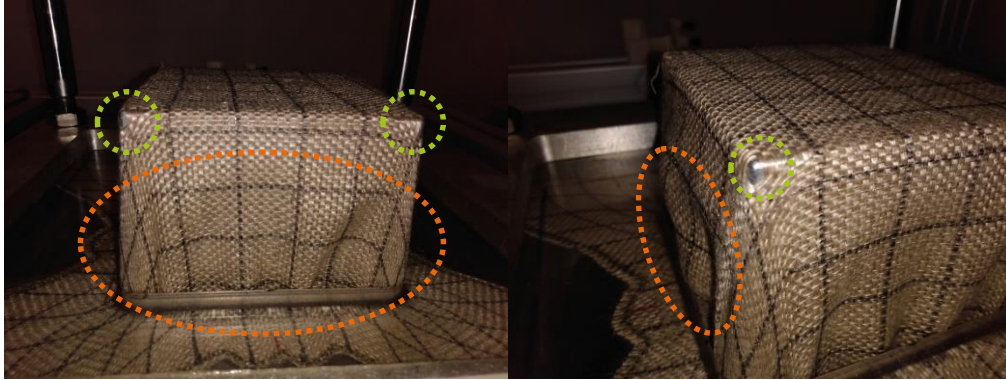


Figure 3-46 : Renfort tissé après emboutissage avec le poinçon cubique

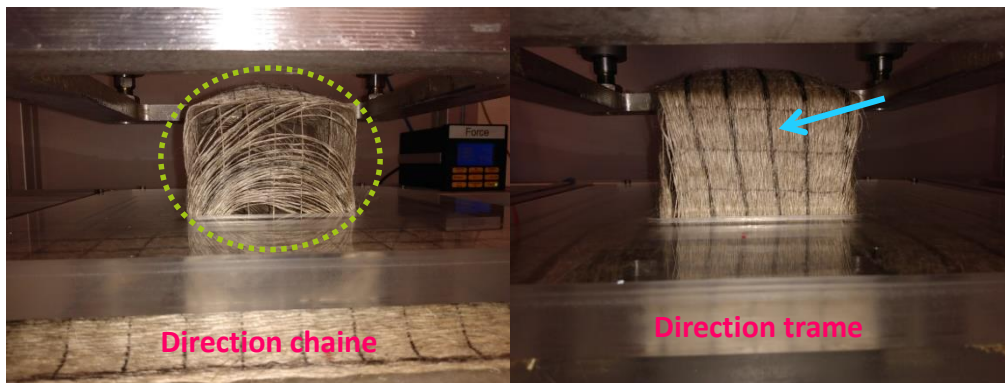


Figure 3-47 : Renfort quasi-unidirectionnel après emboutissage avec le poinçon cubique

L'étude des défauts engendrés par l'emboutissage des renforts, met en évidence un des défauts majeurs des renforts quasi-unidirectionnels : lorsque l'application composite finale requiert un drapage sur une forme non-développable ces derniers ne sont pas adaptés. En raison de la faible cohésion de la structure quasi-unidirectionnelle, cette étape entraîne un écartement des fils et donc des zones pauvres voire vides en fibres. Dans le cas des renforts tissés, la présence de fils dans les deux directions en proportions plus équilibrées permet une certaine adaptabilité. En présence d'une forme non développable, ces derniers sont tout de même capables de se draper sans défauts. Néanmoins, en présence d'une forme trop complexe, les tissus auront tendance à former des plis, ou les fils peuvent s'écarter. Afin de limiter l'apparition de défauts, plusieurs solutions peuvent être envisagées, telles que la diminution de la pression appliquée sur les serre flancs à certains endroits, un changement d'orientation du renfort ou le recours à l'utilisation d'un poinçon aux arrêtes arrondis (pour diminuer la complexité de la forme imposée).

6.2.5 Conclusion

La mise en forme des renforts par un poinçon cubique est beaucoup plus complexe pour les renforts tissés que celle par un poinçon hémisphérique. L'ensemble des renforts se déforme dans les deux directions chaîne et trame pour draper le poinçon tandis que le renfort quasi-unidirectionnel ne se déforme qu'en direction trame, du fait de sa faible cohésion. La force requise pour emboutir les tissus avec le poinçon cubique est beaucoup plus élevée que celle requise pour le poinçon hémisphérique. En présence d'une forme peu complexe, la masse surfacique des renforts influe sur la force nécessaire pour emboutir les renforts, plus cette dernière sera élevée, plus le tissu sera dense et nécessitera une plus grande force pour être mis en forme. Lorsque la forme imposée se complexifie, les frottements entre le renfort et le banc d'essais sont non négligeables et doivent également être pris en considération.

Selon le type de fils (retordu ou mèche), la nature des fils (100% fibres naturelles ou comelés) ou le type de renfort (tissé ou quasi-unidirectionnel) la force requise pour emboutir le renfort à la forme souhaitée diffère. L'avalement, paramètre utilisée pour caractériser la consommation de tissu nécessaire pour que le renfort s'adapte à la forme imposée, varie en fonction de celle-ci, pour que le renfort se drape au mieux à la forme requise. Le cisaillement au sein des renforts dépend également de ces paramètres (type et nature du fil). Enfin, en termes de défauts, le poinçon hémisphérique par les plus faibles efforts générés ne conduit pas à des défauts notamment sur les renforts tissés. Concernant le renfort QUASI-UD, sur cette forme non-développable des glissements commencent à apparaître affectant l'homogénéité du renfort. Le poinçon cubique, quant à lui, entraîne des espacements entre les fils au niveau des sommets du cube et l'apparition de plis sur les faces du cube tandis qu'il entraîne une détérioration du renfort quasi-unidirectionnel.

6.3 Etude de l'influence de l'armure et de la densité trame lors de l'emboutissage par divers poinçons

Une seconde étude d'emboutissage est réalisée, avec les quatre tissus élaborés à l'échelle industrielle (HEMP4, HEMP5, HEMP6 et HEMP7). Ces tissus sont testés avec les trois formes de poinçons (hémisphérique, cubique et cubique arrondi) pour une orientation à 0/90° et pour les deux poinçons les plus complexes (cubique et cubique arrondi) avec une orientation à $\pm 45^\circ$. Les essais à 45° avec un poinçon de forme cubique ou cubique arrondie permettent d'atteindre un plus grand cisaillement des tissus pendant la mise en forme des renforts. Pour ces essais, la pression appliquée sur les serre-flancs est identique et égale à 0,2 MPa.

6.3.1 Force maximale d'emboutissage

La force maximale d'emboutissage pour ces essais est présentée en Figure 3-48. Celle enregistrée avec le poinçon hémisphérique est environ 3 fois plus faible que lors d'une mise en forme par un poinçon cubique, et ce quelle que soit l'orientation de l'échantillon. La mise en forme sur le poinçon cubique requiert une force un peu plus élevée qu'avec le poinçon cubique arrondi du fait de ses arrêtes et ses sommets plus saillants. Cette différence de valeurs d'efforts entre les deux poinçons cubique et cubique arrondi est similaire quel que soit le renfort considéré, à l'exception du tissu HEMP5 à 45°. Pour les échantillons à 45°, la force d'emboutissage est plus faible que pour les échantillons à 0°, à type de poinçon équivalent. Avec une orientation à 45°, les fils ne sont plus orientés dans les deux directions majeures du cube mais dans la direction de ses diagonales, ce qui rend le tissu plus souple, et sa mise en forme, même par une forme complexe, requiert une force moins élevée que pour un même tissu avec une orientation à 0°. Ce phénomène avait déjà été observé par F. Omrani et al. pour des renforts non tissés avec un poinçon cubique [25]. D'autre part l'augmentation de la densité trame (HEMP4 vs. HEMP5 et HEMP6 vs. HEMP7), et par conséquent de la masse surfacique (voir Figure 3-4), entraîne une augmentation de la force maximale d'emboutissage, et ce quels que soient les poinçons et les orientations considérées. En augmentant la densité trame, le renfort devient plus compact, les mouvements des fils les uns par rapport aux autres sont rendus plus difficiles et la force nécessaire pour mettre en forme la structure est plus importante. Par ailleurs, plus il y a de fils dans le renfort, plus les frottements entre le renfort et le banc d'essai seront importants, ce qui nécessitera une force plus importante à l'emboutissage. Les renforts HEMP5 et HEMP7 correspondent, pour rappel, aux versions industrialisées des renforts HEMP2 et HEMP3. Pour un même type de poinçon (hémisphérique ou cubique) et une même orientation (0°), les forces maximales d'emboutissages sont similaires entre les deux versions (Figure 3-35 pour HEMP2 et HEMP3 et Figure 3-48 pour HEMP5 et HEMP7). Ainsi, l'échelle de production n'influe pas sur la force maximale d'emboutissage.

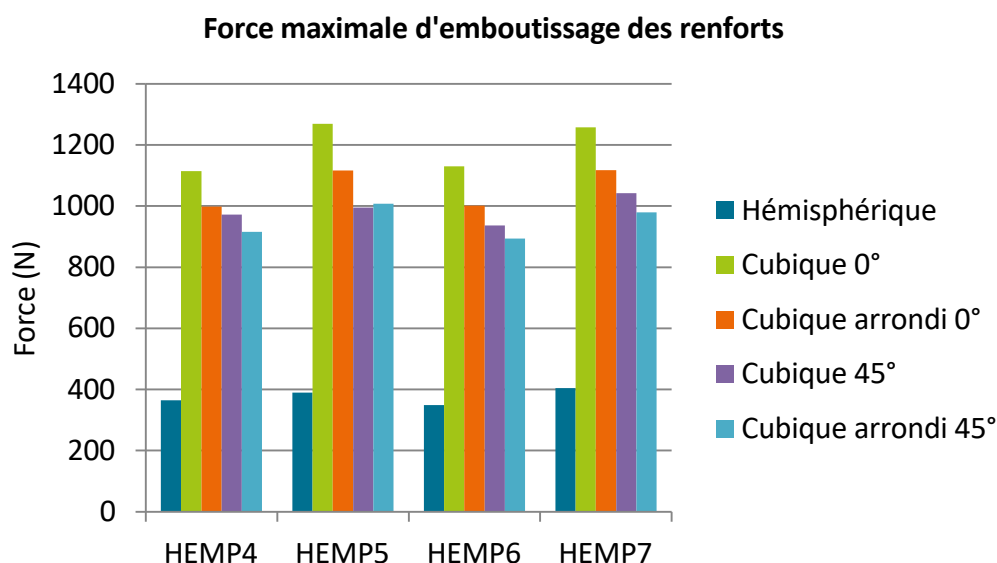


Figure 3-48 : Force maximale d'emboutissage des renforts

6.3.2 Avalement des renforts lors des essais d'emboutissage

Les notions d'avalement chaîne/trame ont été présentées en Figure 3-32 et pour les orientations à 45°, les avalements sont notés dans les sens 1/sens 2 et décrits en Figure 3-33. L'avalement lors des essais d'emboutissage est présenté :

- pour le poinçon hémisphérique avec l'orientation 0° respectivement en Figure 3-49 dans le sens chaîne et en Figure 3-50 dans le sens trame ;
- pour le poinçon cubique avec l'orientation 0° respectivement en Figure 3-51 dans le sens chaîne et en Figure 3-52 dans le sens trame ;
- pour le poinçon cubique arrondi avec l'orientation 0° respectivement en Figure 3-53 dans le sens chaîne et en Figure 3-54 dans le sens trame ;
- pour le poinçon cubique avec l'orientation 45° respectivement en Figure 3-55 dans le sens 1 et en Figure 3-56 dans le sens 2 ;
- pour le poinçon cubique arrondi avec l'orientation 45° respectivement en Figure 3-57 dans le sens 1 et en Figure 3-58 dans le sens 2.

Les avalements des renforts à 0° avec les poinçons hémisphériques et cubiques suivent les mêmes profils que ceux observés lors de l'étude précédente (au paragraphe 6.2.2 pour l'avalement. Il n'y a que très peu de différence de comportement des renforts orientés à 0° entre ceux emboutis par le poinçon cubique et le poinçon cubique arrondi, puisque ces formes ont les mêmes dimensions géométriques. Les modifications des arêtes et sommet du poinçon cubique arrondi, qui entraînait des différences de forces maximales d'emboutissage, influent peu sur l'avalement des renforts. De même que pour la force d'emboutissage, l'échelle de production n'a pas d'influence sur l'avalement des renforts tissés : les valeurs mesurées pour les renforts HEMP2 et HEMP3 pour les poinçons hémisphérique et cubique à

0° sont semblables à celles mesurées pour, respectivement HEMP5 et HEMP7, pour les mêmes poinçons et orientations, aux écarts de mesure près.

Concernant les renforts emboutis à 45° par les poinçons cubique et cubique arrondi, l'avalement est constant et élevé tout le long des arêtes des échantillons testés, tout en restant moins important que lors de l'emboutissage avec un poinçon similaire mais une orientation du renfort à 0°. L'entrecroisement perpendiculaire des fils ne correspond plus aux côtés du poinçon mais se situe le long des diagonales du poinçon avec une orientation de l'échantillon à 45°.

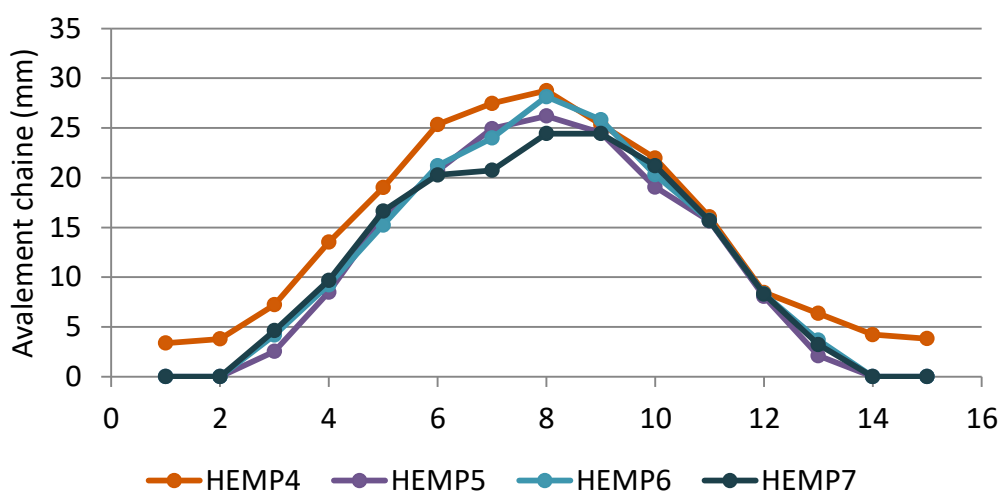


Figure 3-49 : Avalement en sens chaîne (0° poinçon hémisphérique)

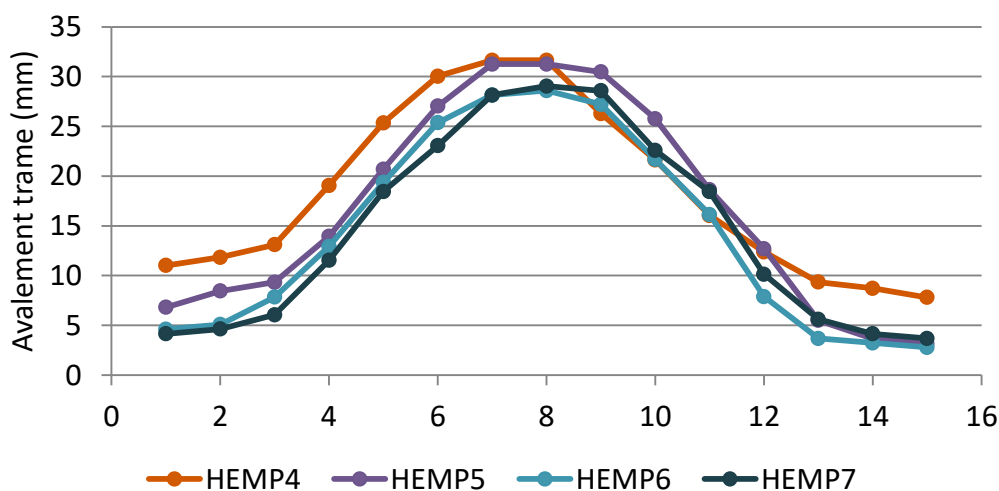


Figure 3-50 : Avalement en sens trame (0° poinçon hémisphérique)

3 – Caractérisation des renforts en fibres naturelles

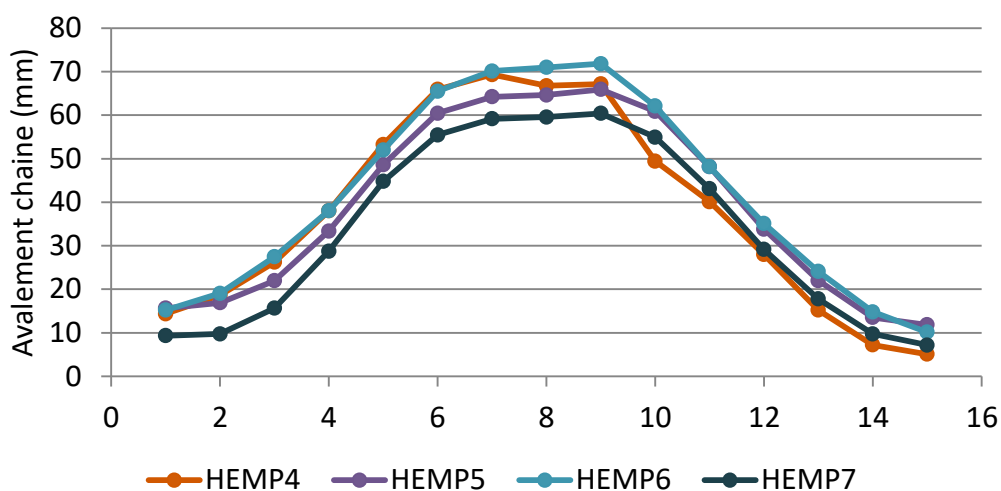


Figure 3-51 : Avalement en sens chaîne (0° poinçon cubique)

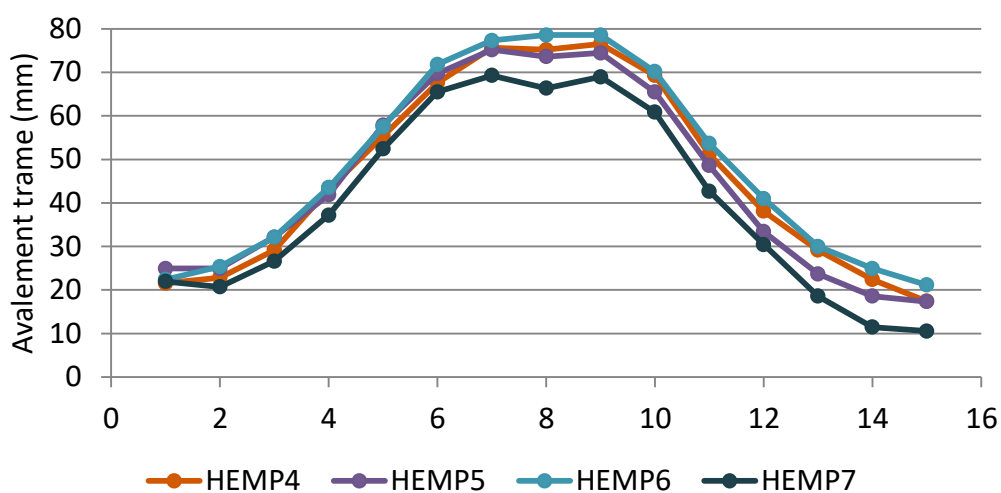


Figure 3-52 : Avalement en sens trame (0° poinçon cubique)

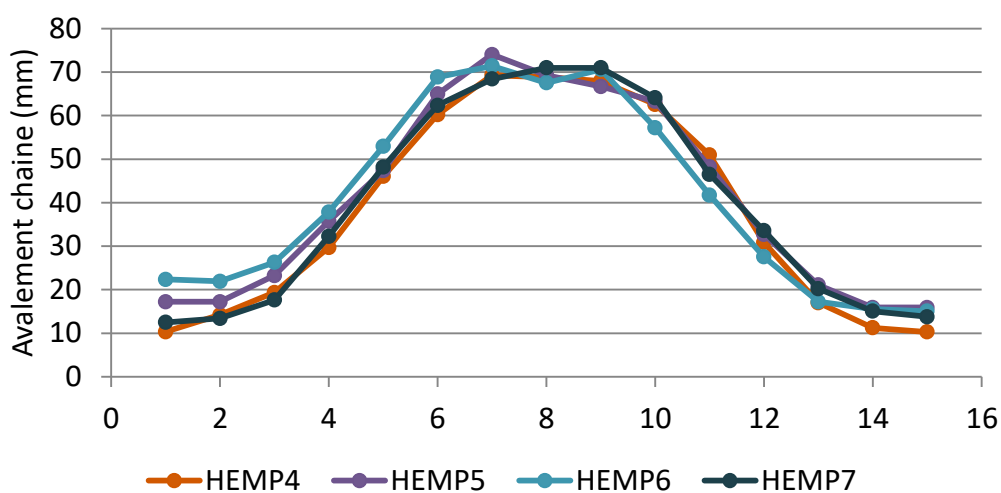


Figure 3-53 : Avalement en sens chaîne (0° poinçon cubique arrondi)

3 – Caractérisation des renforts en fibres naturelles

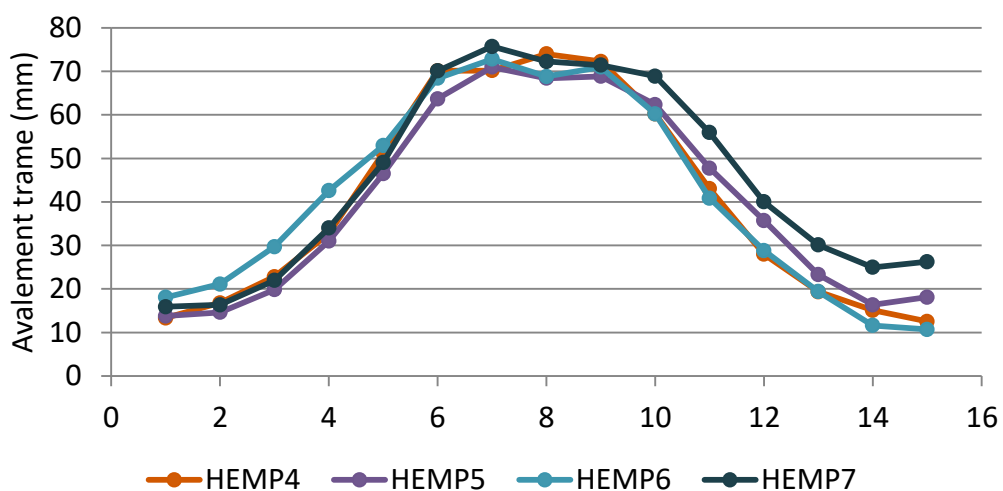


Figure 3-54 : Avalement en sens trame (0° poinçon cubique arrondi)

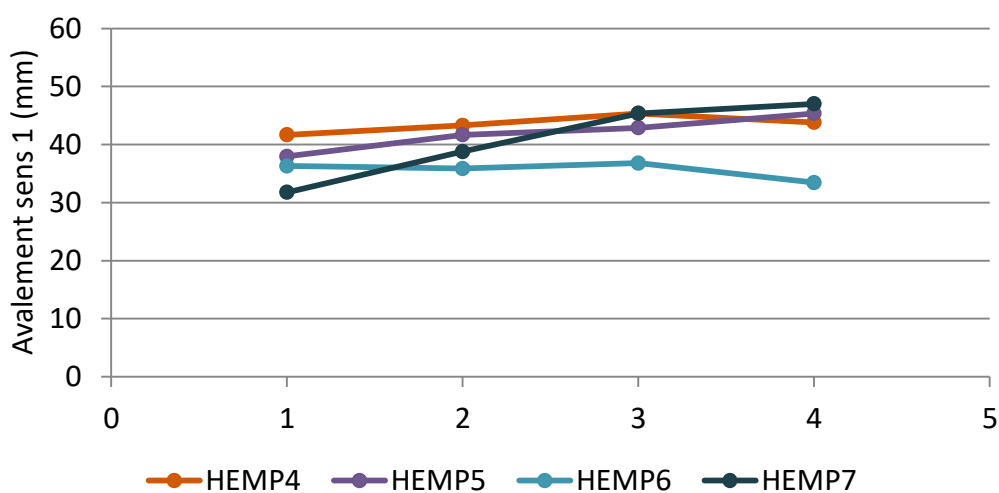


Figure 3-55 : Avalement en sens 1 (45° poinçon cubique)

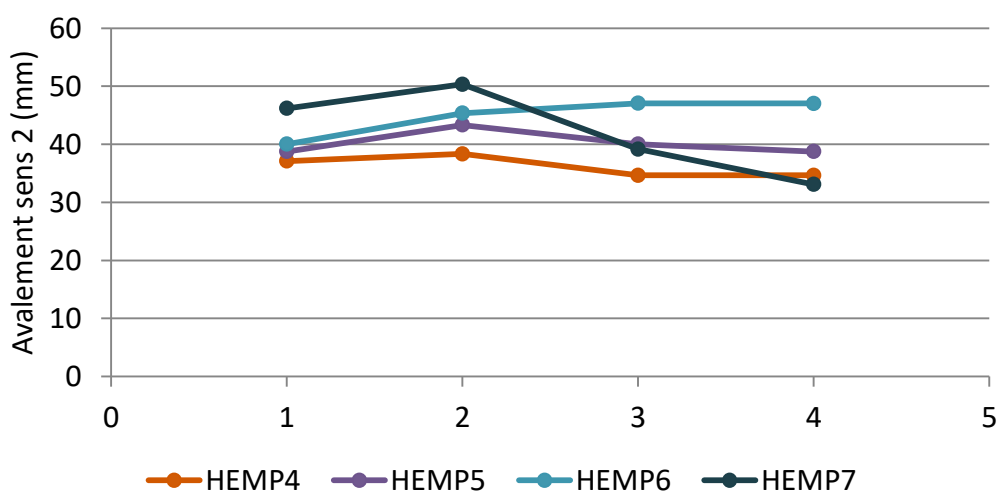


Figure 3-56 : Avalement en sens 2 (45° poinçon cubique)

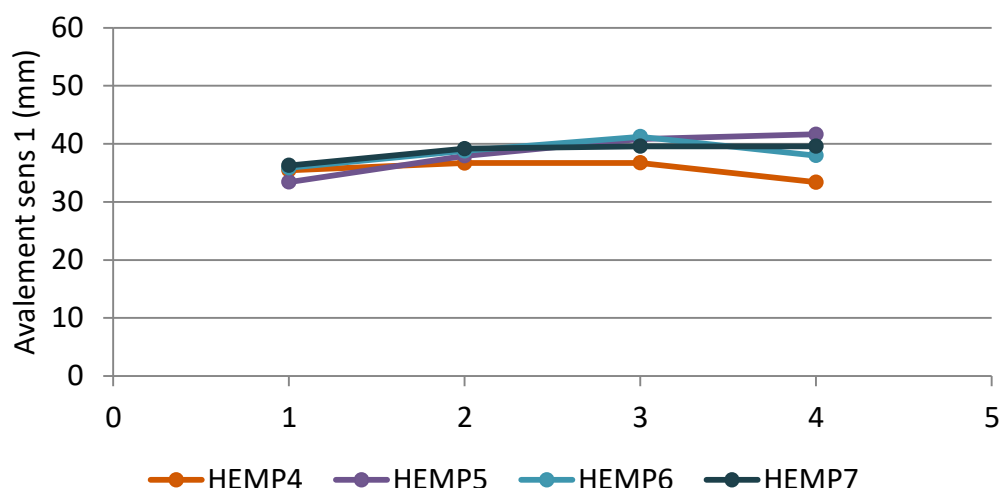


Figure 3-57 : Avalement en sens 1 (45° poinçon cubique arrondi)

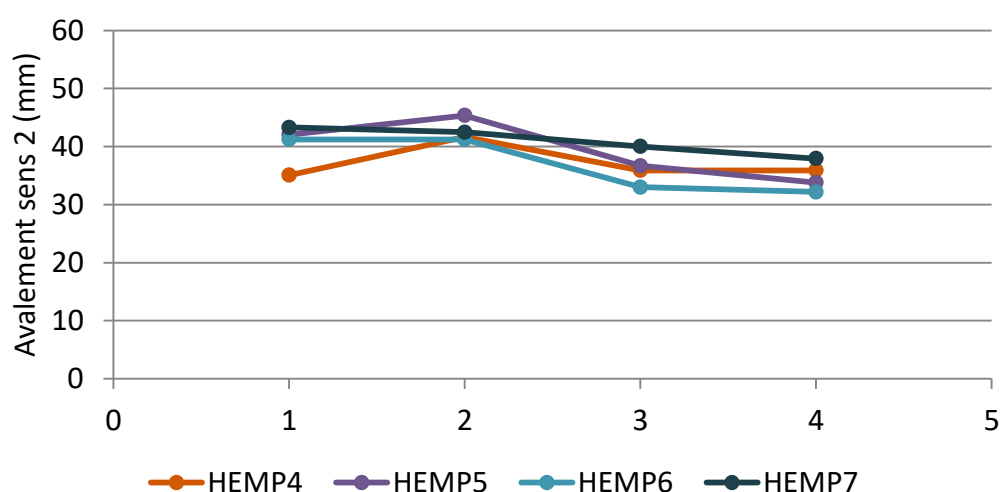


Figure 3-58 : Avalement en sens 2 (45° poinçon cubique arrondi)

La valeur maximale de l'avalement est présentée en Figure 3-59 pour le sens chaîne ou sens 1 et en Figure 3-60 pour le sens trame ou sens 2. Pour les tissus orientés à 0°, les valeurs d'avalement les plus élevées sont obtenues avec les poinçons cubique et cubique arrondi. Ces poinçons étant plus complexes que le poinçon hémisphérique ils entraînent une plus forte consommation de tissu. Que ce soit avec le poinçon cubique ou avec le poinçon cubique arrondi, poinçons qui diffèrent uniquement par l'aspect de leurs arrêtes et sommets, les valeurs d'avalement sont similaires, pour les mêmes orientations considérées. Les échantillons orientés à 45° pendant l'essai d'emboutissage présentent un avalement 1,3 à 1,9 fois moins élevés que les échantillons orientés à 0°. Les fils étant orientés selon la diagonale, aux points de mesure de l'avalement, ces fils ne sont pas assujettis à des déformations de traction par conséquent, l'avalement des renforts orientés à 45° est plus faible. Au niveau des renforts orientés à 45°, l'augmentation de la densité trame entraîne une légère augmentation de l'avalement en sens 2. Dans le sens 2, les fils dont l'extrémité est orientée à 45° sont les fils de chaîne. La structure tissée étant plus dense du fait d'une

densité trame plus élevée, les fils de chaîne sont plus attirés vers l'intérieur du cube, entraînant un avalement plus important. Néanmoins, ce phénomène est faible et uniquement observé dans le sens 2 pour les échantillons orientés à 45°. Ainsi, suivant la forme du poinçon et la direction de l'échantillon, la consommation maximale de tissu varie, du fait des différences de déformabilité des renforts.

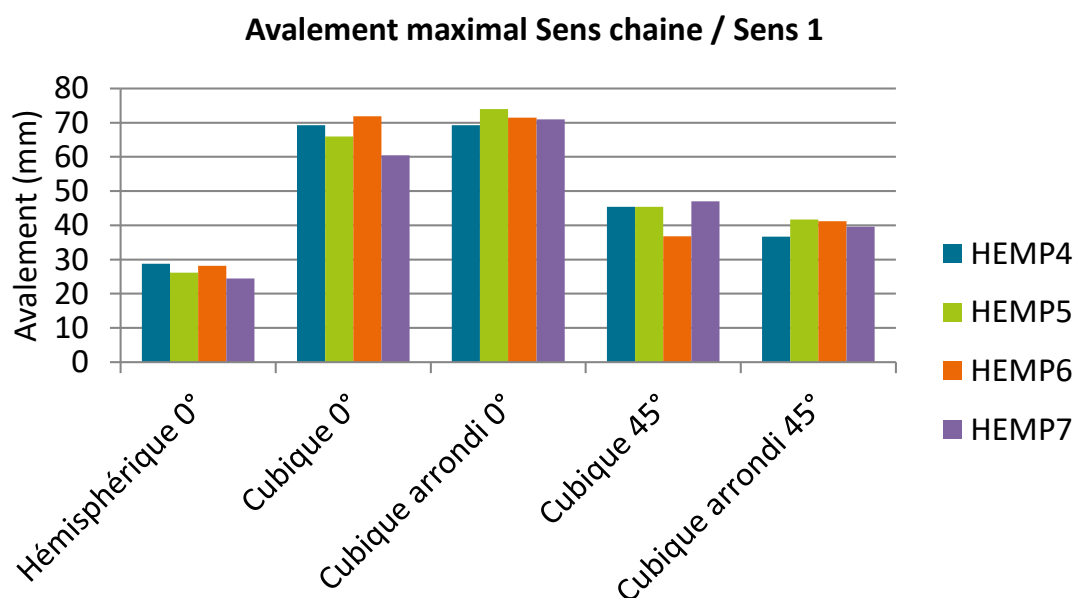


Figure 3-59 : Avalement maximal en sens chaîne / sens 1

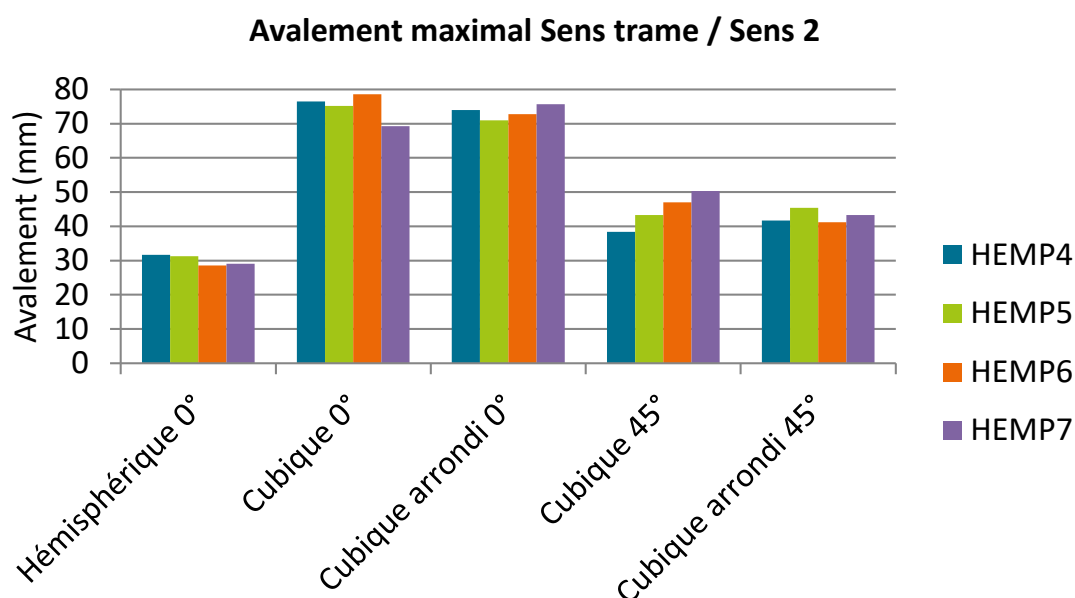


Figure 3-60 : Avalement maximal en sens trame / sens 2

6.3.3 Angles de cisaillement

La localisation des angles de cisaillement maximum pour les 3 formes de poinçons et pour les deux orientations considérées est précisée en Figure 3-61. Les valeurs maximales pour l'ensemble des essais réalisés (pour chaque type de renfort, orientation de renfort, et poinçon) sont présentées en Figure 3-62. A titre de comparaison, l'angle de blocage déterminé lors des essais de bias-test (voir paragraphe 5.2.3) est ajouté sur cet histogramme.

Pour les orientations à 0°, comme ce qui avait été observé dans la première étude (paragraphe 6.2.3), l'emboutissage des renforts avec les 2 poinçons cubiques génère une valeur de cisaillement des renforts plus faible que celle obtenue pour le poinçon hémisphérique pour les tissus déséquilibrés (HEMP5 et HEMP7, avec une densité trame plus élevée que la densité chaîne). Pour ces deux renforts si la valeur maximale est légèrement plus faible avec le poinçon cubique, les valeurs maximales obtenues avec le poinçon cubique arrondi, plus petites, montrent que cette forme sollicite moins le cisaillement, notamment sur les arêtes.

Toujours avec cette orientation 0°, les renforts équilibrés (HEMP 4 et HEMP6) présentent un cisaillement plus important avec les deux poinçons cubiques comparativement à celui observé sur les renforts déséquilibrés à armure équivalente. Le fait de diminuer la densité trame crée plus d'espace entre les fils, augmentant ainsi les possibilités de cisaillement au sein des structures tissées lors de la mise en forme. Pour cette même orientation, le cisaillement maximal atteint avec le poinçon cubique arrondi est plus faible, d'environ 15% pour les renforts équilibrés et 6% pour les renforts déséquilibrés, que celui obtenu avec le poinçon cubique. Les arrêtes et sommets arrondis du poinçon cubique arrondi permettent de diminuer le cisaillement au sein des tissus.

Une orientation à 45° des renforts lors de l'emboutissage par le poinçon cubique ou cubique arrondi semble permettre une plus grande sollicitation en cisaillement des renforts. Cependant, la localisation des zones de cisaillement maximal n'est pas identique selon l'orientation initiale du renfort (Figure 3-61). Les angles de cisaillement maximum mesurés lors des essais d'emboutissage avec une orientation à 45°, que ce soit pour le poinçon cubique ou le poinçon cubique arrondi, sont beaucoup plus élevés que pour une orientation à 0°, entre 1,4 et 1,7 fois supérieur pour le poinçon cubique et entre 1,6 et 1,9 fois supérieur pour le poinçon cubique arrondi. Les valeurs de cisaillement atteintes avec cette orientation à 45° sont proches des valeurs d'angle de blocages déterminées lors des essais d'UBE Test, à l'écart-type près. Ainsi, une orientation à 45° des renforts permet de plus solliciter leur capacité de cisaillement lors de leur mise en forme.

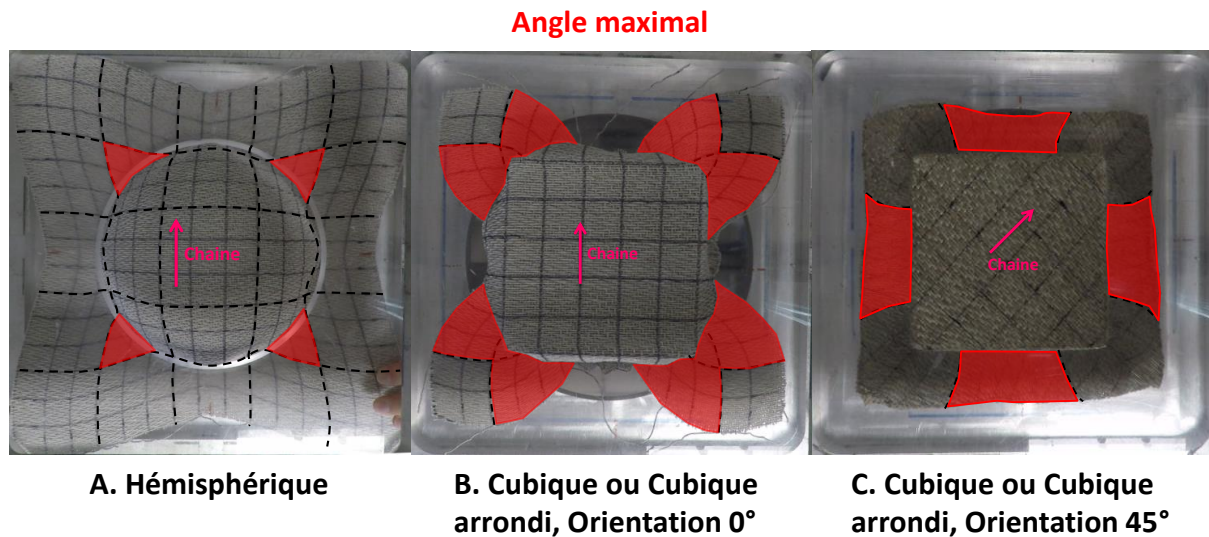


Figure 3-61 : Localisation des zones d'angles maximum pour les poinçons A. Hémisphérique, B. Cubique ou Cubique arrondi avec une orientation à 0°, C. Cubique ou Cubique arrondi avec une orientation à 45°

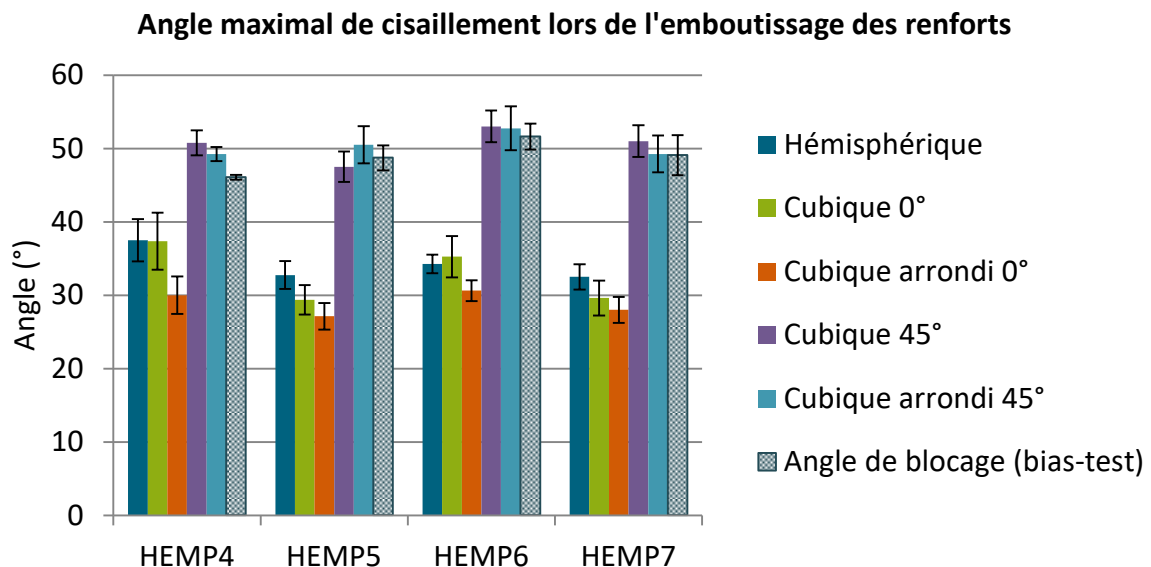


Figure 3-62 : Angle maximal de cisailment lors de l'emboutissage des renforts

6.3.4 Défauts lors de la mise en forme

Les défauts apparus pendant les essais d'emboutissage sont observés à l'issu des essais à l'aide de photos, prises sur le banc d'essai et sur les échantillons sortis du banc d'essai. Les observations étant similaires pour une même densité de fils, quelle que soit l'armure, les images présentées feront référence aux renforts équilibrés (tissus HEMP4 et HEMP6), ou aux renforts déséquilibrés (tissus HEMP5 et HEMP7). Les images après essai pour les poinçons cubique et cubique arrondi sont présentées en Figure 3-63 pour les échantillons orientés à 0°, en Figure 3-64 pour les échantillons orientés à 45° et en Figure 3-65 pour un zoom sur les défauts apparus à l'intérieur du renfort. Comme constaté précédemment pour les renforts tissés, l'emboutissage avec le poinçon hémisphérique

n'entraîne pas de défauts sur le renfort, quelles que soient l'armure ou la densité de fils de trame considérées.

Après l'emboutissage des renforts orientés à 0° avec un poinçon cubique ou cubique arrondi, les défauts apparus sur les renforts sont différents entre le renfort équilibré et le renfort déséquilibré. Pour le renfort équilibré, il y a apparition d'espacements, entourés en vert sur la Figure 3-63, au niveau des sommets du poinçon : les fils s'écartent pour que le tissu puisse s'adapter au maximum à la forme imposée. Avec le poinçon arrondi par le rayon courbure, les fils s'écartent moins et l'espacement est plus petit. En augmentant la densité trame, le renfort devient plus dense et les défauts d'écartement sont très petits, pour le poinçon cubique, voire inexistants, pour le poinçon cubique arrondi. Une forte densité trame peut alors être utilisée pour éviter l'apparition de glissements de réseau sur ces sommets lors du drapage. Néanmoins, cette forte densité trame crée un surplus de matière, et il y aura apparition de plis, entourés en orange sur la Figure 3-63, sur les faces du poinçon (qu'il soit cubique ou cubique arrondi) pour les renforts déséquilibrés. Sur les faces du cube embouti par un renfort équilibré les plis observés sont beaucoup plus faibles. Ainsi, même si une forte densité trame permet d'éviter l'apparition de trous, elle est source d'un autre défaut : l'apparition de plis.

A. Poinçon cubique



Renfort équilibré

Renfort déséquilibré

B. Poinçon cubique arrondi



Renfort équilibré

Renfort déséquilibré

Figure 3-63 : Echantillons orientés à 0° après emboutissage avec le A. Poinçon cubique B. Poinçon cubique arrondi

Les échantillons orientés à 45° sont étudiés après emboutissage. Comme pour les échantillons orientés à 0°, les fils au sein du renfort équilibré s'écartent pour que le tissu s'adapte au mieux à la forme imposée, et il y a apparition d'espacements au niveau des sommets du cube sur ce type de renfort. De la même manière que précédemment, l'augmentation de la densité trame permet d'éviter l'apparition de ces espacements aux sommets du cube. Le tissu HEMP5 (armure satin déséquilibrée) à 45° n'est pas du tout percé par le poinçon cubique mais légèrement par le poinçon cubique arrondi tandis que le tissu HEMP7 (armure sergé déséquilibrée) à 45° est légèrement percé par le poinçon cubique et pas du tout percé par le poinçon cubique arrondi. Cette différence de comportement peut être attribuée au positionnement des points de liage, qui diffère selon l'armure. Quel que soit le type de renfort, équilibré ou déséquilibré, l'orientation à 45° leur confère une plus grande déformabilité, déjà observée en termes d'angles de cisaillement au paragraphe 6.3.3, et il n'y a pas de plis sur les faces du cube. Un renfort orienté à 45° avec une forte

densité trame peut donc être utilisé pour minimiser l'apparition de défauts lors d'une mise en forme par une forme complexe.

L'alignement des fils au sein du renfort orienté à 45° après emboutissage est étudié en regardant de plus près l'échantillon après essai (Figure 3-65). Cette photo expose l'état d'un renfort après emboutissage au niveau d'une arrête verticale du cube, localisée dans la zone entourée en bleu. Dans cette zone, les fils ont été entraînés vers le sommet du cube et ne sont plus alignés dans l'axe dans lequel ils avaient été tissés. Ce mouvement entraîne donc un désalignement des fils. Ainsi, même si les défauts majeurs observables à l'œil nu, tels que l'apparition de trous ou la formation de plis, ne sont pas visibles pour les renforts déséquilibrés, il peut y avoir un désalignement et une perte de l'orientation des renforts.

A. Poinçon cubique



Renfort équilibré

Renfort déséquilibré

B. Poinçon cubique arrondi



Renfort équilibré

Renfort déséquilibré

Figure 3-64 : Echantillons orientés à 45° après emboutissage avec le A. Poinçon cubique B. Poinçon cubique arrondi

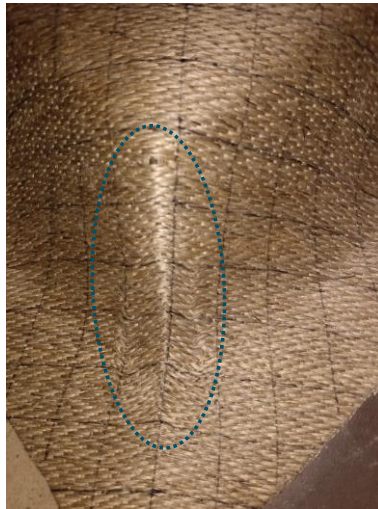


Figure 3-65 : Zoom sur les défauts après emboutissage d'un échantillon orienté à 45°

6.3.5 Conclusion

Dans cette deuxième étude d'emboutissage, l'influence de l'armure et de la densité trame de renforts tissés est étudiée avec divers poinçons (hémisphérique, cubique et cubique arrondi) et diverses orientations (échantillons disposés à 0° et 45°). Comme pour l'étude précédente, l'emboutissage des renforts par un poinçon hémisphérique requiert une force plus faible que les poinçons cubique et cubique arrondi. Avec une orientation à 45°, les renforts tissés sont plus souples et leur emboutissage requiert une force plus faible. L'avalement des renforts tissés orientés à 0° se conforme à la forme imposée par le poinçon tandis que celui des renforts orientés à 45° est constant tout au long de l'échantillon, les fils de chaîne et de trame n'étant plus orientés dans les directions principales du cube mais dans ses diagonales. Pendant l'essai d'emboutissage, le cisaillement entre les fils de chaîne et les fils de trame ne peut pas atteindre son maximum dans les renforts orientés à 0°, quel que soit le poinçon utilisé, tandis qu'il correspond aux valeurs de blocages observées avec les essais de bias-test pour les renforts orientés à 45°. L'orientation à 45° permet d'exploiter au maximum la capacité de cisaillement des renforts tissés. Enfin, en termes de défauts, la densité trame joue un rôle très important. Une faible densité trame aura tendance à créer des espacements entre les fils au niveau des sommets des cubes, quelle que soit l'orientation du renfort, tandis qu'une forte densité trame créera un surplus de matière qui donnera lieu à l'apparition de plis sur les côtés du cube pour les échantillons orientés à 0°. Néanmoins, pour les renforts orientés à 45°, les fils sont désalignés de leur axe d'origine après emboutissage. En conclusion, les renforts à forte densité trame orientés à 45° sont plus souples et semblent être les renforts les mieux adaptés pour une mise en forme avec le moins de défauts possibles, et qui s'adaptent le mieux à la forme imposée, avec un cisaillement maximisé.

7 Conclusion

Dans ce chapitre, l'ensemble des propriétés des renforts a été étudié. Ces propriétés renseignent sur les caractéristiques textiles des renforts, au travers de la masse surfacique, de l'épaisseur et de la perméabilité à l'air, ainsi que sur le comportement mécanique de ces renforts, avec les essais de traction uniaxiaux, de flexion à l'état sec, de cisaillement plan et d'emboutissage. L'ensemble de ces caractérisations conduit à l'élaboration de fiches techniques pour chaque renfort, permettant ensuite de choisir le renfort le mieux adapté en fonction du cahier des charges du matériau composite final.

Les différents renforts élaborés, dans le cadre de ces travaux, à une échelle laboratoire et par la suite, pour certains d'entre eux, à une échelle industrielle, ont été présentés dans ce chapitre. Ils diffèrent par le type de fil utilisé (fil retordu, mèche ou fil guipé, avec ou sans traitement), par l'armure choisie (toile, satin de 4, satin de 6, sergé de 4 ou sergé de 6), par la densité de fils en sens trame ainsi que par le type de renfort (tissé ou quasi-unidirectionnel). Ces différents paramètres influent sur les propriétés textiles des renforts : plus les fils seront lourds ou plus ils seront nombreux, plus le renfort sera épais et lourd. La perméabilité à l'air des renforts, quant à elle, dépend de la densité de fils présents dans la structure tissée, une structure très dense aura une faible perméabilité à l'air, mais également du type de fil utilisé (par exemple, une mèche sans traitement chimique laissera passer l'air plus facilement).

Les propriétés mécaniques en traction des renforts ont ensuite été étudiées au moyen d'essais de traction dans les deux directions majeures des renforts, la direction chaîne et la direction trame. Les différents paramètres choisis lors du tissage (type de fil, armure, densité de fils) entraînent des différences d'efforts à rupture, de rigidité en traction et d'allongement à rupture des renforts. En fonction de ces paramètres de production, le module de rigidité en flexion à l'état sec des renforts varie également, ce qui témoigne de différence de comportement des tissus lors d'une manipulation ou d'une mise en forme. Certains seront plus souples que d'autres, ou se déformeront plus rapidement, au risque d'être dégradés de manière irréversible (principalement dans le cas du renfort quasi-unidirectionnel). Le comportement en cisaillement plan des renforts est ensuite étudié au moyen d'essais de traction à 45° avec l'« Uniaxial Bias Extension Test ». Les différences de comportement entre les différents renforts tissés sont également liées aux différences de paramètres de production, puisque les fils auront plus ou moins de place pour bouger et cisailer au sein des structures tissées. Enfin des essais d'emboutissage ont été menés, afin d'analyser le comportement à la déformabilité de ces renforts. Ces essais, complexes, car mettant en jeu différentes sollicitations couplées (traction, cisaillement, aptitude aux défauts) ont mis en évidence l'aptitude des renforts tissés, comparativement aux renforts (quasi) unidirectionnels, à pouvoir se draper sur des formes non-développables. Cette étude expérimentale et comparative entre les architectures de renfort est assez peu développée

dans la littérature, et encore moins pour des renforts à base de fibres naturelles, et particulièrement en chanvre. Les premiers essais réalisés sur la plupart des renforts tissés et quasi-unidirectionnel ont montré que suivant la complexité de la forme à draper, des défauts, de type plis ou espacement entre les fils, peuvent apparaître. Ces défauts apparaissent pour l'ensemble des renforts tissés et avec le poinçon cubique, forme la plus complexe. Une deuxième étude en emboutissage a permis de montrer qu'en augmentant la densité de fils dans une direction et en orientant le renfort à $\pm 45^\circ$, les renforts sont capables d'épouser des formes complexes avec très peu, voire pas de défauts. De plus, en ayant recours à des arrêtes et des sommets arrondis sur les rebords du cube, le cisaillement et les défauts observés sont minimisés. Il peut alors être judicieux d'arrondir ne serait-ce que légèrement les coins et cotés de la pièce composite à produire pour diminuer les dégradations au sein de la structure tissée lors de cette étape de mise en forme. Le renfort quasi-unidirectionnel n'est pas un renfort adapté pour de la mise en forme, son caractère fortement déséquilibré entraîne des dégradations irréversibles, une forte décohésion du renfort apparaît lors de l'emboutissage qui créera à l'échelle composite des zones vides de fibres.

En fonction des propriétés recherchées, il est possible de choisir le renfort aux caractéristiques les mieux adaptées en fonction de l'application composite finale. La comparaison des renforts tissés en fibres naturelles avec ceux coméllés en chanvre et PA12 a mis en évidence des comportements similaires entre ces deux types de renforts. Ainsi, l'utilisation de tissus coméllés peut être un atout pour certaines applications, puisque le renfort est disponible directement avec un polymère thermoplastique qui deviendra matrice du matériau composite après thermocompression. Cependant, ce type de renfort est plus compliqué à mettre en forme que les renforts en fibres naturelles du fait de la rigidité apportée par les fils guipés le constituant. Le renfort quasi-unidirectionnel, du fait de sa configuration très fortement déséquilibrée, possède quant à lui des propriétés similaires à celles d'un renfort tissé dans une direction (celle qui rassemble la majorité des fibres) et très faibles dans l'autre direction. Ainsi, pour atteindre les propriétés similaires à celles pouvant être atteintes avec un renfort tissé, il est nécessaire de superposer deux plis orientés à 0° et 90° mais qui ne seront pas maintenus entre eux dans l'épaisseur.

Références

- [1] AFNOR, NF EN 12127 - Textiles - Fabrics - Determination of mass per unit area using small samples, 1998.
- [2] AFNOR, NF EN ISO 5084 - Textiles - Determination of thickness of textiles and textile products, 1996.
- [3] AFNOR, NF EN ISO 9237 - Textiles - Determination of permeability of fabrics to air, 1995.
- [4] F. Omrani, P. Wang, D. Soulat, M. Ferreira, Mechanical properties of flax-fibre-reinforced preforms and composites: Influence of the type of yarns on multi-scale characterisations, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 93 (2017) 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.11.013>.
- [5] M.I. Misnon, M.M. Islam, J.A. Epaarachchi, K.T. Lau, Analyses of woven hemp fabric characteristics for composite reinforcement, *Mater. Des.* 1980-2015. 66 (2015) 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.037>.
- [6] A. Gasser, P. Boisse, S. Hanklar, Mechanical behaviour of dry fabric reinforcements. 3D simulations versus biaxial tests, *Comput. Mater. Sci.* 17 (2000) 7–20. [https://doi.org/10.1016/S0927-0256\(99\)00086-5](https://doi.org/10.1016/S0927-0256(99)00086-5).
- [7] AFNOR, NF EN ISO 13934-1 - Tensile properties of fabrics - Part 1 : determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method, 2013.
- [8] AFNOR, NF ISO 7211-3 - Textiles - Woven fabrics - Construction - Methods of analysis - Part 3 : determination of crimp of yarn in fabric, 2017.
- [9] P. Boisse, J. Colmars, N. Hamila, N. Naouar, Q. Steer, Bending and wrinkling of composite fiber preforms and prepregs. A review and new developments in the draping simulations, *Compos. Part B Eng.* 141 (2018) 234–249. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.061>.
- [10] C. Poppe, T. Rosenkranz, D. Dörr, L. Kärger, Comparative experimental and numerical analysis of bending behaviour of dry and low viscous infiltrated woven fabrics, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 124 (2019) 105466. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.05.034>.
- [11] F. Yu, S. Chen, J.V. Viisainen, M.P.F. Sutcliffe, L.T. Harper, N.A. Warrior, A macroscale finite element approach for simulating the bending behaviour of biaxial fabrics, *Compos. Sci. Technol.* 191 (2020) 108078. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108078>.
- [12] F.T.I. F. T. Peirce B.Sc. F.Inst.P., 26—the “Handle” of Cloth as a Measurable Quantity, *J. Text. Inst. Trans.* 21 (1930) T377–T416. <https://doi.org/10.1080/19447023008661529>.
- [13] ASTM International, ASTM D1388-18 - Standard Test Method for Stiffness of Fabrics, 2018.
- [14] AFNOR, ISO 4604 - Reinforcement fabrics - Determination of conventional flexural stiffness - Fixed-angle flexometer method, 2011.
- [15] AFNOR, NF EN ISO 9073-7 - Test method for nonwovens - Part 7 : determination of bending length, 1998.
- [16] E. de Bilbao, D. Soulat, G. Hivet, A. Gasser, Experimental Study of Bending Behaviour of Reinforcements, *Exp. Mech.* 50 (2010) 333–351. <https://doi.org/10.1007/s11340-009-9234-9>.

- [17] P. Boisse, B. Zouari, J.-L. Daniel, Importance of in-plane shear rigidity in finite element analyses of woven fabric composite preforming, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 37 (2006) 2201–2212. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.09.018>.
- [18] P. Boisse, N. Hamila, E. Vidal-Sallé, F. Dumont, Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses, *Compos. Sci. Technol.* 71 (2011) 683–692. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.01.011>.
- [19] P. Boisse, N. Hamila, E. Guzman-Maldonado, A. Madeo, G. Hivet, F. dell’Isola, The bias-extension test for the analysis of in-plane shear properties of textile composite reinforcements and prepregs: a review, *Int. J. Mater. Form.* 10 (2017) 473–492. <https://doi.org/10.1007/s12289-016-1294-7>.
- [20] J. Pourtier, B. Duchamp, M. Kowalski, P. Wang, X. Legrand, D. Soulat, Two-way approach for deformation analysis of non-crimp fabrics in uniaxial bias extension tests based on pure and simple shear assumption, *Int. J. Mater. Form.* (2019). <https://doi.org/10.1007/s12289-019-01481-8>.
- [21] W. Lee, J. Padvoiskis, J. Cao, E. de Luycker, P. Boisse, F. Morestin, J. Chen, J. Sherwood, Bias-extension of woven composite fabrics, *Int. J. Mater. Form.* 1 (2008) 895–898. <https://doi.org/10.1007/s12289-008-0240-8>.
- [22] G. Lebrun, M.N. Bureau, J. Denault, Evaluation of bias-extension and picture-frame test methods for the measurement of intraply shear properties of PP/glass commingled fabrics, *Compos. Struct.* 61 (2003) 341–352. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(03\)00057-6](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(03)00057-6).
- [23] R. Akkerman, A continuum mechanics analysis of shear characterisation methods, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 109 (2018) 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.02.036>.
- [24] C. Dufour, F. Boussu, P. Wang, D. Soulat, Local strain measurements of yarns inside of 3D warp interlock fabric during forming process, *Int. J. Mater. Form.* 11 (2018) 775–788. <https://doi.org/10.1007/s12289-017-1385-0>.
- [25] F. Omrani, P. Wang, D. Soulat, M. Ferreira, P. Ouagne, Analysis of the deformability of flax-fibre nonwoven fabrics during manufacturing, *Compos. Part B Eng.* 116 (2017) 471–485. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.003>.
- [26] P.-B. Jacquot, P. Wang, D. Soulat, X. Legrand, Analysis of the preforming behaviour of the braided and woven flax/polyamide fabrics, *J. Ind. Text.* 46 (2016) 698–718. <https://doi.org/10.1177/1528083715591592>.
- [27] S. Xiao, P. Wang, D. Soulat, X. Legrand, H. Gao, Towards the deformability of triaxial braided composite reinforcement during manufacturing, *Compos. Part B Eng.* 169 (2019) 209–220. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.04.017>.
- [28] H. Shen, P. Wang, X. Legrand, L. Liu, D. Soulat, Influence of the tufting pattern on the formability of tufted multi-layered preforms, *Compos. Struct.* 228 (2019) 111356. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111356>.
- [29] C. Dufour, P. Wang, F. Boussu, D. Soulat, Experimental Investigation About Stamping Behaviour of 3D Warp Interlock Composite Preforms, *Appl. Compos. Mater.* 21 (2014) 725–738. <https://doi.org/10.1007/s10443-013-9369-9>.
- [30] A.R. Labanieh, C. Garnier, P. Ouagne, O. Dalverny, D. Soulat, Intra-ply yarn sliding defect in hemisphere preforming of a woven preform, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 107 (2018) 432–446. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.01.018>.

- [31] P. Ouagne, D. Soulat, G. Hivet, S. Allaoui, D. Duriatti, Analysis of Defects during the Preforming of a Woven Flax Reinforcement, *Adv. Compos. Lett.* 20 (2011) 096369351102000403. <https://doi.org/10.1177/096369351102000403>.
- [32] J.S. Lee, S.J. Hong, W.-R. Yu, T.J. Kang, The effect of blank holder force on the stamp forming behavior of non-crimp fabric with a chain stitch, *Compos. Sci. Technol.* 67 (2007) 357–366. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.09.009>.
- [33] E. Capelle, P. Ouagne, D. Soulat, D. Duriatti, Complex shape forming of flax woven fabrics: Design of specific blank-holder shapes to prevent defects, *Compos. Part B Eng.* 62 (2014) 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.02.007>.

Chapitre 4 : Elaboration de matériaux biocomposites

Table des matières

1	Introduction.....	214
2	Réalisation des matériaux biocomposites	215
2.1	Choix des renforts.....	215
2.2	Fabrication des matériaux biocomposites	216
2.3	Protocole de caractérisation	217
3	Propriétés des matériaux biocomposites	219
3.1	Caractérisation mécanique des matériaux.....	219
3.1.1	Composition des plaques produites.....	219
3.1.2	Propriétés mécaniques des éprouvettes	220
3.2	Comparaison avec la littérature	226
3.2.1	Biocomposites renforcés de tissus.....	226
3.2.2	Biocomposites renforcés d'unidirectionnels ou de quasi-unidirectionnels	229
4	Conclusion	233
	Références.....	235

1 Introduction

En fonction des paramètres définis lors de la production textile, les renforts tissés et quasi-unidirectionnel élaborés à partir de fibres de lin et de chanvre disposent à l'état sec de propriétés mécaniques différentes, identifiées et analysées au chapitre précédent. Grâce à cette diversité de propriétés, un choix peut être effectué pour la mise en œuvre du matériau composite afin d'optimiser ses performances relativement à son application. Suivant les conditions d'utilisation du matériau composite final, ce dernier peut être soumis à des sollicitations mécaniques plus ou moins élevées, et ce, dans une ou plusieurs directions. Certains renforts, présentés et caractérisés dans le chapitre 3, ont été envoyés au laboratoire FEMTO-ST (UMR 6174) de l'Université de Franche-Comté, partenaire du projet SSUCHY, pour la réalisation de matériaux biocomposites et leur caractérisation à cette échelle. Les résultats obtenus sont présentés dans ce chapitre. Ces essais ont été effectués, au FEMTO-ST, dans le cadre des travaux de thèse de B. SALA, dirigée par V. PLACET, avec l'apport de X. GABRION, et les résultats obtenus ont donné lieu à des publications [1–3].

Dans un premier temps, l'élaboration des matériaux biocomposites sera présentée. Le choix des renforts sélectionnés pour réaliser ces matériaux sera détaillé, puis le protocole de fabrication des biocomposites, ainsi que la démarche de caractérisation en traction, seront présentés. Les matériaux ainsi élaborés sont renforcés soit de tissus en fibres de lin et de chanvre ou de quasi-unidirectionnel en fibres de chanvre. Dans une seconde partie, les propriétés des matériaux biocomposites seront détaillées. Tout d'abord la composition des plaques sera analysée, puis leurs propriétés mécaniques en traction seront présentées. L'influence des paramètres d'élaboration des renforts (le type de renfort, les fils utilisés et les armures choisies) sur les propriétés à l'échelle composite sera analysée. Ces différentes propriétés mécaniques seront ensuite comparées avec les propriétés mécaniques, issues de la littérature, de biocomposites élaborés avec des renforts disponibles sur le marché. Cette caractérisation à l'échelle composite permet par la suite de choisir un renfort optimal au regard du cahier des charges de la pièce composite finale.

2 Réalisation des matériaux biocomposites

2.1 Choix des renforts

Parmi les renforts produits et caractérisés au chapitre précédent (Table 3-1), six d'entre eux sont sélectionnés pour élaborer des éprouvettes biocomposites. Les deux tissus en lin, FLAX1 et FLAX2, qui ne diffèrent que par la mèche utilisée en sens trame, (LINO ST, mèche sans traitement dans FLAX1 et LINO T1, mèche avec traitement dans FLAX2) vont permettre d'évaluer l'impact du traitement chimique réalisé sur les mèches, à l'échelle composite. Avec les trois tissus en chanvre HEMP1, HEMP2 et HEMP3, il est possible d'étudier l'influence de l'armure, et donc de la densité trame induite, sur les propriétés composites. Enfin, l'utilisation du renfort quasi-unidirectionnel (QUASI-UD) permet de comparer les différences de propriétés entre des composites renforcés de tissus et ceux renforcés par des quasi-unidirectionnels. Les propriétés de ces différents renforts sont rappelées en Table 4-1 et des représentations des volumes élémentaires représentatifs (VER) réalisées avec le logiciel WiseTex® sont présentées en Figure 4-1. Ces simulations ont été effectuées en prenant en compte les paramètres mesurés sur les tissus (titre et torsion des fils, densités chaîne et trame des tissus, détaillés dans les chapitres précédents). Pour l'ensemble des renforts tissés, les simulations sont effectuées avec six fils de chaîne et six fils de trame. La largeur des tissus sur ces représentations dans le sens trame n'est pas identique. En comparaison des tissus FLAX1 et FLAX2, elle est plus grande pour le tissu HEMP1 et plus faible pour les tissus HEMP2 et HEMP3. Ainsi, cela met en évidence le fait que le tissu HEMP1 possède une densité de fils en sens trame légèrement plus faible que les tissus en lin avec la même armure toile et que les tissus HEMP2 et HEMP3 sont beaucoup plus compacts que les autres tissus, du fait de leurs armures satin et sergé qui leur confèrent une densité de fils en sens trame importante. Le renfort QUASI-UD est représenté avec plus de fils, pour mettre en évidence la faible présence des fils de chaîne par rapport aux fils de trame.

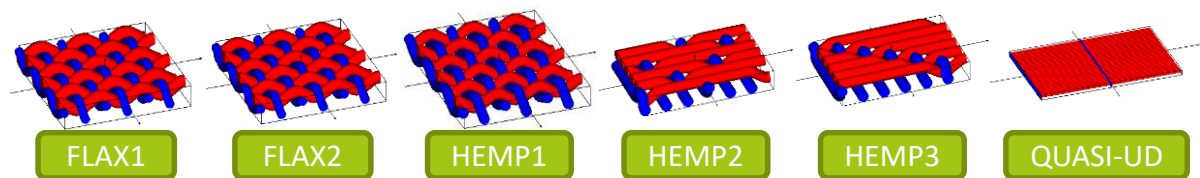


Figure 4-1 : Vues 3D des renforts (fils de chaîne en bleu et fils de trame en rouge)

Table 4-1 : Propriétés des renforts utilisés

Renfort	FLAX1	FLAX2	HEMP1	HEMP2	HEMP3	QUASI-UD
Nature du renfort	Tissu	Tissu	Tissu	Tissu	Tissu	Quasi-unidirectionnel
Nature des fibres	Lin	Lin	Chanvre	Chanvre	Chanvre	Chanvre
Armure	Toile	Toile	Toile	Satin de 6	Sergé de 6	Toile
Densité chaîne (fils/cm)	6	6	6	6	6	0,6
Densité trame (fils/cm)	6	5,8	5	9,5	9,5	20
Volume de fibres en sens chaîne (%)	33,4	38,4	51,8	39,5	39,2	2,0
Volume de fibres en sens trame (%)	66,6	61,6	48,2	60,5	60,8	98,0
Masse surfacique (g/m ²)	307,7 ± 9,2	288,4 ± 19,8	278,3 ± 8,2	426,1 ± 7,9	401,6 ± 3,5	649,4 ± 2,6

2.2 Fabrication des matériaux biocomposites

Les renforts sélectionnés (Table 4-1) sont utilisés pour fabriquer des matériaux composites. Pour chaque biocomposite les renforts et le nombre de plis sont présentés en Table 4-2. A l'exception du composite CH3, qui ne comporte que deux plis de tissu HEMP3, les composites renforcés de tissus sont élaborés avec 4 plis de renfort qui ont tous les mêmes orientations dans le moule. Pour les composites renforcés de quasi-unidirectionnels, les deux composites possèdent deux plis de renfort avec deux stratifications différentes : le composite CQUD dans lequel les deux plis sont disposés avec la même orientation, et le composite CQUDCP qui possède une stratification de type « Cross Ply » avec un pli orienté à 0° et un second pli orienté à 90°.

Table 4-2 : Renforcement des matériaux biocomposites produits

Composite	CF1	CF2	CH1	CH2	CH3	CQUD	CQUDCP
Renfort	FLAX1	FLAX2	HEMP1	HEMP2	HEMP3	QUASI-UD	QUASI-UD
Nombre de plis	4	4	4	4	2	2	2 (CP)

Avant la fabrication composite, les renforts ont été conditionnés à 23°C et 50% d'humidité relative pendant 24h, comme préconisé par la norme ASTM D3039-00 [4], afin de reproduire les conditions de température et d'humidité de l'environnement ambiant. La matrice utilisée est une résine époxy GreenPoxy56® associée à un durcisseur SD7561, disponibles chez Sicomin®, avec rapport de 100g de résine pour 37g de durcisseur. Les plis de renfort sont placés dans un moule, illustré en Figure 4-2.A, puis la résine est déposée sur

chaque pli. Lorsque la stratification est terminée, le moule est placé dans une presse chauffante. Pour les composites renforcés de tissus (CF1, CF2, CH1, CH2 et CH3), le cycle de réticulation se compose d'une cuisson à 130°C pendant 1 heure sous une pression de 3 bars. Pour les composites renforcés de quasi-unidirectionnels (CQUD et CQUDCP), le cycle de réticulation se compose d'une pré-cuisson à 40°C pendant 15 minutes, puis d'une cuisson à 60°C pendant 1 heure et d'une post-cuisson à 130°C pendant 1 heure, avec une pression, pour tous ces paliers, de 3 bars. Ce protocole de mise en œuvre est optimisé pour faciliter l'imprégnation des renforts. Les plaques ainsi produites sont ensuite démoulées et conditionnées pendant un mois à 23°C et 50% d'humidité relative. Un exemple de plaque composite est visible en Figure 4-2.B.

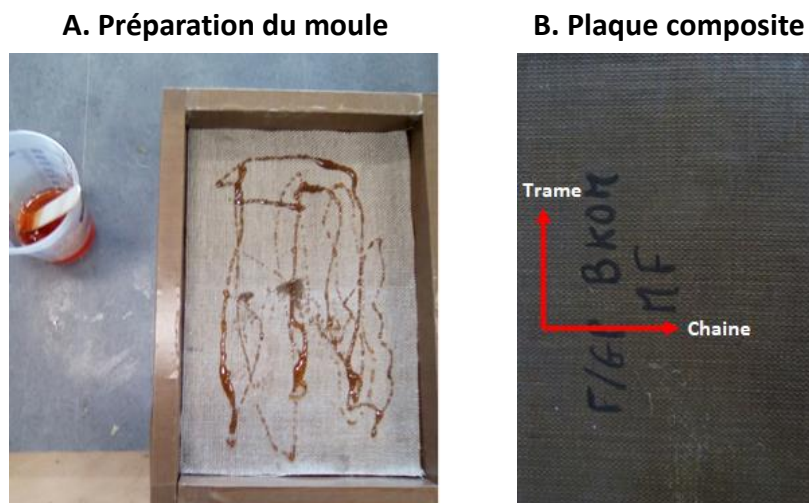


Figure 4-2 : Imprégnation des matériaux biocomposites A. Préparation du moule, B. Plaque composite [5]

2.3 Protocole de caractérisation



Figure 4-3 : Essai de traction composite [5]

Les éprouvettes sont découpées dans les plaques, à l'aide d'une machine de découpe laser Trotec® en vue d'être caractérisées en traction. Ces essais sont réalisés selon la norme ASTM D3039-00 [4] sur un banc de traction MTS Criterion® 45, Figure 4-3, avec une cellule de 5 kN et une vitesse de déplacement de la traverse de 1 mm/min. Les éprouvettes composites ont une largeur de 15 mm et la longueur de jauge est égale à 150 mm. L'allongement est mesuré à l'aide d'extensomètres Instron® 2620-601, possédant une longueur de jauge de 50 mm. A l'aide des données enregistrées par le banc de traction et les extensomètres, la courbe « contrainte – déformation » est déduite, d'où sont extraits la contrainte et la déformation à rupture ainsi que le module. Le module étudié correspond à la pente du début de la courbe, calculé, avant le point d'inflexion, entre 0,01% et 0,1% de déformations. Un exemple de courbe moyenne est proposé Figure 4-4, ainsi que ces paramètres.

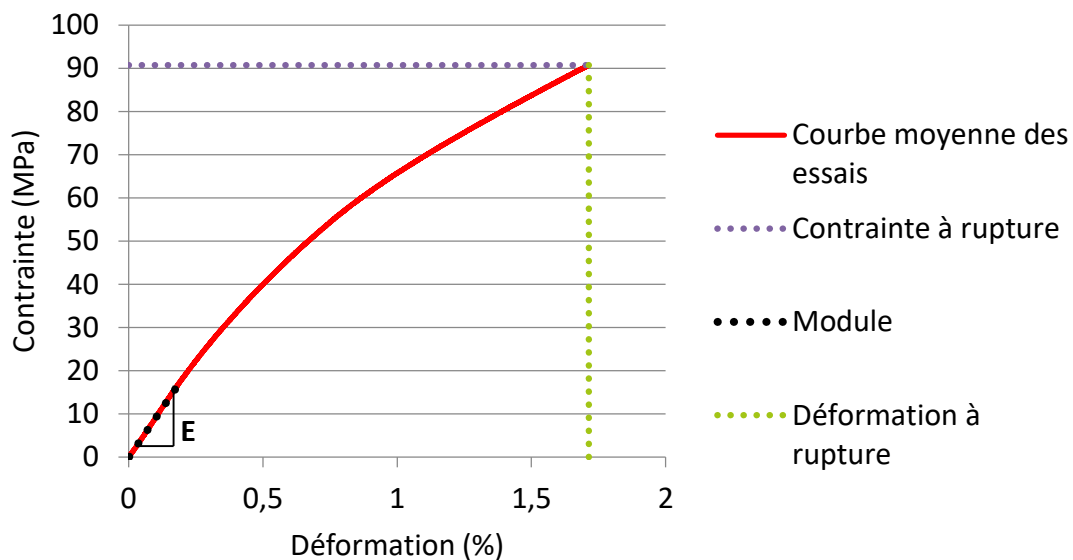


Figure 4-4 : Paramètres étudiés sur les courbes de traction des biocomposites

Pour les composites renforcés de tissus (CF1, CF2, CH1, CH2 et CH3), quatre éprouvettes sont testées respectivement dans les directions chaîne et trame. Pour le composite renforcé d'un quasi-unidirectionnel avec une stratification à 0° (CQUD), cinq éprouvettes sont testées dans la direction où le maximum de fibres est présent (direction trame lors de la production du renfort) et cinq éprouvettes dans la direction transverse (direction comprenant les fils de chaîne utilisés pour le liage). Enfin, le composite renforcé d'un quasi-unidirectionnel avec une stratification « Cross Ply » (CQUDCP) est caractérisé dans une seule direction, les deux directions du matériau étant similaires en termes de renfort avec un pli dans le sens des fibres et un en transverse, avec sept éprouvettes.

3 Propriétés des matériaux biocomposites

3.1 Caractérisation mécanique des matériaux

3.1.1 Composition des plaques produites

La composition des plaques composites, en termes de fractions volumiques de fibres et de porosités, est présentée en Table 4-3. Avec les renforts tissés, il est possible d'atteindre un volume de fibres légèrement supérieur à 40%. Seul le composite CH3, renforcé de 2 plis de tissu, présente un volume de fibres plus faible, en l'occurrence de 37%, (Table 4-3). En termes de porosités, les composites renforcés de tissus présentent des taux faibles, inférieurs à 3%, à l'exception du composite CF2. Le tissu FLAX2, utilisé pour le composite CF2, est une toile de lin (comme le tissu FLAX1) mais dont la trame est composée de mèches avec traitement, contrairement au tissu FLAX1 qui contient des mèches sans traitement en sens trame. Les conditions de fabrication des composites CF1 et CF2 étant similaires, cette différence de porosités peut être attribuée au recours au traitement chimique. Les mèches de lin après traitement présentent un aspect extérieur plus « collé » que les mèches sans traitement, ce qui améliore leur ténacité (chapitre 2) mais rend plus difficile l'imprégnation à cœur des fibres, laissant leurs lumens vides de résine et augmentant la porosité du matériau composite. Pour les renforts en chanvre, utilisés dans les composites CH1, CH2, CH3, ces derniers sont composés à 100% de mèches ayant subi un traitement chimique similaire, mais ils sont correctement imprégnés, avec un taux de porosités faible (compris entre 0,4% et 2,8%). L'utilisation d'une armure de tissage aux points de liages dispersés, armure satin de 6 dans CH2 comparativement à une armure toile dans CH1 par exemple, permettrait d'augmenter la fraction volumique de fibres et de diminuer la fraction volumique de porosité. En effet, avec une armure de type satin de 6 (par exemple), il est possible d'insérer plus de fils par unité de longueur, ce qui permet d'avoir plus de fibres, et les points de liage sont plus dispersés, ce qui permet de faciliter l'empilement des différents plis. Ainsi, il y aura moins d'espaces vides entre les fibres. Les fils retordus, utilisés en sens chaîne dans les renforts FLAX1 et FLAX2, peuvent être source de difficultés d'imprégnation, comme expliqué dans le chapitre 1 (au paragraphe 3.2.1). Néanmoins, au vu des volumes de fibres et de porosité obtenus, qui sont similaires quel que soit le type de fil utilisé pour la production du renfort, il n'y a pas eu de difficulté majeure d'imprégnation avec les fils retordus par rapport aux mèches. Cependant, pour chaque composite, seule une plaque a été réalisée, il faudrait faire plus d'essais pour valider ces observations.

L'utilisation d'un renfort quasi-unidirectionnel permet d'obtenir un taux volumique de fibres beaucoup plus élevé qu'avec les renforts tissés (60% contre 40%) et un taux de porosités relativement faible, de l'ordre de 4%. L'optimisation des paramètres du protocole de fabrication du composite et le recours à un renfort comportant très peu d'ondulation, un taux de fibres plus important que les renforts tissés (la masse surfacique du renfort quasi-

unidirectionnel est 1,5 à 2 fois supérieure à celle des renforts tissés, voir Table 4-1) permet d'atteindre un volume de fibres plus élevé dans le matériau composite ainsi qu'un taux de porosités acceptable. Pour la comparaison des propriétés de ces différents matériaux, grâce à la loi des mélanges, les propriétés mécaniques des matériaux biocomposites sont recalculées pour correspondre à un volume de fibres de 45%.

Table 4-3 : Fraction volumique de fibres et de porosités dans les matériaux biocomposites produits

Composite	CF1	CF2	CH1	CH2	CH3	CQUD	CQUDCP
V_f (%)	41	42	42,4	46	37	60	62
V_p (%)	1,9	6,1	2,4	0,4	2,8	3,6	4,2

3.1.2 Propriétés mécaniques des éprouvettes

Les propriétés en traction des matériaux biocomposites sont présentées en Figure 4-5 pour les contraintes à rupture, en Figure 4-7 pour les modules et en Figure 4-9 pour les déformations à rupture. Les valeurs de ces propriétés sont rassemblées en Annexe E.

Parmi les matériaux renforcés de structures tissées, les composites renforcés de lin CF1 et CF2 présentent des contraintes à rupture et des modules dans l'ensemble plus faibles que les composites renforcés de chanvre. Les renforts FLAX1 et FLAX2 sont les deux seuls renforts tissés comportant des fils retordus en sens chaîne et des mèches en sens trame, les autres renforts tissés ne comportant que des mèches dans les deux directions. Dans la direction chaîne, les fils retordus de lin ayant un titre, en Tex, deux fois plus petit (et donc un numéro métrique deux fois plus élevé) que les mèches de chanvre utilisées dans les renforts en chanvre (voir Annexe B), il y a moins de fibres en section dans le matériau composite et ces dernières sont fortement désorientées de l'axe de la sollicitation mécanique, entraînant ainsi une plus faible contrainte à rupture et un plus faible module. Dans la direction trame, les mèches de lin, qu'elles soient avec ou sans traitement, ont une ténacité et une pente bien inférieures à celles des mèches de chanvre (voir Annexe B). Cette faible ténacité à l'échelle mèche se traduit à l'échelle composite par une plus faible contrainte à rupture et un module plus bas. La comparaison des valeurs des contraintes à ruptures et modules des composites CF1 et CF2 permet de mettre en évidence l'influence du traitement chimique. Les propriétés mécaniques étant similaires entre ces deux matériaux, le traitement chimique n'a pas d'influence sur les propriétés du matériau composite final. Le recours à un traitement chimique est donc validé, puisqu'il permet d'améliorer la tissabilité des fibres naturelles pour permettre la production de renforts, sans diminuer les propriétés du matériau composite final. Ces résultats sont similaires aux observations réalisées à l'échelle fibre par les essais d'IFBT, au Chapitre 2 (paragraphe 4.3.2),

Les biocomposites renforcés de tissus en chanvre (CH1, CH2 et CH3) possèdent donc une contrainte à rupture et un module plus élevés que les biocomposites renforcés de tissus en lin, mais avec un écart entre les propriétés mesurées en sens chaîne et en sens trame plus

ou moins important. Pour le matériau CH1 renforcé par une armure toile, les contraintes à rupture et modules sont quasiment similaires dans les deux directions-: les densités de fils sont identiques entre les directions chaîne et trame, tissées avec la même mèche (CANAPA T1), ce qui fait que ce renfort possède un ratio de fibres quasiment égal dans les deux directions (voir Figure 3-3 au Chapitre 3), conduisant à des propriétés mécaniques équilibrées. Avec un changement d'armure qui entraîne une augmentation de la quantité de fibres en sens trame (due à l'augmentation de la densité de fils dans ce sens), dans les renforts des composites CH2 et CH3, la contrainte à rupture et le module dans la direction trame augmente, par rapport au composite CH1. Entre l'armure satin et l'armure sergé, c'est l'armure satin qui permet d'obtenir les meilleures propriétés mécaniques à l'échelle composite en direction trame, ce qui avait déjà été observé dans l'étude de Baghaei et Skrifvars [6]. De plus, l'étude des propriétés des mèches après tissage (au paragraphe 5.1 du chapitre 2) a mis en évidence un phénomène de détorsion des mèches utilisées en sens trame après tissage, du fait du bobinage sur la canette utilisée dans la navette. Cette détorsion permet de réaligner les fibres dans l'axe du fil, et donc selon la direction de la sollicitation mécanique. Les mèches constituant la trame du renfort HEMP2 ayant subi la détorsion la plus importante, elles sont les moins retordues et permettent au matériau CH2 d'avoir les meilleures propriétés en sens trame. La relation entre le taux de torsion des mèches mesuré après tissage et la contrainte à rupture des biocomposites est présentée en Figure 4-6. Ce graphe permet de confirmer l'influence de la désorientation des fibres sur les propriétés à l'échelle composite : plus la torsion des mèches est élevée, plus les fibres seront désorientées de l'axe de la sollicitation mécanique et plus la contrainte à rupture du matériau composite décroît. Cette tendance est similaire pour les modules.

Le recours à un renfort quasi-unidirectionnel stratifié à 0° permet d'obtenir un matériau composite (CQUD) aux propriétés fortement déséquilibrées, avec de très bonnes propriétés dans la direction où le maximum de fibres est présent, et des propriétés très faibles dans la direction transverse. La contrainte à rupture et le module dans le sens des fibres du composite CQUD sont similaires à ceux obtenus en sens trame avec les composites renforcés de tissus de chanvre, à l'exception du module du composite CH2. Néanmoins, l'utilisation de deux plis de renfort quasi-unidirectionnel permet d'obtenir un volume de fibres dans la plaque composite supérieur à celui obtenu avec quatre plis de tissu (Table 4-3). Ainsi, à l'échelle de la plaque composite, celle renforcée par un quasi-unidirectionnel stratifié à 0° aura de meilleures propriétés dans le sens des fibres, mais pas dans la direction transverse. Il est également possible de stratifier à $0^\circ/90^\circ$, stratification « Cross Ply », le renfort quasi-unidirectionnel pour avoir des fibres dans les deux directions majeures du plan. Pour un volume de fibres de 45%, le composite CQUDCP présente une contrainte à rupture deux fois plus faible que le composite CQUD dans la direction des fibres, mais beaucoup plus élevée que celle mesurée dans la direction transverse du composite CQUD. Cette tendance est similaire pour le module, même si la différence entre les deux matériaux est moins marquée. En effet, une stratification de plis de quasi-unidirectionnel de type « Cross Ply »

permet de rééquilibrer les quantités de fibres dans les deux directions majeures du matériau, entraînant alors une diminution des propriétés longitudinales et une augmentation des propriétés transverses par rapport au quasi-unidirectionnel CQUUD. La contrainte à rupture et le module du composite CQUDCP sont similaires voire légèrement plus faibles que les valeurs obtenues pour les composites renforcés de tissus. Ainsi, contrairement à ce qui aurait pu être attendu, les matériaux biocomposites renforcés de quasi-unidirectionnel ne sont pas meilleurs que ceux renforcés de tissus. Les fils retordus utilisés en sens chaîne pour maintenir les mèches dans le renfort QUASI-UD peuvent entraîner des difficultés d'imprégnation et des phénomènes de concentration de contraintes au sein de la structure, venant la fragiliser et entraînant une rupture prématurée du matériau composite. En effet, la rupture des éprouvettes des composites renforcés de quasi-unidirectionnel est localisée pour l'ensemble des éprouvettes au niveau du fil retordu utilisé en chaîne, comme en témoigne la Figure 4-8.

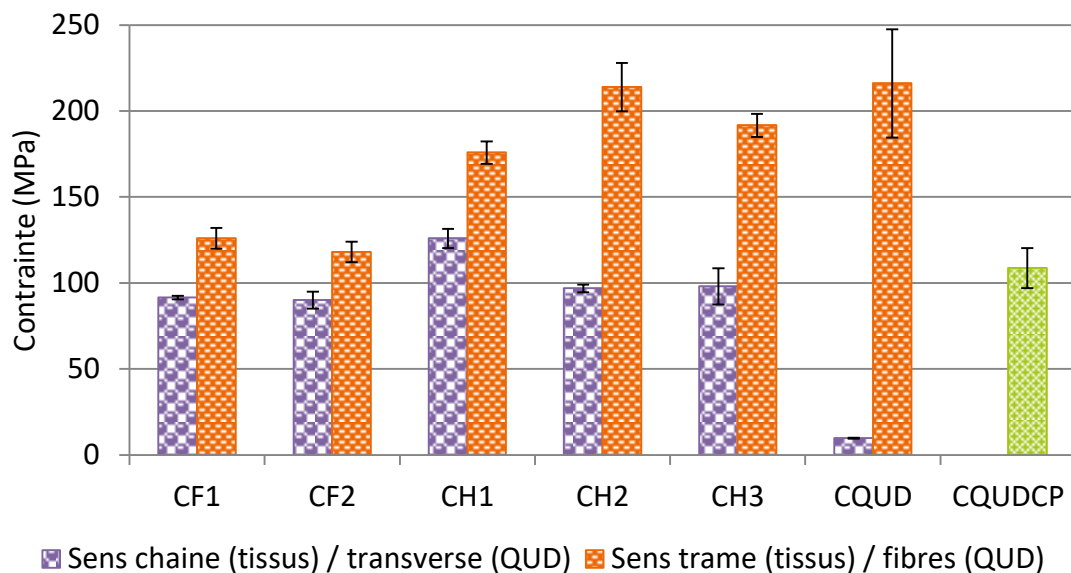


Figure 4-5 : Contraintes à rupture des matériaux biocomposites ($V_f = 45\%$)

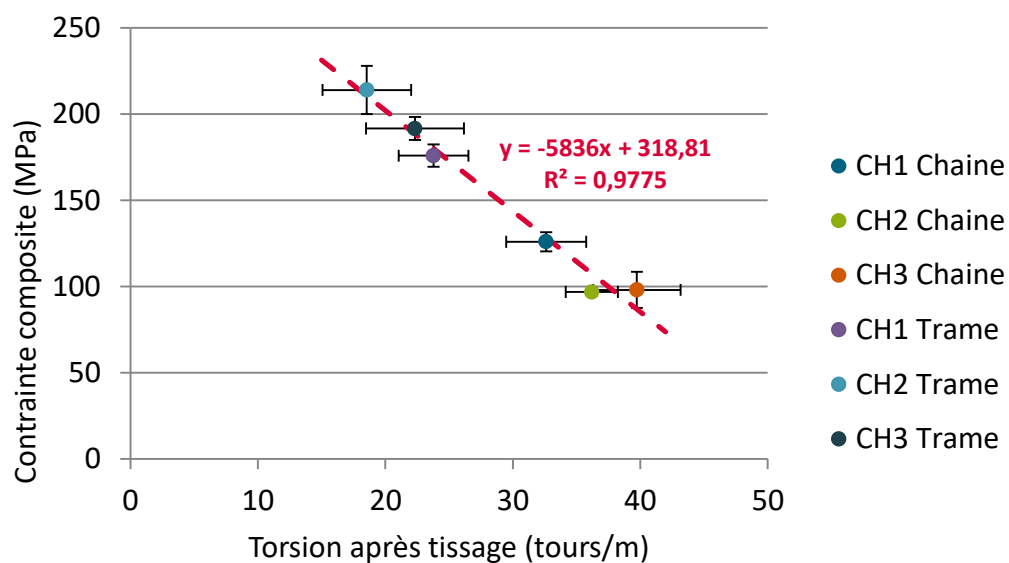


Figure 4-6 : Comparaison entre la torsion des mèches après tissage et la contrainte à rupture des biocomposites ($V_f = 45\%$)

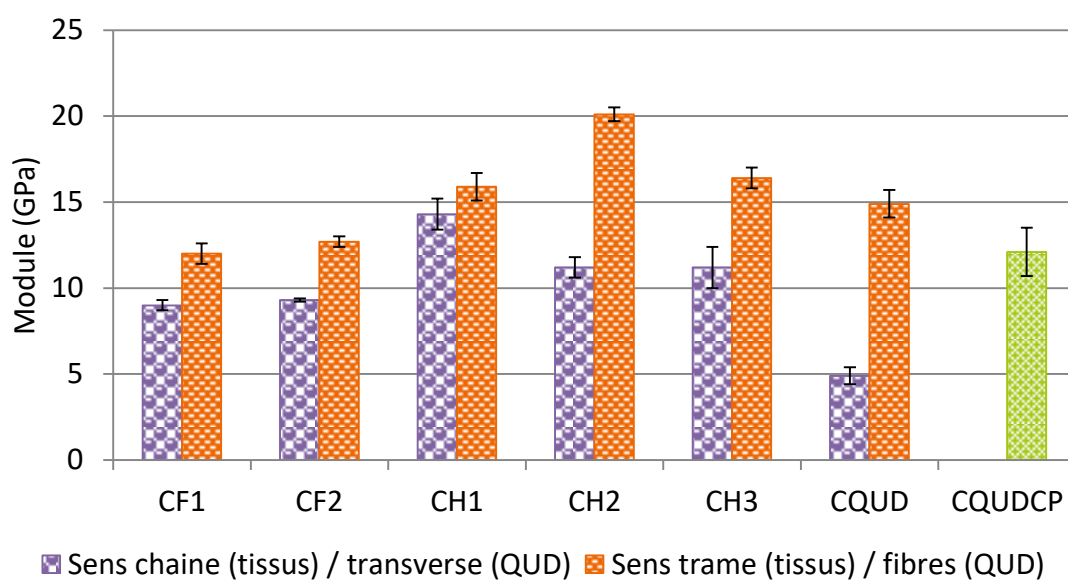


Figure 4-7 : Modules des matériaux biocomposites ($V_f = 45\%$)



Figure 4-8 : Eprouvettes CQUD en sens fibres après essais de traction

La déformation à rupture des biocomposites dépend essentiellement de la nature de leur renfort. En effet, puisque les fils sont beaucoup plus ondulés dans les renforts tissés, la déformation à rupture des matériaux qu'ils renforcent est dans l'ensemble plus élevée que la déformation à rupture des biocomposites renforcés de quasi-unidirectionnel. La Figure 4-10 permet de comparer l'évolution de la déformation à rupture des matériaux biocomposites renforcés de tissus en fonction de la perte d'ondulation des fils au sein des tissus lors de l'essai de traction à l'état sec (voir Chapitre 3 paragraphe 3.2.3). A l'exception du matériau CF1 en sens trame, plus la perte d'ondulation au sein du renfort dans la direction considérée augmente, plus la déformation à rupture du matériau composite est élevée. Le matériau CF1, quant à lui, est renforcé par le renfort FLAX1, composé en sens trame de mèches de lin sans traitement chimique (LINO ST). C'est d'ailleurs le seul matériau renforcé par une mèche sans traitement. Ainsi, même si ce traitement chimique n'influe ni sur la contrainte à rupture ni sur le module du matériau, il tend à diminuer son extensibilité avant rupture à l'échelle composite, alors que ce phénomène n'avait pas été constaté aux échelles fils (Chapitre 2 paragraphe 3.1) et tissus (Chapitre 3 paragraphe 3.2.4). L'utilisation de fils retordus, dans la direction chaîne des renforts des matériaux CF1 et CF2, entraîne une plus faible déformation à rupture des matériaux composites. Du fait du fort taux de torsion des fils, les fibres sont fortement désaxées du sens de la sollicitation mécanique et l'imprégnation est rendue plus difficile, ce qui entraîne une rupture prématurée du matériau composite dans cette direction. Dans le cas des biocomposites renforcés de quasi-unidirectionnels, la déformation avant rupture est plus faible, voire quasi-nulle pour la direction transverse du matériau CQUD. L'ondulation des fils au sein du renfort quasi-unidirectionnel étant peu importante, le matériau composite aura moins de capacité pour se déformer avant son endommagement sous l'effet d'une sollicitation en traction.

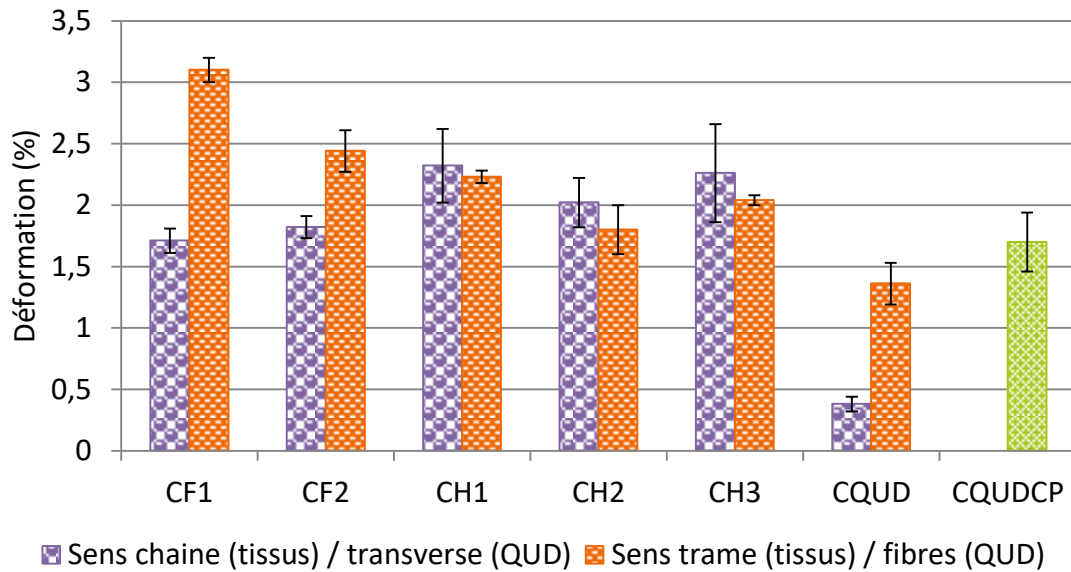


Figure 4-9 : Déformations à rupture des matériaux biocomposites

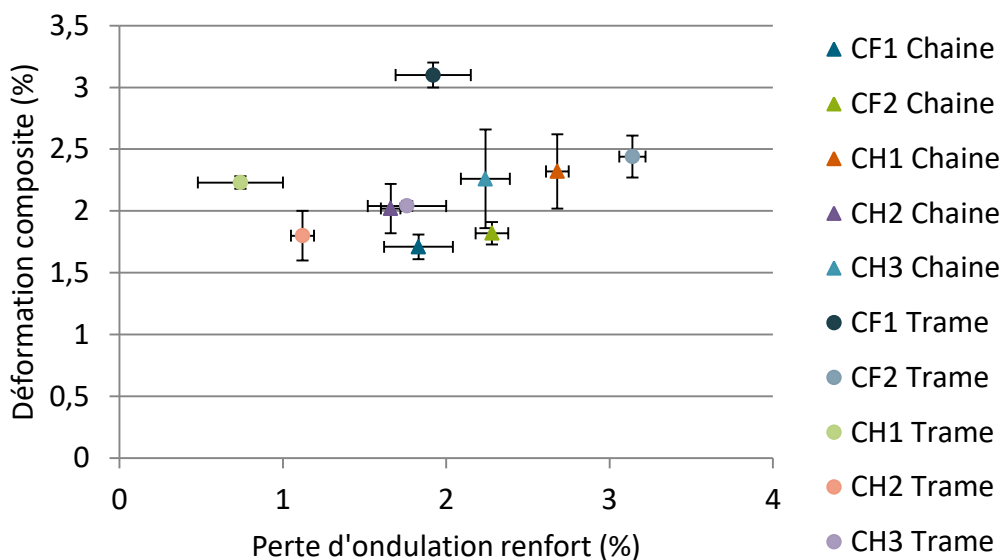


Figure 4-10 : Comparaison entre la perte d'ondulation dans les renforts tissés et la déformation à rupture des biocomposites

Pour conclure, les propriétés en traction des biocomposites dépendent des propriétés de leurs renforts. En fonction principalement des propriétés des fils utilisés pour produire les renforts, de la densité de fil choisie au moment de la production textile et de l'orientation des fibres dans l'axe de la sollicitation mécanique imposée, la contrainte à rupture et le module du matériau composite diffèrent. La déformation à rupture du matériau composite sera, quant à elle, influencée par l'ondulation des fils au sein du renfort, mais également dans une moindre mesure par le type de fil utilisé (taux de torsion et traitement appliqué). Enfin, le recours à un renfort quasi-unidirectionnel permet d'avoir un volume de fibres plus important et donc de meilleures propriétés mécaniques dans la direction contenant un maximum de fibres, le tout avec une déformation moindre du matériau. En fonction des

propriétés requises par le cahier des charges de la pièce composite, un choix de renfort optimisé peut être effectué. Ainsi, en fonction des propriétés recherchées, soit à l'échelle composite, avec par exemple un matériau aux propriétés équilibrées ou déséquilibrées, et/ou à l'échelle renfort, avec par exemple des contraintes en termes de maniabilité des renforts ou de rapidité de mise en œuvre, il est possible de sélectionner le type de fil et les paramètres de production en tissage (type de renfort, armures et densités de fils) pour répondre au mieux à ces spécifications.

3.2 Comparaison avec la littérature

Les propriétés mécaniques des biocomposites fabriqués à l'aide des renforts précédemment développés et caractérisés, appelés renforts SSUCHY, sont comparées à celles de matériaux issus de la littérature [7–10]. Que ce soit pour les contraintes à rupture ou pour les modules des matériaux SSUCHY et ceux issus de la littérature, les valeurs ont été recalculées avec la loi des mélanges pour une fraction volumique de fibres de 45%. Dans cette étude comparative, on distingue les propriétés des biocomposites élaborés à partir de renforts tissés, de celles des biocomposites renforcés par des UD/quasi-UD.

3.2.1 Biocomposites renforcés de tissus

Dans un premier temps, les propriétés des biocomposites SSUCHY (CF1, CF2, CH1, CH2 et CH3) sont comparées à celles des biocomposites renforcés de tissus en lin et jute issus des études de F. Bensadoun [7] et J.P. Torres et al. [9]. La composition des biocomposites de la littérature est présentée en Table 4-4. A l'exception d'un matériau, l'ensemble de ces composites est renforcé de 4 plis de tissus, comme la plupart des composites SSUCHY (hormis CH3 élaboré à partir de 2 plis), et les volumes de fibres atteints, lors de l'élaboration, sont du même ordre de grandeur : entre 35% et 40% pour les composites renforcés de tissus de la littérature et 37% et 41% pour les composites SSUCHY renforcés de tissus.

Table 4-4 : Composition des biocomposites renforcés de tissus de la littérature [7,9]

Composite	Lin Satin 7-1	Jute Sergé 2-2	Jute Toile	Lin Toile	Lin Sergé 2-2 A	Lin Sergé 2-2 B
Référence	[9]	[9]	[9]	[7]	[7]	[7]
Type de renfort	Tissu	Tissu	Tissu	Tissu	Tissu	Tissu
Nombre de plis	4	4	4	4	6	4
V_f (%)	35	36	40	40	40	40
Masse surfacique (g/m ²)	400	550	500	285	400	200

Les performances mécaniques des biocomposites SSUCHY renforcés de tissus sont comparées avec les valeurs de la littérature en Figure 4-11 pour les contraintes à rupture, en Figure 4-12 pour les modules et en Figure 4-13 pour les déformations à rupture. Les biocomposites SSUCHY sont repérés par la couleur bleue et ceux issus de la littérature par la couleur rose. Pour les matériaux issus de la littérature, la direction d'essai (chaîne ou trame) n'est pas mentionnée. Pour les matériaux SSUCHY, la direction chaîne est notée « Ch » et la direction trame « Tr ». Les valeurs de ces propriétés sont rassemblées en Annexe E.

Les biocomposites CF1 et CF2 dans les deux directions ainsi que CH1, CH2 et CH3 en direction chaîne possèdent des valeurs de contraintes à rupture et de modules similaires à celles issues de la littérature. Les matériaux CH1, CH2 et CH3 dans la direction trame présentent quant à eux des valeurs de contrainte à rupture et de module supérieures à celles des valeurs issues de la littérature. La réorientation des fibres due à la détorsion des mèches pendant la production de la préforme permet d'obtenir des matériaux biocomposites performants et compétitifs sur le marché par rapport aux matériaux produits à partir de renforts déjà commercialisés. Les biocomposites SSUCHY renforcés de chanvre présentent même des modules supérieurs à ceux obtenus dans la littérature pour les fibres de lin et encore plus pour ceux renforcés de fibres de jute (hormis pour les matériaux CH2 et CH3 direction chaîne, qui ont des modules dans les mêmes gammes de valeurs). Les fibres de lin sont pourtant connues pour avoir de meilleures propriétés que les fibres de chanvre. Cette rigidité plus élevée souligne les performances prometteuses des matériaux composites produits dans le cadre du SSUCHY avec les renforts tissés en chanvre. Les déformations à rupture des biocomposites SSUCHY sont dans les mêmes gammes de valeurs que celles de la littérature, à l'exception du composite CF1, mais le renfort FLAX1 n'est pas adapté à une production industrielle du fait de la fragilité de la mèche sans traitement utilisée en sens trame.

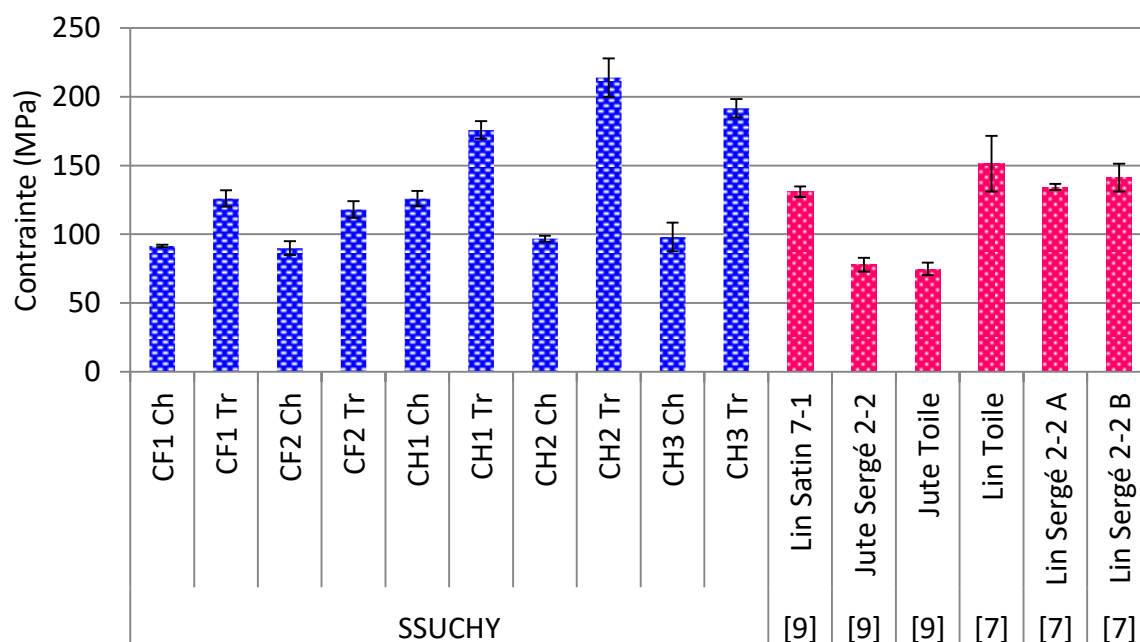


Figure 4-11 : Comparaison des contraintes à rupture des biocomposites SSUCHY avec la littérature pour les renforts tissés [7,9] ($V_f = 45\%$)

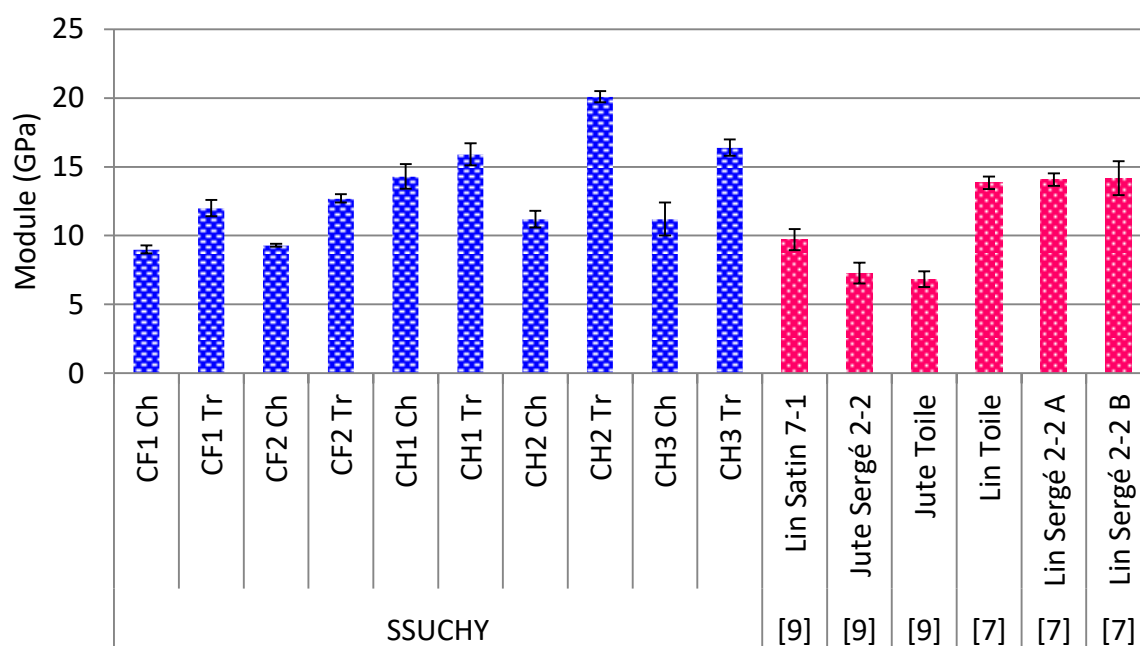


Figure 4-12 : Comparaison des modules des biocomposites SSUCHY avec la littérature pour les renforts tissés [7,9] ($V_f = 45\%$)

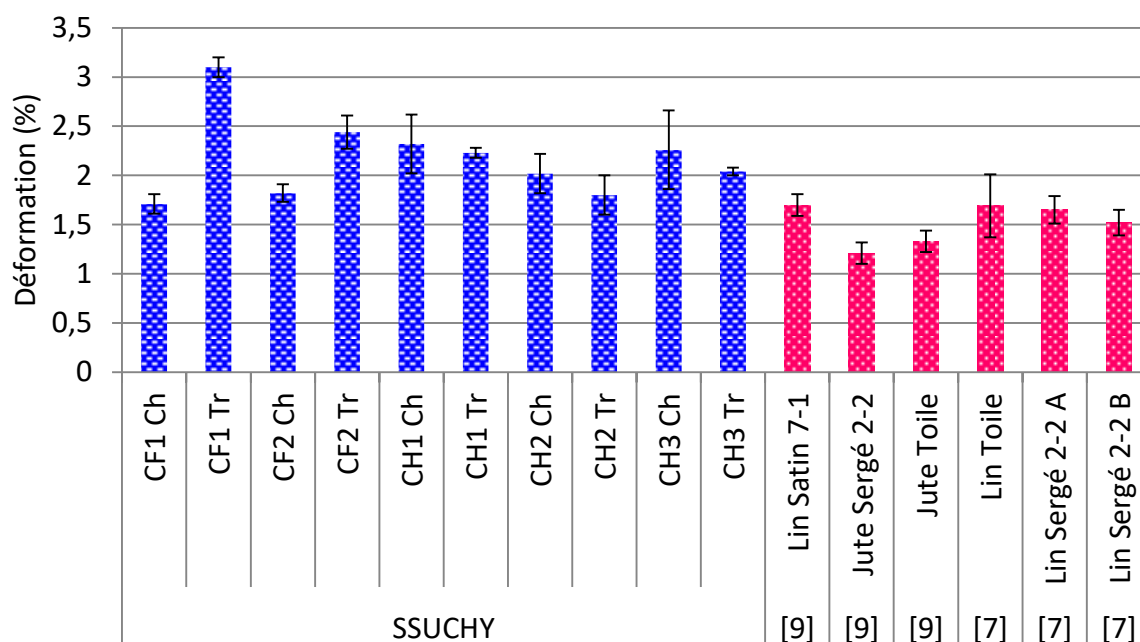


Figure 4-13 : Comparaison des déformations à rupture des biocomposites SSUCHY avec la littérature pour les renforts tissés [7,9]

Pour conclure, les renforts tissés élaborés sont prometteurs et compétitifs par rapport à ce qui est actuellement commercialisé, puisqu'ils confèrent aux matériaux biocomposites des contraintes à rupture et modules similaires, voire même supérieurs dans certains cas, et des déformations semblables en comparaison des renforts déjà disponibles sur le marché. De plus, ces comparaisons ont été effectuées avec des matériaux renforcés de fibres de lin et de jute, et non en chanvre comme les développements SSUCHY, ce qui ouvre la voie à de nouvelles possibilités de renforts avec une autre nature de fibres. Ces nouveaux renforts ne sont encore produits qu'à une échelle laboratoire, et non industrialisés comme les renforts issus de la littérature. Ainsi, avec la phase d'industrialisation, il sera possible de les optimiser pour encore améliorer les propriétés de ces nouveaux matériaux.

3.2.2 Biocomposites renforcés d'unidirectionnels ou de quasi-unidirectionnels

Les propriétés des biocomposites CQUD et CQUDCP (fabriqués à partir du renfort quasi-unidirectionnel QUD) sont comparées à celles de biocomposites soit renforcés d'unidirectionnels et issus des études de F. Bensadoun [7] et de C. Poilâne et al. [8] mais également avec les propriétés des biocomposites renforcés de quasi-unidirectionnels issus des études de J.P. Torres et al. [9], C. Poilâne et al. [8] et M. Berges et al. [10]. La composition des biocomposites de la littérature est présentée en Table 4-5. Le nombre de plis utilisés varie selon les matériaux, et les plus forts taux volumiques de fibres, aux alentours de 60%, sont atteints avec huit ou dix plis de renforts. Le renfort QUD, grâce à son importante masse surfacique, permet d'atteindre un taux volumique de fibres similaire avec seulement deux plis. Seuls les composites FlaxTape [7] et FlaxPly [9] possèdent une stratification de type « Cross Ply », ils seront donc comparés aux propriétés du matériau

CQUDCP. Les autres matériaux de la littérature sont renforcés de plis, déposés avec la même orientation, et testés dans la direction des fibres. Ils seront donc comparés avec le matériau CQUUD, dans sa direction fibres.

Table 4-5 : Composition des biocomposites renforcés d'unidirectionnels et de quasi-unidirectionnels de la littérature [7–10]

Composite	FlaxTape	UD 382	UD 220	FlaxPly	QUD 180	QUD 115	FlaxPreg
Référence	[7]	[8]	[8]	[9]	[8]	[8]	[10]
Type de renfort	UD	UD	UD	Quasi-UD	Quasi-UD	Quasi-UD	Quasi-UD
Nombre de plis	4 [0/90] _{2s}	8	8	4 [0/90] _{2s}	10	10	10
V _f (%)	40	57	60	31	60	46	45
Masse surfacique (g/m ²)	200	400	223	180	180	115	154

Les performances mécaniques des biocomposites SSUCHY renforcés d'unidirectionnels et de quasi-unidirectionnels sont comparées avec la littérature en Figure 4-14 pour les contraintes à rupture, en Figure 4-15 pour les modules et en Figure 4-16 pour les déformations à rupture. Les biocomposites SSUCHY sont repérés par la couleur bleue, ceux issus de la littérature renforcés par une stratification à 0° par la couleur rose, et ceux issus de la littérature renforcés par une stratification à 0°/90° par la couleur verte.

La contrainte à rupture du composite CQUUD est similaire, à l'écart-type près, à celle obtenue dans la littérature pour des composites renforcés d'unidirectionnels ou de quasi-unidirectionnels stratifiés à 0° à l'exception du composite FlaxPreg qui présente une résistance plus élevée, seul renfort préimprégné étudié dans le cadre de cette analyse comparative. La contrainte à rupture du composite CQUDCP est, quant à elle, inférieure à celle des composites stratifiés en « Cross Ply » (FlaxTape, FlaxPly). Concernant la rigidité des biocomposites, le module du composite CQUUD est plus faible que ceux obtenus dans la littérature pour une stratification des renforts à 0° tandis que le module du composite CQUDCP est similaire à celui obtenu dans la littérature pour un renfort quasi-unidirectionnel stratifié à 0°/90° (FlaxPly) et légèrement inférieur à celui obtenu avec un renfort purement unidirectionnel stratifié aussi à 0°/90° (FlaxTape). L'utilisation d'un fil retordu en sens chaîne dans le renfort QUD non optimisé pour la réalisation d'un renfort quasi-unidirectionnel entraîne des difficultés d'imprégnation ainsi que des phénomènes de concentration de contrainte au niveau de points de liage qui vient fragiliser le matériau composite. Enfin, que ce soit pour les renforts unidirectionnels ou quasi-unidirectionnels, la stratification à 0°/90° entraîne une diminution de la contrainte à rupture et du module du matériau composite. Avec ce type de stratification, les fibres ne sont plus toutes dans la même direction mais dans deux directions principales, ce qui diminue de moitié la quantité de fibres présentes dans la direction testée, et donc entraîne de plus faibles propriétés mécaniques. La déformation à rupture des composites renforcés par le quasi-unidirectionnel QUD est

similaire à celle observée dans la littérature. Dans le cas des renforts quasi-unidirectionnels, que ce soit pour le renfort QUD ou pour les renforts quasi-unidirectionnels issus de la littérature, une stratification des renforts de type « Cross Ply » confère au matériau composite une plus grande déformation au matériau composite. Ce phénomène n'est pas observé pour les composites renforcés de purs unidirectionnels stratifiés à 0°/90° puisqu'il n'y a pas de fibres dans la direction transverse du matériau, et donc moitié moins de fibres dans la direction de la sollicitation mécanique avec un tel type d'empilement des renforts.

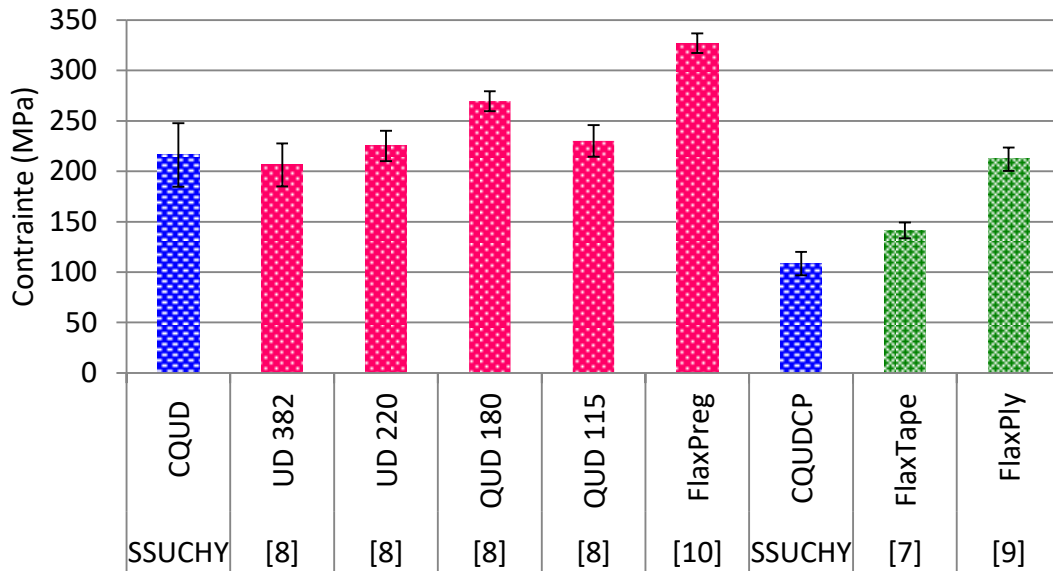


Figure 4-14 : Comparaison des contraintes à rupture des biocomposites SSUCHY avec la littérature pour les renforts UD et quasi-UD [7–10] ($V_f = 45\%$)

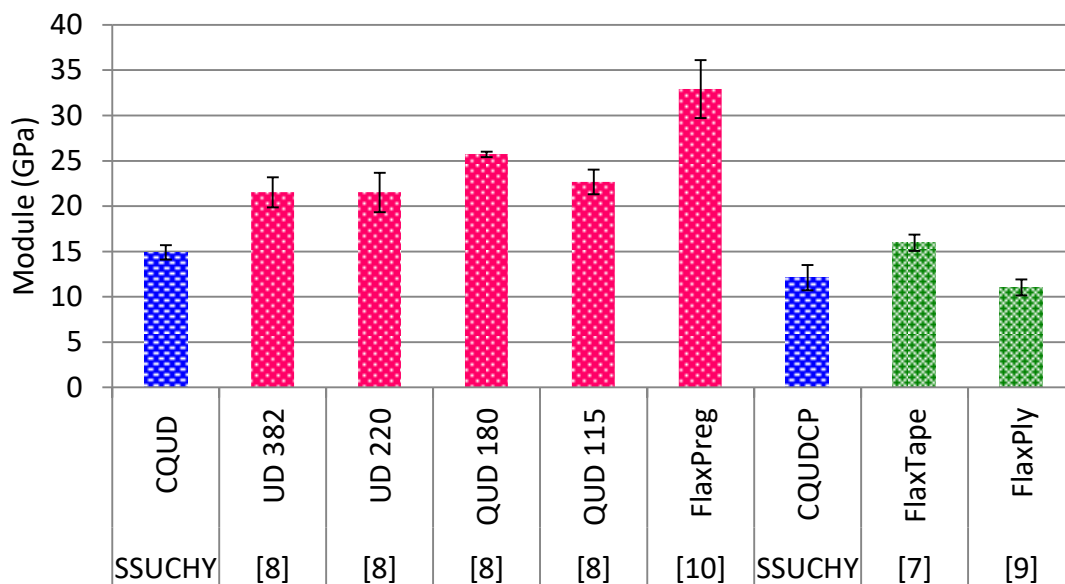


Figure 4-15 : Comparaison des modules des biocomposites SSUCHY avec la littérature pour les renforts UD et quasi-UD [7–10] ($V_f = 45\%$)

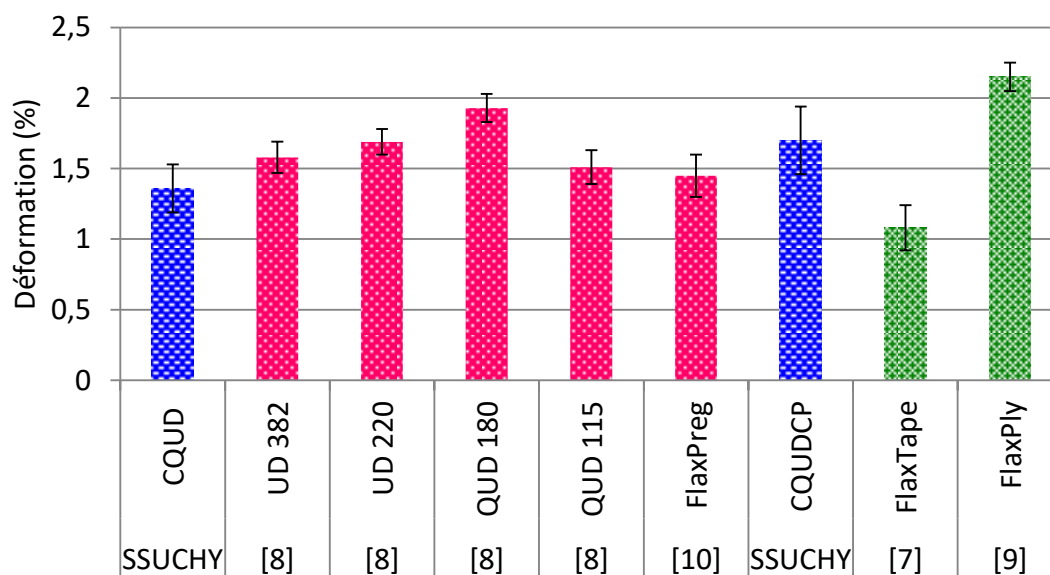


Figure 4-16 : Comparaison des déformations à rupture des biocomposites SSUCHY avec la littérature pour les renforts UD et quasi-UD [7–10]

En conclusion, le renfort quasi-unidirectionnel produit à partir des fibres de chanvre permet d'obtenir des performances mécaniques à l'échelle composite acceptable au regard de ce qui est obtenu dans la littérature avec des renforts unidirectionnels ou quasi-unidirectionnels en lin disponibles sur le marché. Ce renfort est donc prometteur, puisqu'il est produit à partir de fibres de chanvre, alors que les autres renforts unidirectionnels ou quasi-unidirectionnels sont produits à partir de fibres de lin. Ses paramètres de production peuvent être optimisés, notamment en travaillant sur le fil utilisé pour le liage afin d'améliorer son imprégnation et ses propriétés mécaniques à l'échelle composite. En effet, la production de ce renfort quasi-unidirectionnel n'en est qu'à un stade d'élaboration à l'échelle laboratoire, et des nouveaux développements sont en cours à l'échelle industrielle afin d'optimiser les performances de ce nouveau type de renfort.

4 Conclusion

Dans ce chapitre, les renforts en fibres naturelles précédemment développés ont été analysés en termes de propriétés en traction à l'échelle composite. Ces plaques ont été réalisées et caractérisées au sein du laboratoire de l'institut FEMTO-ST, de l'Université de Franche-Comté, partenaire du projet SSUCHY.

En fonction des paramètres de production des renforts, qu'ils soient tissés ou quasi-unidirectionnel, les propriétés des matériaux biocomposites varient. L'utilisation de fils retordus dans le renfort est source de difficultés d'imprégnation et de désorientation des fibres, ce qui entraîne une diminution des propriétés mécaniques. De même, lorsque les renforts sont tissés avec des mèches présentant de faibles ténacités et pentes, le biocomposite final aura de plus faibles propriétés mécaniques. En revanche, le traitement chimique utilisé à l'échelle des mèches n'a pas d'influence à l'échelle composite sur les propriétés mécaniques du matériau, à l'exception d'une légère diminution de sa déformation. Le recours au traitement chimique utilisé pour améliorer la tissabilité des fibres naturelles est donc validé puisqu'il ne dégrade pas le comportement du matériau composite. En termes de choix d'armures, l'utilisation d'une armure toile pour le renfort tissé permet de fabriquer un matériau composite aux propriétés mécaniques relativement équilibrées entre les deux directions. Avec une armure satin ou sergé, les densités de fils au sein du renfort ne sont pas identiques entre les deux directions et le biocomposite aura des propriétés mécaniques plus élevées dans la direction où la densité de fils est plus importante. Avec une armure satin, les points de liage sont plus dispersés qu'avec une armure sergé et les propriétés mécaniques du matériau composite seront meilleures. Le phénomène de détorsion apparu lors du tissage à l'échelle laboratoire entraîne une réorientation des fibres dans le sens de la sollicitation mécanique, permettant d'améliorer la contrainte à rupture et le module du matériau biocomposite. Le matériau biocomposite renforcé de plis de quasi-unidirectionnel disposés dans la même direction possède des propriétés mécaniques très élevées dans la direction des fibres, voire même supérieures à celles pouvant être obtenues avec un renfort tissé du fait d'une moindre ondulation des fibres au sein du renfort quasi-unidirectionnel, mais très faibles dans la direction transverse. Le recours à une stratification à $0^\circ/90^\circ$ des plis de quasi-unidirectionnel permet d'obtenir un taux volumique de fibres similaires dans les deux directions et des propriétés mécaniques intermédiaires entre celles obtenues dans la direction des fibres et celles obtenues dans la direction transverse avec une stratification à 0° . De plus, le biocomposite renforcé d'unidirectionnels à $0^\circ/90^\circ$ présente un comportement similaire à certains biocomposites renforcés de tissus. Ainsi, les propriétés des matériaux composites sont étroitement liées aux propriétés des renforts, et un choix de renfort adapté au cahier des charges de la pièce finale permet de maximiser ses performances.

Les propriétés des biocomposites SSUCHY ont également été comparées avec les données disponibles dans la littérature, pour des matériaux fabriqués à partir de renforts tissés, unidirectionnels et quasi-unidirectionnels composés essentiellement de fibres de lin et déjà commercialisés sur le marché des renforts pour composites. Les renforts tissés produits dans le cadre de SSUCHY sont compétitifs et prometteurs au regard des renforts biosourcés déjà disponibles sur le marché, puisque les biocomposites SSUCHY produits possèdent des propriétés similaires voire supérieures à celles des matériaux issus de la littérature et que les conditions de production des matériaux SSUCHY n'étaient pas optimisées. Ainsi, le développement de ces renforts tissés en fibres de chanvre est donc à poursuivre pour proposer de nouvelles solutions innovantes dans le domaine des renforts tissés pour matériaux biocomposites. D'autres plaques composites seront à produire et à caractériser avec les renforts tissés comelés afin de comparer les propriétés obtenues et mettre en avant les avantages et inconvénients des deux types de renforts tissés (100% fibres naturelles et comelés). Le renfort quasi-unidirectionnel, réalisé avec des fibres de chanvre, permet de réaliser des biocomposites aux propriétés acceptables au regard des biocomposites renforcés d'unidirectionnels ou de quasi-unidirectionnels en fibres de lin disponibles sur le marché. Par la suite, la poursuite du développement d'un tel type de renfort permettra d'optimiser le liage des fibres, et donc la capacité à être imprégné au mieux par la résine, ainsi que de proposer sur le marché un nouveau type de renfort quasi-unidirectionnel avec des fibres de chanvre. Pour l'ensemble des matériaux composites produits, que ce soit avec des renforts tissés 100% fibres naturelles ou comelés ou des renforts quasi-unidirectionnels, des essais de traction composite hors axe (à 45°), des essais de flexions ainsi que des caractérisations plus spécifiques en fonction des démonstrateurs SSUCHY seront à réaliser afin de disposer de l'ensemble du comportement de chaque matériau et de vérifier sa compatibilité par rapport aux applications visées.

Références

- [1] A.-C. Corbin, D. Soulat, M. Ferreira, A.-R. Labanieh, X. Gabrion, V. Placet, Multi-scale analysis of flax fibres woven fabrics for composite applications, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 406 (2018). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/406/1/012016>.
- [2] A.-C. Corbin, D. Soulat, M. Ferreira, A. Labanieh, X. Gabrion, V. Placet, Improvement of the Weavability of Natural-Fiber Reinforcement for Composite Materials Manufacture, *Rev. Compos. Matér. Avancés.* 29 (2019) 201–208. <https://doi.org/10.18280/rcma.290403>.
- [3] A.-C. Corbin, D. Soulat, M. Ferreira, A.-R. Labanieh, X. Gabrion, P. Malécot, V. Placet, Towards hemp fabrics for high-performance composites: Influence of weave pattern and features, *Compos. Part B Eng.* 181 (2020) 107582. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107582>.
- [4] ASTM International, ASTM D3039 / D3039M-17 - Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, West Conshohocken, PA, 2017. https://doi.org/10.1520/D3039_D3039M-00.
- [5] SSUCHY, SSUCHY - Rapports internes, n.d.
- [6] B. Baghaei, M. Skrifvars, Characterisation of polylactic acid biocomposites made from prepregs composed of woven polylactic acid/hemp–Lyocell hybrid yarn fabrics, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 81 (2016) 139–144. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.10.042>.
- [7] F. Bensadoun, In-service behaviour of flax fibre reinforced composites for high performance applications, Thèse, KU Leuven, 2016.
- [8] C. Poilâne, Z.E. Cherif, F. Richard, A. Vivet, B. Ben Doudou, J. Chen, Polymer reinforced by flax fibres as a viscoelastoplastic material, *Compos. Struct.* 112 (2014) 100–112. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.01.043>.
- [9] J.P. Torres, L.-J. Vandi, M. Veidt, M.T. Heitzmann, The mechanical properties of natural fibre composite laminates: A statistical study, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 98 (2017) 99–104. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.03.010>.
- [10] M. Berges, R. Léger, V. Placet, V. Person, S. Corn, X. Gabrion, J. Rousseau, E. Ramasso, P. Ienny, S. Fontaine, Influence of moisture uptake on the static, cyclic and dynamic behaviour of unidirectional flax fibre-reinforced epoxy laminates, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 88 (2016) 165–177. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.05.029>.

Conclusion et Perspectives

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été réalisés dans le cadre du projet H2020-BBI, SSUCHY. L'élaboration de matériaux composites 100% biosourcés, tant pour les fibres de renforts que pour les polymères en tant que matrice, permet d'apporter une alternative prometteuse aux matériaux composites 100% pétrosourcés actuellement utilisés dans de nombreux domaines d'applications. L'objectif de ces travaux, portant sur les renforts fibreux, est le développement de solutions aux propriétés optimisées pour les applications visées à partir de fibres de chanvre, matière à l'heure actuelle peu présente sur le marché du renfort pour matériaux composites. Une démarche multi échelle a été menée avec une analyse des propriétés aux échelles fibres, fils, renforts et composites dans le but de maîtriser les propriétés à chaque échelle en vue du développement de pièces les plus performantes possibles.

Dans un premier temps, il a été nécessaire d'étudier la tissabilité des fibres naturelles. Ces dernières étant discontinues, elles doivent être rassemblées sous la forme d'un semi-produit continu, possédant une certaine ténacité pour pouvoir être tissées, et notamment dans la direction chaîne, sans subir de dommages trop importants. Dans l'industrie textile de l'habillement, cette ténacité est apportée par un fort taux de torsion. Au sein de ces travaux, plusieurs solutions ont été proposées pour pallier à l'utilisation de fils retordus, qui peut être néfaste pour l'imprégnation de résine. La première solution proposée est le recours à un traitement chimique réalisé sur les mèches juste après leur production, qui permet d'améliorer la cohésion des fibres naturelles entre elles. Grâce à ce traitement chimique, la ténacité des mèches et leur utilisation en tissage est désormais possible dans les deux directions. La deuxième solution envisagée est l'utilisation de la technologie de guipage lors de l'étape de filature. Les mèches avec une faible ténacité sont recouvertes par un multifilament thermoplastique, qui va venir compacter la structure interne de la mèche, conférant ainsi au semi-produit guipé une ténacité supérieure à celle de la mèche seule. A partir des mèches, les propriétés des fibres, en termes de rigidités, ont été déterminées à l'aide des essais d'« Impregnated Fibre Bundle Test » (IFBT). Ces travaux ont montré que le suivi des propriétés des fibres nécessite la prise en compte de la porosité des éprouvettes et de la torsion des mèches utilisées pour ces éprouvettes. Des coefficients correcteurs ont donc été appliqués afin de déterminer les propriétés des fibres chanvre, qui ont été mis en regard avec les valeurs de la littérature identifiées par des essais de traction unitaires. Cette démarche d'identification a également permis de démontrer que le traitement chimique réalisé sur les mèches pour permettre leur tissabilité n'entraîne pas de dégradation majeure sur ces dernières, ce qui est donc positif pour la suite de la démarche. Enfin, l'impact du procédé de tissage a été étudié au niveau des propriétés des fils et des fibres. Les fils utilisés en sens chaîne ne subissent pas de détériorations majeures pendant le procédé de tissage, malgré les mouvements nombreux et successifs des cadres. Dans la direction trame, lorsque

les renforts sont produits à l'échelle laboratoire, la caractérisation des fils après tissage a mis en évidence une détorsion des fils, engendrée par le bobinage des fils sur les canettes des navettes, qui entraîne une diminution de leur ténacité. A l'échelle industrielle, les propriétés des fils sont nettement moins diminuées. Ces développements sont essentiels pour la maîtrise des paramètres de tissage de produits à base de fibres naturelles. Le développement de semi-produits guipés est une alternative pour associer ces fibres naturelles à des résines thermoplastiques, en vue de mise en œuvre composite par thermocompression. La faisabilité de la technologie a été démontrée, ici avec des résines pétrosourcées, et la tissabilité de ces mèches guipées pour obtenir des renforts a été analysée.

Par la suite, des renforts tissés avec différents paramètres de production ont été réalisés à l'échelle laboratoire puis, pour un certain nombre d'entre eux, à l'échelle industrielle en faisant varier l'armure, les types de fils et la densité trame. Ainsi, 14 renforts, tissés et quasi-unidirectionnel ont été élaborés à ces deux échelles. Certains paramètres, tels que la densité de fils insérés en direction trame, sont mieux contrôlables à l'échelle industrielle. Les variations de type de fil (fil retordu, mèche ou fil guipé), d'armure (toile, satin, sergé), de densité trame et de type de renfort (tissu ou quasi-unidirectionnel) ont permis d'obtenir un échantillonnage de renforts à épaisseurs, masses surfaciques et perméabilités à l'air différentes. Par la suite, les propriétés mécaniques des renforts ont été étudiées d'abord au moyen d'essais de traction et de flexion à l'état sec. En fonction des paramètres de tissage, la caractérisation de ces renforts a conduit à disposer d'une base de données expérimentale importante de propriétés, à l'état sec, en termes d'efforts à rupture, de rigidités en traction, d'allongements à rupture et de rigidités en flexion. Des propriétés liées à la déformabilité, comme le comportement en cisaillement plan et la mise en forme, ont également été identifiées et sont essentielles pour la fabrication de pièces composites de formes complexes. Les résultats obtenus ont montré que les paramètres de tissage, et principalement la densité de fils du renfort, jouent un rôle important dans le comportement du renfort. Ces essais ont montré que si les renforts UD (ou quasi-UD) à base de fibres naturelles sont légitimés dans la littérature pour leurs propriétés en traction, relativement aux renforts tissés, leur comportement à la drapabilité génère des défauts. Ces développements ont permis de conduire à l'élaboration de renforts tissés, en chanvre, à propriétés optimisées, autant en traction que pour leur aptitude à la mise en forme.

Enfin, en collaboration avec le laboratoire FEMTO-ST (UMR 6174), des plaques composites ont été élaborées à partir de certains renforts tissés et quasi-unidirectionnel en 100% fibres de lin ou de chanvre avec une résine époxy partiellement biosourcée. Ces matériaux ont ensuite été caractérisés en traction. L'influence des paramètres de production des renforts, du type de fil et de l'armure, sur ces propriétés a été analysée. Ainsi le type de fil (fil retordu ou mèche) joue sur l'imprégnation du matériau, entraînant ainsi des propriétés mécaniques en traction plus ou moins élevées, tandis que l'armure permet d'obtenir des densités de fils plus ou moins importantes et donc des taux de fibres qui peuvent varier, ce qui permet d'obtenir un comportement mécanique plus ou moins équilibré dans les deux

directions principales de l'éprouvette. De plus, ces résultats composites ne sont pas impactés par le recours ou non à un traitement chimique sur les fils utilisés pour la production du renfort. Les propriétés mécaniques en traction obtenues sur les matériaux renforcés de chanvre développés dans le cadre de SSUCHY ont par la suite été comparées avec des résultats issus de la littérature obtenus sur des matériaux composites récemment commercialisés à base de fibres de lin ou de jute. Que ce soit pour les biocomposites renforcés de tissus ou du quasi-unidirectionnel, le comportement des matériaux SSUCHY est prometteur, puisqu'il est similaire voire dans certains cas meilleur que celui des matériaux disponibles dans la littérature. De plus, les renforts SSUCHY utilisés ne sont que les premiers renforts développés, voués à être optimisés tout comme les procédés de fabrication composite, et ces renforts sont produits à partir de chanvre, fibres très peu utilisées à l'heure actuelle dans le renfort de matériaux composites.

Dans l'optique d'une poursuite de ces travaux de thèse, de nombreuses perspectives pourront être envisagées à chacune des échelles étudiées. Puisque le traitement chimique n'a pas d'impact à ni à l'échelle des fibres ni à l'échelle composite, et qu'il rend possible la tissabilité des fibres de chanvre, une optimisation de ce dernier pourra être étudiée pour diminuer son impact environnemental, à la fois sur les produits chimiques utilisés mais aussi au niveau des temps et des températures de mise en œuvre. Toujours à l'échelle des fils et en vue d'une réduction de l'impact environnemental du produit, le guipage des mèches de chanvre par un polymère biosourcé sera à envisager. L'utilisation du polyamide 11, synthétisé à partir d'huile de ricin, est une piste en substitution au polyamide 12 utilisé dans ces travaux. Concernant les essais d'IFBT, la torsion des fils utilisés et la porosité des éprouvettes ont été prises en compte, mais les essais menées sur les fils après tissage ont montré que l'ondulation résiduelle des fils conduit à une sous-estimation des propriétés des fibres. Une méthode pour prendre en compte cette ondulation résiduelle liée à l'embuvage et au retrait pourra être étudiée. Ces travaux ont permis de comparer différents modèles associés à l'IFBT, mais sur la rigidité, des développements similaires, mais plus complexes seraient nécessaires pour le terme de contrainte à rupture. Par la suite, à l'échelle du renfort, les développements sur les choix des paramètres de production seront à poursuivre pour mettre au point des renforts dont le comportement sera adapté à la méthode de mise en œuvre de la pièce composite, afin de ne pas endommager le renfort lors des étapes de production, et qui permettront de conférer au matériau final les propriétés les plus adaptées à son utilisation. Le développement d'un renfort comélé avec des fils guipés moins rigides sera à envisager pour obtenir un renfort tissé avec des fils ayant une ondulation moindre et qui permettra d'obtenir de meilleures propriétés mécaniques, avec des fibres mieux alignées dans les deux directions majeures des sollicitations mécaniques. Concernant le renfort quasi-unidirectionnel, un second renfort pourra être tissé avec une densité trame plus faible pour diminuer sa masse surfacique tout en conservant un taux de fibres acceptable. Le recours à un autre type de fil utilisé en chaîne pour le liage sera également à envisager, pour pallier aux problèmes d'imprégnation rencontrés dans ces travaux avec les fils retordus. A l'échelle

des renforts, ces travaux se sont focalisés sur les tissus, des développements similaires sur la tressabilité et la tricotabilité des semi-produits (mèches, fils, fils guipés/comelés) à base de chanvre seront à envisager. Toujours à l'échelle composite, les renforts comelés devront être mis en œuvre par thermocompression et caractérisés, en vue de comparer leurs propriétés avec celles de matériaux renforcés de tissus et quasi-unidirectionnel produits à partir des fibres de lin et de chanvre. Pour l'ensemble des matériaux biocomposites produits dans le cadre de ces travaux, des caractérisations complémentaires, telles que l'étude du comportement en traction à 45° ou en flexion pourront être effectuées, ainsi que des essais plus spécifiques liés aux cahiers des charges des démonstrateurs SSUCHY.

Annexes

Table des matières

Annexe A : Liste des communications.....	241
Annexe B : Propriétés des fils.....	243
Annexe C : Propriétés des renforts	252
Annexe D : Angles de cisaillement des renforts lors des essais d'emboutissage	262
Annexe E : Propriétés mécaniques des matériaux biocomposites	270

Annexe A : Liste des communications

Communications écrites

A.-C. Corbin, F. Boussu, M. Ferreira, D. Soulat, Influence of 3D warp interlock fabrics parameters made with flax rovings on their final mechanical behaviour, Journal of Industrial Textiles. (2018) 1–22. <https://doi.org/10.1177/1528083718808790>.

A.C. Corbin, A. Kecici, F. Boussu, M. Ferreira, D. Soulat, Engineering Design and Mechanical Property Characterisation of 3D Warp Interlock Woven Fabrics, Appl Compos Mater. (2018) 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10443-018-9715-z>.

A.-C. Corbin, D. Soulat, M. Ferreira, A.-R. Labanieh, X. Gabrion, V. Placet, Multi-scale analysis of flax fibres woven fabrics for composite applications, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 406 (2018). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/406/1/012016>.

F. Rubino, A.-C. Corbin, M. Ferreira, A.R. Labbanieh, L. Sanguigno, D. Soulat, A. Maligno, Permeability characterization of braided fabrics made of hemp fibers, AIP Conference Proceedings. 2113 (2019) 060008. <https://doi.org/10.1063/1.5112603>.

A.-C. Corbin, D. Soulat, M. Ferreira, A. Labanieh, X. Gabrion, V. Placet, Improvement of the Weavability of Natural-Fiber Reinforcement for Composite Materials Manufacture, RCMA. 29 (2019) 201–208. <https://doi.org/10.18280/rcma.290403>.

A.-C. Corbin, D. Soulat, M. Ferreira, A.-R. Labanieh, Amélioration de la tissabilité des préformes pour applications composites par l'utilisation de rovings guipés chanvre/PA12, in: Journées Nationales Sur Les Composites 2019 JNC21, Bordeaux INP, France, 2019. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02094120>

A.-C. Corbin, D. Soulat, M. Ferreira, A.-R. Labanieh, Développement de rovings guipés chanvre/thermoplastique pour la réalisation de préformes pour matériaux composites, in: 24ème Congrès Français de Mécanique, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France, 2019. <https://cfm2019.sciencesconf.org/243132>.

A.-C. Corbin, M. Ferreira, A.R. Labanieh, D. Soulat, Natural fiber composite manufacture using wrapped hemp roving with PA12, Materials Today: Proceedings. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.307>.

A.-C. Corbin, D. Soulat, M. Ferreira, A.-R. Labanieh, X. Gabrion, P. Malécot, V. Placet, Towards hemp fabrics for high-performance composites: Influence of weave pattern and features, Composites Part B: Engineering. 181 (2020) 107582. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107582>.

A.-C. Corbin, D. Soulat, M. Ferreira, 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,
<https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1761925>

Communications orales

Posters

A.-C. Corbin, D. Soulat, M. Ferreira, A.R. Labanieh, Study of natural fibers reinforcement for composite applications in dry state, JEC 2018, Paris Nord Villepinte (France), 06-08/03/2018

A.-C. Corbin, D. Soulat, M. Ferreira, A.R. Labanieh, Improvement in the weavability of preforms for composite applications with hemp/PA12 wrap rovings, JEC 2019, Paris Nord Villepinte (France), 12-14/03/2019

A.-C. Corbin, D. Soulat, M. Ferreira, A.R. Labanieh, Amélioration de la tissabilité des préformes pour applications composites par l'utilisation de rovings guipés chanvre/PA12, Journées Nationales sur les Composites 2019 JNC21, Bordeaux INP (France), 01-03/07/2019

Conférences

A.-C. Corbin, D. Soulat, M. Ferreira, A.R. Labanieh, X. Gabrion, V. Placet, Multi-scale analysis of flax fibres woven fabrics for composite applications, TexComp-13 - 13th International Conference on Textile Composites, Politecnico di Milano (Italy) 17/09/2018

A.-C. Corbin, D. Soulat, M. Ferreira, A.R. Labanieh, X. Gabrion, V. Placet, Amélioration de la tissabilité des renforts en fibres naturelles pour la réalisation de matériaux composites, EcoMat2018 - Dégradation des éco-matériaux au cours de leur cycle de vie , Université de Nantes Site de Gavy (France), 11/10/2018

A.-C. Corbin, D. Soulat, M. Ferreira, A.-R. Labanieh, Développement de rovings guipés chanvre/thermoplastique pour la réalisation de préformes pour matériaux composites, 24ème Congrès Français de Mécanique, Université de Bretagne Occidentale, Brest (France), 28/08/2019

Annexe B : Propriétés des fils

Propriétés textiles des fils

Fil	Type de fil	Nature des fibres	Titre (Nm)	Titre (Tex)	Torsion (tours/m)	Régularité (CVm%)	Pilosité (H ± sh)
AMBRA	Fil retordu	100% Lin	5,8 ± 0,5	173 ± 14	231,1 ± 17,8	27,89	7,42 ± 3,43
CANAPA	Fil retordu	100% Chanvre	6,5 ± 0,6	153 ± 14	221,9 ± 13,2	29,83	4,24 ± 2,58
LINO ST	Mèche	100% Lin	2,8 ± 0,3	370 ± 49	31,6 ± 2,5	18,81	21,93 ± 7,81
LINO T1	Mèche	100% Lin	3,3 ± 0,2	304 ± 17	35,8 ± 3,8	19,96	18,78 ± 8,52
CANAPA ST1	Mèche	100% Chanvre	3,0 ± 0,3	334 ± 26	32,0 ± 4,4	18,01	17,71 ± 7,93
CANAPA ST2	Mèche	100% Chanvre	3,2 ± 0,2	313 ± 19	37,2 ± 2,2	18,68	18,96 ± 3,31
CANAPA T1	Mèche	100% Chanvre	3,9 ± 0,2	259 ± 10	36,1 ± 2,8	23,30	14,01 ± 6,49
CANAPA T2	Mèche	100% Chanvre	3,6 ± 0,3	280 ± 20	38,5 ± 2,5	20,36	9,25 ± 4,27
CANAPA T3	Mèche	100% Chanvre	3,8 ± 0,3	267 ± 18	37,2 ± 2,0	20,18	10,26 ± 4,38
CAPA121	Fil guipé	48% Chanvre 52% PA12	1,9 ± 0,4	538 ± 102		13,25	10,49 ± 2,01
CAPA122	Fil guipé	65% Chanvre 35% PA1	2,0 ± 0,1	507 ± 13		14,56	9,94 ± 1,76

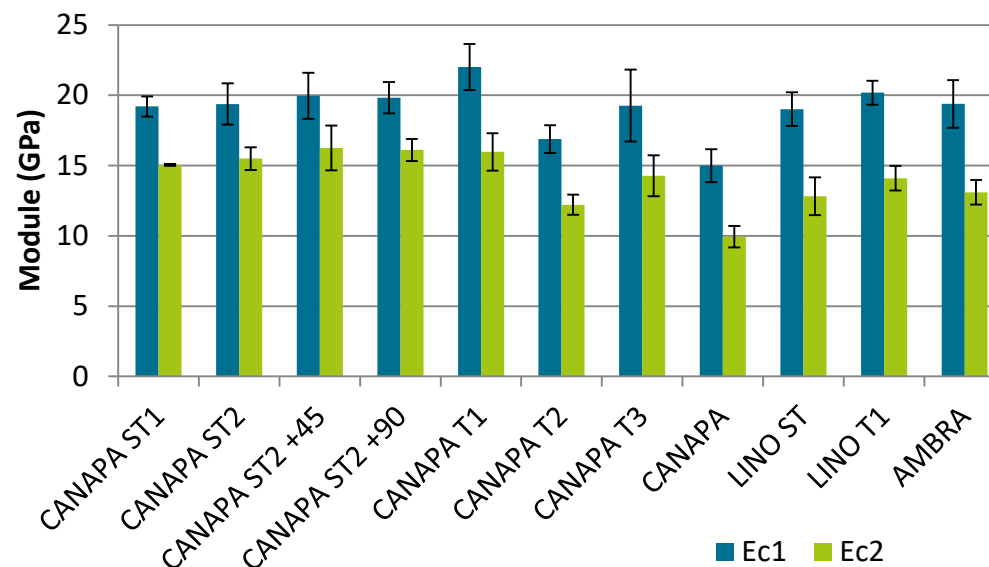
Propriétés mécaniques des fils

Fil	Effort maximal (N)	Déformation à l'effort maximal (%)	Pente 1 (N)	Pente 2 (N)	Ténacité à rupture (cN/Tex)
AMBRA	43,85 ± 5,92	4,64 ± 0,38	5,50 ± 0,56	11,95 ± 1,03	25,28 ± 3,41
CANAPA	57,21 ± 7,27	5,21 ± 0,42	6,80 ± 0,46	13,74 ± 0,87	37,42 ± 4,75
LINO ST	7,40 ± 1,34	2,00 ± 0,28	1,80 ± 0,42	5,32 ± 1,22	4,01 ± 0,40
LINO T1	16,26 ± 3,23	1,80 ± 0,22	5,32 ± 1,22	10,37 ± 2,72	5,18 ± 1,12
CANAPA ST1	25,65 ± 3,11	3,88 ± 0,24	1,13 ± 0,22	10,82 ± 0,89	7,68 ± 0,93
CANAPA ST2	31,53 ± 7,74	3,67 ± 0,42	2,39 ± 0,83	12,67 ± 1,86	10,09 ± 2,48
CANAPA T1	62,63 ± 9,58	4,93 ± 0,42	2,95 ± 0,83	16,53 ± 1,60	24,18 ± 3,70
CANAPA T2	70,99 ± 11,95	5,28 ± 0,46	4,81 ± 1,03	17,47 ± 1,41	25,40 ± 4,27
CANAPA T3	52,73 ± 8,32	3,53 ± 0,28	8,91 ± 1,41	17,90 ± 1,90	19,74 ± 3,12
CAPA121	67,84 ± 14,68	3,90 ± 0,60	10,57 ± 1,49	20,04 ± 2,10	15,29 ± 3,31
CAPA122	58,97 ± 3,75	3,33 ± 0,5	11,70 ± 0,44	20,36 ± 0,93	11,46 ± 0,93

Modules des éprouvettes composites d'IFBT

Module	CANAPA ST1	CANAPA ST2	CANAPA ST2 +45	CANAPA ST2 +90	CANAPA T1	CANAPA T2	CANAPA T3	CANAPA
E_{C1} (GPa)	19,2 ± 0,7	19,4 ± 1,5	20,0 ± 1,6	19,8 ± 1,1	22,0 ± 1,6	16,9 ± 1,0	19,3 ± 2,6	15,0 ± 1,2
E_{C2} (GPa)	15,1 ± 0,1	15,5 ± 0,8	16,3 ± 1,6	16,1 ± 0,8	16,0 ± 1,3	12,2 ± 0,7	14,3 ± 1,5	9,9 ± 0,8

Module	LINO ST	LINO T1	AMBRA
E_{C1} (GPa)	19,0 ± 1,2	20,2 ± 0,9	19,4 ± 1,7
E_{C2} (GPa)	12,8 ± 1,3	14,1 ± 0,9	13,1 ± 0,9



Modules des fibres (IFBT)

Fil utilisé	Equation (2-9)		Equation (2-9) + porosité		Equation (2-13) sans porosité	
	Module E_{f1} (GPa)	Module E_{f2} (GPa)	Module E_{f1} (GPa)	Module E_{f2} (GPa)	Module E_{f1} (GPa)	Module E_{f2} (GPa)
AMBRA	42,57 ± 5,13	27,24 ± 2,64	53,10 ± 9,90	34,47 ± 5,53	58,85 ± 7,25	37,99 ± 3,75
CANAPA	32,40 ± 2,62	19,91 ± 1,95	41,16 ± 3,73	25,95 ± 2,47	42,52 ± 3,37	26,49 ± 2,48
LINO ST	45,59 ± 3,65	29,04 ± 4,20	56,45 ± 5,96	36,65 ± 6,11	46,84 ± 3,79	30,11 ± 4,35
LINO T1	45,44 ± 3,65	30,32 ± 2,57	57,17 ± 5,75	38,68 ± 3,75	46,78 ± 3,12	31,47 ± 2,61
CANAPA ST1	40,11 ± 2,51	30,49 ± 0,54	45,34 ± 2,90	34,67 ± 1,00	40,94 ± 2,54	31,22 ± 0,54
CANAPA ST2	45,43 ± 3,10	35,30 ± 3,10	54,42 ± 3,25	42,62 ± 0,70	46,71 ± 3,09	36,44 ± 1,01
CANAPA ST2 +45	46,00 ± 3,67	36,69 ± 5,03	54,48 ± 3,16	43,71 ± 5,02	49,35 ± 3,77	39,49 ± 5,25
CANAPA ST2 +90	40,98 ± 1,99	32,53 ± 0,63	50,71 ± 3,33	40,59 ± 3,00	50,50 ± 2,33	40,23 ± 0,78
CANAPA T1	50,80 ± 6,71	35,55 ± 5,05	53,71 ± 5,17	37,71 ± 4,03	51,57 ± 6,66	36,15 ± 4,99
CANAPA T2	38,63 ± 0,89	26,52 ± 0,81	52,68 ± 7,84	36,97 ± 5,77	40,21 ± 1,09	27,93 ± 0,93
CANAPA T3	48,82 ± 5,79	34,77 ± 3,78	55,81 ± 6,45	40,08 ± 4,06	49,93 ± 5,85	35,70 ± 3,81

Fil utilisé	Equation (2-14) sans porosité		Equation (2-13)		Equation (2-14)	
	Module Ef1 (GPa)	Module Ef2 (GPa)	Module Ef1 (GPa)	Module Ef2 (GPa)	Module Ef1 (GPa)	Module Ef2 (GPa)
AMBRA	66,79 ± 8,22	43,12 ± 4,26	72,24 ± 13,47	46,90 ± 7,28	82,00 ± 15,29	53,23 ± 8,27
CANAPA	47,11 ± 3,73	29,35 ± 2,75	52,83 ± 4,79	33,30 ± 3,17	58,53 ± 5,30	36,89 ± 3,51
LINO ST	47,05 ± 3,81	30,25 ± 4,37	57,08 ± 6,03	37,06 ± 6,17	57,34 ± 6,05	37,23 ± 6,20
LINO T1	47,03 ± 3,14	31,63 ± 2,62	57,91 ± 5,83	39,18 ± 3,80	58,22 ± 5,86	39,39 ± 3,82
CANAPA ST1	41,14 ± 2,55	31,37 ± 0,54	45,86 ± 2,93	35,07 ± 1,01	46,07 ± 2,94	35,23 ± 1,02
CANAPA ST2	46,99 ± 3,11	36,65 ± 1,01	55,21 ± 3,30	43,24 ± 0,71	55,53 ± 3,32	43,49 ± 0,72
CANAPA ST2 +45	50,53 ± 3,86	40,43 ± 5,38	57,73 ± 3,35	46,32 ± 5,32	59,11 ± 3,43	47,42 ± 5,45
CANAPA ST2 +90	54,66 ± 2,52	43,55 ± 0,84	61,53 ± 4,04	49,25 ± 3,64	66,60 ± 4,38	53,31 ± 3,94
CANAPA T1	51,81 ± 6,69	36,31 ± 5,01	54,32 ± 5,23	38,14 ± 4,07	54,57 ± 5,25	38,32 ± 4,09
CANAPA T2	40,44 ± 1,10	28,09 ± 0,94	53,44 ± 7,95	37,50 ± 5,85	53,75 ± 8,00	37,72 ± 5,88
CANAPA T3	50,18 ± 5,88	35,88 ± 3,83	56,50 ± 6,53	40,57 ± 4,11	56,78 ± 6,57	37,72 ± 5,88

Propriétés textiles des fils après tissage

Fil	Tissu	Titre (Nm)	Torsion (tours/m)	Embuvage / Retrait (%)
AMBRA	PRST1 Chaîne	5,76 ± 0,86	244,77 ± 32,05	3,22 ± 0,40
	FLAX1 Chaîne	5,90 ± 0,51	241,82 ± 29,92	2,72 ± 0,36
	FLAX2 Chaîne	5,50 ± 0,96	233,14 ± 22,02	2,98 ± 0,25
LINO ST	FLAX1 Trame	2,94 ± 0,22	40,68 ± 5,33	1,90 ± 0,18
LINO T1	PRST1 Trame	3,23 ± 0,20	32,71 ± 3,87	3,13 ± 0,35
	FLAX2 Trame	3,30 ± 0,96	18,74 ± 3,34	2,56 ± 0,40
	HEMP1 Chaîne	4,12 ± 0,29	32,62 ± 3,13	2,80 ± 0,27
CANAPA T1	HEMP2 Chaîne	3,83 ± 0,33	36,20 ± 2,05	2,24 ± 0,20
	HEMP3 Chaîne	3,97 ± 0,25	39,74 ± 3,43	2,56 ± 0,34
	HEMP1 Trame	3,64 ± 0,33	23,78 ± 2,73	1,36 ± 0,17
	HEMP2 Trame	3,94 ± 0,26	18,54 ± 3,48	1,90 ± 0,30
	HEMP3 Trame	4,02 ± 0,60	22,32 ± 3,84	1,58 ± 0,22
	TELA Chaîne	3,37 ± 0,28	35,72 ± 3,34	3,91 ± 0,14
	SPINA Chaîne	3,43 ± 0,27	32,30 ± 3,16	3,28 ± 0,18
CANAPA T2	TELA Trame	3,73 ± 0,13	38,46 ± 2,56	0,50 ± 0,12
	SPINA Trame	3,37 ± 0,24	37,90 ± 1,34	1,06 ± 0,17
	QUASI-UD Trame	3,72 ± 0,39		0,286 ± 0,001
	HEMP4 Chaîne	3,41 ± 0,11	34,56 ± 2,56	3,20 ± 0,25
CANAPA T3	HEMP5 Chaîne	3,44 ± 0,23	40,92 ± 3,88	1,79 ± 0,26
	HEMP6 Chaîne	3,55 ± 0,20	40,82 ± 4,91	1,46 ± 0,16
	HEMP7 Chaîne	3,56 ± 0,40	41,72 ± 2,03	1,08 ± 0,13
	HEMP4 Trame	3,70 ± 0,18	48,28 ± 3,70	1,20 ± 0,34
	HEMP5 Trame	3,50 ± 0,18	41,22 ± 1,97	1,62 ± 0,25
	HEMP6 Trame	3,46 ± 0,18	37,44 ± 5,08	0,75 ± 0,13
	HEMP7 Trame	3,26 ± 0,23	39,90 ± 1,99	2,10 ± 0,33
	HPA121 Chaîne	1,77 ± 0,06		3,83 ± 0,21
CAPA121	HPA121 Trame	1,58 ± 0,10		2,84 ± 0,36
CAPA122	HPA122 Chaîne	1,92 ± 0,12		6,70 ± 0,60
	HPA122 Trame	1,93 ± 0,12		4,15 ± 0,44

Propriétés mécaniques des fils après tissage

Fil	Tissu	Effort maximal (N)	Déformation à l'effort maximal (%)	Pente 1 (N)	Pente 2 (N)	Ténacité à rupture (cN/Tex)
AMBRA	PRST1 Chaîne	43,70 ± 7,46	6,00 ± 0,56	2,69 ± 0,75	9,85 ± 1,17	24,64 ± 4,20
	FLAX1 Chaîne	40,25 ± 9,06	5,52 ± 0,70	1,90 ± 0,44	9,31 ± 0,82	23,57 ± 5,31
	FLAX2 Chaîne	47,16 ± 9,79	5,93 ± 0,67	2,17 ± 0,43	9,52 ± 1,11	25,12 ± 5,22
LINO ST	FLAX1 Trame	2,12 ± 0,87	2,02 ± 0,22	0,56 ± 0,19	1,36 ± 0,64	0,62 ± 0,26
LINO T1	PRST1 Trame	19,80 ± 2,54	4,29 ± 0,08	0,56 ± 0,19	11,50 ± 1,37	6,36 ± 0,82
	FLAX2 Trame	10,56 ± 2,00	1,63 ± 0,20	4,02 ± 0,56	8,28 ± 1,14	3,45 ± 0,65
	HEMP1 Chaîne	61,98 ± 10,21	5,12 ± 0,47	4,15 ± 1,17	15,57 ± 1,49	25,42 ± 4,19
CANAPA T1	HEMP2 Chaîne	65,95 ± 13,59	5,24 ± 0,52	5,43 ± 0,73	14,70 ± 1,74	27,05 ± 5,57
	HEMP3 Chaîne	63,91 ± 11,42	4,73 ± 0,40	8,45 ± 0,72	15,81 ± 1,59	25,30 ± 4,52
	HEMP1 Trame	50,47 ± 8,25	4,46 ± 0,36	5,70 ± 1,22	14,57 ± 1,43	20,70 ± 3,39
	HEMP2 Trame	40,24 ± 4,72	4,22 ± 0,49	5,64 ± 1,30	12,32 ± 0,81	16,50 ± 1,93
	HEMP3 Trame	45,84 ± 7,49	3,87 ± 0,47	7,71 ± 0,50	14,57 ± 1,29	18,04 ± 2,95
	TELA Chaîne	66,29 ± 8,42	5,10 ± 0,29	4,86 ± 0,51	16,91 ± 1,13	22,20 ± 2,82
	SPINA Chaîne	72,41 ± 13,30	5,42 ± 0,48	3,80 ± 1,27	17,38 ± 1,68	24,68 ± 4,53
CANAPA T2	TELA Trame	37,37 ± 13,12	3,28 ± 0,47	7,97 ± 1,34	13,04 ± 4,25	13,92 ± 4,89
	SPINA Trame	54,26 ± 11,02	3,78 ± 0,39	8,56 ± 0,73	17,61 ± 2,14	18,21 ± 3,70
	QUASI-UD Trame	61,29 ± 16,06	4,33 ± 0,53	6,65 ± 0,53	17,21 ± 2,32	21,32 ± 5,90
	HEMP4 Chaîne	70,19 ± 8,88	4,53 ± 0,19	8,19 ± 1,23	19,58 ± 2,22	23,94 ± 3,03
CANAPA T3	HEMP5 Chaîne	63,24 ± 8,94	4,30 ± 0,43	8,95 ± 1,50	18,18 ± 1,52	21,63 ± 3,06
	HEMP6 Chaîne	56,06 ± 11,61	4,07 ± 0,43	8,09 ± 0,82	16,91 ± 1,79	19,86 ± 4,11
	HEMP7 Chaîne	59,70 ± 5,80	4,53 ± 0,26	5,81 ± 0,47	17,36 ± 1,09	20,98 ± 2,04
	HEMP4 Trame	63,01 ± 5,43	3,98 ± 0,24	10,08 ± 0,81	18,78 ± 1,25	23,29 ± 2,01
	HEMP5 Trame	50,82 ± 9,23	3,77 ± 0,41	9,01 ± 0,78	16,19 ± 1,90	17,75 ± 3,22
	HEMP6 Trame	52,10 ± 16,40	4,08 ± 0,70	7,57 ± 1,09	14,58 ± 2,44	17,97 ± 5,65
	HEMP7 Trame	48,18 ± 7,31	3,23 ± 0,31	10,79 ± 1,04	17,88 ± 1,78	15,64 ± 2,37
CAPA121	HPA121 Chaîne	119,55 ± 15,28	7,04 ± 0,56	2,04 ± 1,14	21,11 ± 1,14	21,09 ± 2,7
	HPA121 Trame	97,25 ± 15,89	5,85 ± 0,55	3,71 ± 1,45	22,84 ± 2,01	15,30 ± 2,50
CAPA122	HPA122 Chaîne	32,16 ± 4,42	3,43 ± 0,35	4,30 ± 0,65	13,27 ± 0,78	5,24 ± 0,62
	HPA122 Trame	90,94 ± 8,87	4,44 ± 0,41	7,66 ± 1,17	25,76 ± 1,58	17,51 ± 1,71

Modules des fibres après tissage

Fil	Tissu	Module E_{f1} (GPa)	Module E_{f2} (GPa)
CANAPA T1	HEMP1 Chaîne	45 ± 3	28 ± 1
	HEMP2 Chaîne	54 ± 4	35 ± 1
	HEMP3 Chaîne	45 ± 3	29 ± 2
	HEMP1 Trame	55 ± 3	37 ± 4
	HEMP2 Trame	66 ± 7	30 ± 2
	HEMP3 Trame	55 ± 3	32 ± 1
CANAPA T2	QUASI-UD Trame	54 ± 2	40 ± 2

Annexe C : Propriétés des renforts

Propriétés textiles des renforts

Tissu	Armure	Densité chaîne (fils/cm)	Densité trame (fils/cm)	Fraction massique de fibres en chaîne (%)	Fraction massique de fibres en trame (%)	Masse surfaccique (g/m ²)	Epaisseur (mm)	Perméabilité à l'air (L/m ² /s)
FLAX1	Toile	6	6	33,4	66,6	307,7 ± 9,2	1,00 ± 0,07	1365 ± 254
FLAX2	Toile	6	5,8	38,4	61,6	288,4 ± 19,8	0,91 ± 0,03	1935 ± 219
HEMP1	Toile	6	5	51,8	48,2	278,3 ± 8,2	0,98 ± 0,07	756 ± 78
HEMP2	Satin de 6	6	9,5	39,5	60,5	426,1 ± 7,9	1,55 ± 0,05	401 ± 46
HEMP3	Satin de 6	6	9,5	39,2	60,8	401,6 ± 3,5	1,59 ± 0,06	670 ± 115
HPA121	Satin de 6	6	7,3	20,7	27,3	888,9 ± 37,5	2,43 ± 0,17	706 ± 125
HPA122	Satin de 4	6	6,6	31,5	33,5	721,1 ± 42,4	2,06 ± 0,07	2340 ± 92
QUASI-UD	Toile	0,6	20	2,0	98,0	649,4 ± 2,6	2,97 ± 0,14	424 ± 49
PRST1	Toile	6,5	5,5	39,9	60,1	290,3 ± 4,6	0,86 ± 0,04	2071 ± 107
TELA	Toile	6,5	4,7	61,3	38,7	356,7 ± 9,5	0,90 ± 0,02	546 ± 70
SPINA	Sergé de 4	6,5	8,5	43,5	56,5	472,5 ± 16,3	1,02 ± 0,03	211 ± 19
HEMP4	Satin de 6	6,5	6	54,5	45,5	368,5 ± 7,7	1,21 ± 0,03	950 ± 62
HEMP5	Satin de 6	6,5	8,7	43,2	56,8	450,6 ± 6,4	1,20 ± 0,03	359 ± 44
HEMP6	Sergé de 6	6,5	6	51,5	48,5	362,2 ± 4,8	1,09 ± 0,02	992 ± 118
HEMP7	Sergé de 6	6,5	9,5	38,3	61,7	473,4 ± 7,4	1,14 ± 0,03	271 ± 30

Propriétés mécaniques des renforts (traction et flexion)

Tissu	Effort maximal par fil (cN/fil/Tex)		Effort maximal global (N)		Pente par fil (cN/fil/Tex)		Pente globale (N)	
	Sens chaîne	Sens trame	Sens chaîne	Sens trame	Sens chaîne	Sens trame	Sens chaîne	Sens trame
FLAX1	15,28 ± 1,45	7,41 ± 0,71	862 ± 101	711 ± 106	4,52 ± 0,16	3,26 ± 0,19	254,9 ± 14,8	312,0 ± 33,3
FLAX2	13,29 ± 0,65	7,77 ± 0,42	833 ± 41	642 ± 25	4,03 ± 0,41	3,56 ± 0,40	252,2 ± 23,2	294,1 ± 32,6
HEMP1	24,49 ± 1,57	18,64 ± 2,53	1973 ± 188	1310 ± 152	7,53 ± 0,80	7,60 ± 0,94	607,2 ± 83,1	534,7 ± 65,0
HEMP2	19,60 ± 1,76	22,38 ± 2,59	1822 ± 238	2863 ± 303	6,39 ± 0,49	6,99 ± 0,56	591,0 ± 37,5	894,1 ± 59,5
HEMP3	13,08 ± 1,92	19,74 ± 1,70	1065 ± 166	2550 ± 240	4,09 ± 0,47	5,95 ± 0,29	333,2 ± 46,2	768,8 ± 44,2
HPA121	13,97 ± 0,86	12,48 ± 0,9	2553 ± 222	2711 ± 249	4,04 ± 0,29	3,18 ± 0,13	737,8 ± 54,0	630,4 ± 27,9
HPA122	15,53 ± 0,92	17,77 ± 3,04	2525 ± 150	3046 ± 521	4,89 ± 0,45	5,41 ± 1,23	794,3 ± 74,0	938,4 ± 210,4
QUASI-UD	14,79 ± 2,24	9,25 ± 0,96	105 ± 16	2493 ± 259	7,64 ± 0,86	2,70 ± 0,15	54,2 ± 6,1	727,0 ± 39,8
PRST1	16,71 ± 1,45	8,79 ± 0,41	1017 ± 84	721 ± 29	4,97 ± 0,35	4,35 ± 0,34	302,3 ± 19,4	357,1 ± 13,5
TELA	26,95 ± 1,11	19,94 ± 1,46	2879 ± 57	1348 ± 90	6,98 ± 0,36	9,14 ± 0,35	745,8 ± 38,6	549,3 ± 17,6
SPINA	23,45 ± 2,01	18,80 ± 1,23	2478 ± 233	2805 ± 165	6,73 ± 0,25	5,34 ± 0,70	710,6 ± 23,8	792,9 ± 64,6
HEMP4	19,41 ± 1,15	13,64 ± 0,97	1878 ± 120	1159 ± 81	7,82 ± 0,57	6,07 ± 0,38	756,2 ± 51,4	515,3 ± 33,4
HEMP5	18,24 ± 1,27	15,09 ± 0,56	1800 ± 96	2007 ± 126	6,87 ± 0,37	5,27 ± 0,19	678,4 ± 22,3	700,0 ± 35,5
HEMP6	17,53 ± 0,47	15,41 ± 1,71	1682 ± 48	1428 ± 140	7,22 ± 0,36	6,59 ± 0,66	692,6 ± 36,5	610,5 ± 51,9
HEMP7	17,43 ± 0,48	15,53 ± 1,25	1737 ± 29	2402 ± 182	6,03 ± 0,37	5,38 ± 0,31	593,3 ± 34,8	831,2 ± 43,6

Tissu	Perte d'ondulation (%)		Déformation à l'effort maximal (%)		Module de rigidité en flexion (MPa)	
	Sens chaîne	Sens trame	Sens chaîne	Sens trame	Sens chaîne	Sens trame
FLAX1	1,83 ± 0,21	1,92 ± 0,23	5,21 ± 0,12	4,39 ± 0,33	3,75 ± 0,42	4,36 ± 0,22
FLAX2	2,28 ± 0,10	3,14 ± 0,08	5,68 ± 0,13	5,50 ± 0,27	7,84 ± 0,70	12,13 ± 1,12
HEMP1	2,68 ± 0,07	0,74 ± 0,26	6,27 ± 0,13	3,27 ± 0,32	11,73 ± 1,24	12,89 ± 1,12
HEMP2	1,66 ± 0,06	1,12 ± 0,07	4,84 ± 0,47	4,46 ± 0,16	3,10 ± 0,36	14,20 ± 1,07
HEMP3	2,24 ± 0,15	1,76 ± 0,24	5,38 ± 0,38	5,32 ± 0,46	1,44 ± 0,29	19,14 ± 1,85
HPA121	1,68 ± 0,10	3,04 ± 0,03	5,15 ± 0,35	7,20 ± 0,18	5,27 ± 0,55	5,03 ± 0,16
HPA122	3,73 ± 0,13	1,75 ± 0,49	7,03 ± 0,25	5,21 ± 0,74	2,60 ± 0,52	3,46 ± 0,52
QUASI-UD	0,33 ± 0,06	0,59 ± 0,11	2,24 ± 0,21	4,36 ± 0,53	0,01 ± 0,00	3,09 ± 0,25
PRST1	3,32 ± 0,31	2,06 ± 0,04	6,69 ± 0,37	4,16 ± 0,06	3,32 ± 0,29	7,63 ± 1,03
TELA	3,28 ± 0,14	0,51 ± 0,02	7,23 ± 0,16	3,21 ± 0,19	15,67 ± 1,38	22,43 ± 2,48
SPINA	3,19 ± 0,05	2,21 ± 0,08	6,80 ± 0,30	5,00 ± 0,26	6,73 ± 0,58	21,30 ± 2,44
HEMP4	1,09 ± 0,10	0,95 ± 0,05	3,65 ± 0,05	3,32 ± 0,16	9,12 ± 0,71	7,15 ± 0,47
HEMP5	1,43 ± 0,12	0,89 ± 0,13	4,19 ± 0,10	3,95 ± 0,06	6,10 ± 1,29	15,41 ± 1,62
HEMP6	1,11 ± 0,15	0,76 ± 0,08	3,68 ± 0,11	3,23 ± 0,10	6,48 ± 1,00	16,55 ± 1,57
HEMP7	1,81 ± 0,05	1,16 ± 0,12	4,76 ± 0,18	4,22 ± 0,18	5,29 ± 0,78	17,89 ± 1,47

Propriétés des renforts en cisaillement (Uniaxial Bias-Extension Test)

Tissu	Pente de la courbe « Effort – Déplacement » (N)	Angle de blocage (°)
FLAX1	29,32 ± 0,60	59,75 ± 0,74
FLAX2	42,92 ± 3,81	59,02 ± 3,64
HEMP1	52,14 ± 10,27	52,72 ± 0,53
HEMP2	19,89 ± 1,78	50,94 ± 2,54
HEMP3	24,77 ± 4,34	51,84 ± 1,13
HPA121	21,27 ± 1,54	39,19 ± 0,38
HPA122	16,53 ± 3,86	45,56 ± 2,96
PRST1	34,60 ± 0,42	60,63 ± 1,10
TELA	42,33 ± 3,48	51,54 ± 1,39
SPINA	60,07 ± 8,00	49,81 ± 1,28
HEMP4	2,54 ± 0,50	46,06 ± 0,32
HEMP5	10,83 ± 1,01	48,72 ± 1,70
HEMP6	5,44 ± 0,52	51,61 ± 1,76
HEMP7	15,03 ± 0,50	49,08 ± 2,73

Propriétés des renforts lors de leur mise en forme (emboutissage)

Tissu	Force maximale (N)				
	Hémisphérique	Cubique 0°	Cubique arrondi 0°	Cubique 45°	Cubique arrondi 45°
FLAX1	331,03	1125,67			
FLAX2	312,52	1107,37			
HEMP1	343,26	1234,37			
HEMP2	396,13	1292,57			
HEMP3	398,22	1278,86			
HPA121	510,20	1360,11			
HPA122	488,10	1313,57			
QUASI-UD	203,22	362,71			
TELA	348,37	1233,68			
SPINA	407,22	1356,06			
HEMP4	364,92	1113,94	998,28	971,79	915,44
HEMP5	389,76	1268,69	1116,28	995,12	1007,65
HEMP6	348,73	1129,69	1001,32	936,22	893,41
HEMP7	404,45	1257,36	1117,92	1042,37	978,95

Tissu	Avalement maximal sens chaîne (mm)				
	Hémisphérique	Cubique 0°	Cubique arrondi 0°	Cubique 45°	Cubique arrondi 45°
FLAX1	35,93	74,84			
FLAX2	37,92	70,99			
HEMP1	32,66	72,68			
HEMP2	25,42	69,29			
HEMP3	29,28	66,33			
HPA121	27,02	70,58			
HPA122	23,66	64,22			
QUASI-UD	0,00	0,00			
TELA	35,04	72,25			
SPINA	29,67	71,40			
HEMP4	28,76	69,31	69,27	45,37	36,71
HEMP5	26,21	65,91	74,00	45,37	41,66
HEMP6	28,15	71,82	71,42	36,81	41,24
HEMP7	24,44	60,42	70,99	47,01	39,59

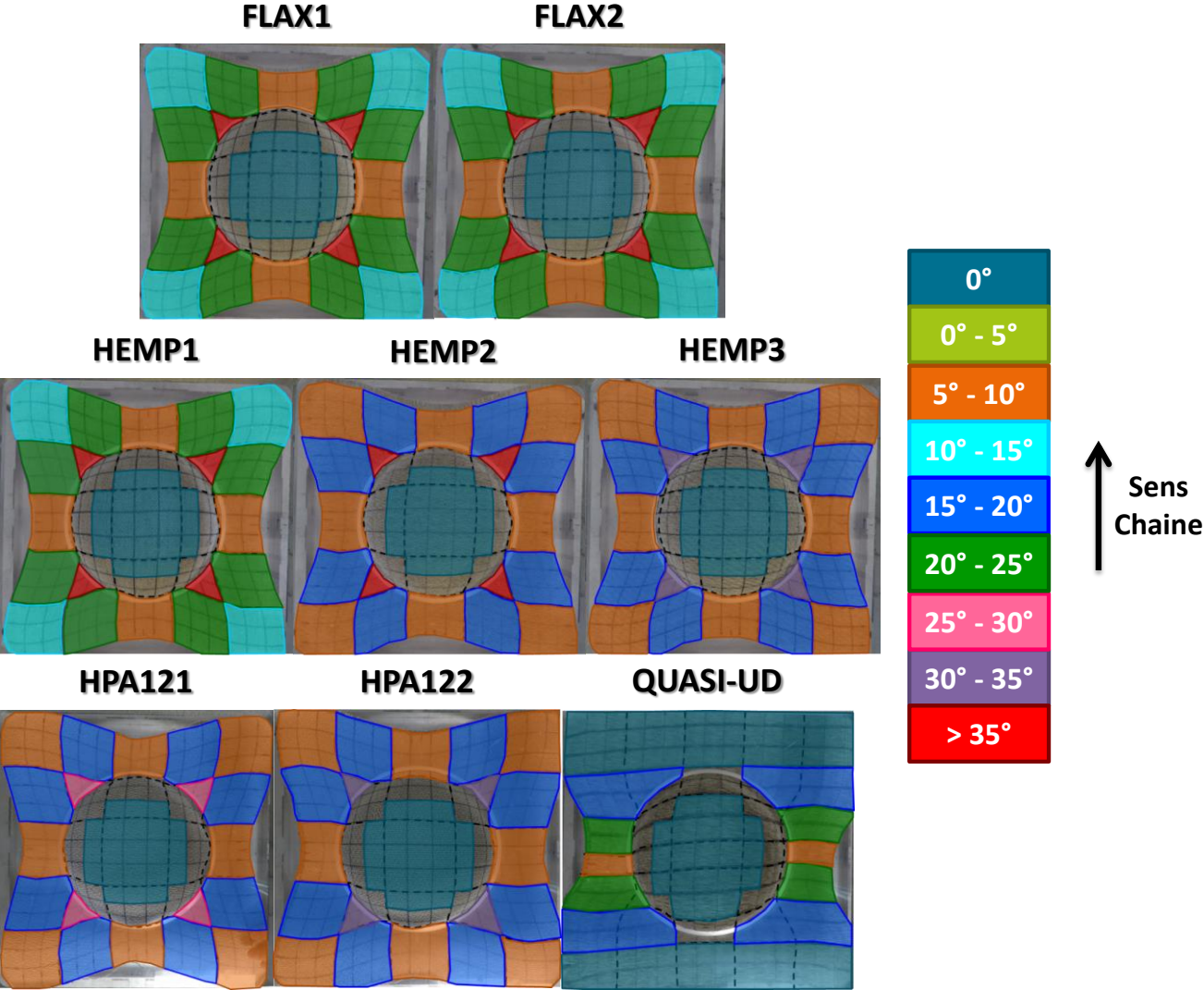
Tissu	Avalement maximal sens trame (mm)				
	Hémisphérique	Cubique 0°	Cubique arrondi 0°	Cubique 45°	Cubique arrondi 45°
FLAX1	39,29	77,31			
FLAX2	40,33	77,31			
HEMP1	38,42	76,48			
HEMP2	33,60	75,62			
HEMP3	37,91	71,01			
HPA121	29,96	56,19			
HPA122	29,96	70,97			
QUASI-UD	25,77	75,62			
TELA	33,60	77,32			
SPINA	37,33	77,73			
HEMP4	31,64	76,50	73,99	38,35	41,65
HEMP5	31,27	75,20	70,99	43,33	45,36
HEMP6	28,59	78,58	78,58	47,06	41,24
HEMP7	29,05	69,29	69,29	50,34	43,31

Tissu	Angle de cisaillement maximal (°)				
	Hémisphérique	Cubique 0°	Cubique arrondi 0°	Cubique 45°	Cubique arrondi 45°
FLAX1	35,75 ± 2,22	28,38 ± 1,69			
FLAX2	35,25 ± 2,87	30,38 ± 2,67			
HEMP1	37,00 ± 0,82	29,63 ± 2,97			
HEMP2	36,25 ± 0,96	28,88 ± 3,09			
HEMP3	33,75 ± 1,26	29,75 ± 2,66			
HPA121	27,75 ± 1,71	14,75 ± 3,15			
HPA122	33,50 ± 1,29	24,50 ± 2,45			
QUASI-UD	25,00 ± 1,15	37,00 ± 1,83			
TELA	36,50 ± 2,38	31,00 ± 2,56			
SPINA	32,50 ± 0,58	28,63 ± 3,20			
HEMP4	37,50 ± 2,89	37,38 ± 3,89	30,00 ± 2,56	50,75 ± 1,71	49,25 ± 0,96
HEMP5	32,75 ± 1,89	29,38 ± 2,00	27,13 ± 1,81	47,50 ± 2,08	50,50 ± 2,52
HEMP6	34,25 ± 1,26	35,25 ± 2,82	30,63 ± 1,41	53,00 ± 2,16	52,75 ± 2,99
HEMP7	32,50 ± 1,73	29,63 ± 2,39	28,00 ± 1,77	51,00 ± 2,16	49,25 ± 2,50

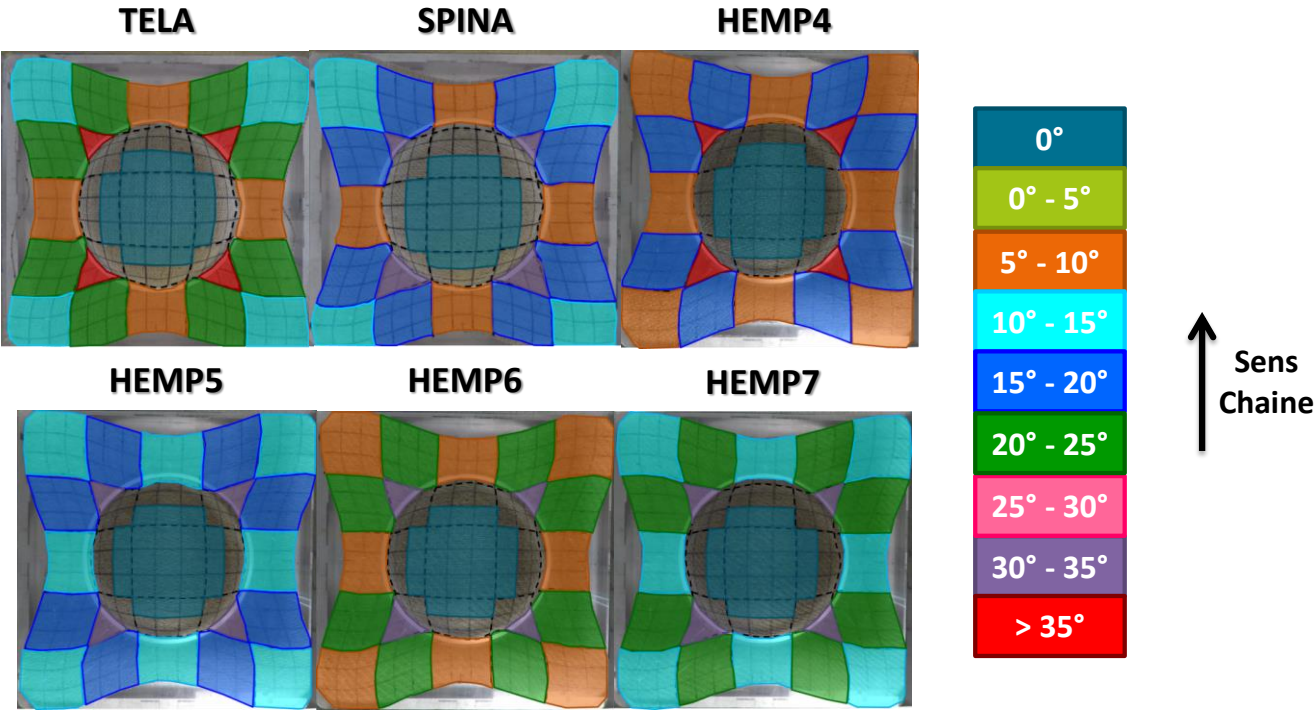
Tissu	Angle de cisaillement minimal (°)				
	Hémisphérique	Cubique 0°	Cubique arrondi 0°	Cubique 45°	Cubique arrondi 45°
FLAX1	5,75 ± 1,26	4,00 ± 0,82			
FLAX2	7,25 ± 0,96	7,50 ± 1,29			
HEMP1	7,75 ± 1,71	7,50 ± 1,29			
HEMP2	5,50 ± 2,08	3,75 ± 0,96			
HEMP3	8,00 ± 1,41	5,75 ± 2,22			
HPA121	11,00 ± 0,82	0,00 ± 0,00			
HPA122	7,00 ± 1,41	1,50 ± 0,58			
QUASI-UD	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00			
TELA	9,50 ± 0,58	7,25 ± 1,71			
SPINA	6,75 ± 1,89	4,00 ± 1,83			
HEMP4	7,50 ± 0,58	12,50 ± 2,08	8,50 ± 1,73	10,50 ± 1,91	14,00 ± 1,41
HEMP5	9,00 ± 1,83	3,00 ± 0,82	7,50 ± 0,58	15,25 ± 1,26	13,75 ± 0,96
HEMP6	9,50 ± 1,00	10,75 ± 2,06	8,25 ± 1,26	13,00 ± 2,16	14,25 ± 1,26
HEMP7	7,25 ± 0,96	2,50 ± 1,00	4,25 ± 0,50	15,25 ± 2,50	13,75 ± 1,71

Annexe D : Angles de cisaillement des renforts lors des essais d'emboutissage

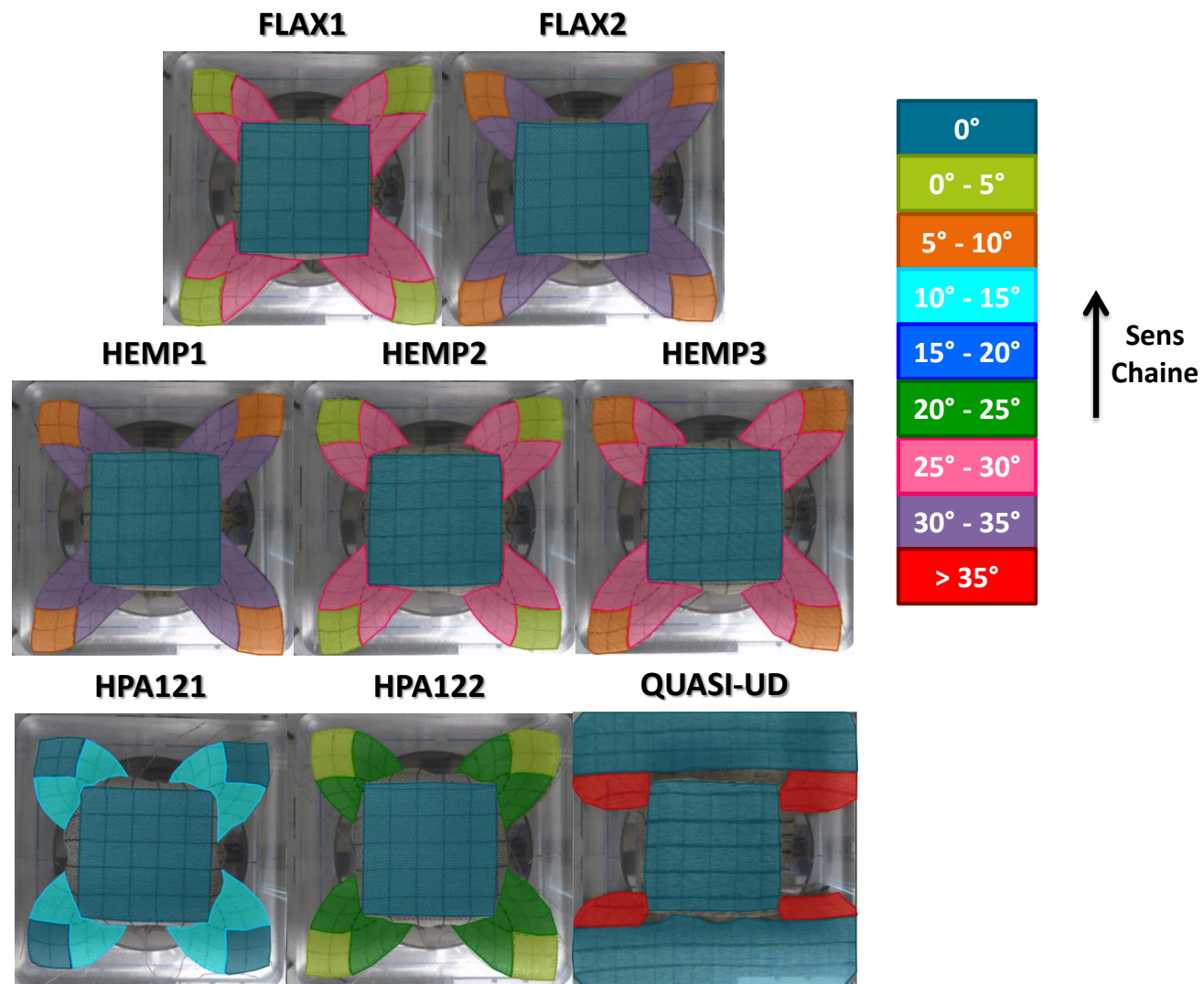
Renforts laboratoires avec le poinçon hémisphérique emboutis à 0°



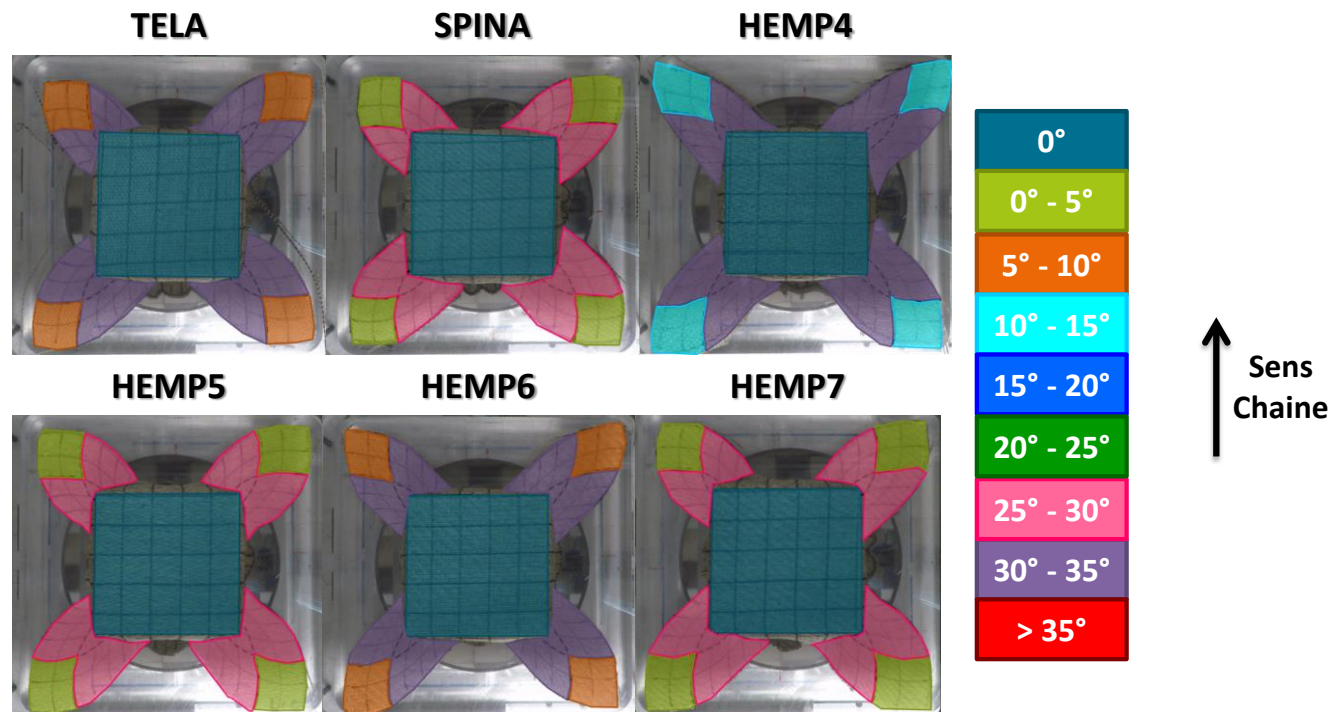
Renforts industriels avec le poinçon hémisphérique emboutis à 0°



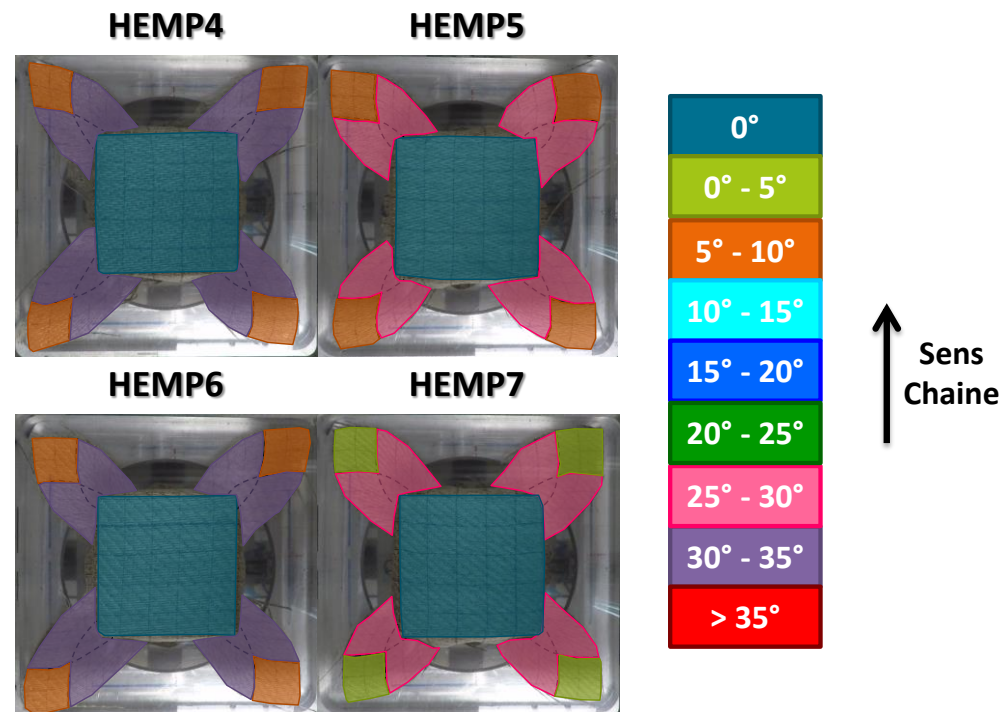
Renforts laboratoires avec le poinçon cubique emboutis à 0°



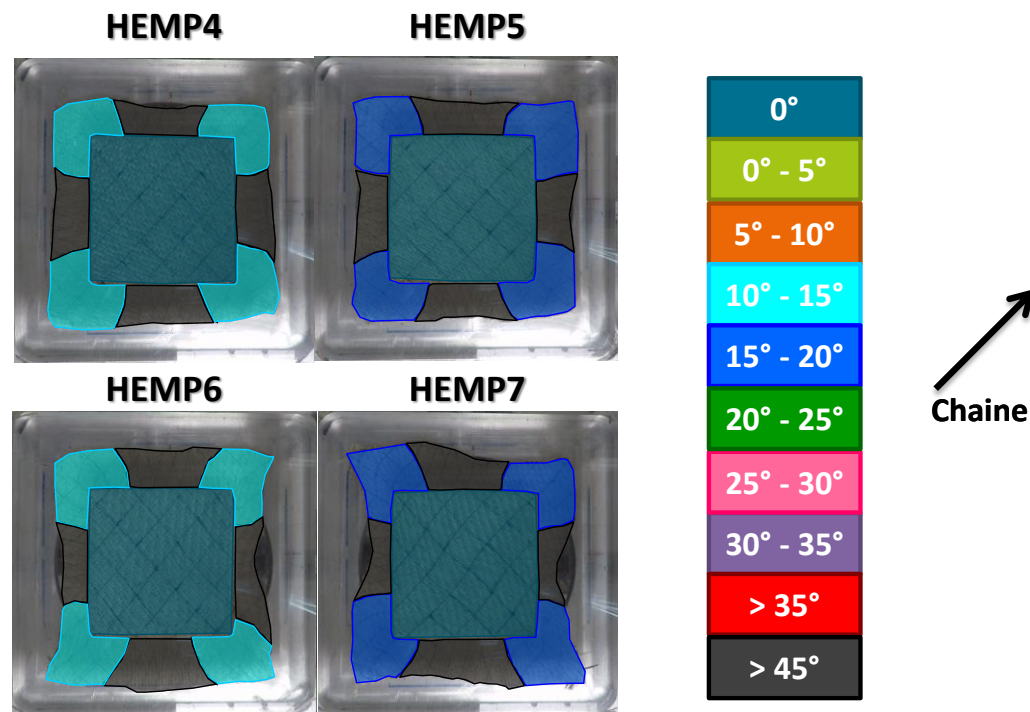
Renforts industriels avec le poinçon cubique emboutis à 0°



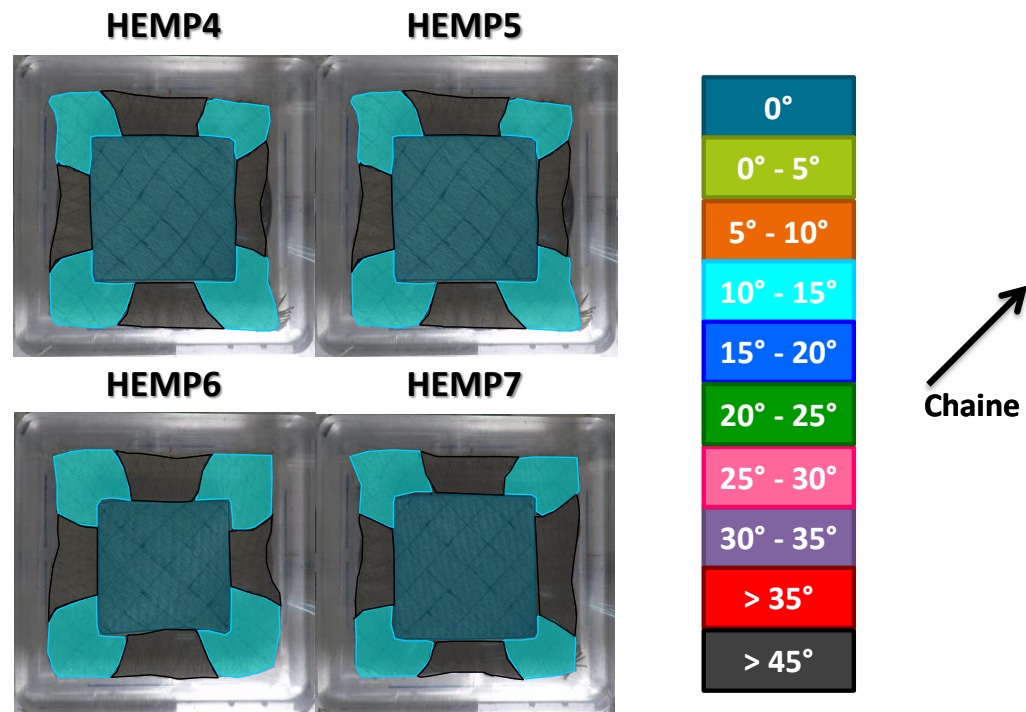
Renforts industriels avec le poinçon cubique arrondi emboutis à 0°



Renforts industriels avec le poinçon cubique emboutis à 45°



Renforts industriels avec le poinçon cubique arrondi emboutis à 45°



Annexe E : Propriétés mécaniques des matériaux biocomposites

Propriétés mécaniques des matériaux biocomposites SSUCHY ($V_f = 45$)

Matériau		Contrainte à rupture (MPa)	Module (GPa)	Déformation à rupture (%)
CF1	Chaine	92 ± 1	$9,0 \pm 0,3$	$1,7 \pm 0,1$
	Trame	126 ± 6	$12,0 \pm 0,6$	$3,1 \pm 0,1$
CF2	Chaine	90 ± 5	$9,3 \pm 0,1$	$1,8 \pm 0,1$
	Trame	118 ± 6	$12,7 \pm 0,3$	$2,4 \pm 0,2$
CH1	Chaine	126 ± 6	$14,3 \pm 0,9$	$2,3 \pm 0,3$
	Trame	176 ± 7	$15,9 \pm 0,8$	$2,2 \pm 0,1$
CH2	Chaine	97 ± 2	$11,2 \pm 0,6$	$2,0 \pm 0,2$
	Trame	176 ± 7	$15,9 \pm 0,8$	$2,2 \pm 0,1$
CH3	Chaine	98 ± 11	$11,2 \pm 1,2$	$2,3 \pm 0,4$
	Trame	192 ± 7	$16,4 \pm 0,6$	$2,0 \pm 0,1$
CQUD	Fibres	10 ± 1	$4,9 \pm 0,5$	$0,4 \pm 0,1$
	Transverse	216 ± 32	$14,9 \pm 0,8$	$1,4 \pm 0,2$
CQUDCP	Chaine	109 ± 12	$12,1 \pm 1,4$	$1,7 \pm 0,3$

Propriétés mécaniques des matériaux biocomposites de la littérature ($V_f = 45$)

Matériau	Type de renfort	Contrainte à rupture (MPa)	Module (GPa)	Déformation à rupture (%)
FlaxTape (1)	UD	141 ± 8	16,0 ± 0,9	1,1 ± 0,2
UD 382 (2)	UD	207 ± 21	21,5 ± 1,7	1,6 ± 0,1
UD 220 (2)	UD	225 ± 15	21,5 ± 2,2	1,7 ± 0,1
FlaxPly (3)	Quasi-UD	212 ± 12	11,0 ± 0,9	2,2 ± 0,1
QUD 180 (2)	Quasi-UD	270 ± 10	25,7 ± 0,3	1,9 ± 0,1
QUD 115 (2)	Quasi-UD	230 ± 16	22,7 ± 1,4	1,5 ± 0,1
FlaxPreg (4)	Quasi-UD	327 ± 10	32,9 ± 3,2	1,5 ± 0,2
Lin Satin 7-1 (3)	Tissu	131 ± 4	9,7 ± 0,8	1,7 ± 0,1
Jute Sergé 2-2 (3)	Tissu	78 ± 5	7,3 ± 0,8	1,2 ± 0,1
Jute Toile (3)	Tissu	75 ± 5	6,8 ± 0,6	1,3 ± 0,1
Lin Toile (1)	Tissu	151 ± 20	13,8 ± 0,4	1,7 ± 0,3
Lin Sergé 2-2 A (1)	Tissu	134 ± 2	14,1 ± 0,4	1,7 ± 0,1
Lin Sergé 2-2 B (1)	Tissu	141 ± 10	14,2 ± 1,2	1,5 ± 0,1

- (1) F. Bensadoun, In-service behaviour of flax fibre reinforced composites for high performance applications, Thèse, KU Leuven, 2016.
- (2) C. Poilâne, Z.E. Cherif, F. Richard, A. Vivet, B. Ben Doudou, J. Chen, Polymer reinforced by flax fibres as a viscoelastoplastic material, Compos. Struct. 112 (2014) 100–112. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.01.043>.
- (3) J.P. Torres, L.-J. Vandi, M. Veidt, M.T. Heitzmann, The mechanical properties of natural fibre composite laminates: A statistical study, Compos. Part Appl. Sci. Manuf. 98 (2017) 99–104. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.03.010>.
- (4) M. Berges, R. Léger, V. Placet, V. Person, S. Corn, X. Gabrion, J. Rousseau, E. Ramasso, P. Lenny, S. Fontaine, Influence of moisture uptake on the static, cyclic and dynamic behaviour of unidirectional flax fibre-reinforced epoxy laminates, Compos. Part Appl. Sci. Manuf. 88 (2016) 165–177. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.05.029>.

Résumé

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet européen SSUCHY (H2020-BBI) qui vise à développer des matériaux composites 100% biosourcés, en termes de renforts et de matrices. L'objectif de cette thèse est le développement et la caractérisation multi-échelle de renforts textiles en fibres de lin et de chanvre capables de répondre aux besoins des applications industrielles visées. Les travaux se focalisent d'une part sur le développement de fils et mèches aux propriétés suffisantes pour la production de renforts par tissage. Ces fils et mèches sont caractérisés sur leurs propriétés textiles et mécaniques. A l'échelle des fibres les caractéristiques sont identifiées par la méthode de l'« Impregnated Fibre Bundle Test » (IFBT). Des renforts sont élaborés par tissage à partir de différents types de fils et l'influence des paramètres de fabrication est analysée sur les propriétés textiles, de flexion à l'état sec, de traction uniaxiale, de cisaillement plan et de mise en forme lors d'essais d'emboutissage. Ces caractérisations permettent d'établir des fiches techniques et de choisir le renfort dont les paramètres de production permettront de répondre au mieux aux spécifications de la pièce composite finale. Enfin, des plaques composites sont produites avec certains des renforts développés, puis caractérisés aux moyens d'essais de traction. Les propriétés sont comparées à celles de biocomposites renforcés de fibres naturelles issues de la littérature ou déjà commercialisés.

Mots clés : Fibres de lin, Fibres de chanvre, Renforts tissés, Renforts quasi-unidirectionnels, Analyse multi-échelle, Caractérisation mécanique, IFBT, UBE test, Mise en forme, Biocomposites

Abstract

This PhD thesis is a part of the European SSUCHY project (H2020-BBI) which aims to develop 100% bio-based composite materials, in terms of reinforcements and matrices. The objective of this thesis is the development and the multi-scale characterization of textile reinforcement made of flax fibers and hemp fibers. These reinforcements have to meet the requirements of the industrial applications of SSUCHY project. First of all, the work focuses on the development of yarns and rovings with sufficient properties for the manufacturing of the reinforcements by weaving technology. For these yarns and rovings, textile and mechanical properties are studied. At the scale of the fibers, properties are obtained by the "Impregnated Fiber Bundle Test" (IFBT) method. Reinforcements are produced by weaving technology with different types of yarns. The influence of production parameters is analyzed on textiles properties, on bending properties in dry state, on uniaxial tensile properties, on plan shear properties and on shape forming capability. These characterization steps allow to build technical data sheets and to choose the reinforcement whose production parameters enables to meet the requirements of the final composite part in the best possible way. Finally, composite plates are manufactured with some of the reinforcements developed, and characterized with tensile tests. Properties of these biocomposites materials are compared with those of biocomposites reinforce by natural fibers from literature or already available on the market.

Keywords: Flax fibers; Hemp fibers; Woven reinforcements; Quasi-unidirectional reinforcements; Multi-scale analysis; Mechanical characterization; IFBT; UBE Tests; Shape forming; Biocomposites