

UNIVERSITÉ D'ORLÉANS

ED EMSTU (Energie, Matériaux, Sciences de la Terre et de l'Univers)

Laboratoire de Mécanique Gabriel Lamé

THÈSE présentée par :

Tiffany LARQUEMIN

soutenue le : 23 Avril 2025

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université d'Orléans**

Discipline/ Spécialité : GENIE MECANIQUE

Simulation à l'échelle mésoscopique d'un renfort tissé en fibres de Lin

THÈSE dirigée par :
M. HIVET Gilles

Professeur, Université d'Orléans

RAPPORTEURS :
M. BREARD Joël
M. BOURMAUD Alain

Professeur, Université de Caen
Ingénieur de recherche, Université de Bretagne Sud

JURY :
M. SOULAT Damien
Mme. BELAYACHI BELAICH Naima
Mme. HIVET Audrey

Professeur, ENSAIT, Président du jury
Professeure, Université d'Orléans
MCF, Université d'Orléans (Co-encadrante)

INVITE :
M. DURIATTI Davy

Docteur ingénieur, Groupe DEPESTELE

I. Remerciements

A l'heure d'effectuer le bilan de ces trois longues et enrichissantes dernières années, je tiens à remercier ceux qui ont permis à cette thèse de voir le jour et de se dérouler dans de bonnes conditions. Ainsi je remercie l'entreprise DEPESTELE pour le financement de ses travaux et la confiance accordée à l'équipe et moi-même dans leurs bonnes réalisations. Je tiens à remercier Davy Duriatti, à la tête de la Recherche et du Développement de l'entreprise pour l'intérêt et l'implication lors de chaque présentation des travaux menés.

Je tiens particulièrement à remercier mon directeur de thèse Gilles Hivet ainsi que mon encadrante Audrey Hivet pour l'accompagnement qui m'as été fournie. Je reconnais la chance qui a été la mienne d'entrer dans cette équipe, certes petite, mais très agréable et qui m'as permis de murir m'as réflexion dans un cadre bienveillant. Je remercie aussi, toutes les personnes du site de Chartres avec qui j'ai pu converser au cours de ces années.

J'aimerais continuer ces remerciements avec une pensée pour les membres du laboratoire que j'ai pu côtoyer sur les différents sites en Centre Val de Loire et qui m'ont apporté leur expertise pour mener à bien ces travaux. Aussi je remercie Anwar Shanwan et Jean Gillibert pour le temps passé à la réalisation et à l'aide accordée afin de mettre au point les différents essais présentés dans ce mémoire. Je remercie aussi Mathieu Venin du CERMEL, et les membres que j'ai pu y croiser, pour le temps accordé dans la réalisation et l'exploitation des essais en tomographie à rayons X. Je remercie les membres du laboratoire du site d'Orléans pour l'accueil particulièrement appréciable auquel j'ai toujours eu droit lors de chacune de mes visites. Je remercie également Christelle Chanteloup pour sa réactivité et sa disponibilité afin de régler les soucis rencontrés au cours de ces dernières années.

Je tiens à terminer ces remerciements en remerciant l'ANRT dont le dispositif de financement m'as permis de réaliser cette thèse et qui a pour moi été une aventure et un trésor d'expériences que je n'oublierai pas.

II. Table des matières

Table des matières

I. Remerciements.....	1
II. Table des matières	2
Introduction.....	16
Chapitre I : Etat de l’art et stratégie de simulation.....	19
I. Etat de l’art.....	19
A. Structure d’un renfort en lin de type sergé 2x2.....	19
1. Structure d’un roving de lin	20
a. Structure de la tige de lin	20
b. Fabrication et composition d’un roving de lin	22
2. Structure d’un renfort sergé 2x2	25
3. Conclusion sur les structures étudiées	27
B. Comportement des mèches de fibres de lin	28
1. Comportement en Traction d’un roving de lin.....	28
a. Fibres unitaires.....	29
b. Fibres techniques et faisceaux de fibres.....	31
c. Roving.....	33
d. Paramètres influents	38
e. Propriétés des rovings avant et après tissage	46
2. Comportement en Compression d’un roving de lin.....	48
3. Conclusions pour l’étude du comportement de roving de lin	49
II. Stratégie de simulation.....	50
III. Conclusion sur l’organisation et les objectifs de l’étude	52
Chapitre II : Modélisation de la géométrie du roving et du renfort.....	53

I.	Caractéristiques des matériaux de l'étude.....	53
II.	Stratégie de modélisation géométrique	54
III.	Observations de la géométrie du roving	56
IV.	Observations de la géométrie du renfort	62
V.	Principe de la reconstruction.....	66
A.	Reconstruction d'un modèle fidèle de roving	66
B.	Reconstruction d'un modèle fidèle de renfort.....	68
1.	Mesures et outils de reconstruction.....	68
2.	Validation du modèle reconstruit	69
VI.	Conclusion sur les modèles géométriques de l'étude	72
Chapitre III :	Comportement d'un roving de lin.....	74
I.	Introduction du chapitre	74
II.	Caractérisation expérimentale du comportement mécanique en traction du roving de lin	74
A.	Protocole d'essai de traction uni-axial sur roving de lin.....	78
1.	Objectifs des essais	78
2.	Méthode de fabrication des éprouvettes.....	79
3.	Acquisition des résultats	83
4.	Méthode d'exploitation des résultats	84
B.	Résultats des essais de traction uni-axial sur roving.....	90
1.	Déformation longitudinale de l'éprouvette	90
a.	Ténacité :.....	90
b.	Rigidité Maximale (dites « Matériau »).....	93
c.	Rigidité linéarisée	97
d.	Influence de l'humidité relative	99
e.	Abattement de la rigidité liée au procédé de tissage :.....	100

2.	Déformation transversale de l'éprouvette	103
C.	Bilan des essais de traction sur roving de lin	107
III.	Essais expérimentaux en compaction/compression sur roving	108
A.	Objectifs des essais	109
B.	Protocole expérimental	111
1.	Essai de compaction sous microscope numérique	111
a.	Principe et objectifs.....	111
b.	Protocole d'essai	115
2.	Essai de compaction/compression	116
a.	Principe et objectifs.....	116
b.	Protocole d'essai	116
C.	Résultats des essais	117
1.	Essai de compaction sous microscope numérique	117
2.	Essai de compaction/compression	125
3.	Bilan des essais de compaction/compression.....	130
IV.	Conclusion sur le comportement des rovings de lin à intégrer en simulation numérique	131
Chapitre IV :	Loi de Comportement	133
I.	Implémentation de la loi de comportement.....	133
A.	Fonctionnement d'une Vumat lors d'une simulation sous Abaqus®	134
B.	Fonctionnement de l'attribution du comportement de la Vumat V0.....	135
1.	Initialisation du module C1111 des éléments.....	136
2.	Initialisation de la fraction volumique de fibres des éléments.....	138
3.	Gestion de la déformation au cours du calcul	139
C.	Adaptation de l'outil Vumat.....	142
1.	Principe	142

2.	Validations de la nouvelle Vumat V2.....	146
a.	Attribution des paramètres initiaux.....	149
b.	Résultats	149
3.	Conclusion sur l'utilisation de l'outil V2.....	151
II.	Validation du comportement en simulation sur roving	152
A.	Simulation du comportement en traction sur roving de lin.....	152
1.	Conditions de simulations.....	153
2.	Résultats	153
B.	Simulation du comportement en compression sur roving de lin.....	156
III.	Conclusion du Chapitre IV	158
Chapitre V :	Résultats et validations de la simulation sur renfort	160
I.	Acquisition/Exploitation d'un essai sur renfort en tomographie à rayons X.....	160
A.	Résultats en compression.....	161
B.	Reconstruction du modèle géométrique du VER de l'échantillon.....	166
II.	Simulation du comportement du renfort en compression	168
III.	Résultats des simulations	169
IV.	Conclusion du Chapitre V.....	173
Conclusions et Perspectives		174
Références.....		177

Table des figures

Figure 1 : Schéma représentant la composition des tiges de lin [5].....	20
Figure 2 : Forme de la section et mesure du diamètre le long d'une fibre unitaire [27].....	21
Figure 3 : Les différentes étapes de fabrication d'un roving de lin (Source Depestele).....	23
Figure 4 : Photo d'une bobine de roving de lin (a) du roving de lin (b).....	25
Figure 5 : Classification des différents types d'architectures de renforts [41]	26
Figure 6 : Principe d'un métier à tisser [50]	27
Figure 7 : Comportement en traction d'une fibre unitaire : A Les différents types observés [53] , B Les différentes phases du comportement de type III [54].....	29
Figure 8 : Comparaison de module tangent et contrainte moyenne à rupture de fibres unitaires [61]	30
Figure 9 : Comportement en traction des types I à III de faisceaux de lin avec répartition du pourcentage de chaque type dans les essais (à gauche) [77] et d'une fibre technique (à droite) [76]	31
Figure 10 : Dépendance des propriétés mécaniques des faisceaux de lin à la longueur de jauge testée [54]	32
Figure 11 : Représentation d'une courbe typique obtenue avec un roving de lin [82]	33
Figure 12 : Comportement en traction d'un roving avec fil d'âme (rupture fragile et ruptures successives) [83]	34
Figure 13 : Estimation de la section du roving pour chaque méthode.....	36
Figure 14 : Résultats d'un essai de traction sur 2 fils (Y1, Y2) et un roving (Y3) et dispersion des résultats pour le roving Y3 [89]	38
Figure 15 : Propriétés en traction de fibres unitaires pour différents taux de rouissage [6]	39
Figure 16 : Evolution de la distance entre les fibres unitaires au sein d'un faisceau (A) et module de la lamelle mitoyenne obtenu par indentation (B) pour différents niveaux de rouissage. Les indicateurs R1 à R5 correspondant à du lin sous-oui et R6 correspond au taux de rouissage privilégié aujourd'hui par les industriels [93].....	39

Figure 17: a) Observation des défauts au microscope polarisé dans des fibres de lin [34] b) Observation de défauts en surface d'une fibre de chanvre (MEB) et de cette fibre en lumière polarisée [98]	40
Figure 18 : Décroissance du module de la fibre unitaire (a) et du faisceau (b) [27].....	41
Figure 19: Variation du module (A), de la contrainte à rupture (B) et de la déformation (C) d'une fibre unitaire en fonction de la longueur de jauge [27]	42
Figure 20 : Contrainte (à gauche) et module (à droite) en fonction de la longueur de jauge pour un essai de traction sur un roving [83]	43
Figure 21 : Essais de traction de rovings avec différents taux d'encollage [82].....	44
Figure 22: Essais de traction avant tissage et après tissage [87].....	47
Figure 23 : Représentation de la mise en compression d'un renfort [106]	48
Figure 24 : Les différentes échelles d'études du renfort	51
Figure 25 : Représentation schématique d'un renfort sergé 2x2.....	53
Figure 26 : Représentation de l'information obtenue avec un microscope numérique pour de la détection de profils rectangulaire ou elliptique.....	55
Figure 27 : Acquisition 3D réalisée au microscope numérique	57
Figure 28 : Exemple de profil extrait d'une image 3D d'un roving	58
Figure 29 : (A) : Grandeurs récupérables à partir de mesures sur les sections du roving. A gauche, le pic est un artefact de la reconstruction. (B) : Variabilité des grandeurs géométriques de deux groupes espacés de plus de 1.6mm.....	59
Figure 30 : Reconstruction 3D d'un roving de 520tex (de largeur 3.7mm) à partir d'une acquisition par tomographie à rayons X, la direction X est la direction longitudinale des fibres	60
Figure 31 : (A) Binarisation de images issues de tomographie à rayons X, (B) Bruitage des coupes aux extrémités de l'acquisition	61
Figure 32 : Taux de fibres dans chaque coupe d'un roving avant tissage.....	62
Figure 33 : Prises de mesures possibles sur une image réalisée à partir d'un microscope numérique et représentation schématique associée d'un VER pour un renfort sergé 2x2. La largeur L2 est une largeur moyenne.....	63

Figure 34 : Visualisation du repliement des mèches au sein du renfort sergé 2x2 par tomographie à rayons X	64
Figure 35 : Reconstruction 3D d'un échantillon de renfort sergé 2x2	65
Figure 36 : Largeur et épaisseur moyenne des rovings dans le renfort.....	66
Figure 37 : Procédure de reconstruction d'un modèle géométrique de roving avec prise en compte de la variabilité d'un échantillon réel. (A) Acquisition 3D de l'échantillon au microscope numérique ; (B) Reconstruction par des sections rectangulaires dans CatiaV5® ; (C) Reconstruction volumique du modèle à importer Abaqus®	67
Figure 38 : Reconstruction avec variabilité trop fine pour obtenir un maillage régulier	68
Figure 39 : Image 3D du renfort acquis au microscope numérique (A) ; Reconstruction de la surface supérieure de ce renfort pour comparaison avec le modèle géométrique reconstruit (B).....	70
Figure 40 : Modèle géométrique du renfort reconstruit à partir des mesures réalisées au microscope numérique.....	70
Figure 41 : Visualisation des différences entre les coupes issues de tomographie et les coupes au même point de la géométrie du renfort modélisé.....	71
Figure 42 : Modèles géométriques.....	73
Figure 43 : Surestimation des efforts simulés engendrées par la négligence de la phase 1	76
Figure 44 : Représentation schématique de la décomposition par phases du comportement et des grandeurs récupérables d'un essai de traction sur roving de lin.	77
Figure 45 : Gabarit pour la préparation des échantillons à différentes longueurs de jauges	80
Figure 46 : Image des marqueurs à l'état initial (A) et après 1% de déformation (B).....	81
Figure 47 : Dispositif d'essai de traction et de mesure de la déformation.....	82
Figure 48 : Linéarisation discrétisée de la courbe de comportement longitudinal du roving.....	86
Figure 49: Obtention des rigidités K_m et K_s à partir de la linéarisation du comportement longitudinal moyen.....	87
Figure 50: Exemple d'exploitation sur essai réel : (A) Interpolation linéaire de la rigidité, (B) Points $[F_c, \epsilon_c]$ avec les différents seuils $[F_{max}/10 ; F_{max}/30]$	88

Figure 51 : Exemple de post traitement (superposition de l'état initial en transparence à l'état $[F_{max}; \varepsilon_{max}]$) pour la détermination de la déformation transverse lors d'un essai de traction. Les lignes en rouges représentent le contour détecté.....	89
Figure 52 : Effort moyen F_{max} et déformation moyenne ε_{max} maximal des rovings avant tissage pour chaque longueur de jauge par rapport à la longueur de jauge 20mm	90
Figure 53 : Exemples de la forme de l'endommagement suivant la longueur de jauge	92
Figure 54 : Estimation du nombre d'échantillon nécessaire pour des séries avec un Δ entre 300 et 2000 pour des écarts-types entre 500 et 1000 avec un risque $\alpha= 5\%$ et $\beta=20\%$	93
Figure 55 : Répartition des distributions de rigidité K_m pour chaque longueur de jauge avant tissage par rapport à la rigidité K_m moyenne de l'ensemble des longueurs de jauges.....	94
Figure 56 : Répartition des distributions de rigidité K_s pour chaque longueur de jauge avant tissage par rapport à la rigidité K_s moyenne de l'ensemble des longueurs de jauges	97
Figure 57 : Erreur absolue et locale moyenne commise par l'approximation linéaire du comportement pour chaque longueur de jauge	99
Figure 58 : Comparaison des rigidités K_m vs les conditions hygrométriques équivalentes à 23°C relevés lors des essais.....	100
Figure 59 : Répartition des distributions de rigidité matériau K_m pour chaque type de roving avant et après tissage	101
Figure 60 : Exemple d'exploitation de l'évolution de la largeur moyenne en cours d'essai (échantillon de 20mm de longueur de jauge).....	104
Figure 61 : Visualisation de l'ensemble des déformations transverses (rouge : 50mm, bleu : 150mm, vert : 300mm).....	105
Figure 62 : Linéarisation du comportement des déformations transverses vs longitudinales pour chaque échantillon des longueurs de jauges 50,150 et 300mm. En noir, la droite représentative de la linéarisation moyenne des courbes	106
Figure 63 : Réponse typique à une sollicitation de compression non confinée pour un roving.	110
Figure 64 : Dispositif de compaction sous microscope	113
Figure 65 : Exemples de profils d'un échantillon en compaction retenue pour reconstruction 3D et vue 3D de la zone reconstruite.....	114

Figure 66 : Visualisation des échantillons testés en compaction sous microscope numérique.....	115
Figure 67 : (A) Montage de l'essai de compression, (B) Visualisation de la répartition de pression observée à partir du capteur Tekscan lors du calibrage de l'orientation des plateaux.	117
Figure 68 : Superposition et évolution en cours d'essai d'un profil de chaque échantillon	118
Figure 69 : Vue 3D de l'échantillon RC.....	118
Figure 70 : Influence de la pilosité sur l'estimation de la largeur des profils.....	119
Figure 71 : Variation de la largeur moyenne de chaque échantillon	120
Figure 72 : Evolution de l'épaisseur des profils de l'échantillon RB	121
Figure 73 : Hauteur maximale de chaque profil pour chaque ajout de charge sur l'échantillon RC	121
Figure 74 : Evolution de la Fraction Volumique de Fibres apparente et réelle moyenne pour chaque échantillon durant l'essai en fonction de la fraction volumique de fibres apparente RB	122
Figure 75 : Variation de Fraction Volumique de Fibres au sein des échantillons : (A) à l'état initial, (B) à l'état final ; par rapport à la moyenne de la fraction volumique de fibres de l'échantillon RB à l'état initial	123
Figure 76 : Interprétation des données par l'équation de Toll	124
Figure 77 (A) Comportement en compression obtenu pour les différents échantillons en fonction des résultats de l'échantillon C1 à partir de l'analyse d'images. [C1, C2] représentent les échantillons direction chaîne et [T1, T2] représentent les échantillons direction trames. (B) Comportement des échantillons sur la plage 0-0.2MPa	126
Figure 78 : Incertitudes sur la détermination de la fraction volumique de fibres apparente liées à la détermination de l'écart entre les plateaux	127
Figure 79 : Observation de l'origine du comportement observé du roving C2 dans la plage de l'essai correspondant à 0-0.2MPa (Figure 77 B).....	128
Figure 80 : Comparaison du comportement en compression des rovings obtenus à partir du microscope numérique et par suivi de marqueur sur une mono-colonne par rapport aux résultats de l'échantillon apparent RB	128
Figure 81 : Fitting du comportement en compression par le modèle de Toll	129

Figure 82 : Représentation schématique de la gestion du calcul numérique en utilisant une Vumat	134
Figure 83 : Hypothèse sur la rigidité de chaque section du roving.....	136
Figure 84 : Répartition homogène des fibres « virtuelles » dans un modèle avec des éléments de sections différentes.....	136
Figure 85 : Modifications de la section d’enveloppe des rovings de lin par l’arrangement fibreux interne.....	137
Figure 86 : Numérotation des sections d’enveloppes du modèle.....	138
Figure 87 : Représentation de la migration des fibres au sein de la section de chaque élément dans le cadre d’une répartition inhomogène (B) et inhomogène (C) à partir d’une répartition homogène (A).	141
Figure 88 : Méthode d’identification et de calcul de la section d’enveloppe au cours de la simulation	143
Figure 89 : Observation de la relation entre le numéro d’élément et le numéro de la section du modèle à laquelle il appartient en fonction de la numérotation du maillage pour une numérotation de type « ligne » (A) ou « colonne » (B) d’un modèle contenant 54 éléments et 6 sections d’enveloppe...	145
Figure 90 : Représentation schématique de la gestion du calcul numérique en utilisant une Vumat adaptée à un modèle à section non constante.....	146
Figure 91 : Résumé des sollicitations appliquées lors du test.....	147
Figure 92 : Variation de contrainte $d\sigma_{11}$ en fonction de la variation de déformation $d\varepsilon_{11}$ pour deux éléments avec des sections de tailles différentes.....	149
Figure 93 : Evolution de la fraction volumique de fibres de deux éléments avec une section de taille différente situés dans la même section d’enveloppe	150
Figure 94 : Evolution de la rigidité du modèle lors du calcul.....	151
Figure 95 : Modèles testés en traction : A ROV500v, B ROV500c.....	152
Figure 96 : Suivi des éléments (A) et des sections (B) au cours du calcul (ici à 1% de déformation de la mèche dans la direction 1).....	154
Figure 97 : Recalcul des dimensions des sections d’enveloppe en cours de calcul.....	154

Figure 98 : Visualisation de la déformée obtenue pour le modèle ROV500c (A) et ROV500v (B)	155
Figure 99 : Comportement en traction des modèles	155
Figure 100 : Conditions de simulation appliquée au modèle ROV500c.....	157
Figure 101 : Comportement en compression du modèle ROV500c	157
Figure 102 : Comportement en compression attendu et comportement apparent de la mèche obtenu en simulation avec le modèle ROV500v.....	158
Figure 103 : Echantillon de sergé 2x2 testé en compression : (A) Photo de l'échantillon après essai, (B) Reconstruction de l'échantillon sous ImageJ à partir des coupes réalisées en tomographie à rayons X à l'état initial	160
Figure 104 : Echantillon de sergé 2X2 testé : (A) Zone d'exploitation de l'échantillon de sergé acquis par tomographie à rayons X ; (B)Méthode d'exploitation manuelle des résultats.....	161
Figure 105 : Détourage manuel des sections des mèches (en surbrillance) dans le VER au centre (A) et dans les zones de transitions (B) du motif. La coupe A provient du centre de C3 et la coupe B de la zone de transition C2-C3 (Figure 104)	162
Figure 106 : Visualisation de la section réelle moyenne normalisée par la section initiale de la mèche et de l'écart type associé de chaque mèche pour chaque acquisition de l'essai dans la direction trame (A) et la direction chaîne (B)	163
Figure 107 : Visualisation des sources d'incertitudes sur les mesures manuelles	164
Figure 108 : Comparaison de la Fraction Volumique de Fibres apparente du VER et de celles de chacune des mèches par rapport à la fraction volumique de fibres initiale de la mèche 211	165
Figure 109 : Comparaison des résultats du comportement apparent en compression de renforts effectués en tomographie à rayons X et avec une machine de traction par rapport aux résultats de l'échantillon Renfort 1	166
Figure 110 : Modèles géométriques moyen et variable réalisés à partir des données tomographiques.	167
Figure 111 : Maillage des modèles géométriques : (A) Maillage du modèle variable Rev, (B) Maillage du modèle moyen Rem	168
Figure 112 : Visualisation de la fraction volumique de fibres réelle de chaque mèche en simulation.	169

Figure 113 : Comparaison de l'évolution de la Fraction Volumique de Fibres des mèches du renfort réel et en simulation (Rev) : (A) dans la direction Chaine ; (B) dans la direction Trame	170
Figure 114 : Comparaison de l'évolution en simulation de la Fraction Volumique de Fibres du modèles Rev et Rem : (A) dans la direction Chaine ; (B) dans la direction Trame.....	171
Figure 115 : Comparaison du comportement apparent en compression du renfort expérimentalement et en simulation.	172
Figure 116 : Répartition de la contrainte (S33) sur les éléments du renfort à l'état final pour les modèles Rev (A) et Rem (B).....	172

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Propriétés de différentes fibres naturelles vs fibres de verre [5–7]	16
Tableau 2 : Données fournisseur sur les caractéristiques des rovings de l'étude.....	53
Tableau 3 : Caractéristiques de la rigidité K_m pour les différentes longueurs de jauges par rapport à la longueur de jauge 20mm.....	95
Tableau 4 : P-value obtenue entre les différentes longueurs de jauges pour la rigidité matériau K_m (en bleu la p-value est inférieure au critère α).	95
Tableau 5 : Caractéristiques de la rigidité K_s pour les différentes longueurs de jauges par rapport à la longueur de jauge 20mm.....	98
Tableau 6 : P-value obtenue entre les différentes longueurs de jauges pour la rigidité K_s (en bleu la p-value est inférieure au critère α).	98
Tableau 7 : Comparaison des ténacités obtenues pour les rovings avant et après tissage par rapport aux résultats obtenus pour les échantillons RB.....	101
Tableau 8 : Caractéristiques de la rigidité K_m pour les différents types de roving	102
Tableau 9 : P-value obtenue entre les différents types de roving pour la rigidité K_m (en bleu la p-value est inférieure au critère α).....	102
Tableau 10 : Caractéristiques de la rigidité K_s pour une longueur de jauge de 50mm pour les différents types de roving par rapport aux résultats des échantillons RB	102
Tableau 11 : P-value obtenue entre les différents types de roving pour la rigidité K_s (en bleu la p-value est inférieure au critère α).....	102
Tableau 12 : Résultats des coefficients CT pour chaque longueur de jauge par rapport à la longueur de jauge 50mm	107
Tableau 13 : Paramètres de Toll obtenus par fitting du comportement de chaque échantillon dans le cas apparent (A) et réel (R) par rapport au couple de valeurs obtenu dans le cas RB apparent	124
Tableau 14 : Comparaison en pourcent des Fraction Volumique de Fibres initiales de l'essai et obtenues par fitting du comportement de chaque échantillon dans le cas apparent (A) et réel (R) par rapport à la fraction volumique apparente initiale de l'échantillon RB	124

Tableau 15 : Coefficients du modèle de Toll déterminés sur les échantillons sur la plage 0- 2MPa normalisés par rapport au couple Kc, γ de l'échantillon C1	130
Tableau 16 : Coefficients du modèle de Toll déterminés sur les échantillons sur la plage 0- 0.2MPa normalisés par rapport au couple Kc, γ de l'échantillon RB	130
Tableau 17 : Valeurs des facteurs de frottement et d'adhérence dynamiques pour les rovings de lin dans différentes configurations	132

Introduction

Aujourd'hui l'intégration dans les structures de pièces composites à base de renforts de fibres naturelles, notamment en lin, est de plus en plus plébiscitée par les industriels [1–4]. La recherche de matériaux biosourcés, avec un impact environnemental plus faible est en effet un défi que les industriels doivent relever qui les amènent à rechercher des solutions alternatives efficaces. Dans ce contexte, la fibre de lin apparaît comme un bon candidat de par son rapport densité/module d'Young qui reste intéressant pour un remplacement de certaines fibres synthétiques, comme les fibres de verre par exemple (Tableau 1). Cela se traduit par ailleurs par une croissance significative de son utilisation.

	Fibres						
Propriétés	Verre-E	Chanvre	Jute	Ramie	Coir	Sisal	Lin
Densité (g/cm ³)	2.55	1.48	1.46	1.5	1.25	1.33	1.4
Résistance à la traction (MPa)	2400	550-900	400-800	500	220	600-700	800-1500
Module E (GPa)	73	70	10-30	44	6	38	60-80
Elongation a rupture (%)	3	1.6	1.8	2	15-25	2-3	1.2-1.6
Absorption d'humidité (%)	-	8	12	12-17	10	11	7

Tableau 1 : Propriétés de différentes fibres naturelles vs fibres de verre [5–7]

Le potentiel des fibres de lin est donc réel mais peine encore à être exploité aujourd'hui car la structure des fils de lin est très différente de celle des fibres synthétiques. Il n'est ainsi pas trivial de transposer les connaissances et outils dédiés aux fibres synthétiques, sur les fibres naturelles. De plus, bien que l'existence des fibres naturelles soit bien antérieure à celle des fibres synthétiques, leur utilisation dans des applications composites est très récente. Ainsi, le recul manque encore et la maturité est moindre.

Pour pouvoir répondre au besoin et fournir une alternative crédible les renforts de fibres de lin doivent se confronter à la double problématique de la fabrication et de la tenue en service, notamment si des pièces structurelles ou semi-structurelles sont visées. Parmi les principaux freins à l'intégration de ces matériaux, notamment dans les milieux techniques, persiste la difficulté à caractériser et prédire le comportement des pièces obtenues et à disposer de procédés de fabrication efficaces et efficients. Les matériaux composites à renfort fibreux peuvent notamment être fabriqués par des procédés de type Liquid Composite Moulding qui consistent à mettre en forme un renfort fibreux sec avant d'injecter (procédé RTM - Resin Transfer Moulding) ou d'infuser la résine (LRI -Liquid Resin Infusion). Pendant la première phase de ce procédé, dite de préformage, le renfort fibreux subit différents types de sollicitations (par exemple la traction, le cisaillement, la flexion et la compaction). Les sollicitations

subies par le renfort, lors du préformage conduisent à des modifications de l'orientation des fibres et peuvent générer des défauts à différentes échelles [8, 9] ce qui impacte au premier ordre les propriétés de la pièce composite. Ces déformations conduisent également à une modification de l'espace poral et affectent donc significativement la seconde étape des procédés LCM. Afin de pouvoir fiabiliser les procédés et aller vers une démarche prédictive de la faisabilité et de la tenue en service des pièces composites en fibre de lin, il est fondamental de comprendre, caractériser et modéliser finement le comportement mécanique des renforts de lin et les mécanismes de déformation mis en jeu.

Le comportement des renforts secs est complexe à caractériser car dépendant de nombreux paramètres [10–16] tels que son architecture, appelée armure [17, 18], le type de mèches et de fibres utilisées, le titrage des mèches utilisées, le procédé d'extraction à partir de la plante pour les fibres naturelles, etc. La caractérisation du comportement du renfort peut être réalisée à l'aide d'essais expérimentaux dont les campagnes sont longues et coûteuses car elles doivent être réalisées sur chaque type de renfort en faisant varier les nombreux paramètres tels que cités précédemment. De plus, les essais restent limités aux renforts existants. Il est donc nécessaire d'adjoindre aux approches expérimentales, des approches numériques qui, si elles sont fiables, permettent des études paramétriques plus efficaces et la prédiction du comportement mécanique d'un renfort avant sa fabrication. L'enjeu de cette étude est ainsi d'apporter une réponse à cette problématique en proposant une démarche de simulation à but prédictif du comportement mécanique d'un renfort tissé en fibres de lin à partir de son architecture et du comportement des mèches qui le composent. Dans le cadre de ce travail, étant donné que de nombreux verrous sont à lever, une architecture simple et fixe a été choisie pour valider l'approche proposée : un renfort tissé de type sergé 2x2 composé de mèches de fibres de lin, également nommées roving de fibres de lin. Un roving est constitué de fibres quasi parallèles et représente une solution intéressante et souvent utilisée pour des applications techniques. L'ensemble des protocoles et des procédures de validations utilisé dans cette étude reste cependant valable pour d'autres types d'architectures de renfort. La mise en place d'une simulation numérique du comportement d'un renfort nécessite de :

- Définir **l'échelle d'étude** et le **modèle géométrique** de la structure associée
- Comprendre et analyser le **comportement mécanique du roving** à implémenter permettant de rendre compte des spécificités du matériau
- Mettre en place une **stratégie de simulation** efficace et efficiente

Ainsi, dans une première partie, à partir d'un état de l'art bibliographique, la structure particulière des rovings produits à partir de fibres de lin sera définie et analysée. Nous verrons ensuite ce que l'on peut attendre en matière de propriétés mécaniques et de réponses aux différentes sollicitations

appliquées aux renforts lors du préformage dans les procédés de LCM ; nous verrons également comment cette architecture, ainsi que les autres paramètres physiques impactent ces propriétés mécaniques, notamment comment l'étape de tissage peut influencer sur le comportement mécanique des renforts. Les différentes stratégies possibles pour une simulation prédictive du comportement mécanique des renforts de lin seront également abordées, afin de choisir celle qui sera mise en œuvre dans le cadre de cette thèse. L'ensemble de ces analyses permettra alors de proposer un plan de travail pour la suite de cette étude et ainsi le contenu des chapitres suivants.

Chapitre I : Etat de l'art et stratégie de simulation

I. Etat de l'art

Cette étude concerne la mise en place de simulations prédictives de la déformation de renforts tissés réalisés à partir de mèches de fibres de lin, lors de procédés de type LCM [19].

Dans ce type de procédé les pièces composites sont fabriquées à partir d'un renfort tissé et de résine suivant 3 étapes principales :

- Une première phase durant laquelle le renfort sec est inséré dans un moule et mis en forme,
- Une phase d'injection de la résine au sein du renfort,
- Une phase de consolidation de la pièce avec la réticulation de la résine par apport de chaleur.

Lors de la phase de mise en forme, le renfort est sollicité, notamment en traction et compression, ce qui induit des déformations locales pouvant altérer les propriétés finales de la pièce. Les architectures de renforts étant multiples (Figure 5), l'impact de ces sollicitations varient. C'est pourquoi on se limitera ici à l'étude d'un renfort de sergé 2X2 composé de rovings de fibres de lin. La réalisation d'essais expérimentaux permettant d'appréhender le comportement du renfort et l'impact des sollicitations lors de l'étape du préformage limite l'exploration des contributions liés au comportement du renfort. C'est pourquoi cette étude vise à mettre en place une simulation numérique représentative du comportement du renfort.

Afin de réaliser ces simulations, il est nécessaire de comprendre la structure qui est étudiée et l'implication de l'agencement structurel dans la manière dont est sollicitée un renfort dans les procédés LCM. C'est pourquoi nous allons nous intéresser dans la partie suivante à la structure du renfort et des rovings qui le compose, mais aussi aux réponses à des sollicitations de type traction et compression.

A. Structure d'un renfort en lin de type sergé 2x2

Les renforts tissés sont des structures, 2D ou 3D, fabriqués par tissage de semi-produits, appelés mèches provenant elles-mêmes du filage de fibres. Il existe différents types d'assemblages de fibres permettant de fabriquer un renfort tels que les fils (également appelés torons) ou les mèches (appelées également rovings). Alors que les fils sont des assemblages de fibres torsadées, obtenus par filature, les rovings sont des assemblages de fibres quasi-parallèles, obtenus par filage (Figure 3). Le présent manuscrit se limitera à l'étude du comportement de rovings de lin ; Afin de déterminer et comprendre

les facteurs influents sur les propriétés de ces rovings particuliers, il est nécessaire, dans un premier temps, d'appréhender sa structure particulière.

1. Structure d'un roving de lin

Afin de déterminer et comprendre les facteurs influents sur les propriétés des rovings de lin, il est nécessaire d'appréhender sa structure particulière, liée notamment à l'arrangement du réseau fibreux au sein de la plante et au procédé de fabrication du roving.

a. Structure de la tige de lin

L'une des difficultés majeures actuelle dans la compréhension du comportement des rovings de lin, provient de l'assemblage structurel des tiges de lin dont sont extraites les fibres permettant la fabrication du roving. En effet, il y a au sein de la tige, un assemblage constitué d'un réseau fibreux qu'il est possible de subdiviser en une multitude de types de fibres de tailles de plus en plus fines et courtes (Figure 1).

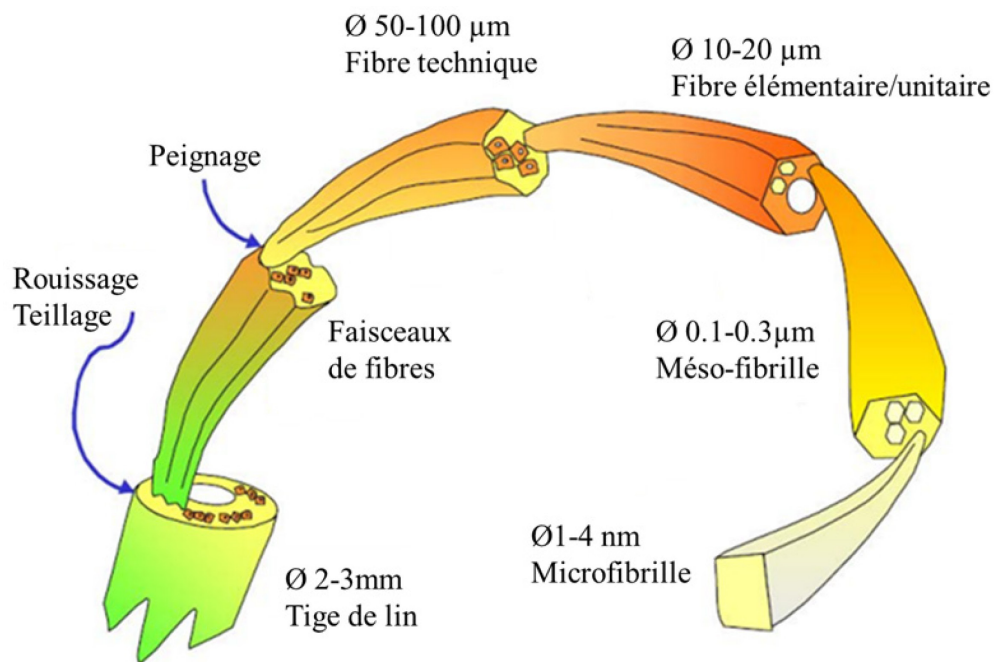


Figure 1 : Schéma représentant la composition des tiges de lin [5]

Les plus gros réseaux fibreux de la tige sont appelés faisceaux de fibres (Figure 1) et sont agencés de manière concentrique dans la tige. Leur longueur peut atteindre la longueur de la tige mais les réseaux sont entrecoupés partiellement ou totalement par la présence des sites d'insertion des feuilles le long de la tige. De plus, la section des faisceaux étant dépendante du diamètre de la tige, comme celle-ci évolue entre le bas et le haut de la tige, cela crée une variation de la section des faisceaux en fonction de la position dans la tige [20, 21].

Au sein des faisceaux, il est possible de subdiviser le réseau en fibres appelées fibres élémentaires ou fibres unitaires (Figure 1). Ces fibres sont liées entre elles par une paroi d'environ $0.2\ \mu\text{m}$ d'épaisseur (la lamelle mitoyenne) essentiellement composée de pectine et de cellulose hémicellulosique [22, 23]. Les fibres unitaires sont agencées dans les faisceaux de manière parallèle entre elles et se chevauchent partiellement pour rigidifier la tige et occuper le plus faible volume possible. Cet arrangement va induire une forte variabilité supplémentaire des sections des faisceaux de fibres. Cela a été observé par Gogoli [24] à l'aide de diffraction de Fraunhofer, un faisceau de fibres est tendu face à une source laser la figure de diffraction est observée en 2 directions transverses afin d'en déterminer la section approximée par une section elliptique. Les observations montrent que les valeurs des petits et grands côtés s'inversent entre les directions transverses le long de la fibre technique. Deux possibilités sont identifiées, les fibres unitaires tournent autour de l'axe de la fibre ou bien il y a des manques de fibres unitaires dans la section. Sachant que les sites d'insertions des feuilles entrecoupent partiellement ou totalement les faisceaux, la seconde hypothèse est privilégiée. Bien que les fibres unitaires soient les fibres les plus étudiées, les nombreux traitements mécaniques ou chimiques permettant de subdiviser totalement ces fibres les unes des autres est très complexe à réaliser. De plus, entre la très forte variabilité des sections observées [25, 26] (Figure 2) et la faible longueur des fibres pour les assembler (quelques millimètres), les industriels se concentrent sur l'échelle intermédiaire entre les faisceaux et les fibres élémentaires qui est celle des fibres techniques (Figure 1).

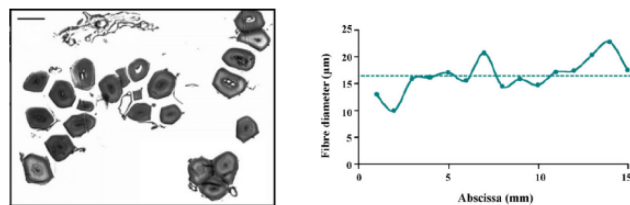


Figure 2 : Forme de la section et mesure du diamètre le long d'une fibre unitaire [27]

L'échelle des fibres techniques n'est pas à proprement parlé un sous réseau naturel de la plante. En effet, les fibres techniques sont issues des procédés d'individualisation des faisceaux et représentent le compromis entre des fibres suffisamment longues pour la fabrication de fil ou de mèche mais suffisamment « fines » pour permettre une bonne imprégnation par la résine des composites puisque la lamelle mitoyenne, composée de pectine, est un frein à l'imprégnation et nuit aux propriétés finales des composites [6, 28].

Au sein des fibres élémentaires, il est possible de distinguer un autre sous réseau fibreux, celui des microfibrilles (Figure 1). En effet, les fibres unitaires sont composées de 3 parois concentriques agencées autour du lumen (cylindre creux au centre de la fibre unitaire Figure 2) dans lesquelles la

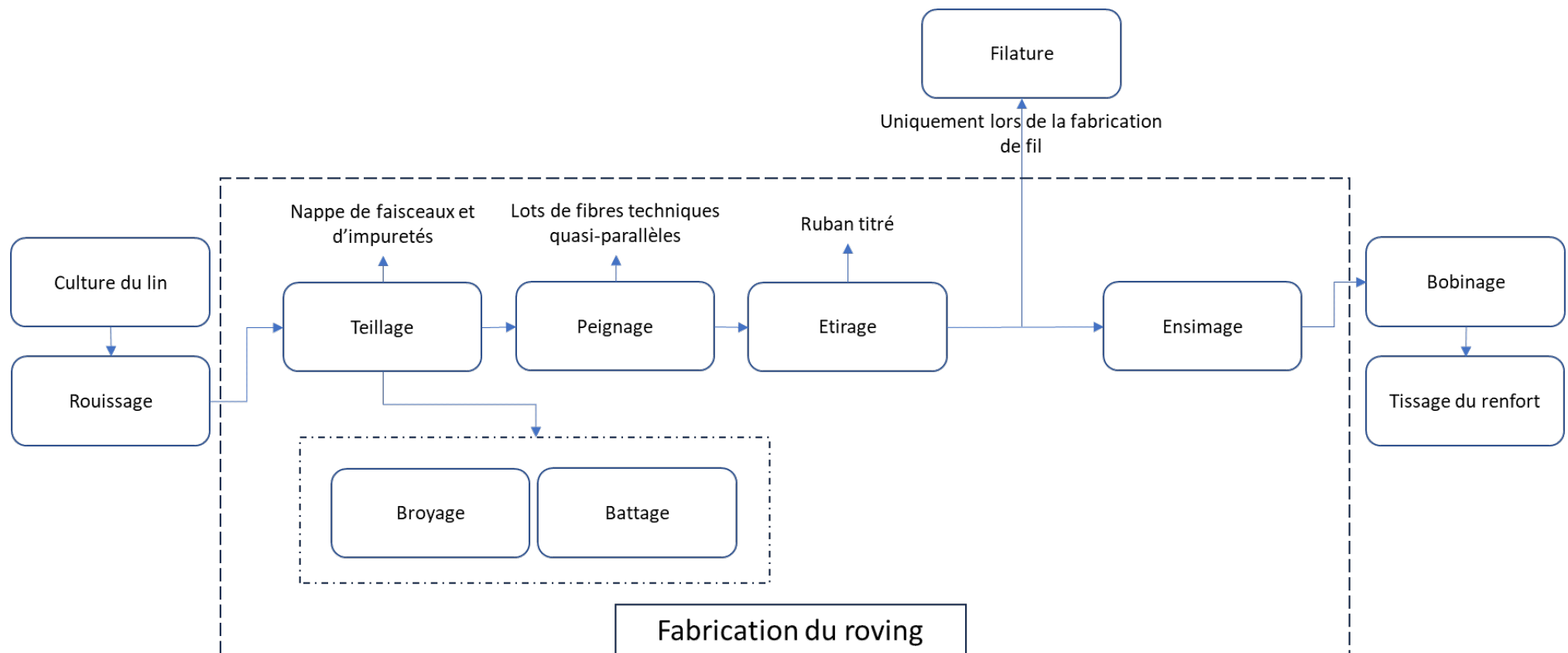
seconde paroi contient des microfibrilles. Ces microfibrilles ont une orientation particulière qui forme un angle général d'une dizaine de degrés avec l'orientation de la tige. Bourmaud et al. trouvent un angle entre $8,3^\circ$ et $9,5^\circ$ [29], Wang et al. déterminent avec deux méthodes différentes (diffraction à rayon X et Scanning Electron Microscope SEM), des angles entre $6,2^\circ$ - $7,2^\circ$ et $5,8^\circ$ - $7,3^\circ$ respectivement [30]. Cet angle varie en fonction de l'emplacement de la fibre dans la tige [31] et est aussi dépendant de facteurs extérieures tels que l'hydratation de la fibre comme le montrent Astley et Donald [32]. Les effets de ces orientations sont explicités dans la partie B.

Après les différentes étapes de fabrications, les fibres les plus représentées au sein des renforts et rovings de lin sont les fibres techniques.

b. Fabrication et composition d'un roving de lin

Les rovings sont des assemblages de fibres longues continues ou discontinues sous forme de ruban. Les fibres (ici fibres techniques) sont positionnées entre elles de manière quasi-parallèles et suivant un titrage particulier exprimé en tex (g.km^{-1}). Le roving est, par définition, non-retordu ce qui signifie que les fibres n'ont pas été torsadées afin de maintenir l'assemblage cohérent. Pour maintenir la cohésion de la mèche dans les directions transverses au sens des fibres (uniquement dues aux frottements inter-fibres), les fibres sont ensimées. La mèche ainsi obtenue est ensuite enroulée autour d'une bobine (Figure 4) puis utilisée pour la fabrication du renfort.

Les fibres naturelles (fibres longues discontinues) nécessitent plusieurs traitements avant d'être alignées et ensimées. En effet, après la culture de la plante et sa récolte, il faut ensuite extraire des tiges les fibres qui y sont contenues. Les différentes étapes de fabrication d'un roving de lin sont résumées dans la Figure 3 et explicité par la suite :



Titre : Le titre est exprimé en tex ou g/km et représente la masse de fibres dans un kilomètre de ruban

$$T(\text{tex}) = \frac{\text{Masse du ruban ou fil (g)}}{\text{Longueur du ruban (km)}}$$

Figure 3 : Les différentes étapes de fabrication d'un roving de lin (Source Depestele)

Dans le cas du lin, une période dite de rouissage, qui consiste à coucher le lin au sol pour favoriser une attaque fongique [33, 34] de la tige, a lieu avant la récolte. En effet, le rouissage permet de dégrader la lamelle mitoyenne [31–35] et permet une extraction simplifiée des fibres contenues dans la tige. La qualité du rouissage est un paramètre important car sous-roui l'étape suivante de teillage devra être plus sévère [36] pour extraire les différents types de fibres de la tige. Or la sévérité du teillage [37–39] fragilise les fibres avec l'apparition de défauts. Mais un rouissage trop important risque d'endommager les fibres unitaires [6, 40]. Le teillage est constitué de deux étapes avec le broyage et le battage des tiges qui permettent d'extraire une nappe de faisceaux de fibres informes qui contient aussi des impuretés tels que des morceaux de tige et d'écorce. L'étape suivante est le peignage qui permet, à travers une série de peignes de plus en plus fins, de paralléliser les fibres entre elles. A cette étape on parle désormais de fibres techniques. En effet, le peignage va non seulement réduire et homogénéiser la longueur des fibres techniques en éliminant les plus courtes (récupérées en étoupe) et en cassant les plus longues sur leurs points de fragilité mais va aussi affiner les faisceaux et les individualiser en fibres techniques (en majorité) et unitaires (ou fibres élémentaires) (voir Figure 1). Toutefois, la sévérité du peignage fragilise les fibres et les teilleurs ne dissocient donc pas les faisceaux jusqu'à atteindre cette échelle de fibres. Cela dit, une forte individualisation des fibres techniques en fibres unitaires permet une meilleure imprégnation et de meilleures propriétés techniques des composites [6, 28]. Il y a donc un compromis à trouver entre la sévérité du peignage et les propriétés finales que l'on souhaite obtenir pour les composites fabriqués à partir de renfort textile. L'un des défauts d'un peignage sévère est aussi l'arrachement partiel ou total des fibres unitaires au sein des fibres techniques. Ces variabilités aux échelles inférieures se reproduisent ensuite à l'échelle du roving.

L'étape suivante est l'étirage et permet de regrouper les lots sortants du peignage et de les superposer en ruban du titre désiré. Plus le titre souhaité est faible et plus l'étape d'étirage est répétée. C'est à cette étape que les rubans sont homogénéisés avec des lots provenant de parcelles et/ou d'année différentes.

Finalement l'étape d'ensimage permet la dépose d'un revêtement sur le ruban afin, entre autres, de maintenir sa cohésion. Ainsi, la fabrication des rovings et notamment des rovings de lin nécessite de nombreuses étapes qui vont chacune influençant ses caractéristiques. Les rovings obtenus peuvent alors être utilisés pour, dans le cas concerné par cette étude, la fabrication de renforts tissés.

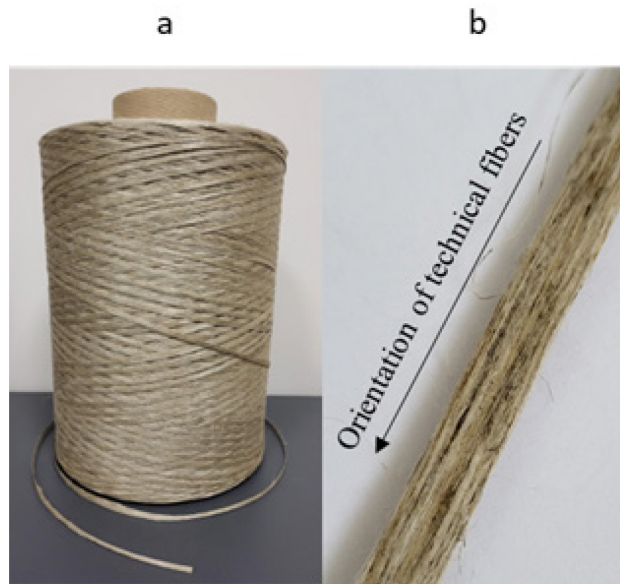


Figure 4 : Photo d'une bobine de roving de lin (a) du roving de lin (b)

2. Structure d'un renfort sergé 2x2

Les renforts sont des matériaux multi-échelles dont l'observation des caractéristiques peut être considérée soit suivant la structure globale (échelle macroscopique) soit comme la composition de plusieurs sous structures telles que les mèches (échelle mésoscopique avec une observation de l'ordre du millimètre) ou à l'échelle encore inférieure, celle des fibres (échelle microscopique, de l'ordre du micromètre). Notons d'après les paragraphes précédents que l'échelle des fibres peut encore être subdivisée dans le cas de fibres naturelles tels que le lin. Les renforts sont donc à la fois des matériaux mais représentent aussi des structures à part entière.

A l'échelle du renfort, les mèches sont des semi-produits dont l'entrelacement par le processus de tissage va permettre de fabriquer le renfort. Il existe de multiples architectures de renforts dont l'entrelacement des mèches peut être suivant deux directions ou plus (Figure 5), on parle alors respectivement d'entrelacement surfacique ou tridimensionnelle.

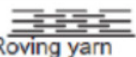
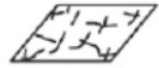
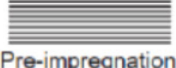
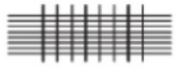
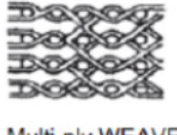
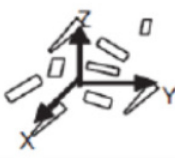
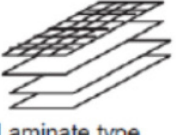
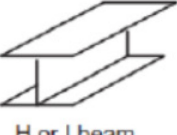
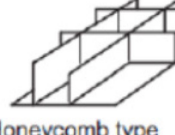
AXIS Dimension		Non-axial	Mono-axial	Biaxial	Triaxial	Multi-axial
1D			 Roving yarn			
2D		 Chopped	 Pre-impregnation sheet	 Plane weave	 Triaxial weave	 Multi-axial
3D	Linear element	 Strandmat	 3D braid	 Multi-ply WEAVE	 Triaxial 3D weave	 Multi-axial 3D weave
	Plane element		 Laminate type	 H or I beam	 Honeycomb type	

Figure 5 : Classification des différents types d'architectures de renforts [41]

L'architecture d'un renfort peut être définie suivant plusieurs paramètres :

- L'**armure** : qui représente le motif d'entrelacement des mèches ;
- Les **mèches** : définies elles-mêmes par leurs structures et le type de fibres utilisées c'est-à-dire le nombre de fibres (ou le titre dont l'unité est en tex) et leur agencement, les propriétés mécaniques etc. ;
- L'**embuvage** e : qui représente l'ondulation des mèches au sein du renfort, soit le rapport de longueur de mèche par rapport à celui du renfort exprimé en % (Équation 1).

$$e = \frac{l_{mèche} - l_{tissu}}{l_{tissu}} * 100 \quad \text{Équation 1}$$

Avec :

- $l_{mèche}$: longueur de la mèche totalement étirée, sans déformation (m)
- l_{tissu} : longueur du tissu (m)
- La **contexture** : qui représente le nombre de mèches par surface de tissu ;
- La **masse surfacique**.

Lors du procédé de tissage, les mèches sont disposées sur un métier à tisser (Figure 6) dans les directions nécessaires à la réalisation de l'armure souhaitée. Dans le cas des renforts 2D, les mèches

sont disposées dans 2 directions, l'une en chaîne et l'autre en trame. Les mèches de chaînes sont tendues et les mèches de trames sont tissées à travers le réseau de mèches de chaînes. Ainsi, on constate que les mèches de trame subissent un embuvage plus important que les mèches de chaînes. Les sollicitations appliquées aux mèches, dans les deux directions, lors du tissage sont suffisamment importantes pour entraîner la modification des propriétés des mèches [42] et donc celles du renfort [43]. Ces sollicitations et leurs intensités sont dépendantes du type de renfort qui va être tissé (architecture, densité de mèches, cohésion, etc.) [44–47]. L'une de ces sources de sollicitation provient des effets de frictions entre les mèches [48, 49], qui est notamment rendu visible par l'augmentation de la pilosité des mèches, c'est-à-dire l'augmentation du nombre de fibres s'échappant de la mèche.

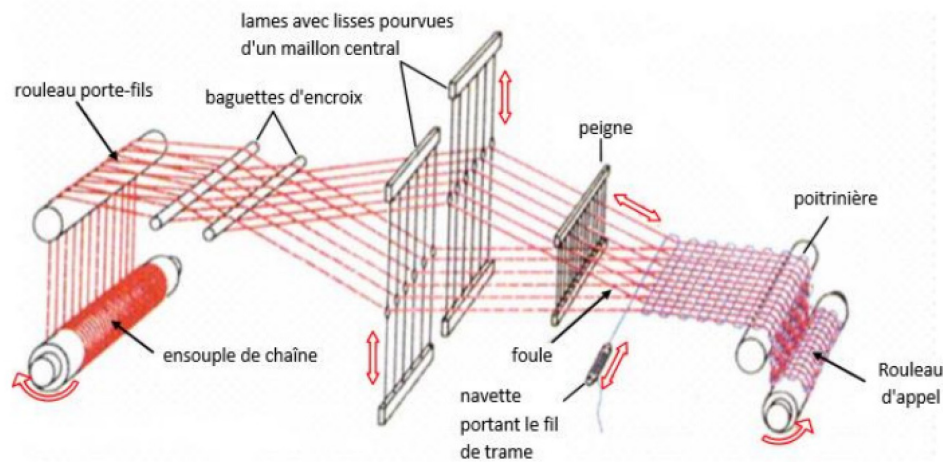


Figure 6 : Principe d'un métier à tisser [50]

3. Conclusion sur les structures étudiées

L'arrangement fibreux au sein de la plante influe sur le procédé de fabrication des roving de lin et un premier bilan sur les caractéristiques du roving peut être fait.

Les roving de lin sont composés de fibres techniques discontinues quasi parallèles et agencées suivant un titrage particulier. Les fibres techniques étant des faisceaux plus ou moins affinés jusqu'aux fibres unitaires. Le roving est composé de différents types de fibres (microfibrilles, fibres unitaires, faisceaux de fibres) et il est donc intéressant de comprendre les propriétés de ces types de fibres pour comprendre et identifier les paramètres influents sur le comportement du roving.

Le procédé de fabrication permet une homogénéisation des longueurs de fibres techniques et de leurs propriétés mais le ruban obtenu possède une grande variabilité de sections déjà présente au sein des différents types de fibres. De plus, les paramètres de fabrication du roving (sévérité du teillage, titre

du roving...) et les différents traitements (mécaniques, chimiques ou thermiques) que subissent les fibres techniques peuvent influencer les propriétés mécaniques du roving.

Ainsi, le comportement mécanique de la structure que représente le roving dépend de paramètres à la fois intrinsèques aux fibres qui le compose, de leur agencement et des différents traitements subis lors de sa fabrication. Il semble donc difficile de déterminer le comportement global du roving à partir de celui des fibres techniques sans réaliser une campagne de caractérisation expérimentale.

De même, le renfort est une structure obtenue par le tissage des rovings dans les directions trames et chaines et ce procédé sollicite fortement les mèches, pouvant conduire à des variations de propriétés mécaniques C'est pourquoi il est nécessaire d'étudier le comportement de rovings en sortie de bobine mais également extraits du renfort et ce dans les deux directions, afin de caractériser l'évolution/l'abattement des propriétés pouvant résulter du procédé de tissage.

B. Comportement des mèches de fibres de lin

Les sollicitations subies par les rovings lors du préformage des pièces dans le procédé LCM sont la traction, la compression, le cisaillement et le frottement. On s'intéressera principalement ici à la traction ainsi qu'à la compression ; un coefficient de frottement est déterminé uniquement afin de pouvoir alimenter les simulations.

Au regard des différentes étapes du procédé de fabrication de la multi-structure du renfort tissé en lin, du tissage des rovings jusqu'à l'enchevêtrement des faisceaux et fibres unitaires, et de l'état d'avancement des stratégies de remontées d'échelles, l'identification des propriétés mécaniques des rovings ne peut s'effectuer que par une caractérisation expérimentale directe sur le roving. Néanmoins, il y a, à notre connaissance, dans la littérature très peu d'études concernant les rovings de lin. C'est pourquoi nous verrons à travers des structures proches les différents facteurs à prendre en compte pour l'étude du comportement de ce type de roving pour les sollicitations précitées et comment ces facteurs influent sur le comportement du roving.

1. Comportement en Traction d'un roving de lin

Le comportement en traction des différentes échelles de fibres de lin est certainement le comportement qui a été le plus étudié dans la littérature à ce jour. Bien que le comportement à l'échelle des rovings soit, à notre sens, peu étudié aujourd'hui, cette échelle est impactée par toutes les échelles inférieures. Il est donc nécessaire de connaître les propriétés en traction des différentes échelles de fibres et les paramètres influents, afin de mieux appréhender le comportement des rovings

a. Fibres unitaires

Les fibres unitaires sont les fibres les plus étudiées à l'heure actuelle et représentent la plus petite fibre placée en parallèle au sein du roving.

Forme de la courbe

On peut noter que la courbe obtenue lors d'un chargement en traction pour la fibre unitaire a une forme typique basée sur l'alternance de phases linéaire et non-linéaire suivant trois cas de figures [51, 52] :

- Le type I tel que le chargement est linéaire. (Figure 7 A)
- Le type II tel que le chargement est une succession de phases linéaires. (Figure 7 A)
- Le type III (qui est le type prépondérant dans les essais) tel que le chargement présente une linéarité initiale (1) suivie d'une phase non-linéaire associée à une baisse de rigidité (2) et enfin une phase non-linéaire (3), qui est parfois approximée linéairement, marquée par une augmentation de la rigidité jusqu'à rupture (Figure 7 B).

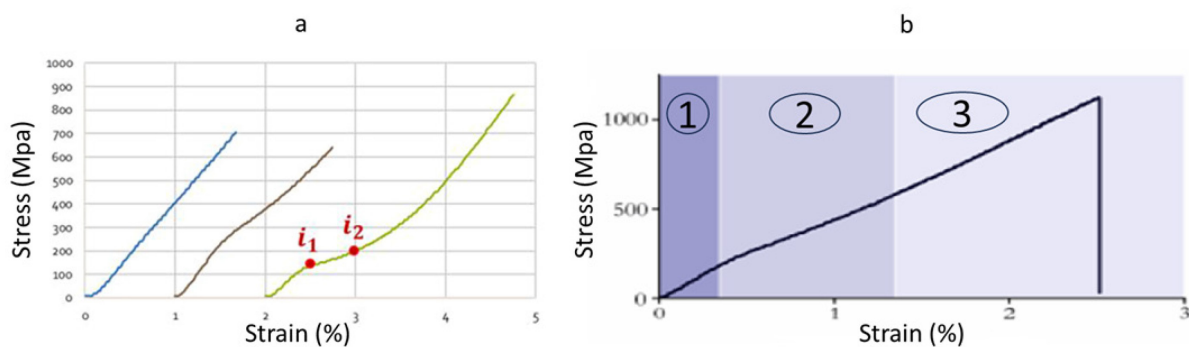


Figure 7 : Comportement en traction d'une fibre unitaire : A Les différents types observés [53] , B Les différentes phases du comportement de type III [54]

La phase non linéaire (2) Figure 7.B et Figure 7 A entre les points d'inflexion i_1 et i_2) observée dans le type III serait en partie due à la réorientation des microfibrilles au sein de la fibre unitaire induite par la contrainte de cisaillement due à l'organisation interne hélicoïdale des microfibrilles [55–58] . Placet et al, propose qu'en plus de la réorientation des microfibrilles, une réorganisation de la structure interne de la zone amorphe des fibres unitaires (composée notamment d'hémicellulose) avec la rupture de liaison chimique (phénomène de stick-slip) a lieu au même moment. Cette double réorganisation provoque ainsi une baisse de la rigidité de la fibre [59]. On peut remarquer de plus, que plus l'angle microfibrillaire est faible, plus la rigidité est élevée et plus l'angle microfibrillaire est initialement élevé, plus la phase de réorganisation est importante [56].

La création de nouvelles liaisons bloque ensuite les microfibrilles dans une nouvelle orientation ce qui explique en partie la phase de ré-augmentation de la rigidité (3). Astley et al. [32] proposent que la non-linéarité observée dans la dernière phase soit due au réalignement réversible des microfibrilles dans les zones de présence de kink-bands.

Il est ainsi important de constater qu'une non-linéarité peut exister dans le comportement en traction de fibres unitaires sans que celle-ci soit systématiquement significative.

Propriétés mécaniques en traction

D'après la littérature, les fibres unitaires ont des propriétés en traction semblables aux fibres de verre avec des modules apparents (extrait de la zone linéaire Figure 7) aux alentours de 35-80 GPa et une contrainte à rupture d'environ 600 à 1200 MPa [6, 20, 21, 28, 29, 55, 58, 60–74].

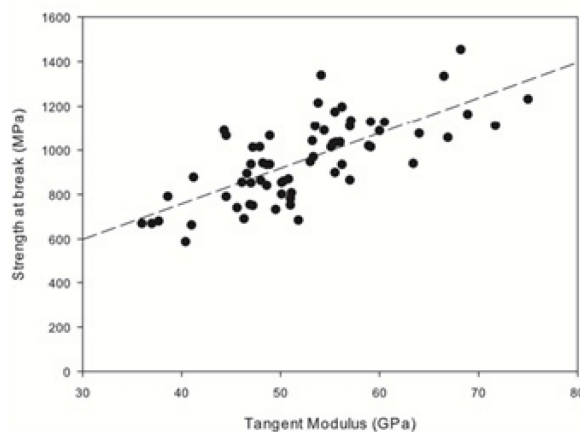


Figure 8 : Comparaison de module tangent et contrainte moyenne à rupture de fibres unitaires [61]

La Figure 8 montre qu'il existe une grande dispersion des propriétés obtenues. L'une des causes avancées pour expliquer ce phénomène provient de la variabilité de sections apparentes des fibres unitaires (Figure 2), engendrant des variations locales de module (plus le diamètre de la fibre est grand et plus le module diminue). D'après Baley [55], cette augmentation du diamètre proviendrait de l'augmentation de la taille du lumen même si cela n'a pas été confirmé dans l'étude de Placet et al. [59]. Toutefois les études qui s'y sont intéressées n'ont pas mis en évidence ce lien [20, 59]. Finalement, la composition biochimique de la fibre unitaire et l'orientation des microfibrilles semblent être le facteur prépondérant dans cette variabilité et est due principalement aux conditions environnementales subies par la plante (b) lors de sa croissance.

b. Fibres techniques et faisceaux de fibres

Remontons maintenant d'une échelle dans la structure du roving pour considérer le faisceau de fibres et la fibre technique.

Forme de la courbe

Concernant la forme de la courbe, il est intéressant de noter que le type de comportement observé pour les faisceaux de fibres et les fibres techniques est de la même nature que celui de la fibre unitaire (Figure 9). Les fibres techniques et les faisceaux étant des assemblages parallèles de fibres unitaires reliées par la lamelle mitoyenne, la non linéarité constatée est, a minima, un héritage du comportement des fibres unitaires et est due au moins en partie au même réarrangement interne lors du chargement [75]. Le déroulement de l'essai présente toutefois une particularité. En effet, lors du chargement en traction, on peut observer [24, 76]:

- Une rotation du faisceau plus ou moins importante suivant les échantillons
- Une ségrégation des fibres unitaires au sein du faisceau avec la présence d'un délaminage qui augmente artificiellement le diamètre du faisceau
- Une rupture brutale sans signe préalable du faisceau complet avec une rupture dispersée des fibres unitaires le long du faisceau

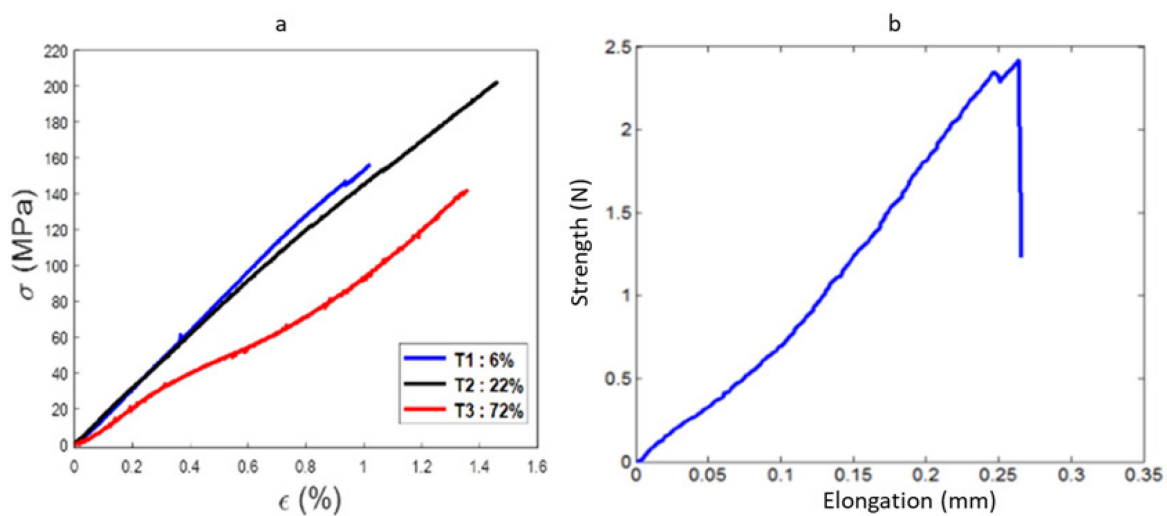


Figure 9 : Comportement en traction des types I à III de faisceaux de lin avec répartition du pourcentage de chaque type dans les essais (à gauche) [77] et d'une fibre technique (à droite) [76]

On peut noter d'après Gogoli [24] que la rotation du faisceau peut être observée jusqu'à la rupture. En effet, cette étude émet l'hypothèse que si les faisceaux, de par les différentes orientations des microfibrilles, ont un vrillage initial, alors l'application du chargement en traction va s'opposer au

vrillage de la section. Si celui-ci est trop important alors la rupture peut avoir lieu avant que les sections soient redevenues droites.

Rupture

Comme pour les fibres unitaires, la rupture des faisceaux et fibres techniques peut être fragile mais peut aussi survenir par la rupture ou par la décohésion successive des fibres unitaires. Des études sur les faisceaux montrent que l'amorce de la rupture s'effectue dans la lamelle mitoyenne [78–80] et se propage plus facilement avec des défauts d'orientation (kink-band voir § 4.A) ou de manque de microfibrilles au sein de la fibre unitaire. En effet, nous avons vu dans le paragraphe précédent que lors du chargement il survient un délaminage des fibres unitaires. Cela est due au fait que lors d'un chargement en traction, la lamelle mitoyenne qui a pour rôle de distribuer l'effort [53], se retrouve contrainte à la fois en traction et en cisaillement [24]. Dans le cas où la lamelle mitoyenne est plus tenace que les fibres unitaires (notamment dans les zones avec de nombreux kink bands), la rupture est transversale au faisceau et se propage à travers les fibres unitaires et dans le cas inverse, la fissure se propage longitudinalement avec le délaminage des fibres unitaires [24].

Propriétés mécaniques en traction

Les études qui s'intéressent aux propriétés des faisceaux montrent une baisse de la contrainte à rupture par rapport aux fibres unitaires, liée à la longueur de jauge testée (Figure 10).

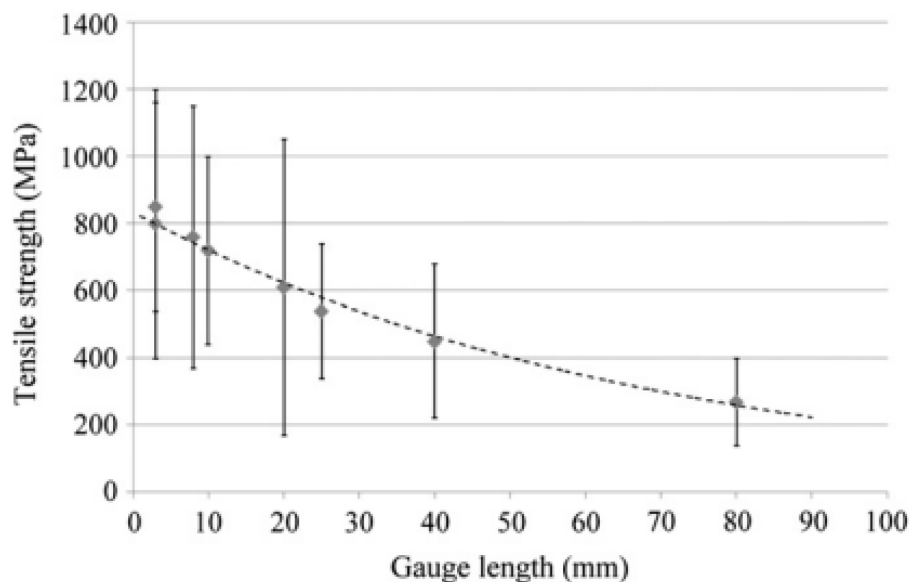


Figure 10 : Dépendance des propriétés mécaniques des faisceaux de lin à la longueur de jauge testée [54]

Cela dit, plus la longueur de jauge est faible et plus la contrainte à rupture est semblable à celui des fibres unitaires. D'une part cela s'explique par le fait que plus la longueur de jauge est faible et plus les fibres unitaires sont sollicitées en tension sans intervention de la lamelle mitoyenne. De plus, la probabilité de présence de défaut critique au sein de l'échantillon augmente avec la longueur de jauge et la rupture survient donc plus tôt. Concernant le module longitudinal, là aussi une baisse est constatée et est liée à la taille de la section [24, 81]. En effet, plus la section augmente et plus la possibilité d'une forte contrainte de cisaillement de la lamelle mitoyenne augmente, et avec elle les phénomènes de délaminage. Cela crée ainsi de la discontinuité dans le réseau fibreux, et réduit ainsi le nombre de fibres qui contribuent à la rigidité.

On peut enfin noter ici que les études ne montrent pas d'influence de la vitesse de sollicitation sur les propriétés mécaniques du faisceau[24]. Bien que l'allure de la courbe de chargement des faisceaux et fibres techniques soit semblable à celle des fibres unitaires, le comportement en traction jusqu'à la rupture est impacté par la présence de la lamelle mitoyenne qui a pour rôle de distribuer l'effort. Il est ainsi évident qu'il sera difficile d'estimer les propriétés mécaniques des faisceaux et fibres techniques à partir des fibres unitaires et qu'il en sera de même pour le roving.

c. Roving

Typologie du comportement

Le roving étant une combinaison d'assemblage de fibres techniques (faisceaux de fibres et fibres unitaires), la forme de la courbe de chargement en traction est logiquement du même type que pour les structures précédentes. Toutefois, on peut noter une inversion des phases linéaires et non-linéaires tels que la phase II est linéaire et est encadrée par deux phases non-linéaires (Figure 11).

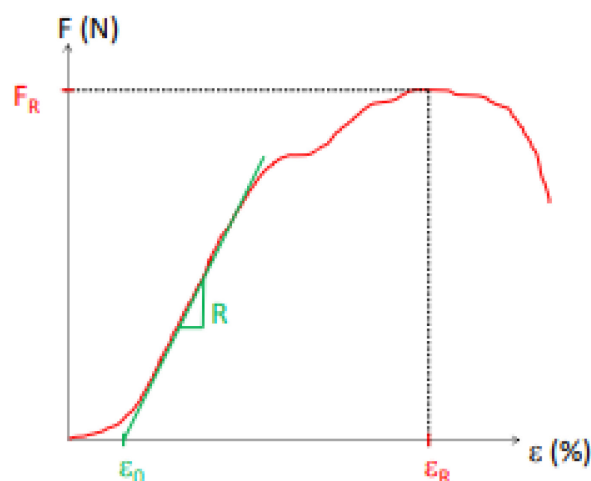


Figure 11 : Représentation d'une courbe typique obtenue avec un roving de lin [82]

De plus, dans certains cas, il est possible d'observer plusieurs pentes lors de la phase linéaire qui semblent être liées à l'agencement et à l'apparition des différents types de chargement de la fibre unitaire. La phase I observée sur les fibres unitaires représente une faible portion de la déformation. De plus, les essais sur roving étant généralement conduits avec une précharge initiale permettant de garantir des conditions initiales identiques pour la répétabilité des essais, il se peut que la phase linéaire initiale (Figure 7 A) des fibres unitaires ne soit pas visible lors des essais de traction sur roving. Ainsi, si la non-linéarité initiale de la courbe de chargement du roving peut s'expliquer par la réorientation des microfibrilles des fibres unitaires de chaque fibre technique, elle peut aussi être accentuée par la présence de l'ensimage entre les fibres techniques qui perturbe la mise en tension et empêche la rotation des fibres techniques.

On peut ainsi noter qu'une phase supplémentaire, non-linéaire, est donc visible sur les essais de traction des rovings liées à la rupture à la fois de fibres techniques et de fibres unitaires et au basculement de la charge sur les constituants pouvant encore le supporter.

Concernant la rupture du roving on observe deux possibilités (Figure 12). Soit une rupture fragile comme la fibre unitaire soit une rupture par palier des paquets de fibres techniques :

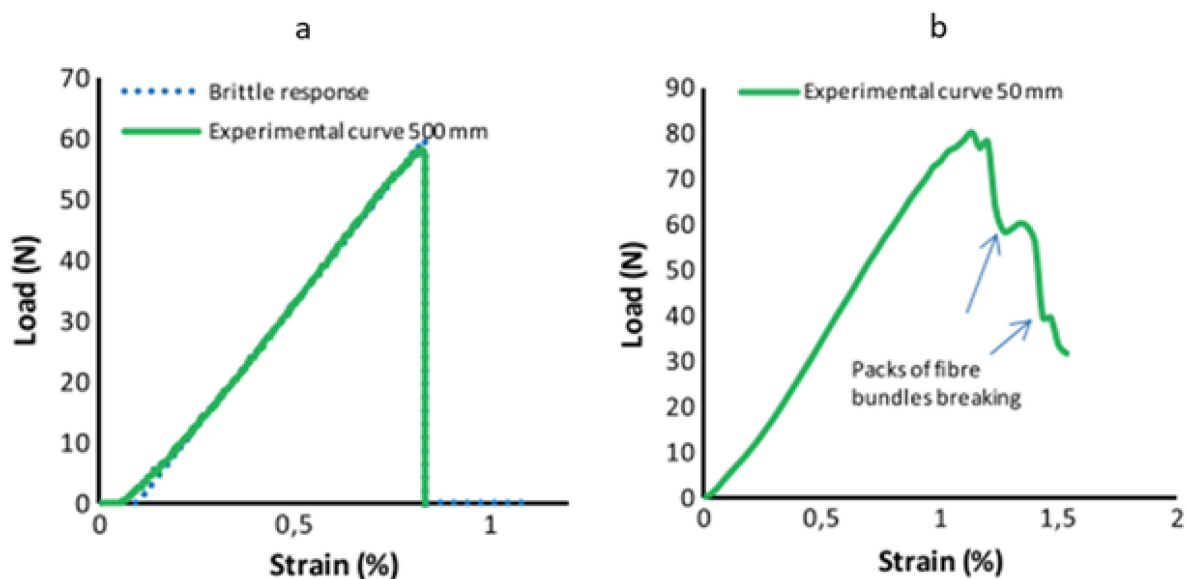


Figure 12 : Comportement en traction d'un roving avec fil d'âme (rupture fragile et ruptures successives) [83]

D'après Moothoo [83], le mécanisme de rupture du roving dépend de la longueur de jauge testée et des phénomènes de cohésion prédominants entre les fibres pour ces différentes longueurs de jauges. En effet, pour de faibles longueurs de jauge (ici 4mm), les fibres unitaires des fibres techniques sont majoritairement maintenues d'un bout à l'autre de l'éprouvette même en cas de décohé- sion de la

lamelle mitoyenne. Mais avec l'augmentation de la longueur de jauge, les fibres unitaires sont mises en tension à travers la lamelle mitoyenne ce qui va provoquer un retard de la propagation et une rupture par paquets successifs. Enfin, pour les grandes longueurs de jauges, le liant devient l'agent de cohésion prédominant et la rupture se produit dans le liant impliquant de nouveau une rupture fragile.

Propriétés mécaniques en traction

Dans la littérature, on utilise pour caractériser les propriétés en traction des rovings, le module d'Young longitudinal et la contrainte à rupture qui dépendent de la section du matériau considérée. Dans le cas du roving, comme pour n'importe quel matériau hétérogène, il est possible de définir deux contraintes :

- Une contrainte homogène équivalente, qui est une contrainte moyenne, considérant la section d'enveloppe du roving (Figure 13). C'est cette contrainte qui sera à considérer dans une modélisation à l'échelle mésoscopique des mèches et des renforts, dans lesquelles le roving est approché par un milieu homogène équivalent.
- Une contrainte « matérielle » définie comme la somme des contraintes dans les matériaux constitutifs, ici, au premier ordre, les fibres unitaires. Cette contrainte est directement le reflet du nombre de fibres techniques, et donc de fibres unitaires en tension (3) et permet de comparer les propriétés des rovings aux propriétés des fibres unitaires.

Ainsi, dans le premier cas, on utilise la section « apparente » ou enveloppe du roving et dans le deuxième cas on calcule la somme des sections des fibres présentes dans la section de roving (Figure 13). Celle-ci peut donc être obtenue à partir du titre et de la densité des fibres (Équation 3).

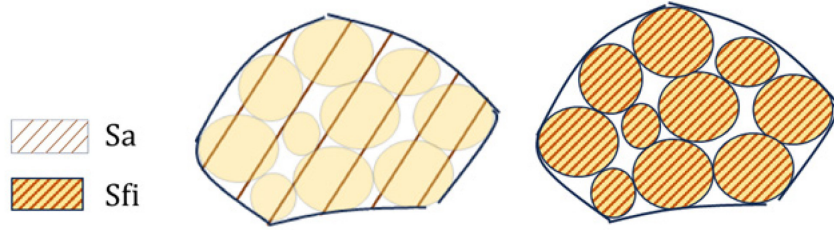


Figure 13 : Estimation de la section du roving pour chaque méthode

$$\sigma_1 = \frac{\sum \vec{n}}{S_a} \quad \text{Équation 2}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sum \vec{n}}{\sum S_{fi}} = \frac{\sum \vec{n}}{T/d_{fi}} \quad \text{Équation 3}$$

Avec

- $\sum \vec{n}$: la résultante des efforts dans l'axe de traction (N)
- T : le titre en (g/km)
- d_{fi} : la densité de la fibre de lin

Dans les deux cas, cette section est donc complexe à obtenir et ce pour différentes raisons. Premièrement, les fibres techniques et donc le roving ont des sections non constantes (2.a Structure de la tige de lin) et il est donc difficile d'attribuer une section unique pour le calcul du module longitudinal.

Concernant la seconde méthode il y a non seulement une difficulté sur la valeur de la densité du lin (entre 1.4 et 1.56 g/cm³) dépendant de la méthode de détermination [84] ou de l'humidité ambiante [85, 86] mais le titre est déterminé pour de grandes longueurs de rovings très supérieure à la longueur d'éprouvette testée et ne prends donc pas en compte les variations locales de la répartition de masse au sein du roving. En effet, F.Omrani [87] vérifie le titre de ces fils et rovings en mesurant la masse de 5 échantillons de 10m de long suivant la norme NF EN ISO 2060. Sur le roving étudié, qui est un roving non ensimé et peu retordu, les résultats montrent une variation de 5.7% du titre par rapport à la valeur nominale. Concernant les rovings ensimés il y a en plus à prendre en compte le taux d'ensimage utilisé. Ainsi, sur des éprouvettes de faibles longueurs la répartition de fibres au sein du roving peut être différentes de celle attendue.

Ces difficultés de calcul de la section vont entrainer une augmentation de la variabilité des résultats bien que cette variabilité soit de plus en plus faible avec l'augmentation de l'échelle d'observation

(fibre unitaire/faisceau/mèche) due à une homogénéisation des arrangements [85, 88]. Dans son étude, Aldroubi [85] constate une forte diminution de la force à rupture entre les différentes échelles (fibres unitaires, faisceaux, roving, tissu) mais un module et une déformation à rupture proche entre l'échelle du roving et du tissu.

Enfin, concernant la détermination des propriétés mécaniques, on peut noter que le module déterminé est un module tangent qui est déterminé par une approximation linéaire de la phase II et qui peut présenter plusieurs inflexions/pentes. Il devient ainsi difficile d'approximer linéairement la courbe.

Pour ce qui est de la détermination d'un panel de valeurs de contraintes à rupture et de modules tangents il est assez difficile de se prononcer. D'une part aux vues des considérations précédentes, les études, peu nombreuses, donnent des résultats différents. Cela peut être dû d'une part pour le module tangent à une désorganisation initiale prononcée et à une difficulté de mettre en tension toutes les fibres techniques au sein du roving. En effet, les fibres techniques utilisées étant discontinues et maintenues par un liant il est clair que les fibres ne participent pas simultanément à la mise en tension du roving ou alors de manière retardée ce qui influe sur la rigidité en tension. Cela conduit à des valeurs plus faibles du module pour le roving que pour les fibres unitaires car la contrainte moyenne ne prend pas en compte le rebascullement de la charge dans le cas où les fibres ne sont pas toutes en tension lors du chargement.

D'autre part concernant la contrainte à rupture, les fibres unitaires sont des fibres très courtes de l'ordre de quelques millimètres alors que les rovings vont être testés sur de plus grandes longueurs. L'augmentation de la longueur d'éprouvette va introduire plus de défauts critiques dans l'éprouvette ce qui va entraîner une rupture pour un effort plus faible pour les rovings que pour les fibres unitaires.

A la difficulté de détermination de ces propriétés mécaniques s'ajoutent une grande dispersion des résultats obtenus pour des longueurs d'éprouvettes équivalentes comme le montre F. Omrani[89] en réalisant 20 essais sur des roving de 250mm de long. La dispersion des résultats est plutôt conséquente car les valeurs varient du simple au double. Cette grande dispersion s'observe aussi pour les fils et rovings (Figure 14).

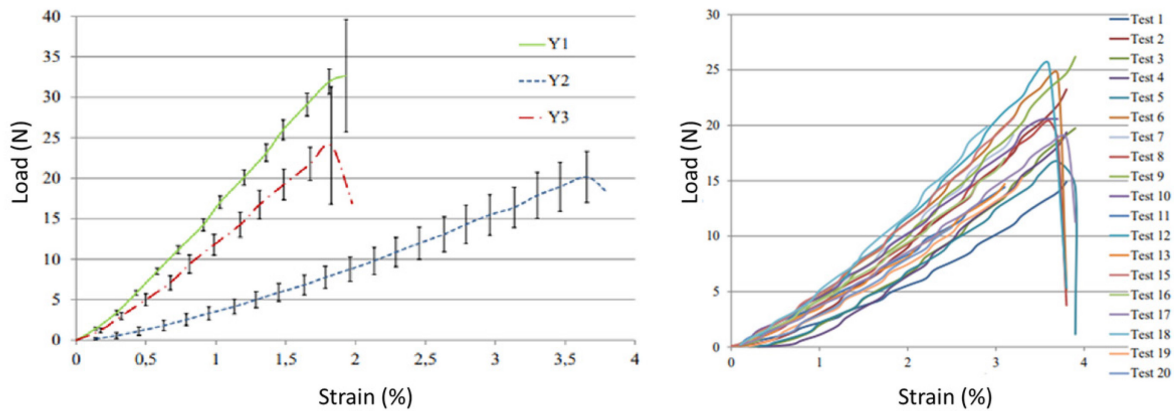


Figure 14 : Résultats d'un essai de traction sur 2 fils (Y1, Y2) et un roving (Y3) et dispersion des résultats pour le roving Y3 [89]

Au vu de ces grandes dispersions de résultats pour un même roving, il est nécessaire de mener des études avec un assez grand nombre d'essais afin d'avoir une vue statistique des propriétés recherchées. Au-delà de cette dispersion rencontrée pour une même structure qui peut être adressée par un nombre important d'essais, de nombreux paramètres peuvent impacter le comportement mécanique des rovings. Il est donc nécessaire d'identifier ces différents paramètres et d'étudier leurs impacts.

d. Paramètres influents

Facteurs influents sur les propriétés des fibres

Les rovings étant constitués de fibres techniques (faisceaux affinés composés de fibres unitaires assemblées à l'aide d'une lamelle mitoyenne) les facteurs influents sur les fibres unitaires et la lamelle mitoyenne peuvent impacter le comportement du roving. Dans ces paramètres on retrouve :

- Les paramètres de culture de la plante :

En effet, bien que la sélection variétale ne soit pas un facteur influent sur les propriétés des fibres [67, 90–92], on remarque que les conditions climatiques de culture de la plante, ainsi que le taux de rouissage, influencent les propriétés mécaniques de la fibre de lin. L'augmentation du rouissage, par la meilleure dissociation des fibres unitaires avec la lamelle mitoyenne, permet d'augmenter, jusqu'à un taux de rouissage optimum, les propriétés mécaniques de la fibre unitaire [6, 61, 64, 93]. Toutefois, cela dégrade les propriétés des faisceaux de fibres [6, 93–95] (Figure 15 et Figure 16) car le rouissage dégrade la lamelle mitoyenne qui sert d'interface et permet de répartir la charge entre les fibres unitaires au sein du faisceau.

Batch	Batch diameter (μm)	Tensile test diameter (μm)	E (Gpa)	σ (Mpa)	A (%)
R1	13.3 ± 4.4	14.0 ± 2.7	38.6 ± 17.3	792 ± 374	2.2 ± 0.7
R3	13.0 ± 4.0	14.5 ± 2.6	48.6 ± 11.8	935 ± 317	2.2 ± 0.7
R6	14.8 ± 4.4	15.9 ± 2.5	55.6 ± 11.8	1036 ± 270	1.9 ± 0.5

Figure 15 : Propriétés en traction de fibres unitaires pour différents taux de rouissage [6]

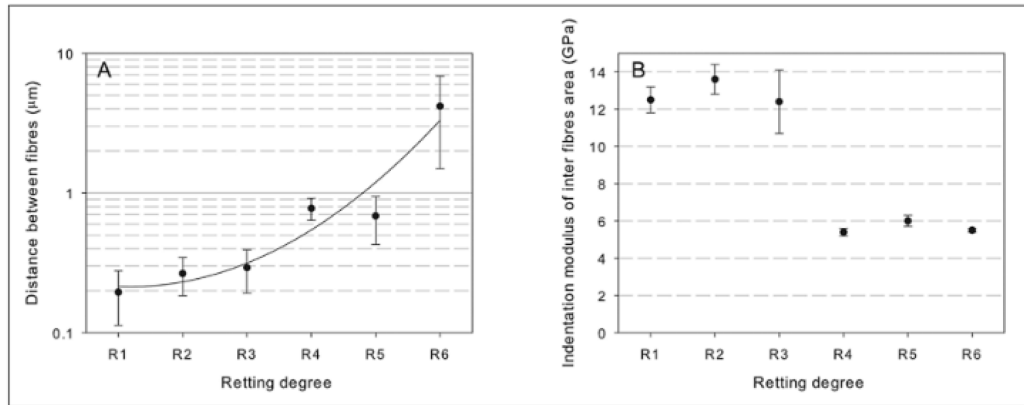


Figure 16 : Evolution de la distance entre les fibres unitaires au sein d'un faisceau (A) et module de la lamelle mitoyenne obtenu par indentation (B) pour différents niveaux de rouissage. Les indicateurs R1 à R5 correspondant à du lin sous-oui et R6 correspond au taux de rouissage privilégié aujourd'hui par les industriels [93]

Nilsson [96] montre à partir d'une simulation qu'en moyenne les faisceaux de fibres modélisés ont une meilleure contrainte à rupture que les fibres unitaires sur certaines longueurs de jauge mais que le moindre affaiblissement des caractéristiques de la lamelle mitoyenne amène une chute drastique de la contrainte à rupture des faisceaux. Toutefois, les fabricants de roving assemblent différents lots de lin afin d'atténuer ce phénomène dans le roving.

Bien que les conditions de cultures diffèrent d'une parcelle et d'une année sur l'autre, l'assemblage des différents lots réalisés par les fabricants permet d'assurer une certaine pérennité des résultats obtenus pour une utilisation sur le long terme.

- Les paramètres d'extraction des fibres :

Comme expliqué au I.A.1.b§ (Figure 3), les tiges de lin sont teillées puis peignées afin d'obtenir les fibres techniques, Le peignage va permettre d'individualiser plus ou moins finement les faisceaux afin d'en obtenir des fibres techniques. Du point de vue du composite il est très intéressant d'avoir le plus possible de faisceaux affinés, voire de fibres unitaires, non seulement pour les propriétés mécaniques mais aussi car il est plus simple d'imprégner

de résine des fibres unitaires que des faisceaux puisqu'ils comportent moins de lamelle mitoyenne, qui sont un frein à l'imprégnation. Barbulée [26] a étudié les effets du teillage sur les propriétés des fibres unitaires et des faisceaux et montré qu'un bon degré de rouissage permet de diminuer la sévérité du teillage mais que le teillage a tendance à diminuer le module de la fibre unitaire en favorisant l'apparition de ce qu'il appelle des genoux (aussi appelé kinks bands Figure 17 [97]). C'est aussi ce que constate Morgillo [36] en étudiant différents lots ayant subi un teillage plus ou moins sévère. La sévérité du teillage augmente le nombre de kink bands observés et la taille des défauts ne semble pas être à l'origine de la baisse du module.

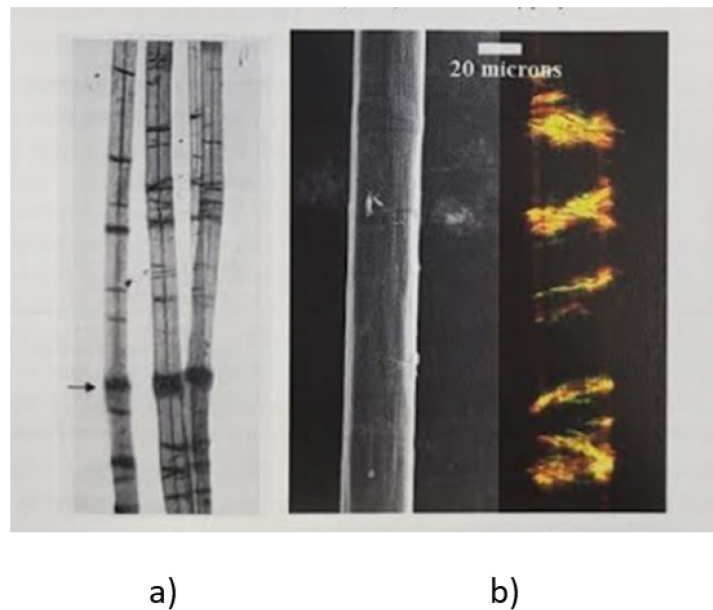


Figure 17: a) Observation des défauts au microscope polarisé dans des fibres de lin [34] b) Observation de défauts en surface d'une fibre de chanvre (MEB) et de cette fibre en lumière polarisée [98]

Cela dit, les fibres techniques subissent le peignage après les étapes de teillage. Or, cette étape de la fabrication a tendance à supprimer les fibres techniques les moins résistantes. Ainsi, bien que l'on observe des fibres avec de nombreux kinks bands [27, 57, 79, 99, 100], la qualité moyenne du lot a une meilleure résistance mécanique qu'observée juste après le teillage. Ce qui semble en cohérence avec les récentes avancées sur l'impact des kink-bands sur les propriétés mécaniques des fibres [36, 52, 101].

Les défauts engendrés par le procédé de fabrication est un facteur clé qu'il sera très difficile à intégrer dans une loi de comportement mais qui va induire une variabilité substantielle dans le comportement

mécanique de rovings de même titre fabriqué avec des stratégies et des paramètres procédés différents.

- L'humidité relative :

Les fibres de lin étant sensibles à l'eau [42, 102–104], la variation de l'humidité relative entraîne des changements de propriétés et notamment une baisse du module (Figure 18). C'est ce qu'a constaté Barbulée [27] sur des fibres unitaires et des faisceaux en comparant le module pour une humidité relative de HR=20% aux résultats pour des humidités plus élevées.

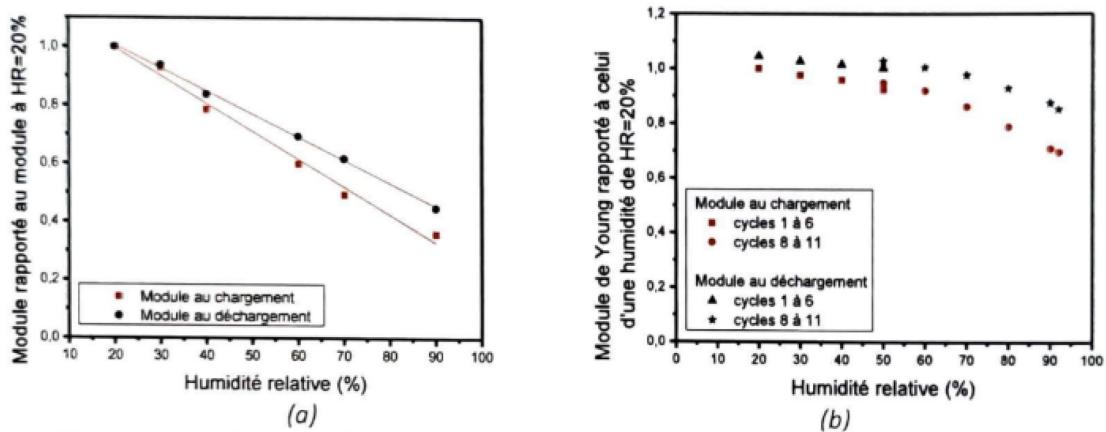


Figure 18 : Décroissance du module de la fibre unitaire (a) et du faisceau (b) [27]

Deux choses sont intéressantes à noter. Premièrement, la décroissance du module est plus importante pour les fibres unitaires que pour les faisceaux ; ce qu'explique Barbulée [27] par le fait que la lamelle mitoyenne qui sert d'interface aux fibres unitaires dans les faisceaux est peu sensible à l'eau. Deuxièmement, dans le cas qui nous intéresse (c'est-à-dire celui des faisceaux qui composent en majorité les rovings) on remarque tout de même qu'au chargement il peut y avoir 30% de perte du module entre 20 et 90% d'humidité relative. Il est donc important d'effectuer des essais avec une humidité relative maîtrisée ou contrôlée. L'augmentation de l'humidité relative entraîne aussi une conséquence sur la ténacité des fibres. En effet, en étudiant la réorganisation des microfibrilles lors d'un essai de traction avec différentes humidités relatives, Nuez et al [105] ont constaté que l'augmentation de l'humidité relative ne modifie pas l'angle micro-fibrillaire mais implique une plastification de la phase amorphe qui entraîne une augmentation de la déformation à rupture. Dans ce sens, Baley et al [5] montrent qu'une fibre humidifiée puis séchée ne recouvre pas de meilleures propriétés.

En conséquence, les essais sur rovings doivent donc être réalisés en contrôlant l'humidité relative afin de prendre en compte cet aspect dans l'analyse des résultats.

Ces facteurs ne sont pas les seuls à considérer pour le comportement mécanique des rovings, il faut également prendre en compte les facteurs liés à l'architecture du roving.

Facteurs liés à l'architecture du roving

- La longueur de jauge :

Sur les rovings tout comme sur les faisceaux de fibres et les fibres unitaires (Figure 19) que la longueur de jauge testée a un impact sur les propriétés mécaniques.

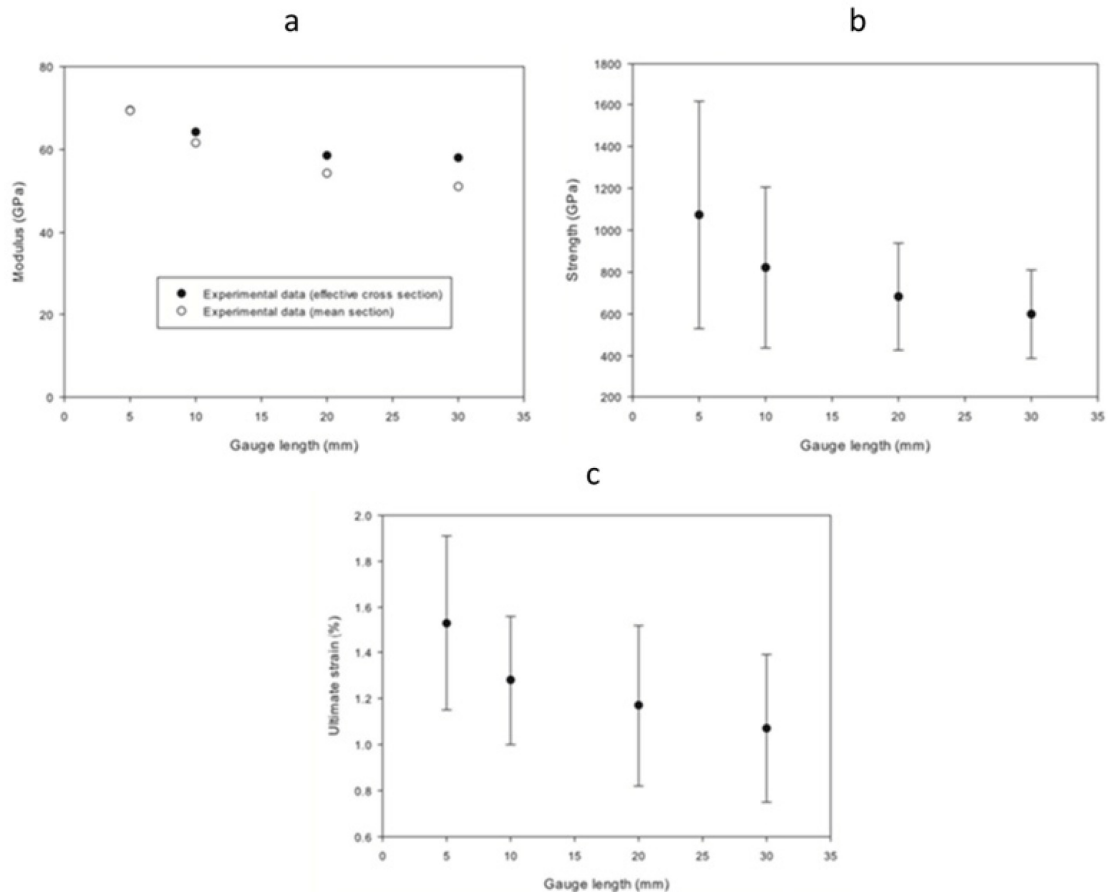


Figure 19: Variation du module (A), de la contrainte à rupture (B) et de la déformation (C) d'une fibre unitaire en fonction de la longueur de jauge [27]

Dans les essais de Moothoo [83], on constate une diminution à la fois de la contrainte à rupture et du module longitudinal du roving avec l'augmentation de la longueur de jauge. Si cela est classique pour les matériaux pour la contrainte à la rupture du fait de la probabilité d'apparition des défauts, c'est plus rare concernant la rigidité.

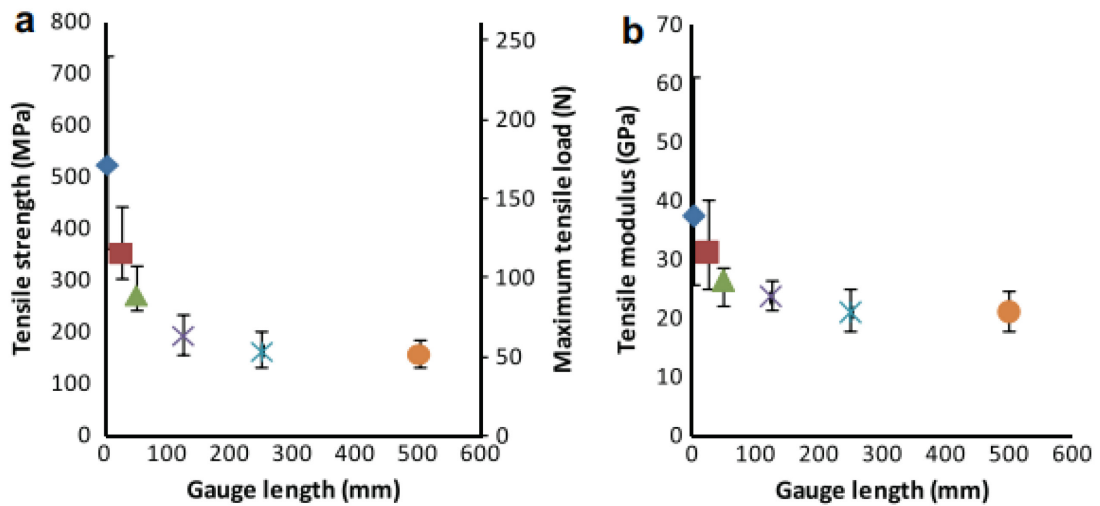


Figure 20 : Contrainte (à gauche) et module (à droite) en fonction de la longueur de jauge pour un essai de traction sur un roving [83]

Cela peut être expliqué par différents phénomènes. Tout d'abord, le roving est constitué de fibres discontinues. Or comme il a déjà été remarqué en II.3.b dans le cas où la longueur de jauge est faible, il est possible d'avoir entre les talons de l'éprouvette des fibres techniques et unitaires maintenues de bout en bout et les propriétés constatées sont ainsi proches des fibres unitaires (on se place dans le cas d'équi-tension de faisceaux comme les essais de Barbulée [26]). D'ailleurs pour les faibles longueurs de jauge il est possible d'écrire le comportement en traction avec une loi de Weibull [80] qui est utilisée pour les fibres continues. Mais plus la longueur de jauge augmente et plus la charge va être transférée tout d'abord par les interfaces entre les fibres unitaires (la lamelle mitoyenne) puis pour d'encore plus grandes longueurs de jauge par les interfaces entre les fibres techniques (le liant) et on récupère donc les propriétés à rupture du liant. Ce point sera développé dans le paragraphe suivant.

Cette dépendance des propriétés à la longueur de jauge provient aussi de la distribution des défauts (kinks bands et autres) et des variations de section dans la fibre unitaire qui augmente avec la longueur de jauge testée. Ainsi, plus la longueur de jauge augmente pour le roving, plus la distribution de défauts, et donc de défauts critiques, augmente. De plus, nous avons vu en 2.a que les faisceaux ont des interruptions de fibres ce qui rend difficile l'estimation de la section réelle en tension. Barbulée [26] estime que sur 20mm de roving on a 7% des fibres techniques (faisceaux) qui sont interrompus et 22% pour une longueur de 50mm. L'erreur de section pourrait donc augmenter la perte de propriétés mécaniques constatée. On remarque tout de même qu'il y a une stabilisation du module et de la contrainte à rupture à partir de 250mm dans les essais de Moothoo[83] qui correspond au moment où toutes les fibres ne sont

plus maintenues de part et d'autre de l'éprouvette et la charge est donc répartie uniquement à travers le l'ensimage.

L'étude des propriétés en traction doit donc prendre en compte cet aspect en réalisant des essais à différentes longueurs de jauges avec des longueurs proches de celles des fibres unitaires et de grandes longueurs supérieures à la longueur des fibres techniques (autour de 30cm).

- Rôle de l'ensimage :

L'ensimage joue un rôle important dans le maintien de la cohésion des fibres lors du tissage. De plus, il permet d'éviter une partie de la dégradation des fibres au sein du roving lors du tissage en agissant comme un agent protecteur. Il joue également un rôle dans la rupture du roving lorsque celui-ci est sollicité à partir d'une certaine longueur de jauge. Moothoo [83] afin d'en étudier l'effet a réalisé un essai sur une éprouvette de 250mm pour deux rovings d'ensimages différents. Il constate des modules équivalents mais des contraintes et déformations à rupture qui varient de 50%. Capelle [82] a quant à elle étudié l'impact du pourcentage d'ensimage(Figure 21). Il apparait que lorsque le taux d'ensimage augmente, à la fois le module longi, l'effort et la déformation à rupture augmentent :

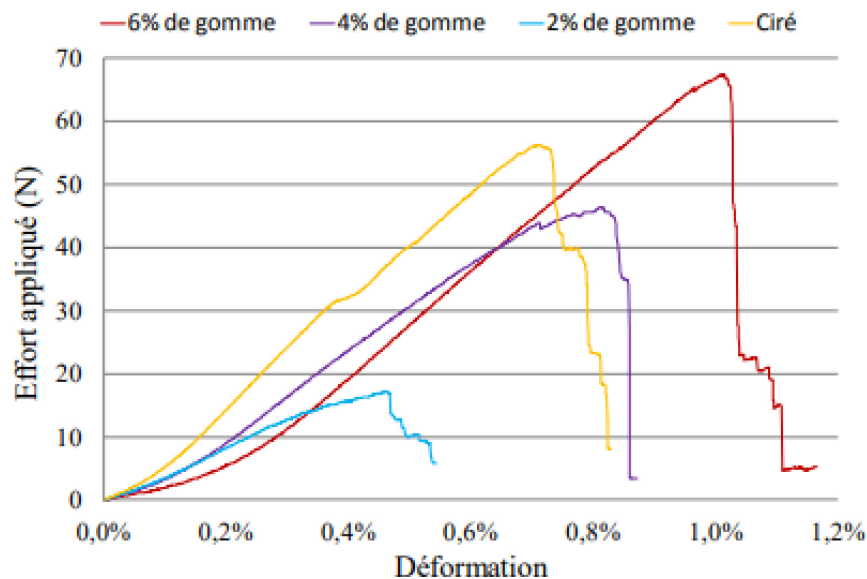


Figure 21 : Essais de traction de rovings avec différents taux d'encollage [82]

Sur ces essais la partie non linéaire en début de courbe est également plus importante pour le taux d'ensimage le plus élevé, mettant en évidence son rôle dans la mise en tension des fibres au sein du roving.

Tout comme pour les défauts engendrés par le procédé de fabrication, l'impact spécifique de l'ensimage ne sera pas étudié. Toutefois, un changement du taux et de la nature du liant utilisé conduira à une nouvelle campagne d'essais.

- La régularité du roving :

Nous avons vu précédemment que les propriétés issues des essais de traction sont influencées par la variabilité à la fois de la distribution de fibres au sein du roving mais aussi par la variabilité de section des fibres qui le composent. Omrani [OMR17] afin de caractériser et comparer la variabilité au sein de lots de fils et de rovings utilise un critère de régularité. Ce critère se décompose par l'étude de l'irrégularité, la pilosité, la finesse, la grosseur et les boutons (aussi appelés neps). L'irrégularité consiste à mesurer la variation de masse au sein de l'échantillon et est notée U%. Ce critère est intéressant car comme nous l'avons vu en II.4, la variation de densité et donc de titre au sein du roving rend l'exploitation des propriétés mécaniques difficile. Cette variation peut aussi expliquer une plus forte variabilité des résultats observés aux faibles longueurs de jauges avec des éprouvettes contenant une densité de fibres différentes. Les critères de finesse et de grosseur permettent de représenter les variations de sections avec la caractérisation du nombre de sections inférieures ou supérieures à 50% de la valeur nominale. Les boutons qui sont des défauts liés à la finesse de la fibre sont comptabilisés par le nombre de sections dépassant 200% de la valeur nominale. Le dernier critère, qui est la pilosité, est particulièrement intéressant. En effet, il représente les fibres s'échappant du fil ou du roving. Pour un roving, les fibres s'échappant du roving ne participent plus lors de l'essai de traction et ont, de plus, tendance à perturber les mesures des sections du ruban. Un dernier paramètre sur le roving peut influencer les résultats, il s'agit de l'alignement des fibres au sein du roving. En effet, lorsque des fibres ne sont pas alignées lors de l'essai un phénomène de mise en tension progressive et asynchrone de l'effort peut avoir lieu. Ce phénomène de retard est observé par Moothoo[83] pour des longueurs de jauges autour de 50mm. Il y observe une rupture successive par paquet de fibres potentiellement liée à un désalignement des fibres techniques. Pour des éprouvettes de faibles longueurs ce désalignement est aussi une cause de la plus grande disparité des résultats observés car la rupture peut s'être produite avant l'alignement complet et des fibres ne vont donc pas participer à l'effort. Là encore la présence du liant peut être un frein au réalignment des fibres.

Concernant la pilosité des rovings, ce paramètre pourrait permettre de caractériser le pourcentage de fibres qui ne participent pas lors de l'essai et permettre de classer les résultats. Afin d'amoindrir le phénomène de perturbation de la mise en tension, de stabiliser et donc d'assurer une répétabilité de

l'état initial de l'échantillon, une précharge généralement d'environ 2 à 2.5N est appliquée en début d'essai.

- La vitesse de déformation :

Les fibres de lin étant considérées comme un matériau viscoélastique [17, 76], la vitesse de déformation appliquée lors des essais de traction influent sur les propriétés mécaniques. En effet, Moothoo [83] constate bien une dépendance du module et de la contrainte à rupture avec l'augmentation de la vitesse de déformation avec une augmentation respective de 26 et 14 % de la contrainte et du module pour une augmentation de la vitesse de déformation de $1,3 \times 10^{-4}$ à $1,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. L'augmentation supplémentaire de la vitesse de déformation ($1,3 \times 10^{-2}$) n'a ensuite que peu d'impact sur ces propriétés (209 ± 20 à $220 \pm 7 \text{ MPa}$ pour la contrainte à rupture et 25 ± 3 à $26 \pm 0.5 \text{ GPa}$ pour le module tangent).

Cependant, dans le contexte de cette étude, il n'est pas nécessaire de prendre en compte cette dépendance à la vitesse de sollicitation car les procédés de mises en forme s'effectuent dans un spectre de faibles vitesses de sollicitations ; seule l'étude de la dégradation des propriétés s'avère nécessaire. Afin d'effectuer des essais quasi-statiques, une vitesse de déformation comparable à celle appliqué par Moothoo [83] de $1,3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ sera utilisée lors des essais présentés au chapitre III.

Une fois les différents paramètres influents sur les propriétés des roving pris en compte, il est intéressant de noter qu'il reste encore une grande étape pour parvenir aux renforts et qui est le tissage. En effet, connaître les propriétés des rovings ne peut pas permettre de directement estimer les propriétés des renforts notamment car les rovings vont subir d'intenses sollicitations lors du tissage. [89] Il est donc intéressant d'étudier les impacts de ce procédé de fabrication sur les rovings.

e. Propriétés des rovings avant et après tissage

De nombreux facteurs peuvent influencer les propriétés mécaniques du roving. Que ce soient des facteurs provenant de la culture de la plante, du procédé de fabrication du roving ou des conditions d'essais. Toutefois, il ne faut pas oublier que le roving est un semi-produit qui va permettre, entre autres, la réalisation de renforts. Lors du procédé de tissage, le roving va donc subir des sollicitations qui vont potentiellement affecter ses propriétés mécaniques et donc affecter le comportement du renfort. Afin de déterminer les effets du tissage F.Omrani a réalisé des essais de traction sur mèches avant et après tissage afin d'estimer l'impact du tissage sur l'évolution des propriétés mécaniques [87].

Toutefois, les tests de cette étude n'ont été réalisés que sur des mèches de sens trame et il serait judicieux de les compléter par des tests sur des mèches de chaînes pour analyser la différence entre les deux réseaux.

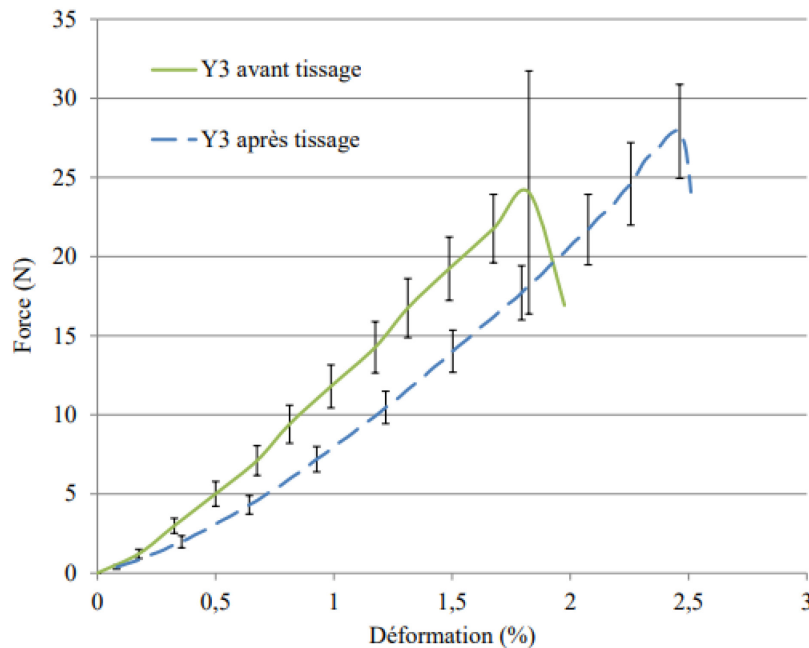


Figure 22: Essais de traction avant tissage et après tissage [87]

Dans cette étude [89], le roving (Y3) est légèrement retordu (115 ± 9 tr/m) et on constate après tissage une augmentation de la déformation maximale de 33% ainsi qu'une augmentation de la non-linéarité initiale avec un point d'inflexion moins prononcé (zone de transition entre les deux premières phases du comportement). On constate sur ces essais que la variabilité à rupture est plus faible après tissage pour un même effort à rupture. Le tissage entraîne donc un endommagement des mèches qui modifie leurs propriétés mécaniques. Le tissage peut, en effet, avoir trois conséquences impactant la rigidité :

- Accentuer l'ondulation des fibres au sein de la mèche (générée par le motif d'entrelacement) et entraîner un alignement plus progressif des fibres lors de l'essai de traction.
- Entraîner la rupture de fibres
- Augmenter la pilosité

Dans les deux derniers cas les fibres ne contribuent donc plus à la rigidité de la mèche.

En conséquence, la détermination précise des propriétés en traction des rovings dans le renfort nécessite de prendre en compte l'étape de tissage. Soit en déterminant l'impact du tissage dans les deux directions, soit en réalisant les essais mécaniques sur des mèches extraites du renfort dans les différentes directions (exemple trame et chaîne pour les renforts 2D). Une étude plus complète

pourrait permettre de donner une idée de l'ordre de grandeur de la dégradation des propriétés mécaniques des rovings lors du procédé de tissage.

2. Comportement en Compression d'un roving de lin

Le comportement en compression des renforts est particulièrement critique dans les procédés de fabrications des composites de type LCM. En effet, la mise en compression des mèches et du renfort (Figure 23) induit des modifications de l'espace poral, ce qui impacte l'étape d'injection. D'après V.Rougier [106], la compression d'un empilement de renforts implique un fléchissement de la structure puis le glissement et l'imbrication des mèches (nesting) (dépendant du nombre de couches de renfort et de l'architecture du tissage [107–109]) et enfin une phase de compression des mèches.

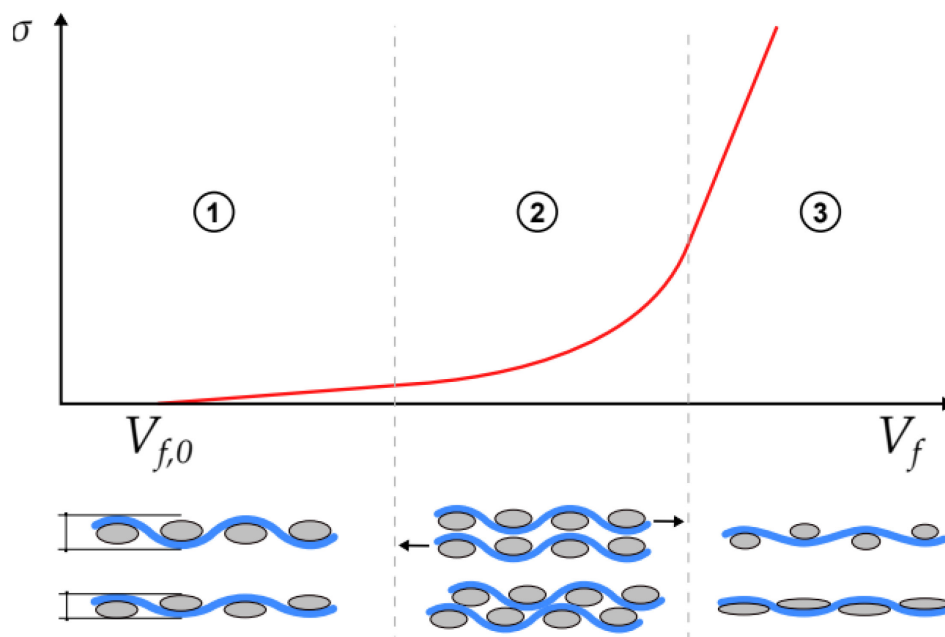


Figure 23 : Représentation de la mise en compression d'un renfort [106]

Il existe de nombreuses études sur les fibres synthétiques décrivant la mise en compression des fibres, mèches et renforts [110–117]. Le comportement en compression des mèches a été observé en microtomographie par P.Latil [118] et est largement dominé par le contact entre les fibres. En effet, ce comportement, non linéaire, peut être décrit suivant trois phases [119]:

- Une première phase dans laquelle la structure se réorganise et l'espace inter-fibres diminue impliquant une forte modification des dimensions de l'enveloppe de la structure pour un faible effort
- Une seconde phase s'ensuit avec la multiplication des contacts inter-fibres qui se traduit par une augmentation de la résistance de la structure à la compression
- Une dernière phase survient avec le blocage du réseau et la déformation des fibres

Plusieurs modèles de comportement en compression des mèches et renforts existent [107, 120–122] dont la plupart sont basés sur un aspect phénoménologique de la compression avec pour grandeur principal la variation de la fraction volumique de fibres au sein de la mèche. La fraction volumique de fibres est la grandeur permettant de décrire la proportion du volume de fibres à l'intérieur de l'enveloppe de la mèche. Le modèle le plus largement utilisé est le modèle de Toll & Manson [123, 124] , qui exprime la pression apparente en fonction de la fraction volumique de fibres, dépendamment de trois paramètres à identifier K_c , γ et Vf_0 (Équation 4).

$$P = K_c * (Vf^\gamma - Vf_0^\gamma) \quad \text{Équation 4}$$

Avec :

- P : la pression apparente moyenne appliquée sur l'échantillon (MPa)
- Vf : la fraction volumique de fibres
- Vf_0 : la fraction volumique de fibres à l'état initial (soit sous pression nulle)
- K_c, γ : deux paramètres à identifier sur les courbes expérimentales, avec γ un paramètre lié à la structure en compression de l'ordre de 5 pour les réseaux 2D et entre 7 et 30 pour les réseaux 1D.

Dans le cas des fibres naturelles, les études sont moins nombreuses [106, 125–130] néanmoins Shah et al [131] montrent une similitude du comportement et des mécanismes mis en jeu lors de la compression des réseaux de fibres naturelles par rapport aux fibres synthétiques. La particularité de la multi-structure des fibres naturelles implique, de la même manière que pour le comportement en traction, qu'il n'est pas envisageable de transposer le comportement des fibres au comportement de la mèche et des essais sur mèches doivent donc être réalisés. Les dynamiques de frottement entre fibres synthétiques montrent que la réorganisation du milieu est facilitée par la présence d'eau ou de lubrifiant, la sensibilité des fibres naturelles aux paramètres ambiants peut donc influencer sur le comportement en compression [132]. Même si l'étude ne porte pas sur les variations de comportement induites par ces phénomènes, un relevé des conditions hydromécaniques sera réalisé lors de la mise en place et la réalisation des essais de compression.

3. Conclusions pour l'étude du comportement de roving de lin

Dans le cadre de la mise en place d'une simulation numérique d'un renfort tissé en fibres de lin il est nécessaire de s'intéresser au comportement du roving de lin lors de sollicitations élémentaires telles que la traction ou la compression.

L'architecture d'un roving de lin étant multi-échelle, il est intéressant de comprendre les différents mécanismes qui déterminent le comportement des éléments constitutifs du roving à chacune de ces échelles afin d'en estimer l'impact sur le comportement du roving lui-même. Bien que les fibres unitaires, qui représentent la plus petite échelle de fibres et possèdent les propriétés mécaniques les plus intéressantes et les plus étudiées, l'agencement particulier en faisceaux et la présence de la lamelle mitoyenne ne permet pas d'estimer les propriétés du roving à partir de cette échelle de fibres. Il faut donc, pour extraire le comportement mécanique d'un roving, réaliser des essais directement sur celui-ci. Concernant les différents facteurs influents sur les propriétés mécaniques à étudier, les paramètres de culture, d'extraction des fibres (comprenant le rouissage, les différentes étapes de teillage et les défauts au sein des fibres), et de fabrication du roving (régularité, teneur en liant, homogénéité de la répartition des fibres) sont des facteurs de variabilités qui ne peuvent être dissociés pour ces essais. A contrario les paramètres tels que la longueur de jauge et les conditions de température et d'humidité doivent être pris en compte dans l'exploitation des résultats.

L'objectif est donc, afin d'obtenir le comportement du roving, de mener des essais en traction et compression et déterminer comment implémenter ce comportement en simulation. Les essais devront être menés sur des rovings provenant de lots avant et après l'étape de tissage du renfort afin d'étudier la dégradation des propriétés mécaniques liées à ce procédé.

II. Stratégie de simulation

Il existe deux approches principales permettant la simulation de mise en forme de renforts tissés : les approches dites « cinématiques » et les approches par éléments finis. Les approches cinématiques, sur lesquelles nous ne nous étendrons pas ici, sont des approches purement géométriques, de type algorithme du filet. Elles présentent l'avantage d'être très rapides et efficaces mais n'incluent pas de mécanique ; les résultats sont donc identiques quelles que soient les propriétés du renfort considéré. Ces méthodes fonctionnent cependant très bien dans des cas simples et éprouvés [133–136] Le second type d'approche est celle par éléments finis. Plusieurs échelles de modélisation/simulation sont alors envisageables (Figure 24) et présentent chacune leurs avantages et inconvénients :

- L'échelle macroscopique est l'échelle du renfort (Figure 24 A) ; à cette échelle le renfort est modélisé par une membrane et est donc considéré comme un milieu continu. La loi de comportement associée doit alors prendre en compte la nature fibreuse et enchevêtrée du renfort. Ces modélisations sont extrêmement complexes et, bien que de nombreuses approches concurrentes se développent et fournissent des résultats

cohérents [137–145] il n'existe pas de modèle universellement accepté aujourd'hui. De plus, ces modèles ne peuvent pas décrire le glissement relatif des mèches, ce qui est une limite forte lorsque l'objectif est d'aller vers la modélisation de défauts impliquant ce type de phénomènes

- A l'opposé, l'échelle microscopique (Figure 24 C) prend en compte le contact et la distribution de milliers de fibres. Ces modèles sont extrêmement précis mais coûteux en temps de calcul [146–150]
- A l'intermédiaire entre ces deux première échelle, l'échelle mésoscopique (Figure 24 B) prend en compte l'entrelacement de mèches supposées homogènes. A cette échelle, il est possible d'obtenir des résultats à la fois globaux (de type renfort à l'état déformé) mais également locaux (de type déformation des mèches ou variation de forme de sections). L'objectif de cette étude étant de pouvoir obtenir la déformation du renfort mais également de pouvoir suivre l'évolution de la déformation des mèches et, par conséquent, de l'espace poral, l'échelle mésoscopique est l'échelle la plus adaptée dans le cas présent.

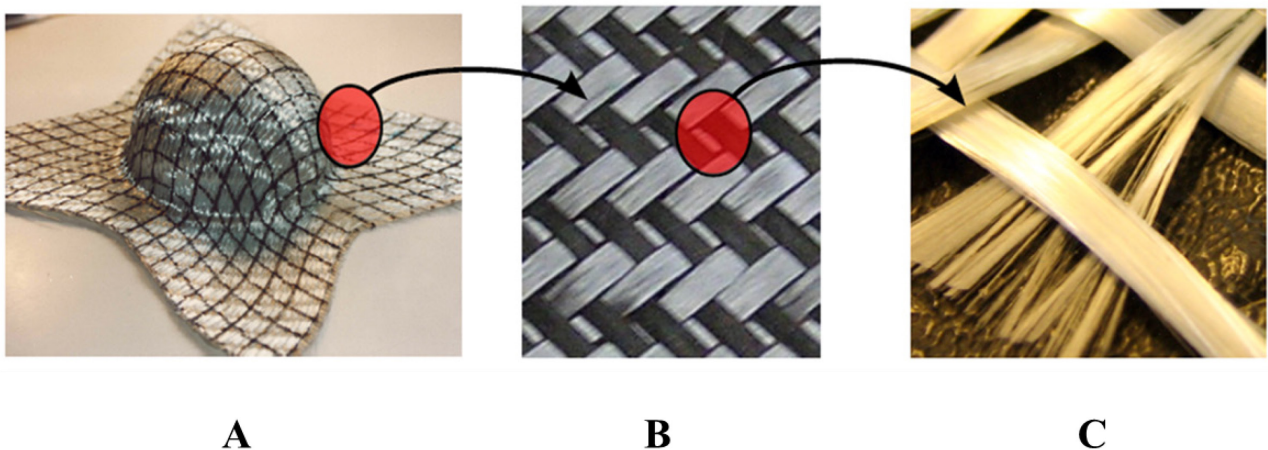


Figure 24 : Les différentes échelles d'études du renfort

D'autre part, étant donné la présence de nombreux contacts, de grandes déformations et de grands glissements, le choix se porte encore aujourd'hui sur des simulations en dynamique explicite.

III. Conclusion sur l'organisation et les objectifs de l'étude

Afin de répondre à la problématique de la mise en place d'une simulation à l'échelle mésoscopique d'un renfort tissé en fibres de lin, la présente étude s'articule autour de trois grands axes :

Le choix de se placer à l'échelle mésoscopique nécessite de :

- Disposer de modèles géométriques précis et cohérents des renforts et des mèches. Un outil développé précédemment, nommé GeoFab [151, 152], sera utilisé pour la modélisation des renforts et un point particulier sera fait sur l'observation et la modélisation des géométries de ces roving et renforts en fibres de lin dans chapitre II ;
- Connaître et caractériser le comportement des rovings de lin sous sollicitations qui fait l'objet du chapitre III ;
- Mettre en place une loi de comportement pertinente, l'implémenter dans le logiciel de calcul et la valider sur un roving, ce qui fait l'objet du chapitre IV.

Enfin, les résultats obtenus font l'objet du chapitre V, portant sur la mise en place et la validation de la simulation sur renfort.

Chapitre II : Modélisation de la géométrie du roving et du renfort

Pour réaliser une simulation numérique, il est nécessaire de disposer de modèles précis et cohérents du renfort et notamment des mèches. Dans le cadre de cette étude, un renfort de type sergé est modélisé en simulation. Néanmoins, l'ensemble de la méthode, des mesures à la réalisation du modèle géométrique, est transposable pour d'autres types de renforts. Ce chapitre est ainsi consacré à la mise en avant des différentes méthodes et procédures mises en place pour la réalisation d'un modèle géométrique de renfort tissé avec un renfort spécifique présenté ci-dessous.

I. Caractéristiques des matériaux de l'étude

Concernant les matériaux de cette étude, les rovings et renforts sont fournis par l'entreprise Depestele. Les rovings ont un titre de 520 tex (Tableau 2) et le renfort sergé 2x2 est constitué desdits rovings. Le renfort de l'étude est un renfort 2D de type sergé avec 2 directions privilégiées perpendiculaires l'une à l'autre dont le motif est représenté en Figure 25. Le type 2x2 signifie que chaque fil s'entremêle par répétition au-dessus puis en-dessous autour de deux fils de l'autre direction.

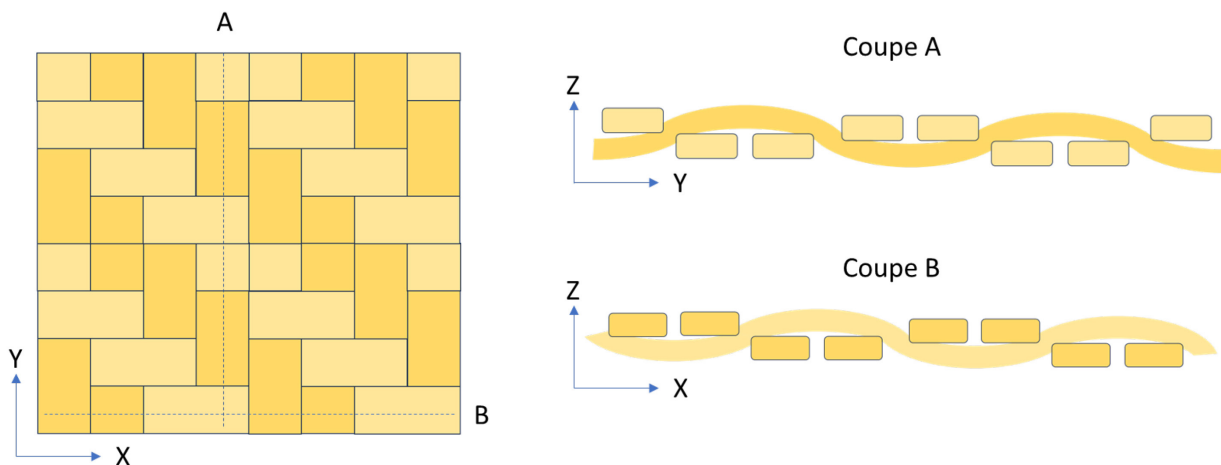


Figure 25 : Représentation schématique d'un renfort sergé 2x2

	Roving (FR520)
Titre (tex)	520 ± 20
Epaisseur (mm)	0.15 ± 0.05
Largeur (mm)	5.1 ± 1.4

Tableau 2 : Données fournisseur sur les caractéristiques des rovings de l'étude

Une étude des caractéristiques géométriques à la fois du roving et du renfort sera explicité dans ce chapitre et permettra de comparer les données fournisseurs aux résultats obtenus.

II. Stratégie de modélisation géométrique

La stratégie utilisée pour modéliser le renfort de l'étude utilise un outil créé au laboratoire et nommé GeoFab. Cet outil, complètement automatisé, permet la modélisation cohérente de tout type de cellules élémentaires à deux réseaux parallèles, à partir de données fabricants, ou de mesures par analyse de tomographies par exemple. Cet outil utilise les avantages de la CAO 3D, via l'utilisation de Catia V5® et l'ensemble est regroupé sous la forme d'un pack de routines Scilab et VBA. La stratégie [111, 151] ne sera pas précisément décrite dans ce mémoire qui se concentrera plutôt sur l'utilisation de GeoFab pour la modélisation du sergé 2X2 précédemment défini.

Il a été montré au Chapitre I que contrairement aux fibres synthétiques, les fibres naturelles, dont le lin, sont sujettes à une forte variabilité géométrique qui se répercute aux échelles supérieures (roving et renfort)., Pour ce faire, il est nécessaire de pouvoir rendre compte d'une géométrie représentative de la structure et prenant donc en compte la variabilité de sections du roving. Deux stratégies peuvent être envisagées et mises en place en fonction du besoin de représentation de cette variabilité :

- L'utilisation de la data sheet du fabricant pour réaliser un modèle moyen, idéal dans le cadre de simulations prédictives ou pour l'obtention de résultats moyens ;
- Une prise de mesure réelle sur échantillon qui permet de réaliser des simulations avec une géométrie statistiquement représentative ou intégrant une variabilité.—Notons que cette méthode est idéale pour de l'identification inverse et la calibration de la simulation sur roving. Elle permet aussi de vérifier les résultats obtenus avec un cas réel sur renfort.

Pour la modélisation de ces géométries, il est nécessaire d'observer la structure étudiée afin d'obtenir :

- Pour le roving : une forme de section adaptée et la variabilité associée
- Pour le renfort :
 - La forme des sections des rovings après tissage (si modifications liées au tissage)
 - L'armure (Gestion de l'agencement, de l'orientation et des zones de contacts entre les rovings). Dans le cas étudié ici, il s'agira d'un sergé 2X2
 - La variation des dimensions des sections et espaces inter-mèches.

Si l'utilisation de la tomographie à rayons X peut permettre de réaliser des mesures précises et les modèles nécessaires à la validation des simulations cette technique n'est pas adaptée pour obtenir un grand nombre de mesures. En effet, les mesures obtenues par tomographie à rayon X permettent non seulement d'obtenir l'intégralité du contour de l'objet mais aussi d'observer sa structure interne. Dans

le cas des milieux fibreux, il est donc possible d'observer la répartition structurale des fibres à l'intérieur du roving. Néanmoins, l'acquisition par tomographie à rayons X est un procédé qui nécessite un paramétrage lourd (source utilisée, puissance du rayon, réglage et mise en place de l'échantillon) et un temps d'acquisition et d'exploitation particulièrement long. Il faut compter une à plusieurs heures d'acquisitions pour une seule image 3D. L'exploitation est, elle aussi, fastidieuse car il faut traiter un volume conséquent de données et réussir à seuiliser et séparer dans les images obtenues les voxels représentant les fibres et ceux contenant du vide. Or, les fibres de lin absorbent peu le rayonnement (le contraste des images est donc faible) et ont des sections de l'ordre d'une cinquantaine à une centaine de microns (ordre de grandeur pour les fibres techniques (Figure 1) et ne représente donc que quelques voxels ce qui rend la séparation complexe et chronophage.

Une autre méthode envisagée est l'utilisation d'un microscope numérique. L'observation au microscope numérique permet d'obtenir les contours 3D de l'objet observé avec une qualité de l'ordre du millimètre au micron et un temps d'acquisition relativement faible (quelques secondes à quelques minutes en fonction de la taille de l'image et des filtres utilisés). Cela permet d'obtenir des mesures fiables en quantités suffisantes pour avoir des résultats représentatifs. Néanmoins, une partie de l'information n'est pas accessible ce qui peut entraîner une mauvaise interprétation du contour réel de l'objet et/ou de ses dimensions (Figure 26). Ces mesures nécessitent donc de mettre en place une stratégie qui vise à s'assurer des grandeurs obtenues.

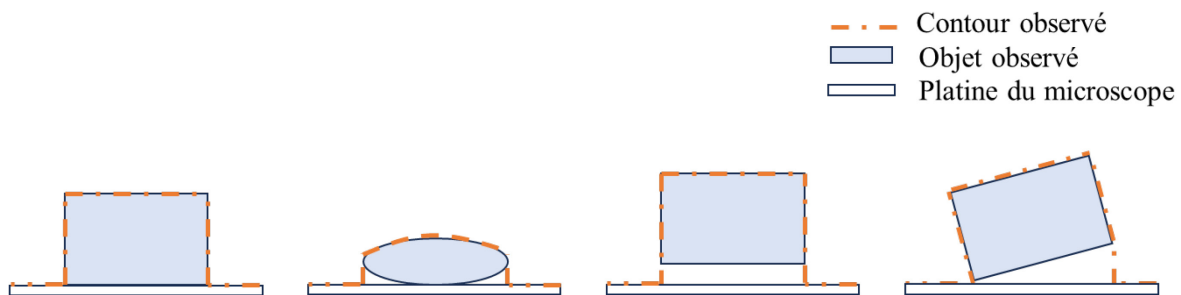


Figure 26 : Représentation de l'information obtenue avec un microscope numérique pour de la détection de profils rectangulaire ou elliptique

La stratégie adoptée pour l'obtention des différents modèles géométriques dédiés à la simulation est ainsi la suivante :

- Une campagne d'acquisitions au microscope numérique doit permettre d'obtenir une idée de la forme et de la variabilité des sections du roving et nécessite la mise en place d'une procédure d'acquisition et d'exploitation des données adaptée. Les présomptions sur la forme sont à confirmer à l'aide de mesures par tomographie à rayons X sur un nombre restreint

d'échantillons. Ces mesures permettront de réaliser des modèles dans un objectif de simulation prédictive.

- Les mesures au microscope doivent permettre de reconstruire des modèles de roving représentatifs d'échantillons testés expérimentalement dans un objectif de simulation par identification inverse.
- La reconstruction de modèles géométriques de renfort ne peut pas être intégralement réalisée avec uniquement les données obtenues au microscope. Néanmoins, le recoupement des informations par l'intermédiaire des deux méthodes d'acquisition doit permettre de réaliser à la fois des reconstructions de modèles prédictifs et proches des échantillons réels.

Finalement, ces différentes stratégies permettront d'obtenir trois types de géométries :

- Une géométrie obtenue via les données fournisseur
- Une géométrie moyenne, statistique, obtenue à partir des mesures sur les échantillons de sergé 2X2
- Des géométries particulières, variables, représentant chacune un échantillon spécifique.

La comparaison de ces modèles va permettre d'observer l'impact de la variabilité géométrique sur le comportement.

III. Observations de la géométrie du roving

Comme explicité précédemment, dans le but d'obtenir des informations visant à construire des modèles géométriques de rovings représentatifs, il est nécessaire de connaître la forme des sections du roving et les caractéristiques géométriques associées. Un protocole d'observation a donc été mis en place afin d'observer les profils de sections de rovings. Pour éviter de surestimer les caractéristiques géométriques récupérables à partir des profils de sections (Figure 26) et d'avoir une bonne répétabilité des mesures, les rovings ont été observés avec une plaque de verre permettant d'appliquer une légère pression, de l'ordre de quelques kPa, pour les maintenir plaqués contre la platine du microscope et qui a permis d'obtenir des premiers résultats (Figure 27). Les mesures obtenues avec le microscope étant relatives, toutes les images doivent être réalisées avec un point de vue sur le support sur lequel est placé l'objet et qui sert de référence.



Figure 27 : Acquisition 3D réalisée au microscope numérique

On peut observer sur la Figure 27 les irrégularités sur la « surface » supérieure du roving possiblement liés aux amas de fibres qui se déposent lors de l'étape d'étirage du roving.

Le microscope utilisé, de la marque Keyence, et équipé d'un objectif Z20 a été réglé avec un grossissement (x100) dont le pixel représente environ $2,2\mu\text{m}$ (Axes XY). Cela permet, au vu des différentes possibilités de réglages, d'avoir une large zone d'acquisition en conservant une précision de l'ordre d'une dizaine de microns sur la profondeur de l'objet (Axe Z) et limitant la survenue d'artefacts (Figure 29 A) pouvant perturber les mesures. Dans un premier temps, afin de vérifier la viabilité de la procédure, 10 profils ont été extraits d'images (Figure 28) représentant 3mm d'échantillon. La Figure 29 montre la superposition de 5 de ces profils, chacun pris à intervalle de $400\mu\text{m}$. L'observation de ces profils permet de conclure que :

- Les sections du roving sont de formes rectangulaires et les grandeurs récupérables sont une largeur et une épaisseur (Figure 29 A) ;
- Une variation notable des grandeurs des sections ne survient qu'environ tous les 1,6mm de longueur de roving.
- La variabilité des sections est importante sur les deux grandeurs (Figure 29 B) ;

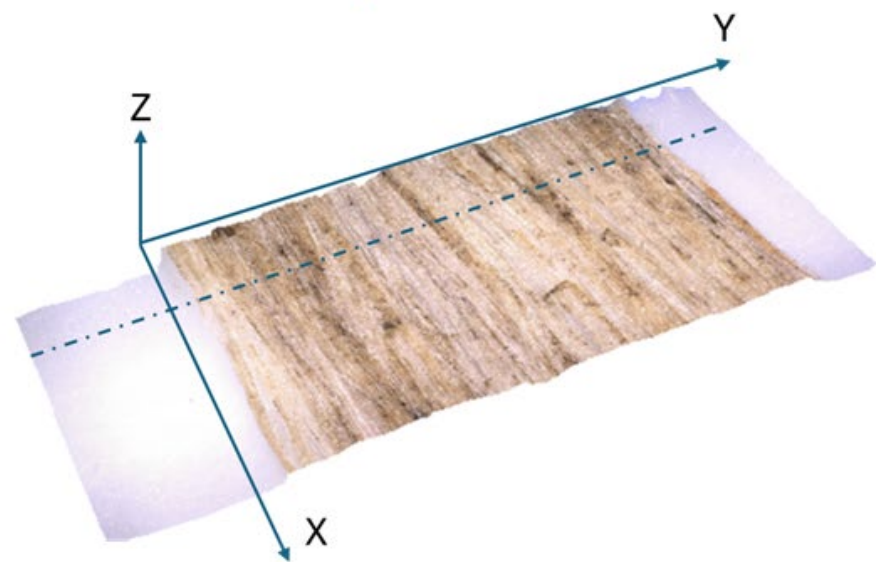
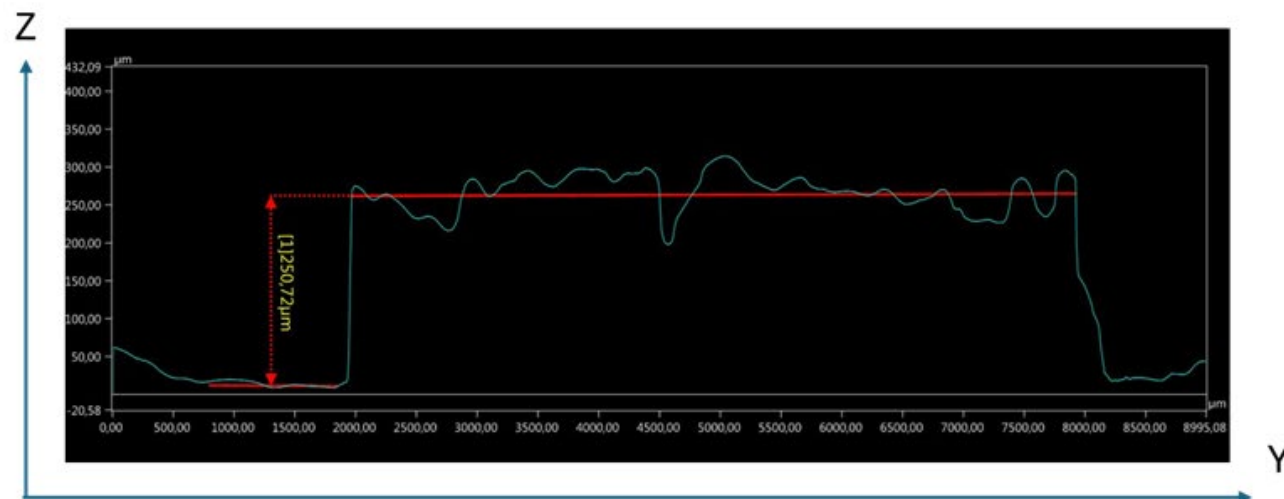


Figure 28 : Exemple de profil extrait d'une image 3D d'un roving

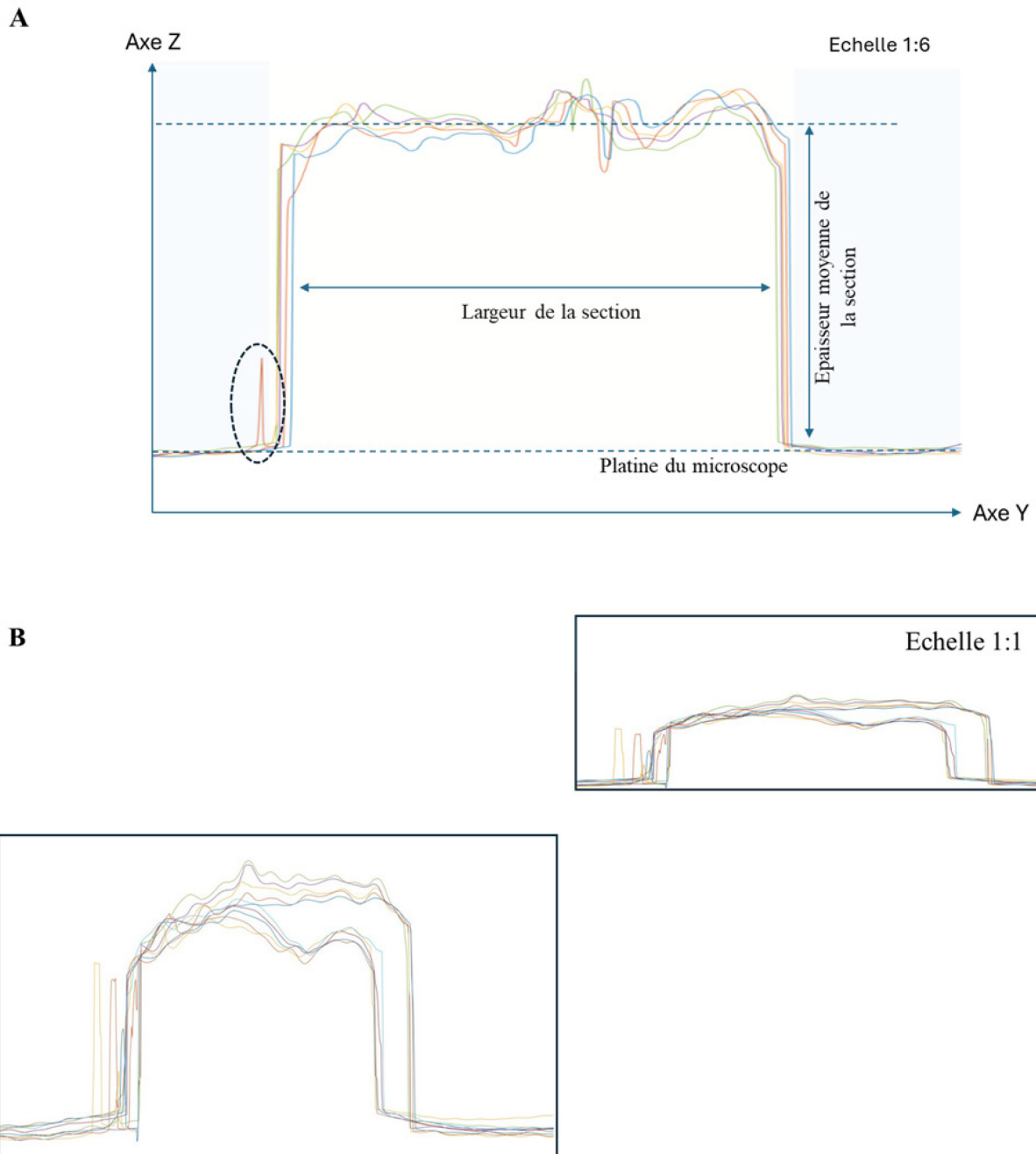


Figure 29 : (A) : Grandeurs récupérables à partir de mesures sur les sections du roving. A gauche, le pic est un artefact de la reconstruction. (B) : Variabilité des grandeurs géométriques de deux groupes espacés de plus de 1.6mm

Afin de vérifier ces résultats, des acquisitions ont été réalisées en tomographie à rayons X. Les ondulations naturelles des fibres couplées aux effets du bobinage rendent les observations particulièrement difficiles à interpréter (Figure 30) sans conditions précises de maintien de la mèche. Lors de l'acquisition présentée en Figure 30, le roving était positionné librement sur un plateau ce qui conduit à une courbure dans les deux directions. D'autres conditions ont été testés, notamment avec

un système de maintien en position vertical du roving mais là encore l'observation n'as pas été concluante (Figure 31). Néanmoins au vu de la distribution de fibres observée et le peu d'études sur la question existant aujourd'hui [153], le choix est fait de conserver l'hypothèse de sections rectangulaires en sortie de bobine.

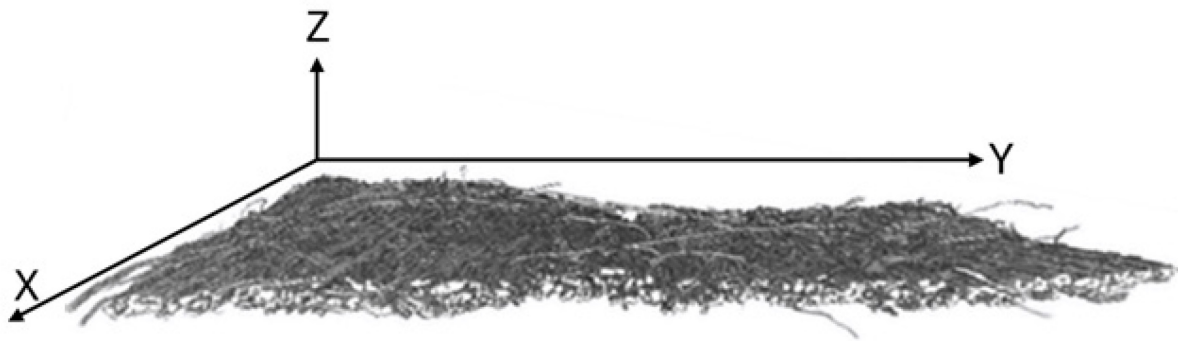


Figure 30 : Reconstruction 3D d'un roving de 520tex (de largeur 3.7mm) à partir d'une acquisition par tomographie à rayons X, la direction X est la direction longitudinale des fibres

Au vu des caractéristiques du roving nécessaires pour l'étude de la variabilité des sections, il semble intéressant de pouvoir automatiser la procédure de récupération des propriétés géométriques. Afin de s'assurer de la répétabilité des mesures, le dispositif de compaction, qui sera présenté dans le chapitre suivant, a été utilisé. Cela permet de réaliser des mesures à faible pression, de l'ordre du kilopascal, en accord avec les simulations qui seront réalisées avec ces mesures.

En considérant une acquisition avec un assemblage d'images sur un échantillon d'une longueur de 20mm cela permet d'obtenir environ 9000 profils de sections par image dont 11 mesures permettent de traduire la variabilité géométrique générale de l'échantillon. L'enjeu ici n'est pas seulement d'obtenir des données sur la variabilité géométrique mais aussi de pouvoir prétendre à la reconstruction d'un échantillon testé expérimentalement. Parmi les écueils éventuellement rencontrés on note les difficultés de :

- Distinguer le profil de l'échantillon et la platine du microscope ;
- Distinguer les fibres n'appartenant pas à la section et liées à la pilosité de l'échantillon (I.B.1.d page28) ;
- Détecter les artefacts qui perturbent la mesure.

A ce jour, seulement quelques mesures ont pu être faites concernant la variabilité géométriques des rovings avant tissage. Ces mesures restent cependant comprises dans l'écart-type des valeurs données dans la data sheet fournisseur (Tableau 2). Il sera donc possible de comparer les résultats de

simulations réalisées avec une géométrie dont les valeurs sont issues de cette data sheet avec une géométrie dont les valeurs sont celles de l'échantillon testé. Ces valeurs peuvent ainsi être obtenues avec le microscope numérique, qui permet donc de connaître la variabilité des sections du roving. Cela, dans le but de construire un modèle représentatif dédié à des simulations prédictives mais aussi de mettre en avant la possibilité de reproduire la variabilité d'échantillons testés expérimentalement. Le test en simulation permet par ailleurs de mettre en place un processus d'identification inverse et de vérifier la fiabilité du comportement obtenu.

Une dernière hypothèse vérifiée à la suite de ces observations concerne le titre, soit la quantité de fibres présentes le long du roving, considéré constant. Pour ce faire, l'une des acquisitions en tomographie à rayons X sur un roving avant tissage a été étudiée à l'aide du logiciel ImageJ. Chaque coupe de l'acquisition dans le plan transverse (YZ) de la mèche, acquise avec une résolution de $4\mu\text{m}$, a été binarisée (Figure 31 A), ce qui a permis de déterminer le taux de fibres par coupe pour une longueur de roving de 13mm (Figure 32). Les résultats présentés sur le taux de fibres par coupe sont calculés sur l'image entière et non à partir de la détermination d'une section d'enveloppe du roving pour chaque coupe. Les extrémités de l'acquisition présentent un fort bruitage de l'image (Figure 31) qui perturbe la détermination du taux de fibres mais ne représente qu'une centaine de coupes sur l'acquisition totale.

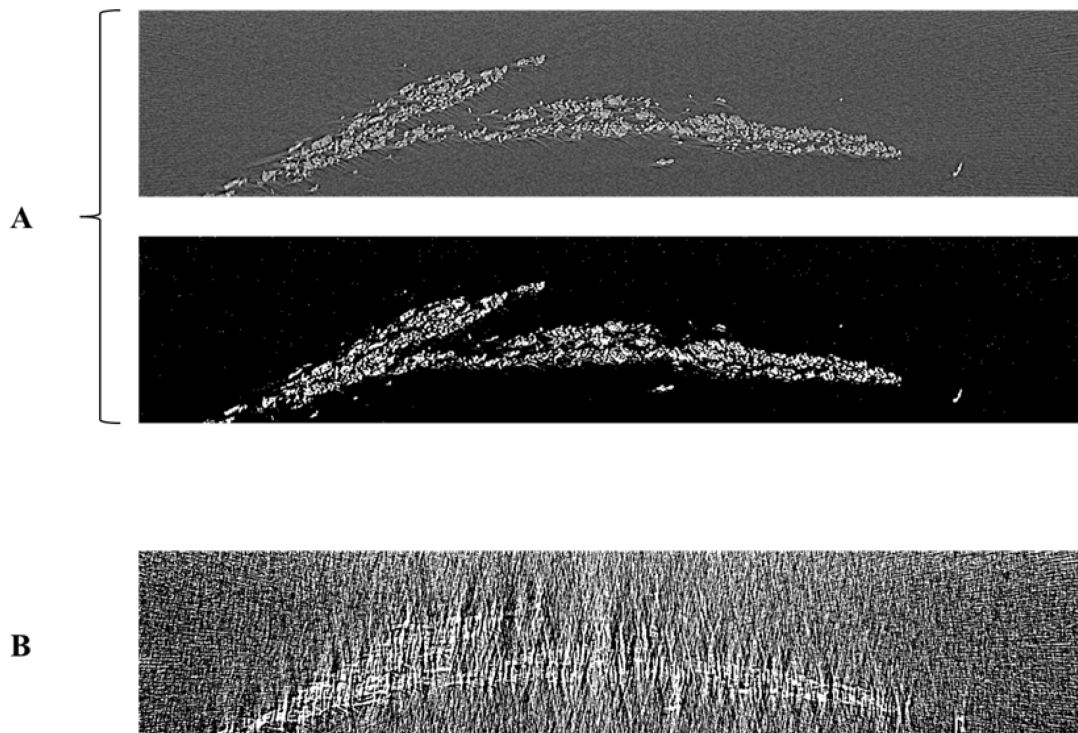


Figure 31 : (A) Binarisation de images issues de tomographie à rayons X, (B) Bruitage des coupes aux extrémités de l'acquisition

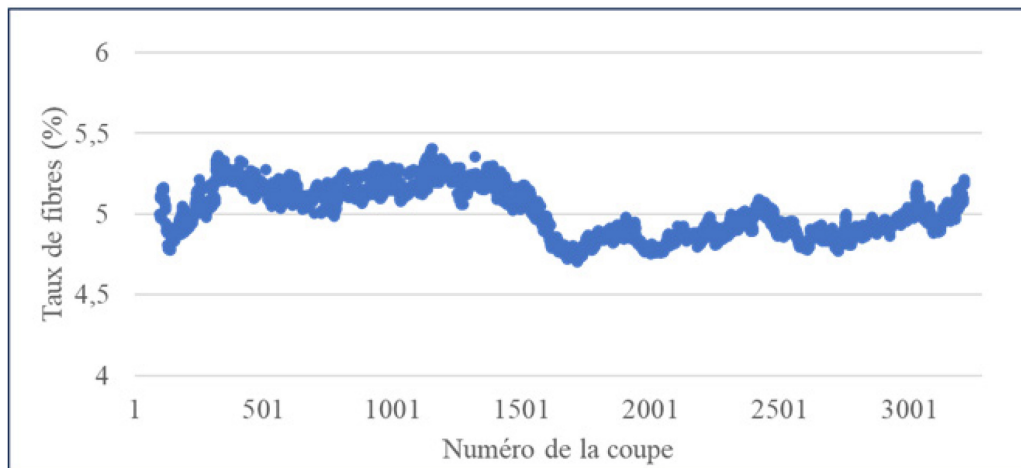
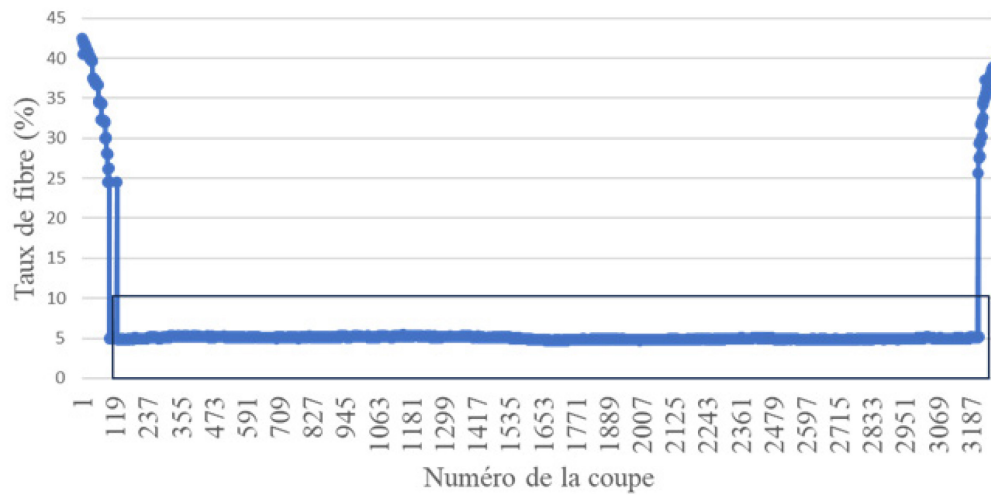


Figure 32 : Taux de fibres dans chaque coupe d'un roving avant tissage

D'après la figure ci-dessus, la proportion de fibres varie peu sur la longueur du roving, ce qui valide l'hypothèse de la constance du titre.

IV. Observations de la géométrie du renfort

Afin de reconstruire un Volume Élémentaire Représentatif (VER) statistiquement représentatif du renfort à l'échelle mésoscopique, il est nécessaire de pouvoir reproduire :

- Le motif du renfort sergé 2x2 ;
- La forme et la variabilité des sections des rovings au sein du renfort.

Les résultats des mesures géométriques sur le roving ont permis de montrer que la forme des sections avant tissage est rectangulaire avec une largeur moyenne et une épaisseur moyenne cohérente avec les données fournisseurs (Tableau 2). Le tissage du renfort est un procédé rude pour les rovings qui subissent de fortes sollicitations et entraîne de la rupture et de la réorganisation de fibres. Ces

phénomènes modifient la forme de la section par rapport au roving avant tissage. Il est donc attendu d'observer des modifications sur la géométrie des rovings dans le renfort, possiblement dépendant du réseau auquel ils appartiennent. Ce phénomène, courant lors du tissage des renforts, n'implique pas nécessairement de changement visible des valeurs d'épaisseur et de largeur.

Le microscope numérique permet certes d'avoir accès à la valeur des largeurs du roving (Figure 33) mais présente également l'avantage de donner accès à une mesure dans la troisième direction (épaisseur). L'épaisseur moyenne du renfort a donc pu être estimée. En considérant que les rovings de chaque réseau ont la même épaisseur, il est possible d'estimer la valeur de l'épaisseur des rovings à partir de la mesure de l'épaisseur du renfort. La prise de mesures s'effectue tout comme pour le roving avec l'application d'une pression de l'ordre du kilopascal, la difficulté étant toujours que la face inférieure du renfort est bien en contact avec le support.

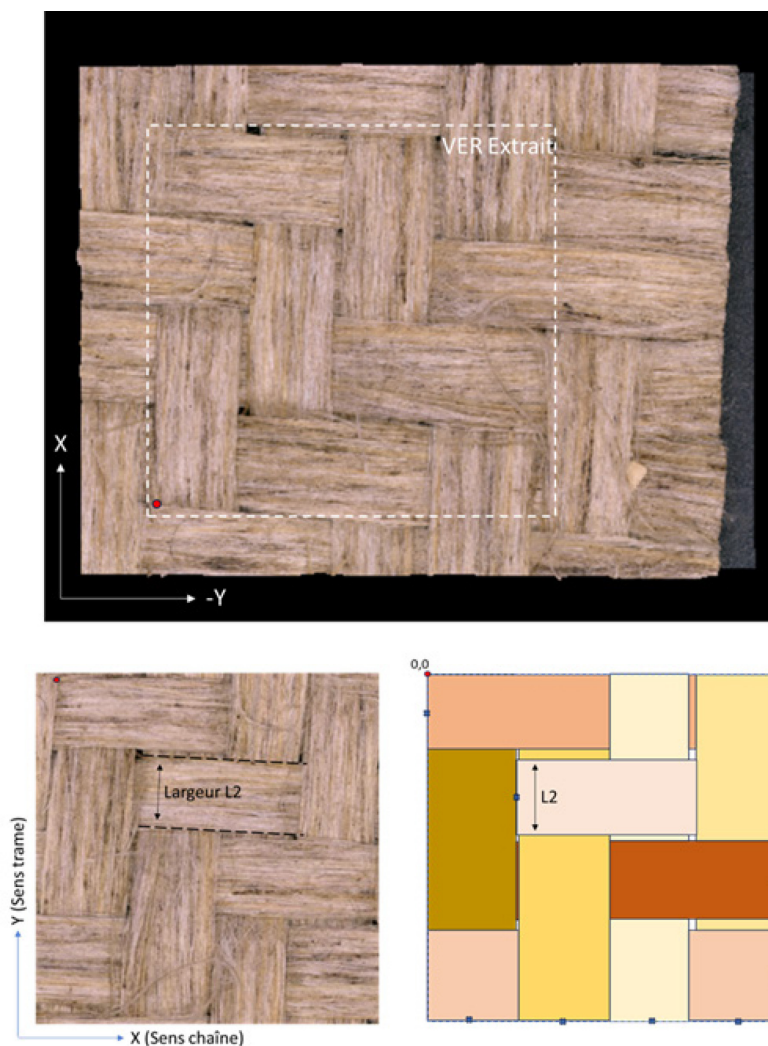


Figure 33 : Prises de mesures possibles sur une image réalisée à partir d'un microscope numérique et représentation schématique associée d'un VER pour un renfort sergé 2x2. La largeur L2 est une largeur moyenne.

A l'aide de ces premières mesures, on constate que la largeur moyenne est d'un ratio deux fois inférieur aux valeurs obtenues par rapport aux rovings avant tissage. L'épaisseur moyenne du renfort représente plus du double de l'épaisseur moyenne des rovings avant tissage. Dans l'exemple, en Figure 33, l'épaisseur moyenne du renfort est d'environ 1.9mm soit environ 0.9mm par roving. Pour rappel, les données du fabricant donnent une épaisseur entre 0.1 et 0.2mm et une largeur d'environ 5 ± 1.4 mm, les résultats obtenus ne sont donc pas cohérents.

Afin de comprendre ces résultats, des observations sur mèches issues de renfort ont été réalisées. Après recherche et extraction de roving du renfort, il s'avère qu'un phénomène de repliement de la mèche peut être observée et est notamment bien visible en tomographie (Figure 34).

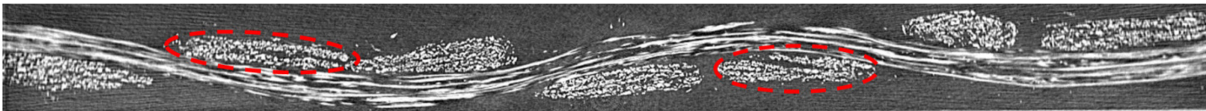


Figure 34 : Visualisation du repliement des mèches au sein du renfort sergé 2x2 par tomographie à rayons X

Afin d'obtenir les dimensions des rovings à l'intérieur du renfort, une acquisition en tomographie à rayons X a été réalisée (Figure 35) avec une résolution de 13 μ m. L'échantillon a été découpé afin d'obtenir des données sur un VER complet. Les mesures sont réalisées au centre des mèches et au niveau des transitions du motif. On peut noter sur la Figure 35, la forte pilosité des rovings.

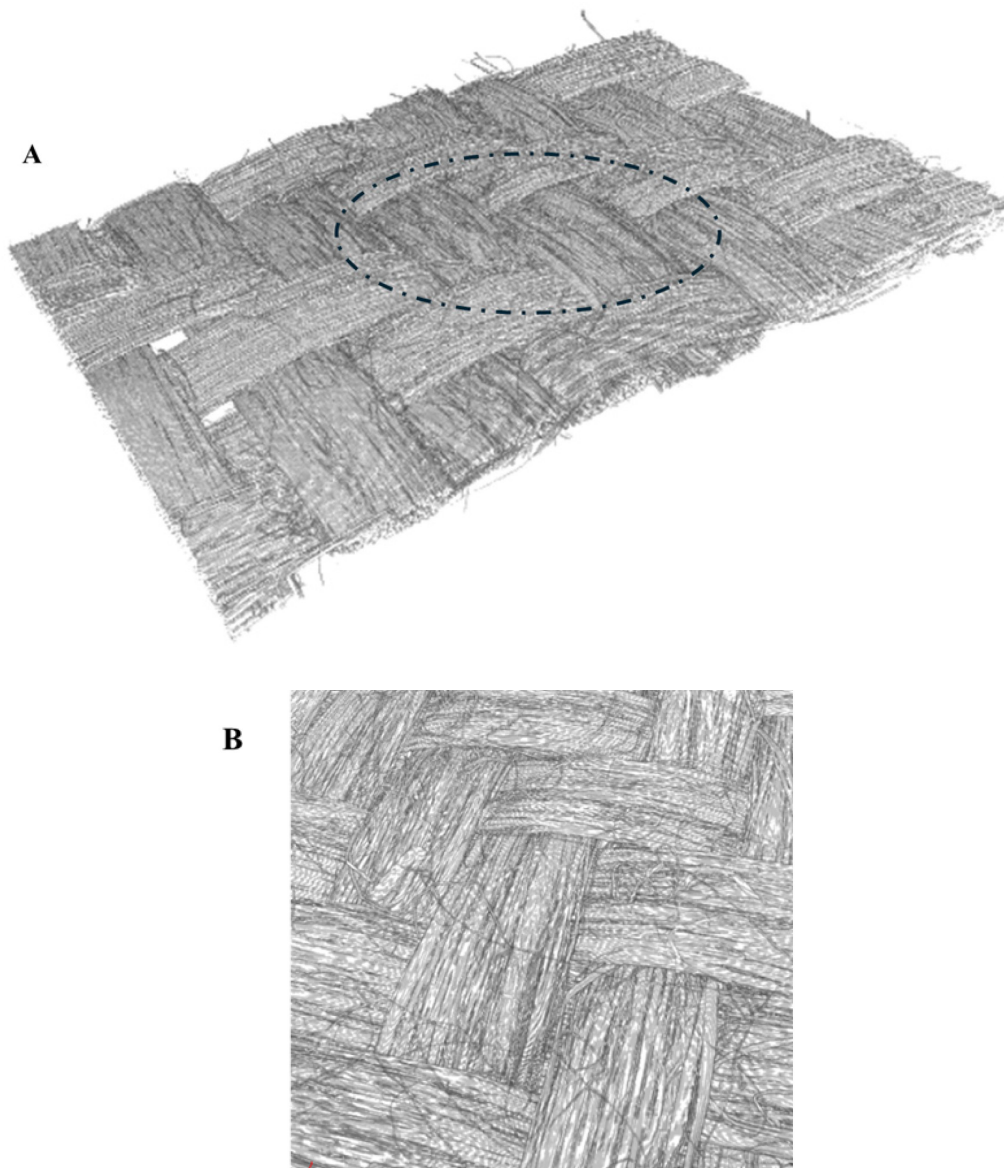


Figure 35 : Reconstruction 3D d'un échantillon de renfort sergé 2x2

L'analyse des coupes est effectuée manuellement et permet d'associer, pour les coupes extraites de l'acquisition, une section elliptique pour chaque roving. En plus de cette acquisition, une seconde a été réalisée avec une résolution de $14\mu\text{m}$ et est présentée dans le Chapitre V. La méthode d'exploitation est identique.

La largeur et l'épaisseur moyenne de chaque mèche des deux acquisitions sont donc obtenues à l'aide de 9 mesures (Figure 36).

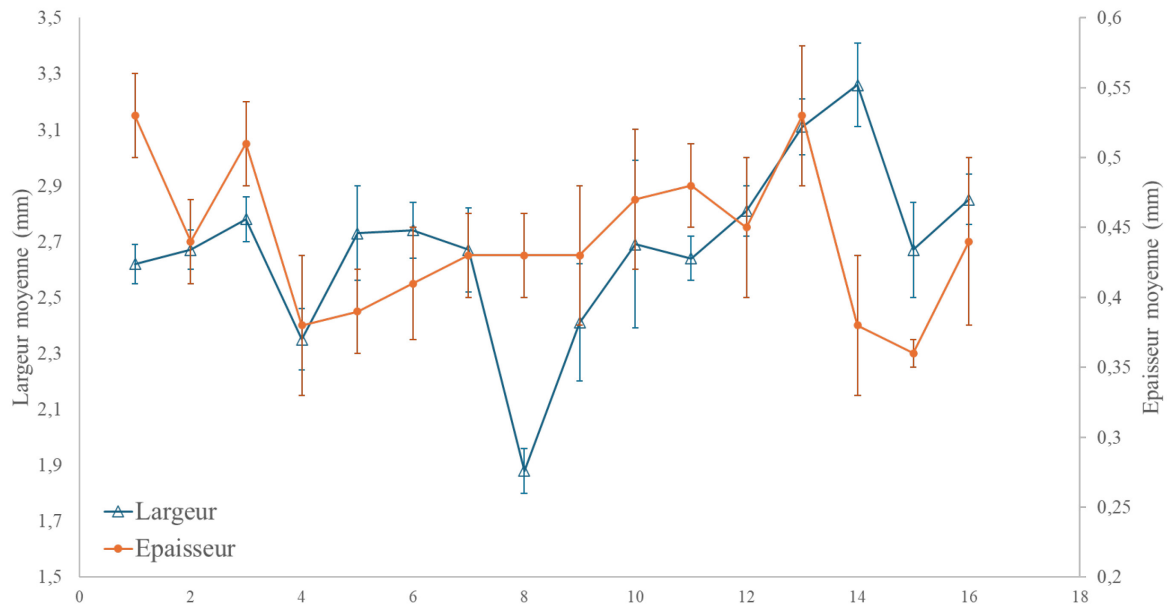


Figure 36 : Largeur et épaisseur moyenne des rovings dans le renfort

En moyenne, la largeur des rovings dans le renfort est ainsi de $2.7 \pm 0.3\text{mm}$ et l'épaisseur est de $0.44 \pm 0.05\text{mm}$.

V. Principe de la reconstruction

Avec les différentes informations obtenues à partir des mesures géométriques et la mise en place d'une procédure d'extraction de paramètres géométriques permettant de reproduire la variabilité d'échantillons testés expérimentalement, il est désormais possible de construire des modèles fidèles de roving et de renfort.

A. Reconstruction d'un modèle fidèle de roving

Concernant la reconstruction de modèles de roving, la procédure consiste à réaliser une observation 3D de l'échantillon à l'aide du microscope numérique (Figure 37 A) avec les contraintes appropriées en tension et/ou en compression suivant le type d'essai qui doit être simulé. Une procédure automatique codée sous Matlab permet ensuite d'extraire et analyser les profils de sections de l'échantillon (Figure 29) tous les 0,8mm pour rendre compte de la variabilité géométrique de l'échantillon. Chaque section analysée est assimilée à un rectangle avec les bonnes dimensions, en accord avec les résultats sur la forme des sections (III) et afin de permettre un maillage régulier du modèle. Une variabilité plus fine de la section avec la visualisation de chaque fibre dépassant de la

section n'est pas souhaitable et n'apporterait pas d'informations supplémentaires (Figure 38). De plus, cela rendrait le maillage plus complexe avec des éléments très fins et un temps de calcul très élevé.

Les sections rectangulaires analysées sont ensuite importées dans CatiaV5® à l'aide d'une macro dédiée¹ (Figure 37 B). Les sections permettent ainsi de définir le contour du volume (enveloppe) du roving qui sera ensuite importé (Figure 37 C) puis maillé avec des éléments C3D8R dans Abaqus®.

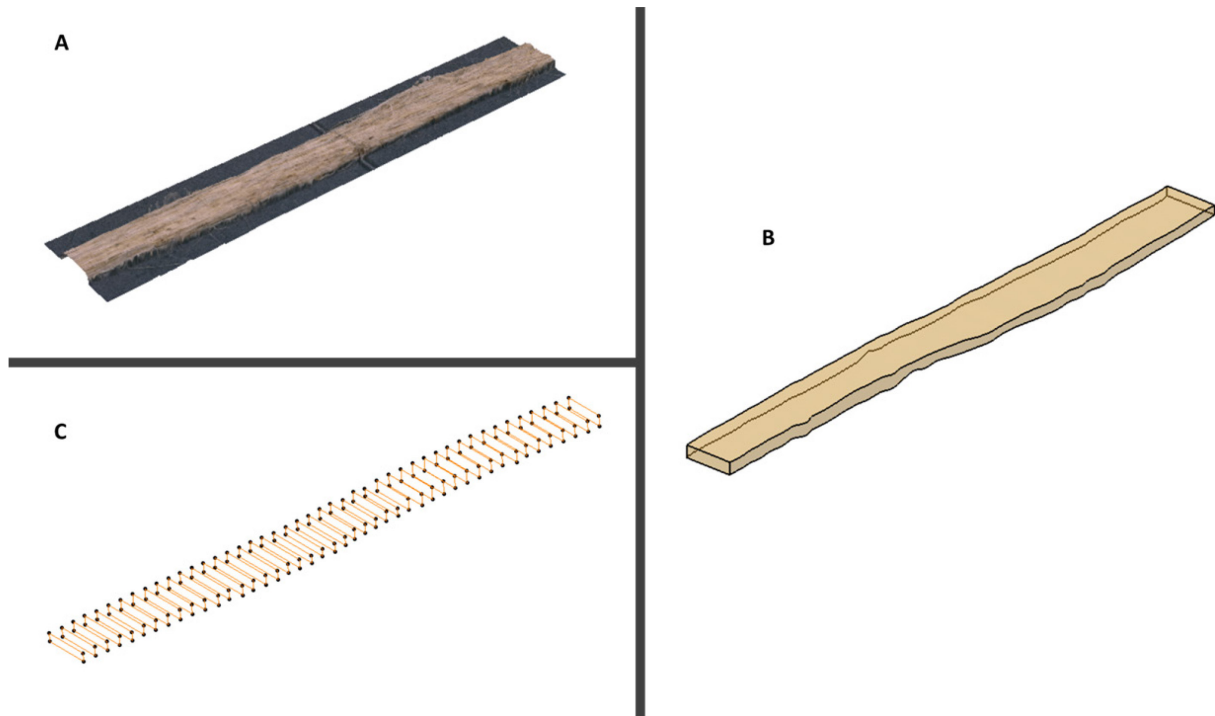


Figure 37 : Procédure de reconstruction d'un modèle géométrique de roving avec prise en compte de la variabilité d'un échantillon réel. (A) Acquisition 3D de l'échantillon au microscope numérique ; (B) Reconstruction par des sections rectangulaires dans CatiaV5® ; (C) Reconstruction volumique du modèle à importer Abaqus®

¹ GSD_PointSplineLoftFromExcel

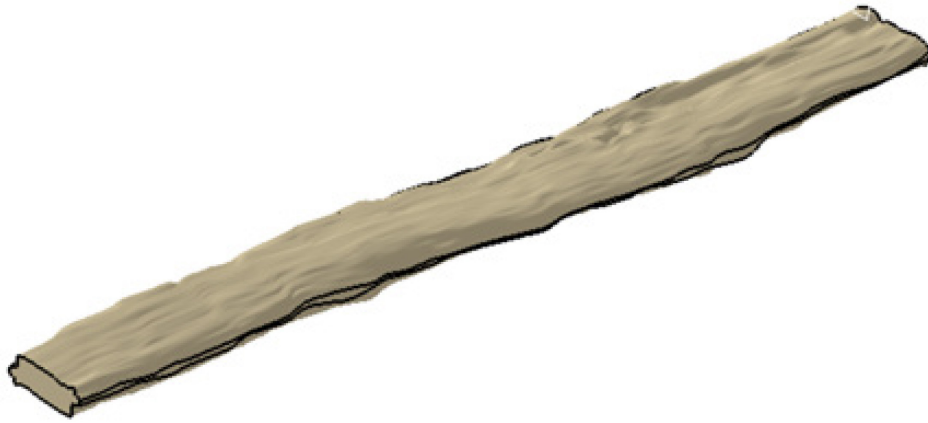


Figure 38 : Reconstruction avec variabilité trop fine pour obtenir un maillage régulier

B. Reconstruction d'un modèle fidèle de renfort

Il a été vu au §III que les mesures obtenues avec le microscope numérique permettent d'établir la variabilité suivant la largeur des rovings mais donnent une surestimation de l'épaisseur.

Les images issues de la tomographie permettent de montrer que les sections des rovings au sein du renfort sont elliptiques avec un phénomène de repliement des mèches lors de l'étape du tissage (Figure 34). Les épaisseurs des rovings sont de l'ordre de 2.7mm et les largeurs sont de l'ordre de 0.44mm en accord avec les résultats en microscopie.

Le recoupement des informations obtenues avec les deux méthodes permet d'estimer la variabilité des paramètres géométriques nécessaire pour l'établissement d'un modèle moyen statistiquement représentatif du renfort. L'établissement d'un modèle représentatif de la variabilité du renfort permet de vérifier et valider les méthodes et procédures mises en place. Dans les deux cas, la méthode de reconstruction est la même et nécessite l'utilisation de GEOFAB.

1. Mesures et outils de reconstruction

Suite aux différentes mesures réalisées, il est maintenant possible de reconstruire un VER statistiquement représentatif du sergé 2X2.

La construction du modèle comporte deux grandes étapes :

- La mise en données et la construction d'un modèle géométrique
- L'importation, le maillage et la pré-mise en données dans Abaqus® [111, 152]

Ces deux étapes sont réalisées à l'aide de l'outil nommé GeoFab et son utilisation se déroule comme suit :

- La première étape, la mise en données : consiste à implémenter les données nécessaires à la construction du VER. Cela nécessite le nombre de mèche réparti dans les directions trame et chaîne, le nombre et les paires de mèches en contact, la forme des sections (avec un paramètre de forme pour obtenir des sections entre rectangulaires et elliptiques), la position initiale du centre de section de chacune des mèches (qui permet de donner le motif de l'armure) ainsi que les paramètres géométriques de largeur et d'épaisseur. L'outil compile ensuite ces informations et crée un modèle en évitant les interpénétrations de mèches. Les données sont ensuite importées dans CatiaV5® pour une reconstruction volumique du VER.
- La seconde étape, le maillage et la mise en données Abaqus® : consiste à importer la géométrie 3D obtenue avec CatiaV5® et à préparer le modèle pour la réalisation de simulations. Pour cela, chacune des mèches est maillée séparément avec des éléments C3D8R. Le maillage est régulier et contient dans chaque section transverse le même nombre d'éléments. Les conditions de symétries, zones de contact et orientations matérielles des éléments sont déterminées et implémentées à ce stade. Le modèle peut ainsi être utilisé en simulation.

On peut noter que dans le cas du modèle représentatif l'ensemble des mèches auront les mêmes caractéristiques géométriques avec des variations liées à l'agencement au sein du VER, notamment pour garantir qu'il n'y a pas d'interpénétrations entre les mèches. On peut aussi noter que dans le cas d'un modèle avec prise en compte de la variabilité, « seule » la variabilité globale entre les mèches a été prise en compte c'est-à-dire que chaque mèche aura une section constante mais différente des autres. Il est possible d'introduire la même variabilité de sections que pour les simulations sur mèches mais à ce stade ne connaissant pas le réel impact sur le comportement du renfort et dans l'objectif de minimiser les temps de calculs, cela n'a pas été retenu pour cette étude.

2. Validation du modèle reconstruit

Une fois la construction du modèle dans CatiaV5® effectuée, le modèle peut être vérifié. Concernant la validation des modèles de roving, les incertitudes concernent la capacité à déterminer correctement le contour du profil au sein de l'image 3D. Pour cela, une estimation de la largeur moyenne obtenue avec le détournage peut être comparée à une mesure manuelle obtenue avec le microscope. De plus, une attention particulière doit être portée sur l'estimation de la taille des sections. Il faut donc évaluer l'erreur commise par l'approximation rectangulaire.

La validation du modèle géométrique du renfort peut s'effectuer par une évaluation qualitative de la reconstruction en comparant la surface supérieure du renfort (Figure 39) obtenu par microscopie et le VER (Figure 40) réalisé à partir de GeoFab.

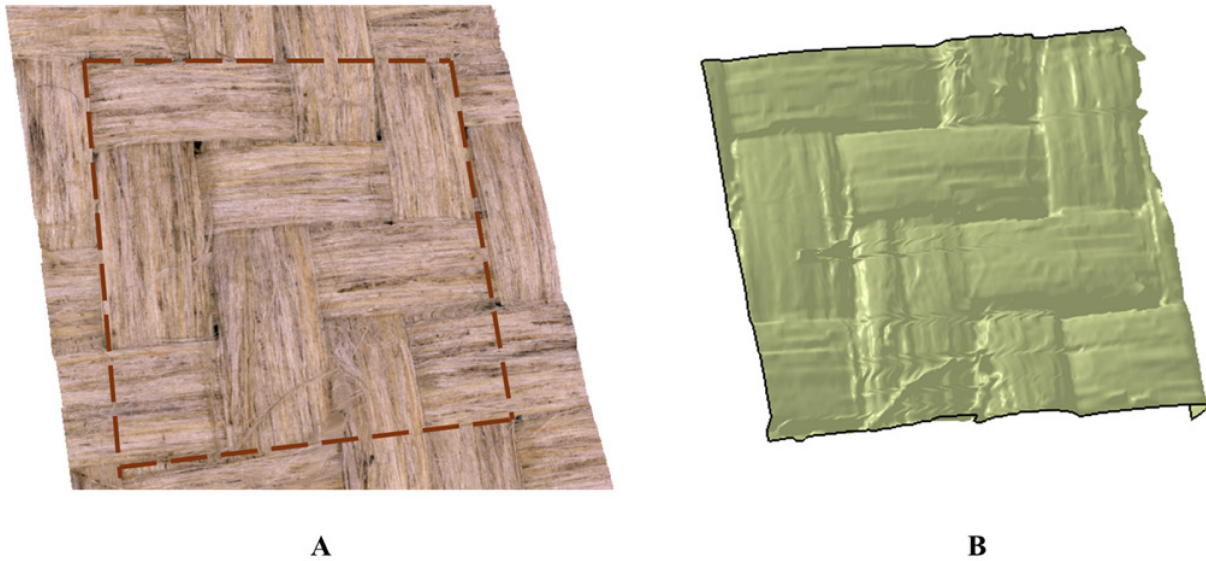


Figure 39 : Image 3D du renfort acquis au microscope numérique (A) ; Reconstruction de la surface supérieure de ce renfort pour comparaison avec le modèle géométrique reconstruit (B)

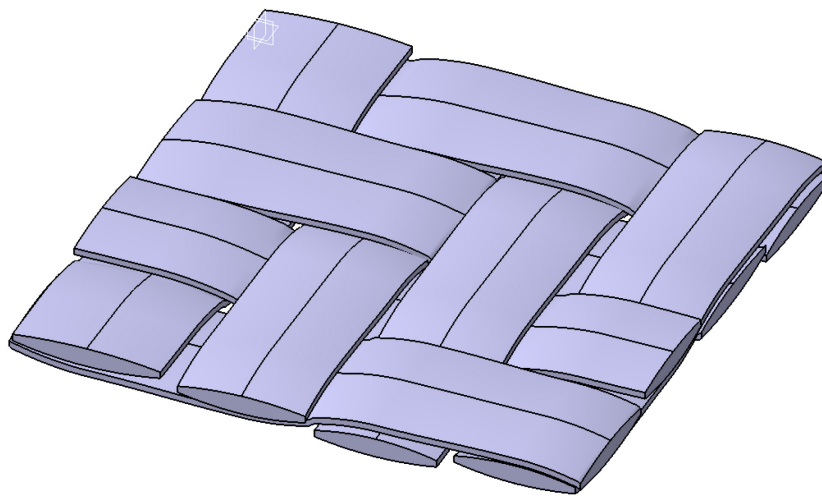


Figure 40 : Modèle géométrique du renfort reconstruit à partir des mesures réalisées au microscope numérique

Deux dernières validations du modèle sont possibles grâce aux acquisitions réalisées en tomographie à rayon X. En effet, une acquisition du renfort a été réalisée pour permettre la validation du comportement en compression en simulation numérique. Ce point sera détaillé dans le Chapitre V. Néanmoins deux modèles sont reconstruits à partir des mesures réalisées sur cette acquisition, un modèle moyen et un modèle incluant la variabilité des largeurs et du positionnement des mèches entre elles. Il est donc possible pour vérifier la viabilité du modèle géométrique variable par la mesure de

l'embuvage du renfort et de comparer qualitativement les coupes des sections provenant de l'acquisition et les coupes de ces mêmes sections sur le modèle géométrique reconstruit (Figure 41).

L'embuvage du modèle a été mesuré sur CatiaV5® et vaut 0.8% en direction chaîne et 0.9% en direction trame. Les mesures effectuées en tomographie à rayon X ont permis de connaître l'embuvage des rovings au sein du renfort et donnent 0.6% en direction chaîne et 0.9% en direction trame. Le modèle reconstruit est donc très cohérent par rapport au renfort original.

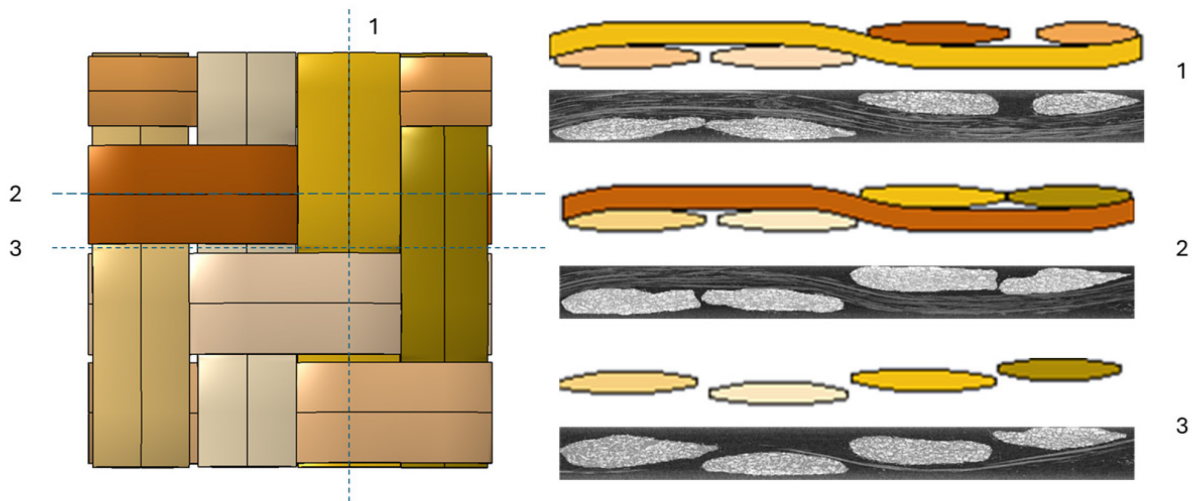


Figure 41 : Visualisation des différences entre les coupes issues de tomographie et les coupes au même point de la géométrie du renfort modélisé

Même si les sections du modèle sont idéalisées par des ellipses, on note une très bonne correspondance du modèle vis-à-vis de la réalité.

A partir des mesures réalisées à la fois en tomographie à rayons X et au microscope numérique il est donc possible de reconstruire des modèles cohérents et fidèles des renforts observés pour la réalisation de simulation numérique.

VI. Conclusion sur les modèles géométriques de l'étude

L'objectif de l'étude est de pouvoir réaliser des modèles fiables de roving et de renfort afin de réaliser des simulations numériques dans le cadre d'identification inverse du comportement des rovings et dans le cadre de la validation du comportement du renfort. Pour cela, une procédure a été mise en place à partir d'observations réalisées par microscopie numérique et par tomographie à rayons X afin de déterminer :

- La forme des sections du roving avant et après l'étape de tissage
- Des données sur la variabilité géométrique des échantillons

A partir de ces données, deux méthodes permettent de construire des modèles géométriques de roving et de renfort. La construction de ces modèles a été validée par des observations complémentaires.

Avec les outils de reconstruction précédents, il est donc possible d'obtenir :

- Un modèle moyen de roving (Figure 42 B) avec une section constante rectangulaire avec les caractéristiques géométriques moyennes obtenues par mesures et/ou par les données fabricants.
- Des modèles de roving avec une section rectangulaire et une variabilité sur les grandeurs caractéristiques (largeur, épaisseurs) des sections cohérentes (Figure 42 A).
- Des modèles moyens de renfort (VER) issues de mesures réels (Figure 42 D) avec des sections de formes elliptiques. On rappelle que les rovings au sein du renfort présentent un repliement qui ne permet pas d'utiliser les données fabricants du rovings telles quelles. Au vu du peu de mesures fiables réalisées sur le renfort, il n'existe pas de modèle moyen unique et représentatif à l'heure actuelle.
- Des modèles variables de renfort (Figure 42 C) issues d'observations réels avec une variabilité portant uniquement sur la largeur des mèches.

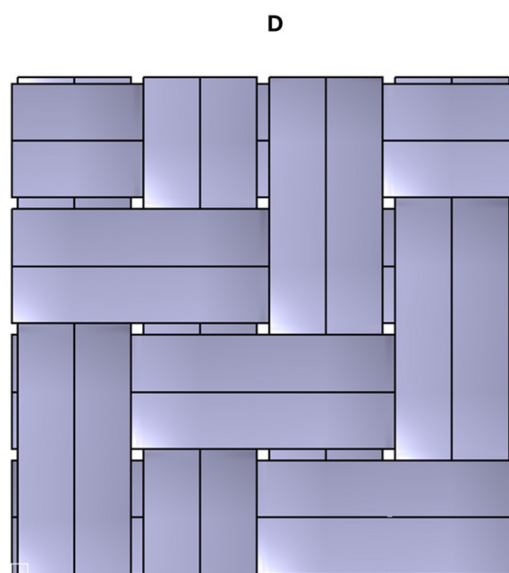
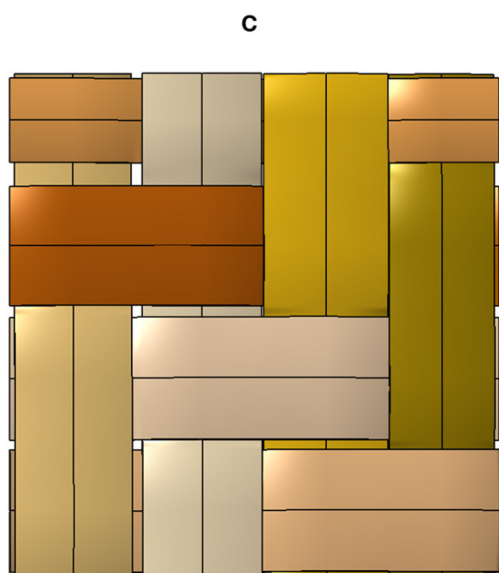
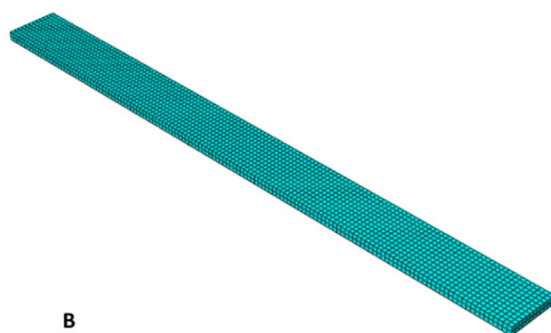


Figure 42 : Modèles géométriques

Chapitre III : Comportement d'un roving de lin

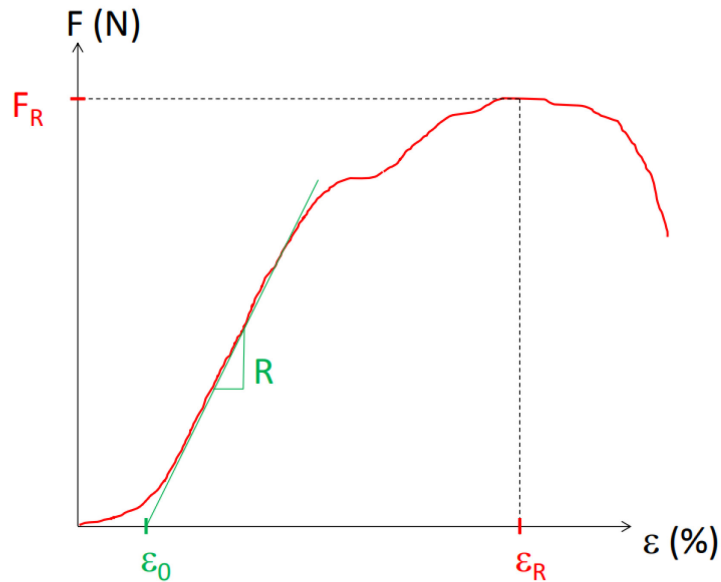
I. Introduction du chapitre

Comme explicité précédemment (Chapitre I), le procédé de fabrication d'un roving de lin, ainsi que la complexité de sa constitution et de son architecture amènent à considérer l'étude expérimentale de ses propriétés mécaniques. En effet, il semble aujourd'hui illusoire de pouvoir déterminer les propriétés mécaniques du roving à partir de ceux du procédé et celles de ses constituants. L'étude étant axée sur les mécanismes de déformation lors des étapes de préformage et de compression avant injection, deux sollicitations prépondérantes vont être étudiées : la traction et la compression des fils. En effet, ce sont ces deux modes qui sont à l'origine de l'énergie de déformation dans les fils. L'objectif de ces essais est donc de déterminer le comportement du roving pour ce type de sollicitation. Lors du procédé de tissage, le fil est soumis à de nombreuses sollicitations et contacts, il sera donc nécessaire de pouvoir identifier quel est l'impact du tissage sur le comportement mécanique pour connaître les propriétés mécaniques réelles du fil au sein du renfort. Suite à la caractérisation du comportement mécanique, il est enfin nécessaire de caractériser l'interaction de contact entre les mèches au sein du renfort, et donc de caractériser le frottement entre les mèches.

Ce chapitre est ainsi dédié à la mise en place et l'étude des propriétés en traction (II) et en compression (III) des rovings avant et après tissage dont la notation sera [RB] et [RC, RT] (Roving extrait de Bobine, Roving extrait du renfort sergé2x2 respectivement en direction Chaîne et en direction Trame).

II. Caractérisation expérimentale du comportement mécanique en traction du roving de lin

Concernant le comportement en traction des rovings, des travaux ont précédemment été menés à cette échelle pour des renforts tissés avec des roving de fibres synthétiques ([111] par exemple). Dans ces travaux, le comportement en traction, dans le sens des fibres, des rovings est considéré linéaire sans modification des grandeurs transverses. Nous avons vu (Chapitre 1, I.B.1.c, page 33), que peu d'études s'intéressent au comportement des rovings en traction mais qu'une courbe typique (Figure 11) peut être identifiée pour ce type d'essais et est rappelée ci-dessous :



Cette courbe est alors divisée en plusieurs phases avec :

- Phase 1 : une forte non-linéarité, attribuée à la réorganisation structurale et héritée du comportement non linéaire aux échelles inférieures. On rappelle, en effet, que les fibres au sein des rovings sont appelées fibres techniques et sont des faisceaux délamés plus ou moins fortement par le procédé d'obtention du tirage. Ces faisceaux contiennent des fibres unitaires agencées parallèlement entre elles et maintenues par la lamelle mitoyenne (un composé hémicellulosique de quelques microns d'épaisseurs) [5, 22, 23].
- Phase 2 : zone du comportement considérée « linéarisable » qui permet de définir un module apparent E_{app} (Équation 5) du roving. On peut noter que trois variantes de cette phase existent avec l'alternance de plusieurs zones linéarisables mais de pentes différentes.
- Phase 3 : zone d'endommagement et de rupture progressive du roving avant la ruine complète.

$$E_{app} = \frac{K}{S} \text{ avec } F = K\varepsilon \quad \text{Équation 5}$$

Avec :

- K : la rigidité de la structure (N). Dans le cas d'un comportement linéaire, la rigidité est la pente entre l'effort (F) et la déformation (ε) du roving.
- S : section apparente du roving (mm²). Comme précisé dans le Chapitre 1 (I.B.1.c, page 33), la variabilité de section du roving ne rend pas toujours simple l'estimation d'un module apparent.

L'objectif de la présente étude est de déterminer quelles propriétés doivent être intégrées dans le comportement du roving. Or, l'utilisation d'un comportement linéaire sur l'ensemble spectre de

déformation avec les valeurs de rigidités obtenus à partir de la phase 2 ont pour effet de surestimer l'effort en simulation (Figure 43). Dès lors, l'importance de la phase 1 doit être étudiée en déterminant l'erreur commise par une approximation linéaire du comportement complet des phases 1 et 2 et s'il est nécessaire de prendre le temps d'implémenter cette phase ou si une approche par linéarisation globale du comportement est acceptable.

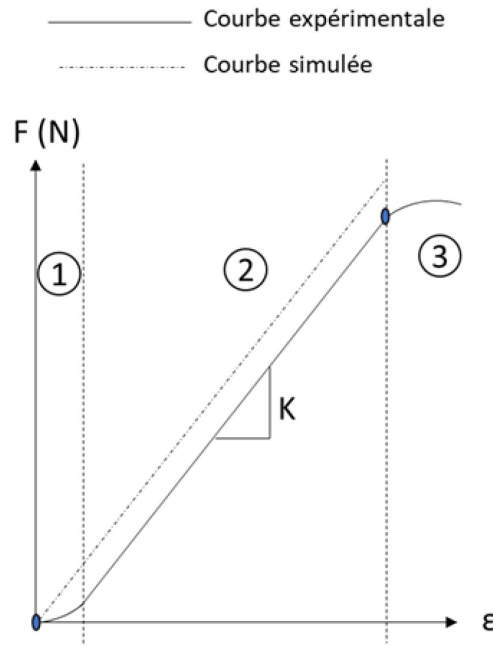


Figure 43 : Surestimation des efforts simulés engendrées par la négligence de la phase 1

A ce jour il n'est pas envisagé d'implémenter l'endommagement de la phase 3 en raison de l'utilisation du roving. Un roving trop endommagé n'a, en effet, que peu d'intérêt pour la suite du procédé et une utilisation au sein d'un composite. Dans le cadre d'une détermination automatique des propriétés, il est, en revanche, nécessaire d'identifier par des critères précis les limites des différentes phases. Or, les premiers essais réalisés ont montré que lors de la phase 2, un endommagement progressif et continu survient (Figure 50). Dès lors, une limite de l'endommagement « acceptable » pour assurer la tenue en service attendue dans le composite doit être déterminée. Ainsi, le post-traitement de l'essai amène à considérer l'approche présentée ci-dessous.

Parmi les grandeurs caractéristiques qu'il est possible d'extraire de la réponse en traction d'un roving, deux points de vue sont proposés :

- Un point de vue *matériau* qui permet de décrire et comparer les caractéristiques du roving avec celui des différentes échelles de fibres ;
- Un point de vue *Modèle de comportement homogénéisé* dont le but est de déterminer quel type de comportement doit/peut être implémenté dans la simulation mésoscopique.

En ce qui concerne le point de vue matériau, les caractéristiques d'intérêts sont :

- Les paramètres qui régissent la ténacité du matériau et représentent l'effort et la déformation maximale [$F_{\max}$, $\epsilon_{\max}$] avant initiation de la ruine du matériau (fin de phase 3 de la Figure 44) ;
- Le paramètre de rigidité [noté K_m] qui représente la rigidité maximale du matériau et se produit lorsqu'un maximum de fibres techniques sont sollicitées simultanément en traction ;

Concernant le point de vue *Modèle de comportement homogénéisé* on se concentrera sur le paramètre de rigidité [noté K_s] associé à la linéarisation du comportement entre la déformation initiale et un point seuil [F_c , ϵ_c] qui détermine l'initiation d'un endommagement de la rigidité maximale supérieur à 30%. Au-delà d'un abattement de 30%, nous pouvons considérer que le fil n'est plus en capacité de remplir sa fonction lors du procédé et dans le composite. L'amorce de cette phase d'endommagement est donc un bon point de repère pour déterminer la limite [F_c , ϵ_c]. Cette valeur peut évidemment être adaptée si l'on souhaite prendre plus ou moins de marge par rapport à la ruine ou la rigidité maximale.

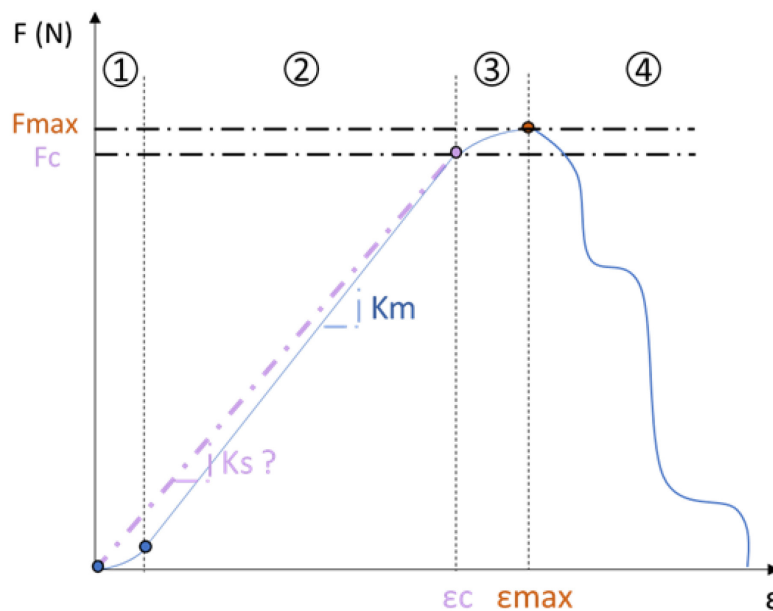


Figure 44 : Représentation schématique de la décomposition par phases du comportement et des grandeurs récupérables d'un essai de traction sur roving de lin.

Le comportement du roving dépend de paramètres à la fois intrinsèques aux fibres naturelles qui le compose et des différents traitements et étapes subis lors de sa fabrication. Ces différentes étapes, l'origine naturelle, ainsi que la complexité de la constitution peuvent ainsi difficilement conduire à une homogénéité de la structure et donc du comportement tout le long du roving. Il faut ainsi s'attendre à une dispersion significative du comportement mécanique. De même, la longueur de jauge, c'est-à-dire la taille de l'échantillon, peut impacter la rigidité de traction. Il sera donc nécessaire

de réaliser une étude statistique des propriétés mécaniques en traction des rovings en fonction des paramètres influents à ce stade du procédé, soit :

- La longueur de jauge ;
- Le contrôle de l'hygrométrie (Température et humidité relative) ;
- L'abattement des propriétés lié au tissage en fonction de la direction trame ou chaîne.

Les procédés de préformage s'effectuent à des vitesses de sollicitations quasi-statiques. Les essais seront donc conduits à faible vitesse de sollicitation sans étudier l'impact de la vitesse.

A. Protocole d'essai de traction uni-axial sur roving de lin

1. Objectifs des essais

Les rovings utilisés sont des rovings de lin de 520 tex (g/km), fournis par l'entreprise Depestele, plats et non retordus (pas de twist). Les échantillons RB (Roving extrait de Bobine) proviennent tous d'un même lot. Les rovings permettant de déterminer l'abattement des propriétés lié au procédé de tissage (RT et RC) proviennent d'un renfort sergé 2x2 de 380g/m² tissé avec des rovings de même titrage. L'ensemble des échantillons sont stockés dans la même pièce à température ambiante.

Pour étudier l'impact de la longueur de jauge sur la rigidité, une dizaine d'échantillons sont préparées par longueur de jauges (20, 30, 50, 150, 200 et 300mm) pour les rovings RB. Les longueurs de jauges choisies permettent de balayer le spectre allant de la longueur des fibres techniques (20-30mm) et jusqu'au « grandes » longueurs, plus représentatives des longueurs mises en jeu à l'échelle du renfort. Cet intervalle permet également de comparer aux autres études du même type [83, 87, 154, 155].

Pour valider l'impact d'un paramètre sur le comportement mécanique, c'est-à-dire, démontrer que deux statistiques sont bien distinctes et que le nombre d'échantillons testé est suffisant, un test de Student est réalisé et est présenté en II.B.1.b (page 93).

$$n_{ech} = \frac{2s^2}{\Delta^2} \times (Z_{\alpha} + Z_{2\beta})^2 \quad \text{Équation 6}$$

Avec :

- s^2 : la variance estimée
- Δ : l'écart entre les moyennes estimées
- $Z_{\alpha}, Z_{2\beta}$: la probabilité associée respectivement au risque α et β (1^{ère} et 2^{ème} espèce).

L'étude de l'abattement des propriétés mécaniques due au tissage, est réalisé par une comparaison entre les échantillons RT et RC et les échantillons RB pour la même longueur de jauge de 50mm. Il

est peu probable que les dégradations subies lors du procédé soient sensibles à la longueur, et la nécessité de répéter les essais, conduirait à une augmentation significative de la campagne expérimentale à réaliser pour confirmer de façon irréfutable cette hypothèse.

2. Méthode de fabrication des éprouvettes

Parmi les différentes problématiques liées à la fabrication et la réalisation des essais sur roving de lin, on note :

- La mise en tension totale de l'échantillon : c'est à dire assurer une tension initiale la plus homogène possible le long de la largeur de l'échantillon.
- L'alignement de la direction préférentielle des fibres dans la direction de traction.
- La maîtrise de la longueur de jauge
- La maîtrise des conditions thermo-hygrométriques (ambiantes donc sujettes à variation)
- La détermination de la déformation de l'échantillon. En effet, les biais possibles sont nombreux sur un fil de lin du fait qu'il n'est pas constitué de fibres longues, et ainsi que la déformation le long du fil est extrêmement hétérogène. Ainsi, la définition et la mesure de la déformation est donc un point d'attention crucial.

La préparation des éprouvettes nécessite ainsi un soin particulier et un protocole rigoureux ne faisant à l'heure actuelle l'objet d'aucune norme, celui-ci a donc été développé par le laboratoire basé sur une adaptation de celui utilisé par le laboratoire pour les fibres synthétiques depuis de nombreuses années. Pour éviter d'endommager les fibres lors d'un serrage excessif et maintenir un encastrement rigide, les échantillons sont collés entre deux talons qui sont ensuite serrés par les mors.

Le protocole de préparation se déroule comme suit :

- Deux talons encollés sont placés dans un gabarit à encoche, obtenu par impression 3D (Figure 45), de la longueur de jauge souhaitée. Ce gabarit permet à la fois de réaliser des échantillons avec une bonne répétabilité sur la longueur de jauge, mais aussi de bien aligner l'échantillon avec la direction de traction ;
- Pour s'assurer que l'échantillon est bien rectiligne et s'affranchir d'une éventuelle ondulation une pré-tension est imposée à chaque extrémité (0.3N).
- Les deux derniers talons sont placés en évitant de créer des bulles d'air ou d'encoller la zone utile de l'échantillon. L'échantillon est ensuite testé après séchage d'au moins 24h de la colle.

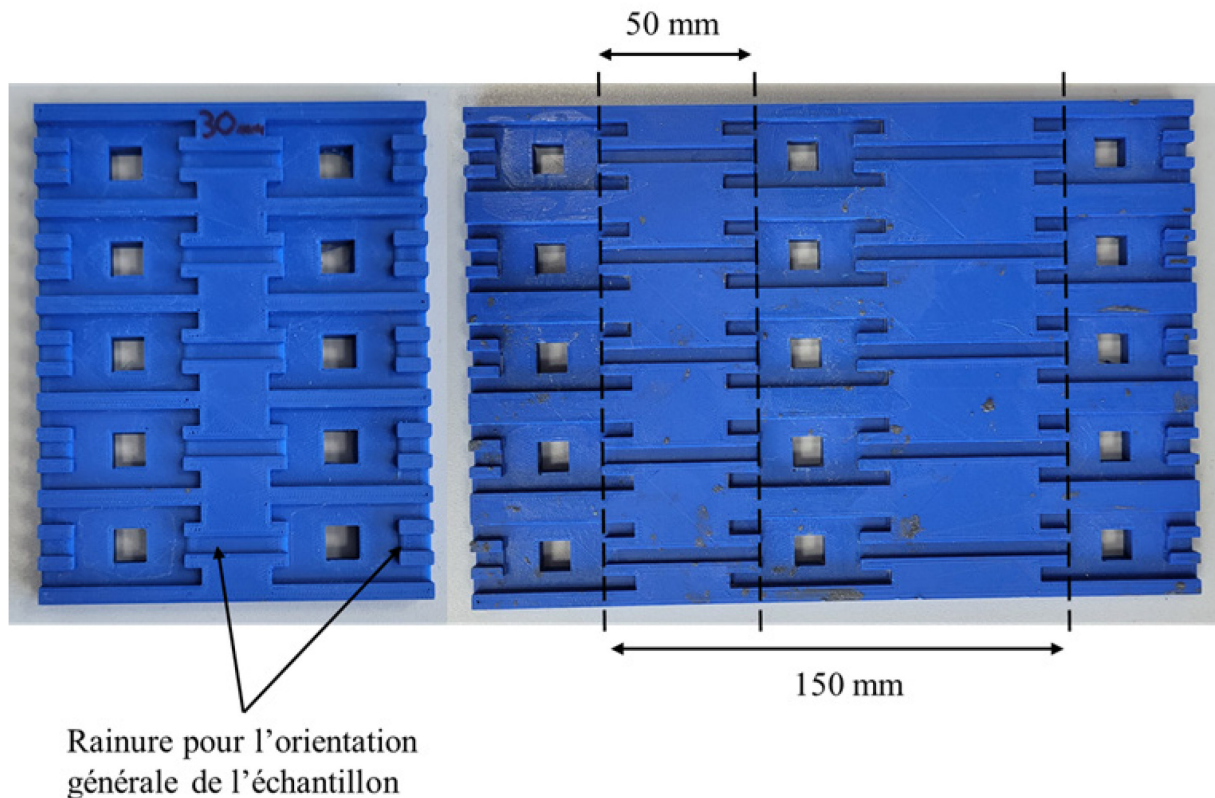


Figure 45 : Gabarit pour la préparation des échantillons à différentes longueurs de jagues

Les échantillons sont prélevés avec une attention particulière portée à la pilosité (Chapitre 1, I.B.1.d, page 38). En effet, le bobinage sollicite en frottement les échantillons ce qui peut endommager les fibres dans certaines zones. Ainsi, les échantillons présentant des ruptures importantes de faisceaux ou des pliures n'ont pas été retenus pour les essais.

Afin de mesurer les déplacements directement sur l'échantillon et ainsi s'affranchir des rigidités et jeux liées à la machine de traction, un appareil photo est mis en place avec pour objectif la réalisation d'un suivi de marqueur. Comme cela a été évoqué, la corrélation d'images basée sur un mouchetis, aurait peu d'intérêt sur un échantillon avec une telle structure et un champ de déformation aussi erratique, en outre, pour définir une déformation moyenne sur l'échantillon. De même positionner des marqueurs tout le long de l'échantillon pour définir les déformations « locales » des différentes zones n'amène pas beaucoup d'informations car ceux-ci se « déstructurent » très vite et la définition de leur centre n'est plus cohérente.

Cela peut être observée sur la figure ci-dessous, où l'on voit clairement les marqueurs se déstructurer sous l'effet des glissements locaux des fibres.

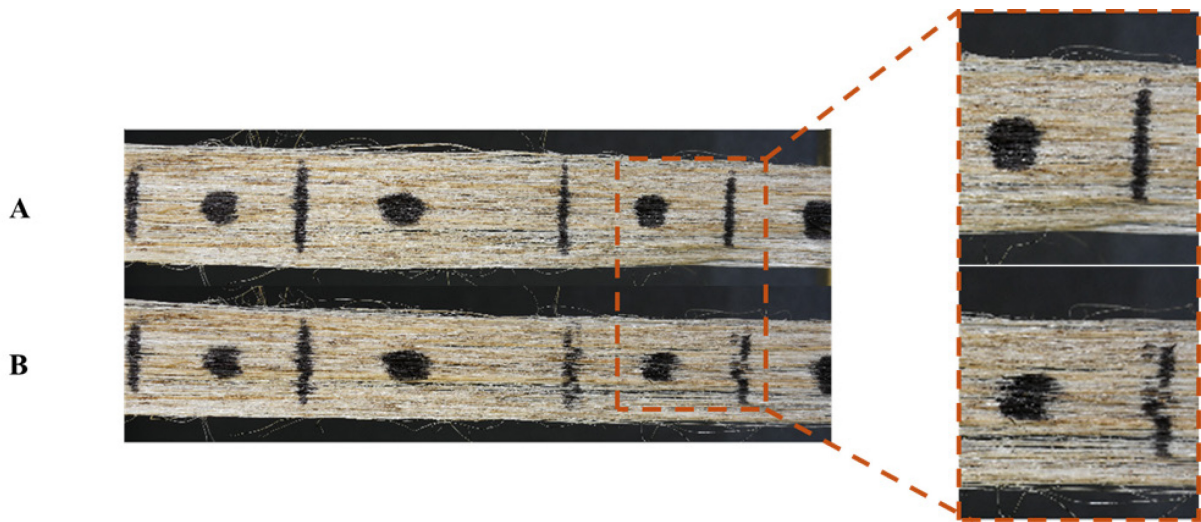
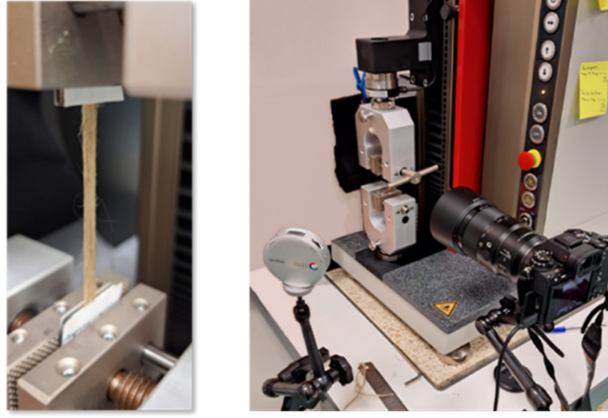
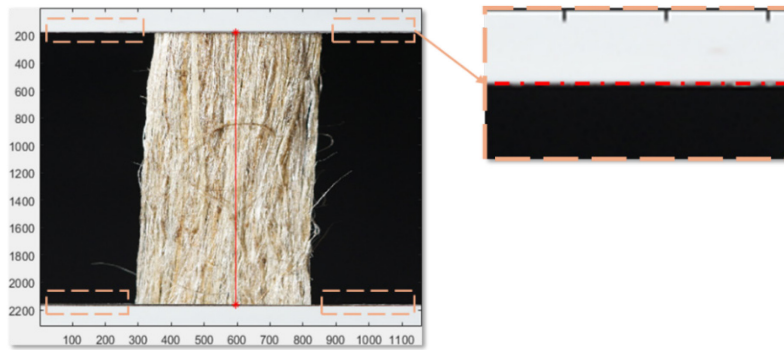


Figure 46 : Image des marqueurs à l'état initial (A) et après 1% de déformation (B)

Moothoo [155] dans ces essais, applique un marqueur de type gouache sur ces échantillons. Néanmoins cette méthode possède deux inconvénients majeurs, l'application de gouache peut potentiellement perturber le comportement de la zone « peinte » mais surtout le suivi n'est pas réalisé sur l'ensemble de la longueur de l'échantillon, mais uniquement entre les deux marqueurs. Or, la déformation de l'échantillon n'est pas homogène, il est donc difficile d'extrapoler la déformation dans la zone non couverte par les marqueurs. Cela peut ainsi entraîner une erreur sur la détermination de la déformation. Le suivi de la déformation moyenne de l'échantillon est donc réalisé par la détermination du déplacement des bords des talons collés aux extrémités de l'échantillons. Cela permet un suivi au plus près de la déformation totale de l'échantillon. Afin d'augmenter le contraste et de ne pas perturber la détection automatique des bords lors de l'analyse des images de l'essai, les talons sont blanchis.



a. Image essai avec appareil photo



b. Image avec talons pour mesure de la distance

Figure 47 : Dispositif d'essai de traction et de mesure de la déformation

Ainsi, la mesure de déformation choisie pour le dépouillement des essais de traction par imagerie est une déformation moyenne sur l'ensemble de l'échantillon issue de la distance entre les talons :

$$\varepsilon_I = \ln \left(\frac{d_T}{d_{T0}} \right)$$

qui peut être approchée avec une erreur négligeable dans le cas de déformations inférieures à 5% par :

$$\varepsilon_I = \frac{d_T - d_{T0}}{d_{T0}}$$

d_{T0} , d_T sont les distances entre les talons respectivement à l'instant initial et déformé.

Cette mesure de déformation est à comparer à celle obtenue via le déplacement de la traverse machine :

$$\varepsilon_M = \ln \left(1 + \frac{u_M}{d_{T0}} \right)$$

qui peut être approchée avec une erreur négligeable dans le cas de déformations inférieures à 5% par :

$$\varepsilon_I = \frac{u_M}{d_{T0}}$$

d_{T0} , u_M sont les distances entre mors à l'instant initial et u_M le déplacement traverse fourni par la machine.

Au-delà d'assurer une mesure fiable de la déformation longitudinale moyenne de l'échantillon, la réalisation du suivi par imagerie permet d'avoir une trace de l'échantillon pendant la totalité de l'essai. Ce suivi a notamment permis de constater la présence d'une déformation transverse. Les images obtenues vont ainsi permettre de déterminer cette déformation transverse pour les différentes longueurs de jauges.

3. Acquisition des résultats

Les essais sont réalisés avec une machine de traction Zwick mono-colonne munit d'un capteur 5kN qui assure une classe 1 dès 20N. L'essai est piloté en déplacement avec une vitesse de déformation constante de 6.10^{-5}s^{-1} (soit $\sim 0.4\%$ /min), celle-ci étant asservie sur le capteur de déplacement de la traverse. La vitesse de déformation de l'échantillon peut ainsi subir de faibles variations mais que l'on peut négliger après avoir vérifié que les déplacements traverses sont proches de ceux obtenues par imagerie.

L'appareil photo utilisé pour le suivi de marqueur est un Sony α équipé d'un objectif Macro FE 2.8/90. L'exactitude des déplacements obtenus dépend du nombre de pixel de l'image qui représente l'échantillon, et donc du rapport pixel/mm. En plaçant l'appareil de façon à maximiser la taille de l'échantillon complet dans l'image, nous obtenons une correspondance pour les échantillons de 20 à 300mm respectivement de 0.01mm par pixel à 0.05mm par pixel. Si l'on considère une incertitude possible de ± 1 pixel sur les mesures de distance, cela permet de garantir une exactitude inférieure à $\pm 0,05\%$ sur la valeur de la déformation pour tous les échantillons.

Le suivi de la déformation moyenne longitudinale des échantillons est donc réalisé à l'aide de deux méthodes :

Méthode 1 : Acquisition par prise d'images à l'aide d'un appareil photo numérique. Cette méthode a plusieurs avantages :

- S'assurer d'un suivi précis du déplacement de l'éprouvette et de sa longueur initiale ;
- S'affranchir d'éventuelles problèmes liés à la souplesse et aux jeux machine ;
- Permettre un suivi imagé de l'essai ;
- Permettre la détermination d'une déformation transverse moyenne de l'éprouvette.

Une première image est prise à précharge pour l'obtention de la longueur initiale de l'éprouvette puis l'acquisition est réalisée avec 1 image/seconde pour les essais quasi-statiques.

Méthode 2 : Une acquisition du déplacement de la traverse via le capteur de déplacement de la machine avec une prise de mesure toutes les 0.1 secondes.

L'utilisation d'une double méthode va permettre de comparer les résultats de chacune d'elle. Les essais étant long à exploiter avec la méthode A, la comparaison statistique des deux jeux de données permet de n'utiliser que les données capteur dans le cas de recherche de rigidité uniquement. Pour effectuer cette comparaison statistique entre les deux jeux de données, un test de rang signé de Wilcoxon (test d'hypothèse, [156]) a été mené aux différentes longueurs de jauge après un premier lot de 5 échantillons testés. Ce test permet de comparer les états avant et après une opération particulière entre deux jeux de données de même taille et ainsi de vérifier si les résultats de l'exploitation entre les données issues de l'analyse d'image (méthode 1) et les données capteur (méthode 2) de la machine sont identiques du point de vue statistique. Ce test est équivalent au test de Student mais peut être mené pour des distributions qui ne suivent pas une Loi Normale. La comparaison des données a montré que les résultats obtenus par les deux méthodes (1 et 2) sont identiques pour un risque α standard.

La présentation des résultats de déformation moyenne dans la direction longitudinale pour la suite de l'étude provient ainsi de l'analyse des données machines (méthode 2). La méthode 1, reste néanmoins cruciale pour vérifier pour chaque essai qu'il n'y a pas de dérive entre déplacements traverses et ceux de l'échantillon.

4. Méthode d'exploitation des résultats

Comme explicité précédemment, l'objectif est d'obtenir le comportement du roving de deux points de vue (matériau, simulation). Etant donné le grand nombre d'essais à post-traiter, un

programme de post-traitement automatique a été créé sous MATLAB. Ce programme consiste à déterminer manuellement une zone de recherche viable pour chaque talon de chaque côté de la mèche et tout au long de l'essai. Un seuillage permet de conserver uniquement les données du talon et permet de déterminer le bord de celui-ci. Une fois les données recueillies, celles-ci sont interpolées linéairement au centre initial de la mèche. La corrélation entre les données images et l'effort machine s'effectue par l'horodatage des images. La longueur initiale de l'échantillon est déterminée manuellement sur la première image de l'essai pour le recalage de la déformation perçue par la machine dans le cadre de la méthode 2. Pour cela, les grandeurs caractérisant la ténacité du matériau $[F_{max}, \varepsilon_{max}]$ sont récupérées sur la courbe du comportement longitudinal moyen C de chaque essai au point d'effort maximal (Figure 44).

La procédure d'exploitation permettant d'obtenir les rigidités maximale K_m et K_s , rigidité linéarisée entre la déformation initiale et le point seuil $[F_c, \varepsilon_c]$, (Figure 44) se déroule comme suit :

- La courbe de comportement longitudinal C est linéarisé par discrétisation (Figure 48) en chaque point i de la courbe sur un nombre de point n_c . Le nombre de point n_c est déterminé comme étant le nombre de points correspondants à $F_{max}/10$. Ce critère permet de ne pas être perturbé par les variations du pied de courbe. Néanmoins, les résultats ont aussi été étudiés avec les critères $F_{max}/15$ et $F_{max}/30$ sans modification notable des résultats. On récupère ainsi la pente K_i de chacune des droites d_i obtenues par régression linéaire pour les n_c points considérés qui représente une rigidité locale ;
- La rigidité matériau K_m est obtenue en calculant le maximum des pentes K_i (Figure 49).

$$K_s = F_c / \varepsilon_c \quad \text{Équation 7}$$

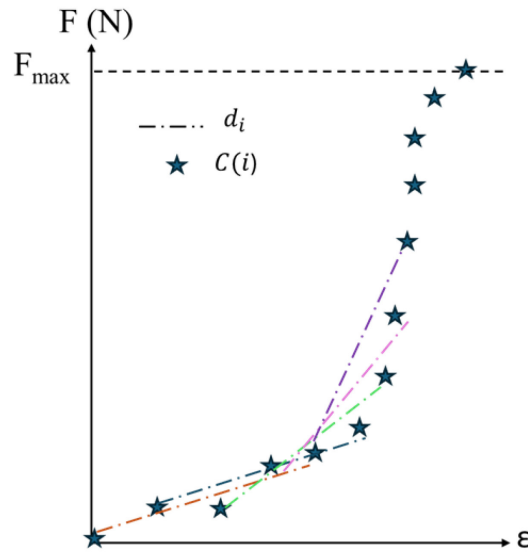


Figure 48 : Linéarisation discrétisée de la courbe de comportement longitudinal du roving

A partir de la rigidité matériau on recherche le premier abattement de rigidité supérieur à 30% de la rigidité K_m . On cherche ensuite à retrouver le point d'initiation lié à cet abattement pour obtenir les coordonnées $[F_c, \epsilon_c]$ (Figure 44) et calculer la rigidité K_s (Équation 7) associé à la linéarisation du comportement. Pour cela, une routine Matlab permet de remonter la courbe de rigidité tant que la pente de courbe de rigidité est supérieure à 30° , c'est à dire que nous sommes dans une phase aigüe d'endommagement. Ce critère reste évidemment discutable puisque l'endommagement est progressif, et que les seuils sont par définition dépendants des limites définies par le fabricant et des performances souhaitées en aval. Cela-dit, ce critère semble un bon compromis de base pour définir le démarrage de l'endommagement critique puisqu'il combine une perte significative de rigidité (30%) avec un endommagement rapide (pente $>30^\circ$).

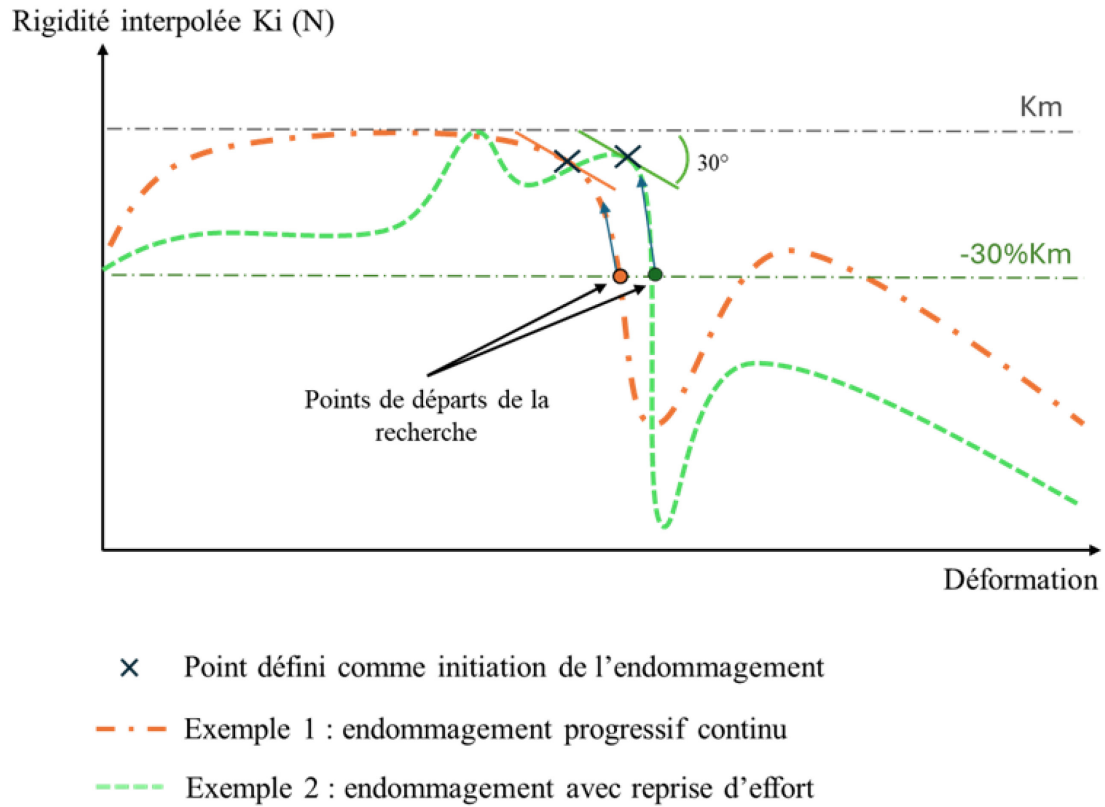


Figure 49: Obtention des rigidités K_m et K_s à partir de la linéarisation du comportement longitudinal moyen

Afin de déterminer si la linéarisation du comportement moyen envisagée avec le calcul de K_s est acceptable, le coefficient de corrélation R^2 (Équation 8) est calculé entre le comportement linéarisé obtenu avec la rigidité K_s et la courbe du comportement C de l'essai. L'erreur absolue maximale sur l'effort et la déformation sont aussi calculés pour vérifier que l'erreur commise localement est là encore acceptable.

$$R^2 = \frac{1}{(n-1)} \times \sum_i^n \left(\frac{C_i - m_C}{s_C} \times \frac{L_i - m_L}{s_L} \right) \quad \text{Équation 8}$$

Avec :

- n : nombre de données que l'on a linéarisé. Correspond au nombre de point de la courbe C entre le point de déformation initial et le point $[F_c, \varepsilon_c]$
- C : la courbe de comportement « réel »
- L : la courbe de comportement linéarisé, de pente K_s
- m_C, m_L : respectivement la moyenne de C et L
- s_C, s_L : respectivement l'écart-type de C et L

Ci-dessous un exemple d'exploitation obtenue sur un échantillon de 150mm :

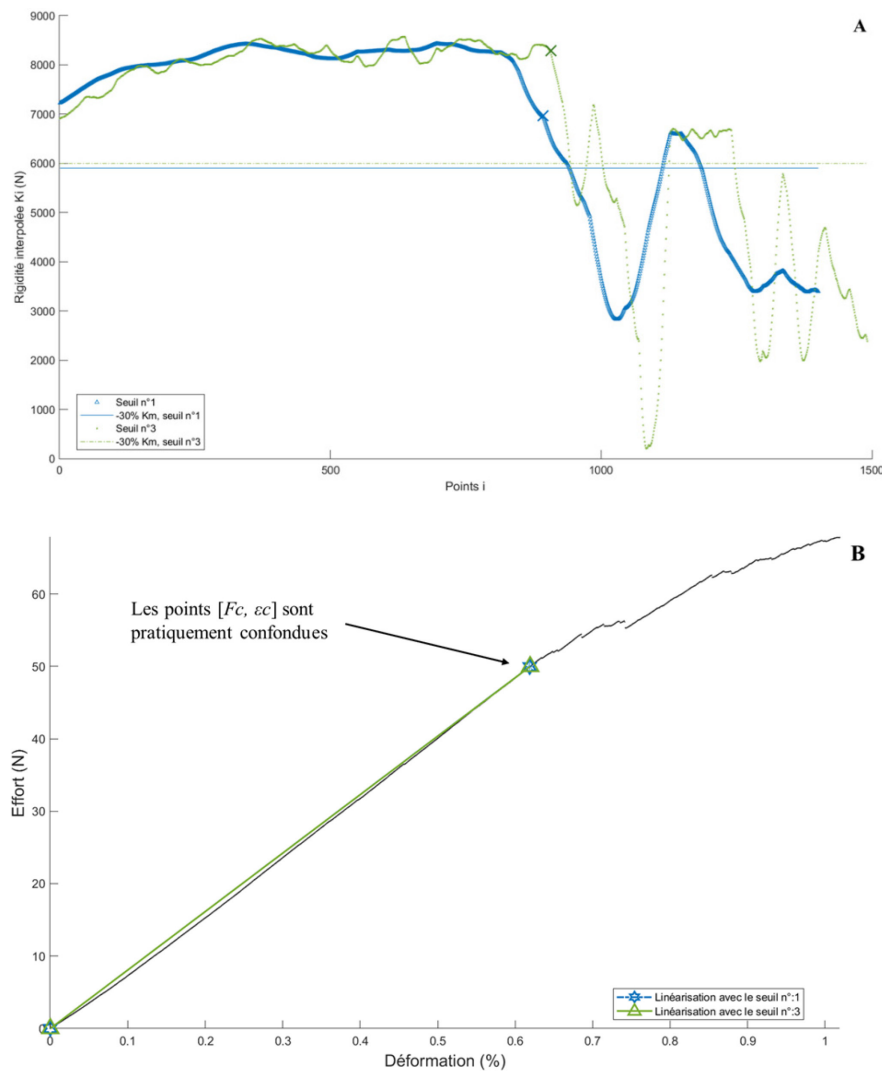


Figure 50: Exemple d'exploitation sur essai réel : (A) Interpolation linéaire de la rigidité, (B) Points $[F_c, \epsilon_c]$ avec les différents seuils $[F_{max}/10 ; F_{max}/30]$.

L'utilisation du suivi par imagerie de l'échantillon a mis en évidence un phénomène important de déformation transverse de l'éprouvette lors de la traction. Il est important de constater que ce phénomène n'est pas ou très peu présent dans les roving de fibres synthétiques, ce qui constitue une nouvelle différence notable de comportement mécanique entre ces deux types de fil. Les images ont donc été traitées afin de déterminer la déformation moyenne de la largeur de l'échantillon pendant les essais. Le post-traitement des essais consiste à déterminer à l'aide d'un code Matlab spécifiquement développé, sur chacune des images, le contour de l'échantillon (Figure 51) puis de suivre l'évolution moyenne de la largeur. Néanmoins, la présence de fibres non accolées complètement à l'échantillon perturbe la détermination. Pour palier cela, la continuité du profil est utilisée, ainsi que le filtrage des ruptures « brutales » de largeur. Comme pour l'exploitation longitudinale, les images sont seuillées

par niveau d'intensité, ce qui permet d'éliminer une partie des fibres « parasites ». Le contour du profil est déterminé à l'aide d'une zone de recherche entrée par l'utilisateur qui est par la suite déterminée autour de la position précédente. Afin d'éviter une dérive interne par fissuration, priorité est donnée aux pixels en positions externes. Un contrôle visuel par groupe d'images est effectué afin d'intervenir et corriger le contour dans le cas d'une dérive sur les fibres parasites restantes. Cela entraîne un temps de post traitement considérable par essai et justifie le nombre d'échantillons testés. Rappelons que l'objectif est de déterminer un ordre de grandeur de la déformation transverse qui n'était pas attendu dans cette étude. De plus, la littérature mentionne un effet de vrillage des faisceaux lors d'un essai de traction dues aux contraintes de cisaillement de la lamelle mitoyenne. Cet effet, a pu être observé à plus grande échelle sur le roving et peut augmenter artificiellement la déformation transverse perçue sur les images. Les échantillons vrillés sont donc systématiquement exclus de l'analyse. On note ici que seuls les échantillons extraits de bobines sont concernés par cette analyse. En effet, en plus de l'augmentation de la pilosité des échantillons extraits de renforts, le « dépliement » des mèches rend impossible la détermination de l'évolution du contour de la mèche par cette méthode.

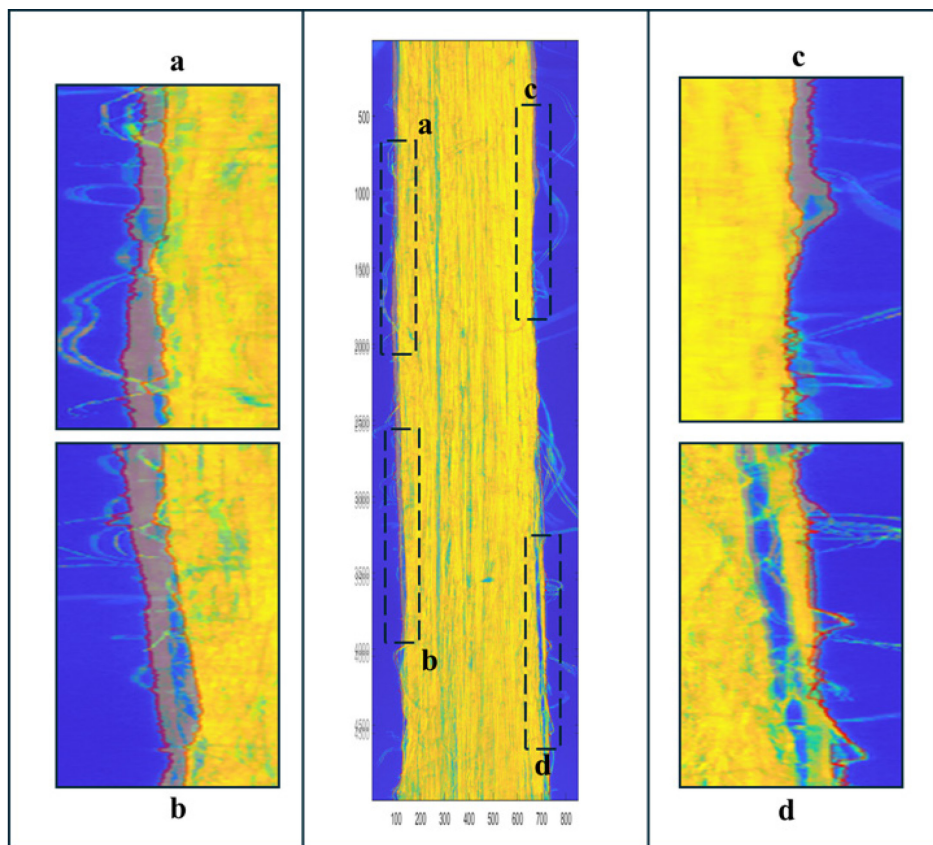


Figure 51 : Exemple de post traitement (superposition de l'état initial en transparence à l'état $[F_{max}; \epsilon_{max}]$) pour la détermination de la déformation transverse lors d'un essai de traction. Les lignes en rouges représentent le contour détecté.

B. Résultats des essais de traction uni-axial sur roving

1. Déformation longitudinale de l'éprouvette

a. Ténacité :

Les paramètres de ténacité du roving avant tissage (effort maximal atteint et déformation à ce niveau [F_{max} ; ε_{max}]) ainsi que la survenue de la ruine du matériau ont été observés (phase 4 -Figure 44) et sont présentés ci-après (Figure 52).

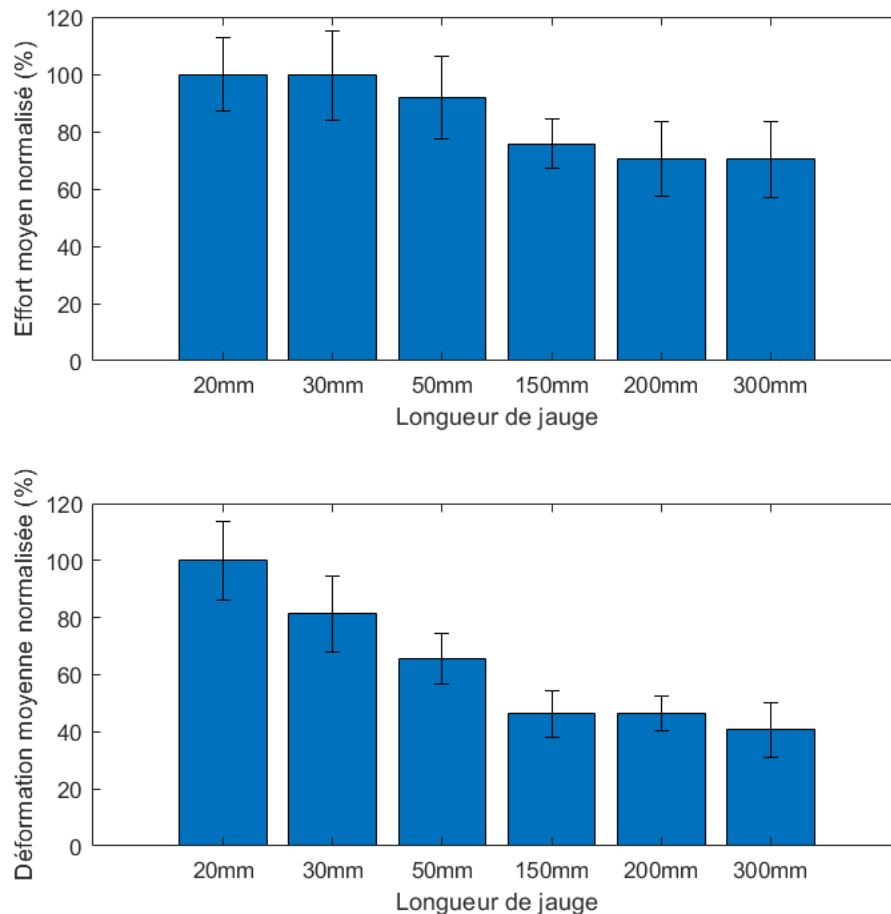


Figure 52 : Effort moyen F_{max} et déformation moyenne ε_{max} maximal des rovings avant tissage pour chaque longueur de jauge par rapport à la longueur de jauge 20mm

La diminution de l'effort maximal avec l'augmentation de la longueur de jauge est un résultat logique et classique car l'augmentation de longueur augmente de facto la probabilité de trouver un défaut critique dans l'échantillon. De même, la diminution des écart types pour les grandes longueurs de jauge est également conforme à la distribution probabiliste de défauts qui sont à l'origine de la rupture.

L'observation des phases 3 et 4 du comportement (Figure 44) montre (Figure 53) que le processus d'endommagement et de ruine du matériau ne s'effectue pas à la même vitesse entre les éprouvettes de petites et grandes longueurs de jauge (on rappelle que les essais sont effectués avec une vitesse de déformation constante). En effet, on observe à 20mm un endommagement en phase 3 plus long avec de multiples reprises d'effort dans la phase 4. Avec l'augmentation de la longueur de jauge, la phase d'endommagement entraînant la ruine est de plus en courte et la phase de ruine présente des sauts de rupture plus prononcés.

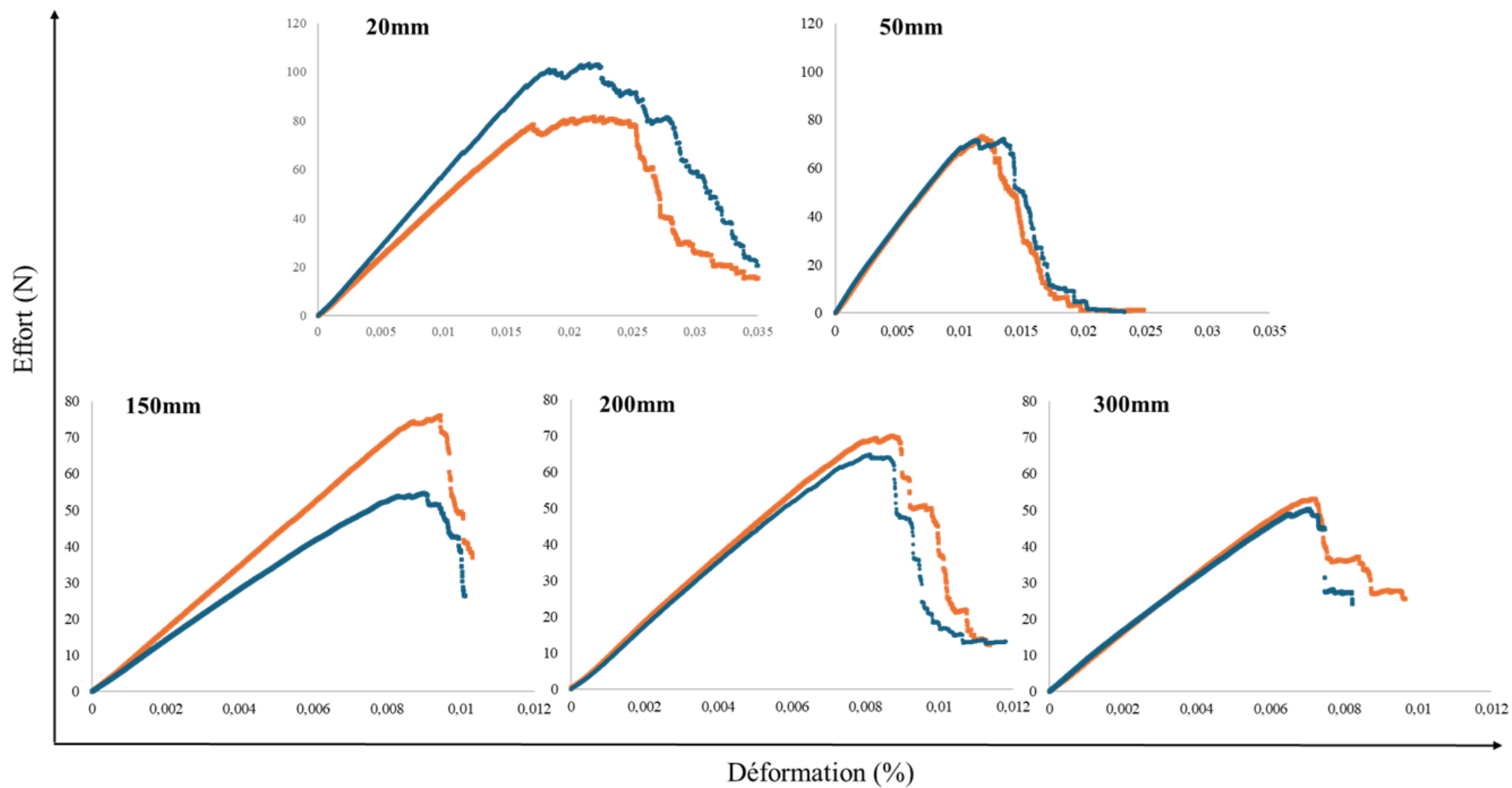


Figure 53 : Exemples de la forme de l'endommagement suivant la longueur de jauge

L'observation qualitative de la ruine du matériau montre que les mécanismes mis en jeu lors du chargement de l'éprouvette diffèrent suivant la longueur de jauge. La sollicitation du réseau fibreux entraîne une modification de la réponse du comportement du roving. Une étude plus approfondie des mécanismes de rupture, ainsi qu'une analyse de la nature « Weibulienne » de la rupture ou non, serait d'un grand intérêt, cependant, ce point ne sera pas traité dans ce document. En effet, dans le cadre de ce travail, l'enjeu est de pouvoir modéliser et décrire le comportement du fil dans sa zone d'intégrité mécanique et donc en amont des phases de ruptures significatives. Nous nous concentrerons donc sur la zone en amont de l'amorce d'endommagement significatif défini par $[F_c, \epsilon_c]$ dans le paragraphe précédent.

b. Rigidité Maximale (dites « Matériau »)

Concernant la rigidité matériau K_m , les résultats sont présentés en Figure 55 et les paramètres des distributions sont résumés dans le Tableau 3. Comme cela pouvait être prévisible étant donné le procédé de fabrication et la structure des fils, les résultats sont très dispersés avec un écart type de l'ordre de 10 à 15% de la valeur moyenne, notamment pour les faibles longueurs de jauge, ce qui nous conduit à un intervalle de confiance de ± 20 à 30% pour un taux de confiance de 95%. Cette grande variabilité devra d'une part être prise en compte dans la modélisation, mais induit également une difficulté supplémentaire pour analyser l'influence des paramètres, puisqu'elle conduit à augmenter le nombre d'échantillons nécessaires pour conclure sur les tests d'hypothèse. En effet, le graphique ci-dessous illustre les nombres théoriques d'échantillon nécessaire pour pouvoir conclure avec des niveaux standards de risque α et β (5 et 20%). Cela confirme clairement la difficulté de discriminer de petits écarts avec des grandes variabilités.

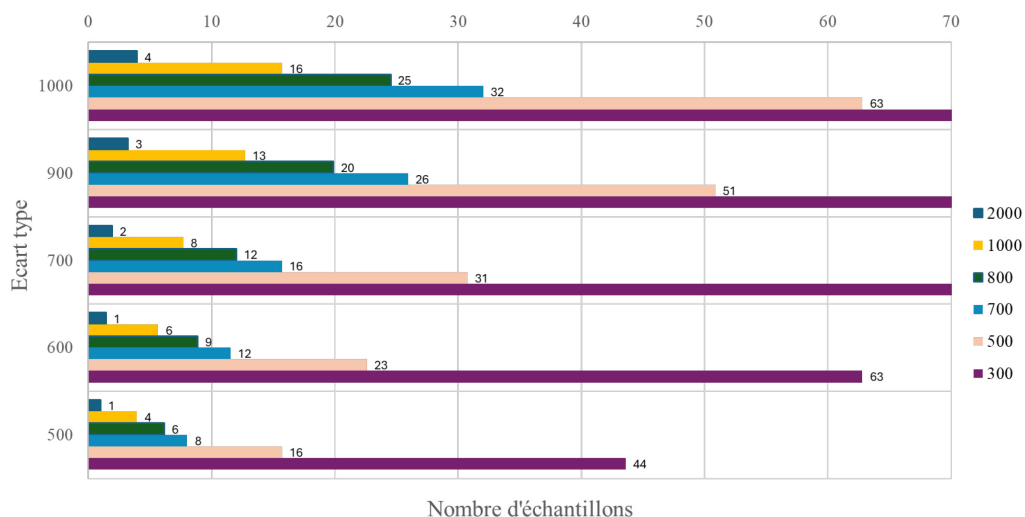


Figure 54 : Estimation du nombre d'échantillon nécessaire pour des séries avec un Δ entre 300 et 2000 pour des écarts-types entre 500 et 1000 avec un risque $\alpha=5\%$ et $\beta=20\%$.

En ce qui concerne l'influence de la longueur de jauge, contrairement aux études de la littérature [26, 80, 155], l'augmentation de la longueur de jauge induit une augmentation de la rigidité K_m (Figure 55). En revanche une tendance qui semble asymptotique pour les grandes longueurs est observée conformément aux constatations des autres études. La structure des rovings étudiés dans les articles [26, 83] sont significativement différentes de celle à l'étude ici, par exemple, un fil d'âme était présent dans les fils étudiés par J Moothoo. Cela nous conduit à une première conclusion intéressante : la chute de rigidité qui avait été observée dans les autres rovings, n'est pas intrinsèquement liée à la nature des fibres techniques de lin mais bien à la structure globale du fil, issue du procédé et de l'ensimage.

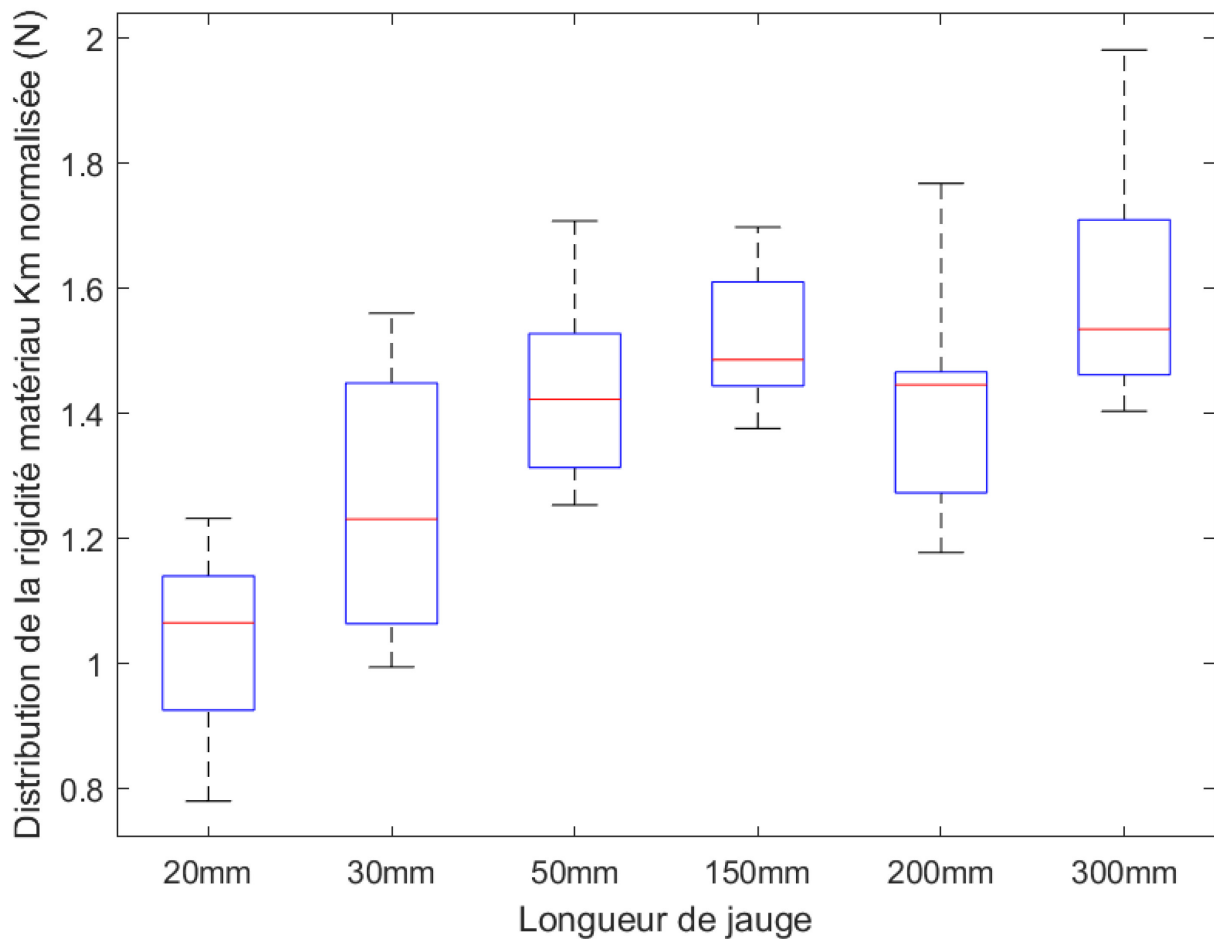


Figure 55 : Répartition des distributions de rigidité K_m pour chaque longueur de jauge avant tissage par rapport à la rigidité K_m moyenne de l'ensemble des longueurs de jauges

Longueur de jauge (mm)	20	30	50	150	200	300
Ecart Moyen (%)	0	23	40	48	36	54
Ecart-type (%)	14.5	15.9	9.5	6.7	11.2	11.1

Tableau 3 : Caractéristiques de la rigidité Km pour les différentes longueurs de jauges par rapport à la longueur de jauge 20mm

Afin de vérifier si les écarts sont réellement significatifs d'un point de vue statistique, le test de Student avec les valeurs standards pour les risques α et β est effectué. Les tests de Student réalisés sont des tests bilatéraux, avec une hypothèse H_0 qui considère que les séries sont identiques. L'obtention d'une P-value inférieure au seuil du risque α (Tableau 4) signifie que l'hypothèse H_0 est rejetée et que les séries sont différentes mais ne signifie pas pour autant que les séries avec des valeurs supérieures sont identiques.

	30	50	150	200	300
20	0,007	1,34E-07	7,04E-09	1,17E-06	2,65E-07
30		0,029	0,003	0,087	0,001
50			0,146	0,492	0,048
150				0,041	0,300
200					0,017

Tableau 4 : P-value obtenue entre les différentes longueurs de jauges pour la rigidité matériau Km (en bleu la p-value est inférieure au critère α).

A l'aide du tableau 2 et de la figure 7, nous pouvons constater que le nombre d'échantillons (10) et les P-value obtenues permettent de conclure à une différence statistiquement significative entre les longueurs de jauge 20, 30, 50 mm, ce qui confirme bien l'augmentation de la rigidité initialement observée Figure 54 avec la longueur de jauge dans cette plage.

Par la suite, la tendance asymptotique qui semble se dégager rend très difficile une confirmation statistique puisque les écarts de moyenne deviennent petits au regard de la variabilité, et qu'un nombre très important d'échantillons serait nécessaire. Cela peut sans doute expliquer la position particulière de la longueur 200mm au regard des autres longueurs (150 et 300mm).

Cela dit, l'observation de l'ensemble des jauges 150 à 300 semble clairement indiquer une stabilisation de la rigidité, avec des écarts qui s'ils existent restent faibles au regard de la variabilité intrinsèque. Il semble donc peu pertinent à ce stade d'investir un temps et une énergie importante pour discriminer des écarts noyés dans la variabilité.

Au vu des écarts moyens et de la variabilité constatés entre les séries et du nombre d'échantillons testés (Équation 6, Figure 54), les séries avec les longueurs de jauges de 30 à 300mm ne peuvent être discriminés complètement par les résultats du test de Student. Néanmoins la tendance asymptotique des résultats avec des écart moyens faible et une grande répartition des plages de résultats suggèrent une zone de transition autour de 50mm puis une stabilisation de la rigidité aux alentours de 150 mm. Ainsi, une longueur de jauge de 150 à 300 mm permet d'avoir atteint la zone stabilisée de la rigidité. Cette gamme de longueur pourra ainsi être considérée pour la suite comme représentative de la rigidité aux « grandes longueurs » mises en jeu lors de la mise en œuvre d'un renfort fibreux.

L'interprétation de cette augmentation de la rigidité en fonction de la longueur de jauge n'est pas triviale, et peut même apparaître contre-intuitive. Le point de départ, est que la rigidité des fibres n'est pas supérieure à celle des lamelles mitoyennes qui les relie. Ainsi, converger vers la taille des fibres, n'est pas synonyme d'une augmentation de la rigidité, contrairement à ce qui pourrait être pensé en première approche. Plusieurs explications peuvent être avancées et mériteraient d'être validées par un travail spécifique aux petites échelles qui est hors du scope de cette thèse. La diminution de la rigidité maximale aux faibles longueurs de jauge illustre le fait qu'un nombre plus faible de fibres techniques « travaillent » simultanément au niveau de la zone de rigidité maximale ou que les fibres ne sont pas alignées dans la direction de traction. En effet, converger vers la taille des fibres unitaires de lin, implique qu'un nombre croissant de fibres unitaires sont encastrées dans les mors à leur 2 extrémités, cela a pour conséquence de verrouiller leur position et d'empêcher toute réorganisation et donc réaligement dans la direction de traction. De même, les effets de « déondulation » locales, qui sont favorisés par les effets de structure peuvent être limités par le verrouillage des fibres. Cela peut également expliquer la rupture plus progressive dans les faibles longueurs de jauge puisque les fibres travaillent moins simultanément. L'analyse du comportement des rovings à partir de leur architecture et de leurs constituants est une tâche extrêmement complexe qui est encore très loin d'être abouti à ce jour malgré un travail intense de plusieurs équipes. Cela reste la seule à pouvoir fournir une validation des hypothèses ci-dessus.

c. Rigidité linéarisée

L'approximation linéaire du comportement pour l'obtention de la rigidité K_s pour chaque longueur de jauge est présenté en Figure 56. On constate la même tendance que pour les résultats sur la rigidité matériau. Ainsi, la même analyse statistique conduit aux mêmes conclusions qui ne seront pas reprises ici sur la dépendance de la rigidité linéarisée à la longueur de jauge et la convergence à 150 mm (Tableau 3, Tableau 5, Tableau 6). Néanmoins, la rigidité K_s , issue de la linéarisation d'un comportement par nature non-linéaire, subit l'influence de la mise en tension des rovings (phase 1 Figure 44) et du début de l'endommagement après la rigidité maximale. Les rigidités obtenues sont donc évidemment plus faibles ($\approx 10\%$ en moyenne par rapport à la rigidité maximale du matériau (Tableau 3 et Tableau 5).

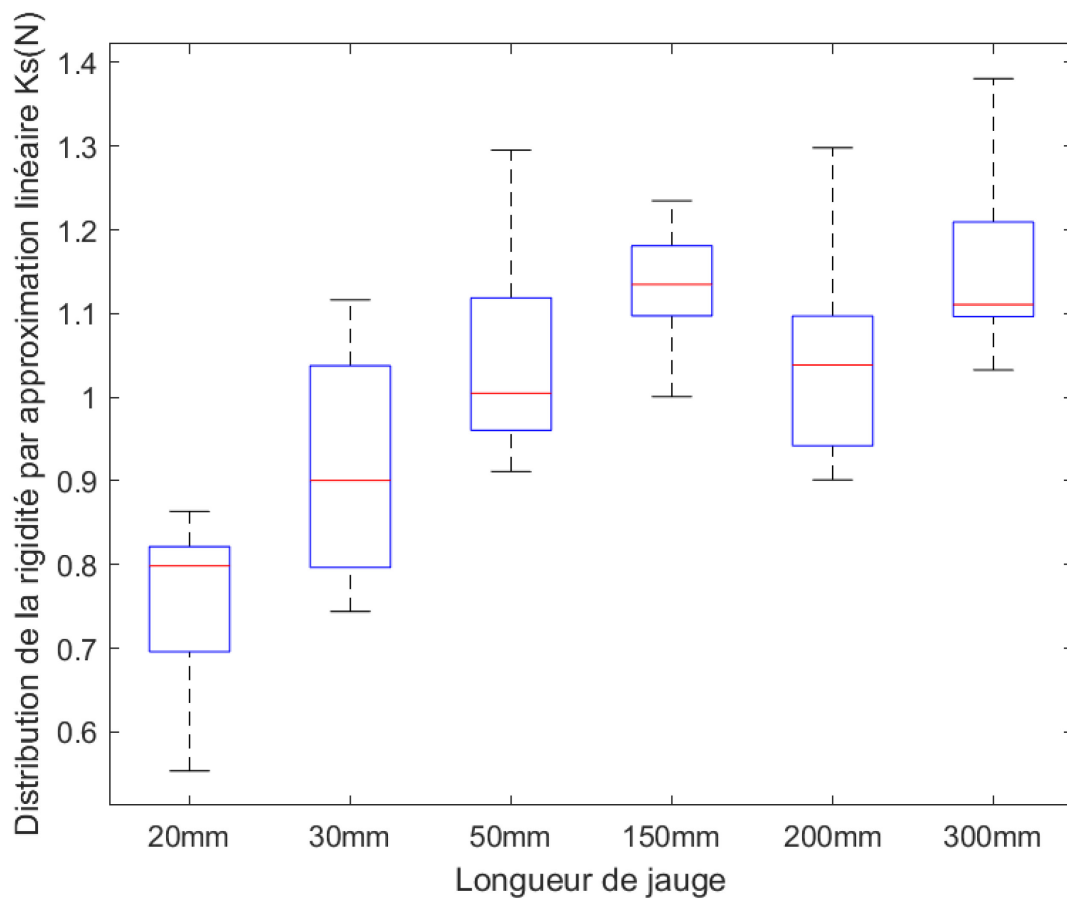


Figure 56 : Répartition des distributions de rigidité K_s pour chaque longueur de jauge avant tissage par rapport à la rigidité K_s moyenne de l'ensemble des longueurs de jauges

Longueur de jauge (mm)	20	30	50	150	200	300
Ecart moyen (%)	0	22	38	50	37	52
Ecart-type (%)	13.4	14.0	11.4	5.9	11.4	8.6

Tableau 5 : Caractéristiques de la rigidité K_s pour les différentes longueurs de jauges par rapport à la longueur de jauge 20mm

	30	50	150	200	300
20	0.004	6.75E-07	6.88E-10	5.91E-07	1.10E-08
30		0.026	4.27E-04	0.036	3.60E-04
50			0.041	0.831	0.037
150				0.020	0.679
200					0.020

Tableau 6 : P-value obtenue entre les différentes longueurs de jauges pour la rigidité K_s (en bleu la p-value est inférieure au critère α).

Bien qu'il soit possible de déterminer une valeur de rigidité K_s du comportement linéarisé pour chaque catégorie, il faut vérifier que la linéarisation ne provoque pas une erreur trop importante sur le comportement mécanique, car cela nécessiterait de considérer un modèle non-linéaire pour la modélisation de celui-ci. Afin de déterminer cela, une erreur moyenne globale représentée par le coefficient de corrélation de la droite (Équation 8) est calculée. De plus, il faut aussi éviter localement des erreurs trop importantes et l'écart absolue en effort et en déformation a donc été estimé. Les résultats sont présentés en Figure 57 et montre que l'approximation linéaire du comportement est acceptable d'autant plus pour les grandes longueurs de jauges qui présentent une phase 1 (Figure 44) peu accentuée.

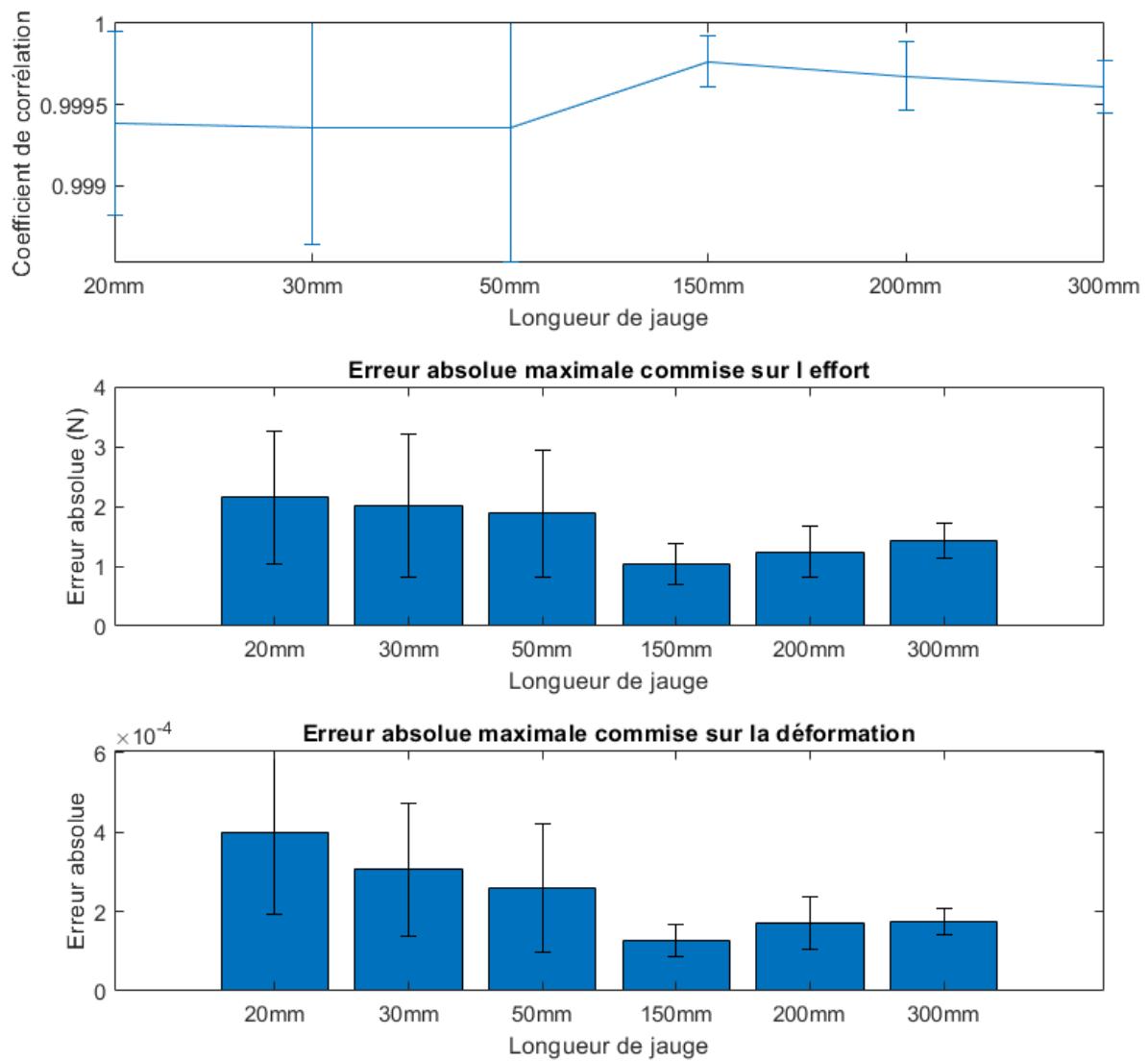


Figure 57 : Erreur absolue et locale moyenne commise par l'approximation linéaire du comportement pour chaque longueur de jauge

La conclusion de cette partie est qu'une rigidité linéarisée à une longueur de jauge comprise entre 150 et 300 mm peut être considérée comme rigidité de traction d'une mèche sortie de bobine.

d. Influence de l'humidité relative

D'après les études [27, 105], les fibres unitaires de lin sont sensibles à l'humidité relative même si cela est moins vrai dans le cas des faisceaux (et donc des rovings) [27]. Bien que cela ne soit pas l'objet de l'étude, la température et l'humidité relative ont été relevées lors des essais. Afin de comparer l'influence des conditions hygrométriques sur la rigidité des échantillons (Figure 58), les données hygrométriques ont été converties en humidité relative équivalente à la température de 23°C.

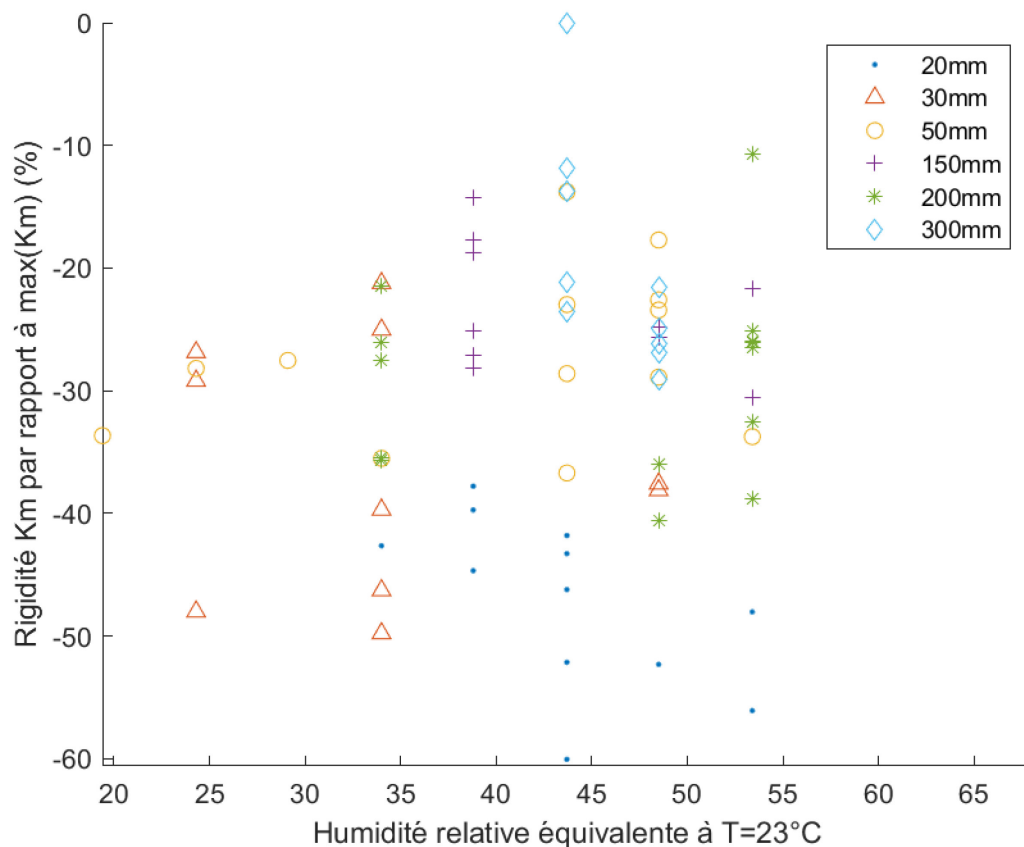


Figure 58 : Comparaison des rigidités Km vs les conditions hygrométriques équivalentes à 23°C relevés lors des essais

La plage d’hygrométrie relevée lors des essais est dispersée mais aucune tendance claire ne semble se dégager entre les conditions hygrométriques et les résultats observés sur la rigidité des rovings. Cela ne signifie pas forcément que les conditions hygrométriques n’influencent pas le comportement des rovings mais cela peut signifier que ce phénomène n’est pas visible eu égard à la variabilité des résultats observés sur la rigidité.

e. Abattement de la rigidité liée au procédé de tissage :

Afin de déterminer l’abattement des propriétés à utiliser dans les simulations sur renfort, des échantillons ont été extraits d’un renfort sergé 2x2 et testés suivant le même protocole que les échantillons avant tissage. La longueur de jauge utilisée pour déterminer cet abattement est la longueur de 50mm. Dans la suite, les résultats nommés RB représentent les échantillons avant tissage, RT et RC représentent les échantillons extraits de renforts respectivement sens trame et sens chaîne.

Les résultats concernant la ténacité [F_{max} ; ϵ_{max}] des rovings avant et après tissage sont présentés en Tableau 7. On constate qu’en moyenne l’effort maximal atteint par les rovings sens trame chute de près de 20% et même de 30% pour les rovings sens chaîne. Concernant la déformation, celle-ci reste identique en sens chaîne mais augmente en moyenne d’environ 12% en sens trame. Ceci peut en

partie être expliqué par le fait que les rovings en sens trame subissent davantage l'embuvage dans le renfort. Cela provoque une ondulation des fibres et une modification locale de la structure plus difficile à redresser en tension.

		RB	RC	RT
F_{max} (N)	Ecart moyen (%)	0	-19	-28
	Ecart-type (%)	14.4	9.8	14.2
ε_{max} (%)	Ecart moyen (%)	0	0	12
	Ecart-type (%)	8.9	10.6	11.6

Tableau 7 : Comparaison des ténacités obtenues pour les rovings avant et après tissage par rapport aux résultats obtenus pour les échantillons RB

La répartition des rigidités K_m obtenues pour les trois types de rovings sont présentés ci-après en Figure 59. On constate une chute de la rigidité K_m entre avant et après l'étape de tissage (Tableau 8). De plus, on remarque une différence notable entre les rovings sens trame et sens chaîne. Cette différence est confirmée par la suite avec les résultats des tests de Student (Tableau 9).

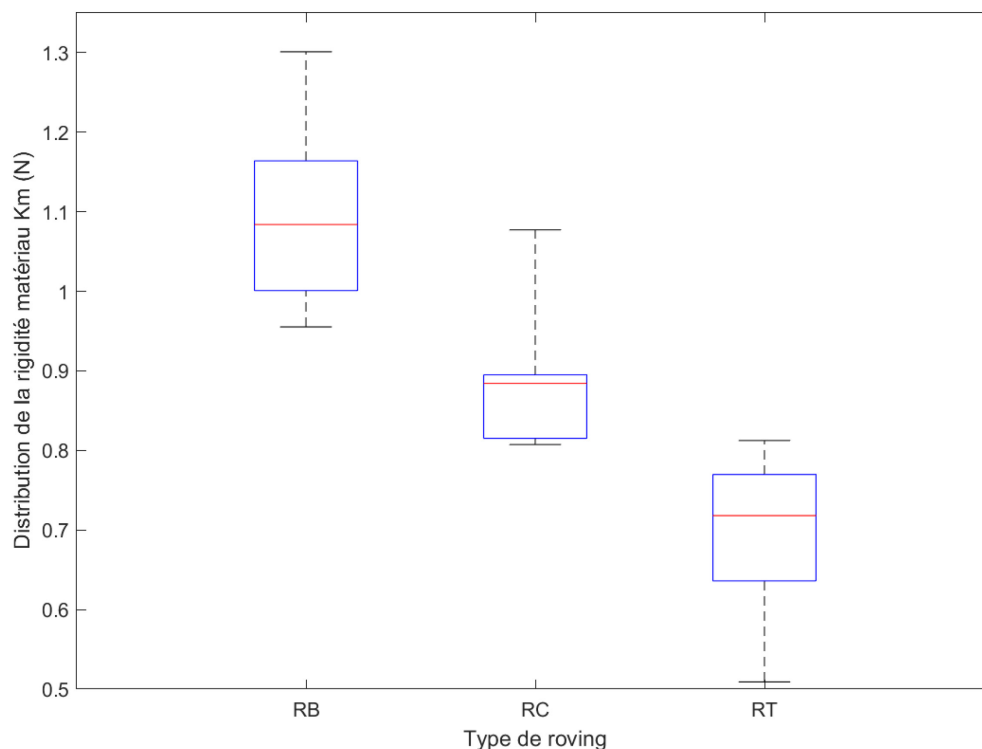


Figure 59 : Répartition des distributions de rigidité matériau K_m pour chaque type de roving avant et après tissage

Type de roving	RB	RC	RT
Ecart moyen (%)	0	-20	-36
Ecart-type (%)	9.5	9.0	13.2

Tableau 8 : Caractéristiques de la rigidité K_m pour les différents types de roving

	RC	RT
RB	1.3E-05	4.8E-09
RC		2.0E-04

Tableau 9 : P-value obtenue entre les différents types de roving pour la rigidité K_m (en bleu la p-value est inférieure au critère α).

Ainsi, la rigidité matériau K_m chute en moyenne, par rapport aux rovings avant tissage, d'environ 20% pour les rovings sens chaîne et d'environ 36% pour les rovings sens trame. Concernant la rigidité K_s , les résultats sont résumés ci-après (Tableau 10 et Tableau 11) et suivent la même tendance que pour la rigidité matériau. Là encore la différence moyenne entre les rigidités K_s et K_m sont d'environ 10-12%.

Type de roving	RB	RC	RT
Ecart moyen (%)	0	-20	-37
Ecart-type (%)	11.3	9.6	12.4

Tableau 10 : Caractéristiques de la rigidité K_s pour une longueur de jauge de 50mm pour les différents types de roving par rapport aux résultats des échantillons RB

	RC	RT
RB	7.8E-05	7.5E-09
RC		8.0E-05

Tableau 11 : P-value obtenue entre les différents types de roving pour la rigidité K_s (en bleu la p-value est inférieure au critère α).

Il faut encore vérifier que la linéarisation du comportement est acceptable pour les rovings au sein du renfort. Dans les deux cas, le coefficient de corrélation est supérieur à 0.998. L'erreur maximale moyenne commise sur l'effort est de 2.2 ± 1 N pour le roving sens chaîne et 2.3 ± 1.3 N pour le sens

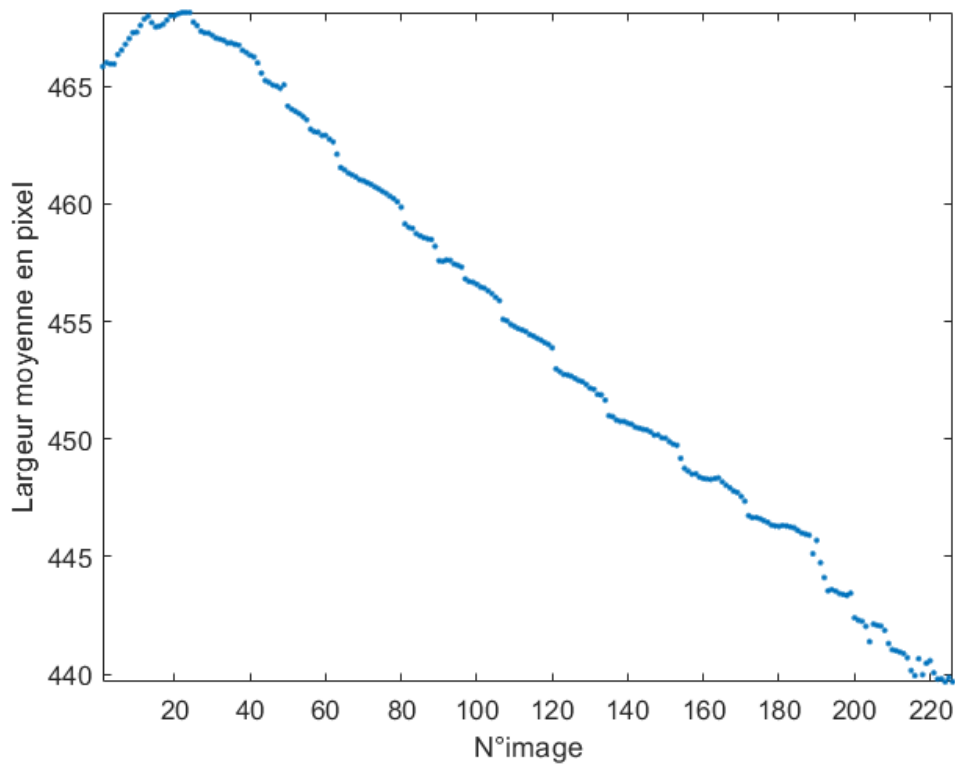
trame. L'erreur maximale moyenne commise sur la déformation est quant à elle de $(3.7 \pm 1.76) \cdot 10^{-4}$ pour le roving sens chaîne et $(4.8 \pm 2.56) \cdot 10^{-4}$ pour le sens trame.

Si l'on pouvait s'y attendre car les fils sont très sollicités pendant l'étape de tissage et que cet abattement est également connu pour les fibres synthétiques, cette étude confirme l'impact significatif du procédé de tissage sur l'intégrité et donc le comportement mécanique des rovings, aussi bien d'un point de vue de la ténacité que de la rigidité. Elle permet en outre de quantifier cet impact. En effet, il semble important pour l'avenir de pouvoir extrapoler le comportement mécanique du fil in-situ à partir de celui de la bobine. Cela permet de réduire les étapes liées à l'identification tout en ouvrant la voie à des simulations prédictives qui est un élément majeur pour le développement des modèles mésoscopiques. Il serait par la suite intéressant de faire varier les outils et les paramètres procédé (contexture, tensions, vitesses, ...) pour voir quel est l'impact sur l'abattement.

Ainsi, dans le cas d'une simulation numérique sur renfort, la rigidité K à utiliser dans le paramètre C1111 dépend aussi de la direction au sein du renfort et dont l'abattement correspond à 20% de la rigidité K_s dans le sens chaîne et de 36% dans le sens trame.

2. Déformation transversale de l'éprouvette

La visualisation des essais montre une déformation transverse de l'échantillon. Peu d'échantillons ont pu être post traités dans le temps imparti, sachant que le développement du code de reconstruction du profil et les validations à mettre en œuvre sont très consommateurs de temps. Comme pour la déformation longitudinale, la déformation transverse est très variable le long de l'échantillon (Figure 51), aussi les observations se concentrent sur une déformation moyenne de l'échantillon. Une tendance peut être observée sur la forme de la déformation transverse. En effet, on peut constater (Figure 60) sur la plupart des essais une première phase d'augmentation de la largeur moyenne suivi d'une baisse importante et continue jusqu'à un certain seuil d'endommagement. Dans l'exemple Figure 60, la largeur moyenne augmente d'environ 0.5% avant de diminuer d'environ 5.5% ce qui est très élevé au regard d'une déformation longitudinale de l'ordre de 1%.



*Figure 60 : Exemple d'exploitation de l'évolution de la largeur moyenne en cours d'essai
(échantillon de 20mm de longueur de jauge)*

L'augmentation de la longueur de jauge entraîne une évolution plus importante de la largeur transverse (Figure 61, Figure 62). Ceci est logique puisqu'une plus grande longueur de jauge tend à diminuer l'impact des conditions aux bords, dans notre cas, l'encastrement de l'extrémité de la mèche qui réduit la possibilité de déformation transverse. Il est aussi à noter que le suivi des grandes longueurs de jauge est moins précis, du fait que le rapport mm/pixel baisse avec l'augmentation de la zone à couvrir par la caméra.

Étant donné le faible nombre d'échantillons post-traités à ce jour, de la forte variabilité le long du roving et de la difficulté à caractériser ces déformations transverses, ces premiers résultats doivent être considérés comme préliminaires et méritent d'être enrichis et affinés par le dépouillement d'un beaucoup plus grand nombre d'échantillons comme cela a été fait pour les déformations longitudinales. Cela dit, nous observons des rapports entre déformation transverse et longitudinale extrêmement élevés de l'ordre de 5 à 10 (Figure 61) une fois la réorganisation initiale passée. Cela nous conduit à plusieurs conclusions et de nombreuses questions et perspectives :

- Il est absolument nécessaire d'intégrer cette relation entre les déformations longitudinales et latérales dans la loi de comportement. Le comportement du roving de lin marque ici encore sa différence notable avec ses homologues synthétiques pour lesquels cette relation est quasi systématiquement négligeable.

- Il serait nécessaire de pouvoir analyser simultanément la variation d'épaisseur du roving afin d'avoir une vision complète de la variation de volume, et les relations entre les évolutions dimensionnelles dans les 3 directions.
- Une analyse plus fine des variations locales serait à mener pour comprendre quels sont les causes profondes expliquant ce comportement particulier, les phénomènes mis en jeu et ainsi en déduire une équation $\epsilon_{22} = f(\epsilon_{11})$ couvrant tout le champ de déformation, et intégrant la variabilité.
- Il serait intéressant de réaliser cette étude sur les rovings extraits de renfort en adaptant la méthode au problème de « dépliement » lors de l'essai. En effet, la structure plus instable des rovings issus de renfort rend encore plus difficile la définition même de « largeur » de mèche.

Dans ce manuscrit, pour une première approche, et en accord avec les résultats en déformation longitudinale, une approximation linéaire du coefficient transverse est réalisée via un paramètre constant C_T (tel que $C_T = \frac{\epsilon_{22}}{\epsilon_{11}}$) obtenue entre le seuil $F_{max}/10$ et le point $[F_c; \epsilon_c]$ de chaque essai pour les grandes longueurs de jauges sera utilisé (Figure 62). Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 12.

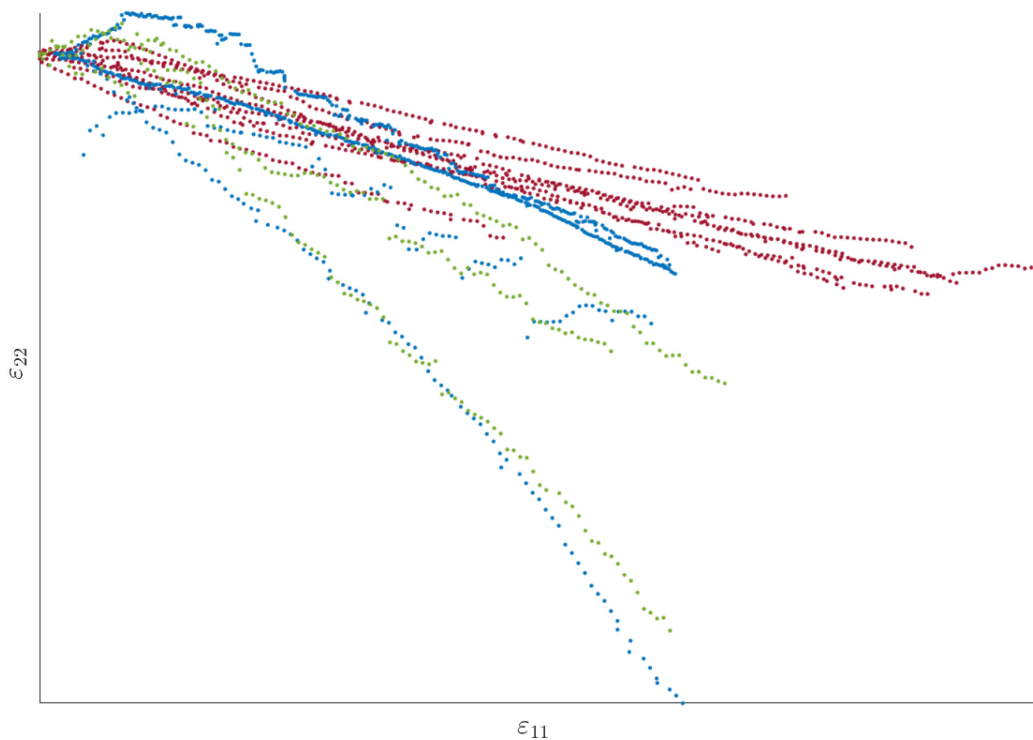


Figure 61 : Visualisation de l'ensemble des déformations transverses (rouge : 50mm, bleu : 150mm, vert : 300mm)

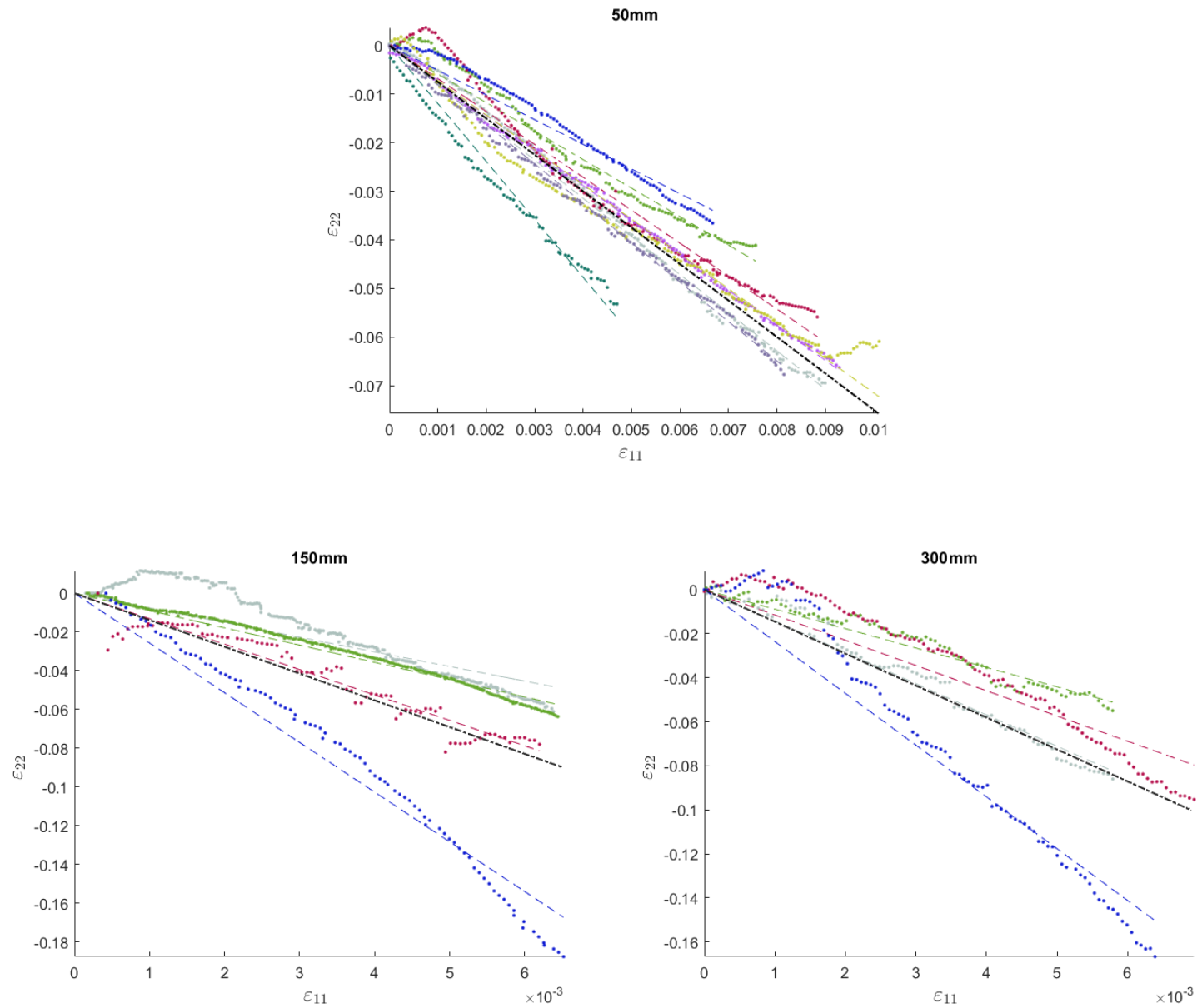


Figure 62 : Linéarisation du comportement des déformations transverses vs longitudinales pour chaque échantillon des longueurs de jauges 50,150 et 300mm.

En noir, la droite représentative de la linéarisation moyenne des courbes

	50	150	300
Ecart moyen (%)	0	84	93
Ecart type (%)	27.3	59.8	44.2

Tableau 12 : Résultats des coefficients C_T pour chaque longueur de jauge par rapport à la longueur de jauge 50mm

On observe que les coefficients obtenus entre les longueurs de 150 et 300mm sont assez proches ($\approx 5\%$) ce qui est cohérent avec les résultats de l'exploitation longitudinale et une similitude de la réaction des structures dans le cas d'une sollicitation longitudinale.

C. Bilan des essais de traction sur roving de lin

Afin d'obtenir le comportement du roving pour une sollicitation en traction longitudinale, un protocole a été spécifiquement mis en place. L'objectif étant de déterminer quelle loi de comportement implémenter dans une simulation numérique. L'exploitation s'est déroulée suivant deux points de vue, un point de vue matériau et un point de vue matériau homogénéisé. Le premier point de vue a permis de montrer, contrairement aux autres études portant sur le lin, que l'augmentation de longueur de jauge entraîne une augmentation de la rigidité avec une stabilisation autour de 150mm. La rigidité calculée par ce point de vue est une rigidité maximale qui ne permet pas de rendre compte de la rigidité sur toute la plage de déformation avant endommagement.

L'étude a aussi permis de montrer que la dégradation subie par le roving lors du tissage entraîne une diminution de la rigidité dépendante de la direction d'insertion du roving au sein du renfort. La rigidité diminue ainsi respectivement de 20 et 36% entre les directions chaines et trames.

Le deuxième point de vue a permis d'étudier la rigidité du roving sur l'ensemble du spectre de déformations ou celui-ci peut être considéré comme « sain ». Il a été démontré qu'il est possible de linéariser le comportement sur une plage cohérente de la dégradation du roving. Les rigidités sont alors inférieures d'environ 10% par rapport au point de vue matériau ce qui est cohérent avec la méthode d'analyse utilisée.

Pour les deux points de vue une étude statistique a permis de montrer la très grande variabilité du comportement des rovings et ainsi la nécessité de rentrer, comme pour la géométrie dans une approche probabiliste du comportement mécanique. Le rapport entre la variabilité et la non-linéarité permet

également de conclure que cette dernière peut de façon très cohérente être négligée, ce qui permet de linéariser la réponse à la traction du roving comme cela a été fait dans ce document.

Ainsi, conformément aux objectifs de cette étude expérimentale, nous pouvons conclure sur l'implémentation du comportement en traction dans les éléments finis. Etant donnée la variabilité des résultats observés et en cohérence avec les longueurs de jauges mises à contribution dans le renfort, la rigidité K_s implémenté en simulation pour une mèche extraite de bobine est obtenue en fusionnant les résultats des longueurs de jauge entre 150 et 300mm, et sera ainsi considéré comme variant dans un intervalle de confiance et pourra également être obtenu par un tirage Gaussien. Dans le cas des rovings extraits de renforts pour les simulations sur ce dernier : un abattement de 20 et 36% pour les directions chaines et trames sera réalisé.

De plus, contrairement à ce qui pouvait être attendu, cette campagne d'essais a mis en évidence, la présence d'une déformation transverse des échantillons très élevée lors de la traction, d'un facteur 5 à 15 par rapport à la déformation longitudinale. Un protocole d'exploitation a ainsi été mis en place afin de la quantifier. Si les résultats restent préliminaires, posent beaucoup de questions et ouvrent beaucoup de perspectives, une bonne estimation de cette déformation transverse a pu être identifiée. Afin de rester cohérent avec l'exploitation longitudinale et dans une première approche, le comportement transverse reliant la déformation longitudinale aux déformations transverses est considéré linéaire. La détermination du coefficient CT montre une cohérence des résultats dans les grandes longueurs de jauges, avec une variabilité également importante. Il n'a pas pu être mené une identification de l'impact du tissage sur CT du fait de la difficulté d'accéder à une définition et à une mesure cohérente de la déformation transverse. Ainsi, la valeur de C_T utilisée sera celle issue du roving sorti de bobine. Selon le même processus que pour K_s , le coefficient C_T sera considéré comme variant dans un intervalle de confiance et pourra également être obtenu par un tirage Gaussien.

III. Essais expérimentaux en compaction/compression sur roving

Lors du préformage, les renforts sont placés à l'intérieur d'un moule puis comprimé avant l'injection de résine. Cette compression permet non seulement d'affiner l'épaisseur de la pièce mais surtout d'augmenter la fraction volumique de fibres.

Lors de cette compression deux réarrangements s'opèrent, la réorganisation par mouvement des mèches et la réorganisation interne des mèches. Pour rappel, l'objectif de la simulation sur renfort consiste à maîtriser l'organisation de la géométrie initiale et par le biais des interactions entre les

mèches et par l'implémentation de la loi de comportement des mèches pour permettre d'obtenir la déformation globale du renfort, des mèches et les efforts associés.

Nous avons vu que lors d'un essai de traction, le comportement de la mèche est guidé par le nombre de fibres en tension simultanément. Le titre du roving étant considéré constant (Chapitre II, III page 56), le nombre de fibres au sein de chaque section est identique et permet d'attribuer les mêmes propriétés dans chaque section du roving malgré la variabilité de la taille des sections. Ce point sera d'ailleurs repris en détail lors de l'intégration du comportement dans les éléments finis. C'est très différent pour la compression. En effet, comme la compression est guidé par la fraction volumique de fibres, c'est-à-dire par l'organisation interne au sein de la section, il est difficile de prédire l'impact de la variabilité de section sur le comportement des mèches. Il est donc nécessaire de réaliser des essais et notamment d'envisager une simulation par identification inverse pour comprendre et caractériser cet impact.

A. Objectifs des essais

Lors de la compression d'un roving, deux grandes phases du réarrangement de la structure s'opèrent (Figure 63) :

- La compaction : qui consiste à la réorganisation interne des fibres les unes par rapport aux autres avec une densification du milieu très prononcée pour de faibles efforts ;
- La compression : lorsque la mobilité des fibres devient très difficile ou impossible, les fibres se déforment, les efforts nécessaires augmentant donc très fortement.

Le passage d'un état à l'autre se fait progressivement par une phase de transition dans la zone de courbure maximale de la réponse à la compression (entre étape 2 et 3, Figure 63).

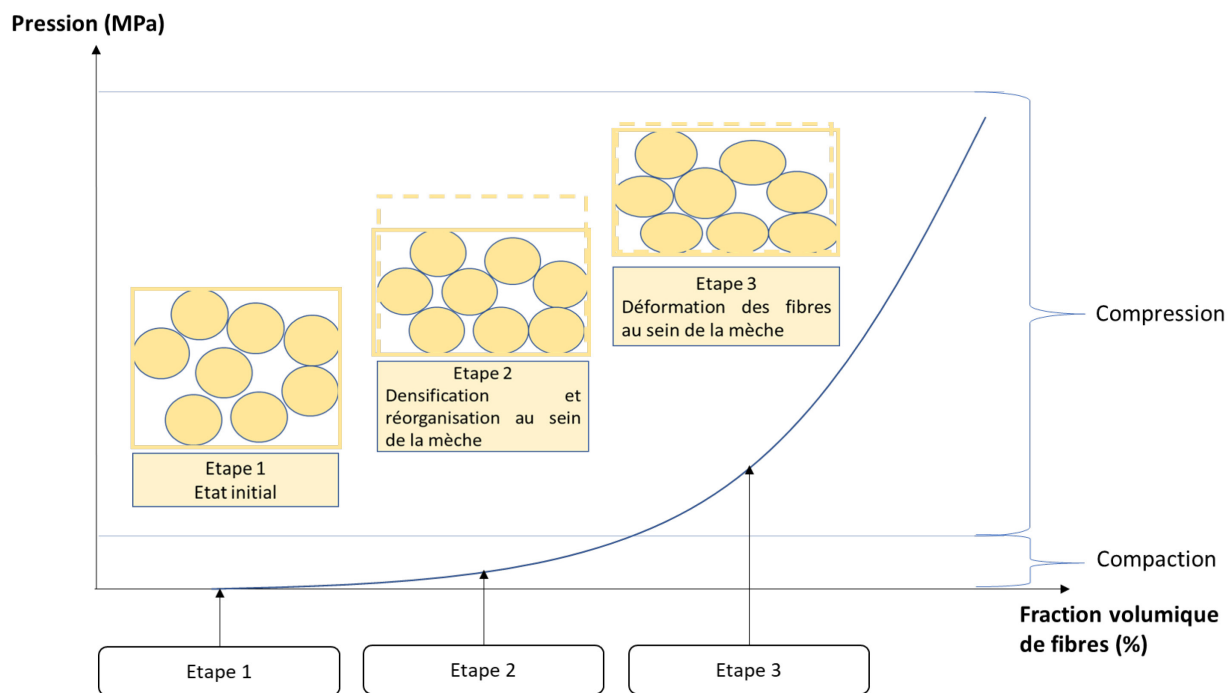


Figure 63 : Réponse typique à une sollicitation de compression non confinée pour un roving.

Le comportement en compression d'un roving est lié aux interactions entre les fibres au sein de la section. Plus la densification s'intensifie et plus le nombre d'interactions augmente ce qui rigidifie le comportement. Ainsi, en première approximation, le comportement en compression peut être défini, pour un roving donné comme directement fonction de la fraction volumique de fibres au sein de ce même roving. La relation classiquement utilisée et qui a montré sa pertinence [123, 124] est celle établie de façon heuristique par Toll & Manson, même si elle nécessite d'être systématiquement réidentifiée pour chaque roving, et donc de mener des essais de compression sur chaque nouveau type de fil.

$$P = K_c * (Vf^\gamma - Vf_0^\gamma) \quad \text{Équation 9}$$

Avec :

- P : la pression apparente moyenne appliquée sur l'échantillon (MPa)
- Vf : la fraction volumique de fibres
- Vf0 : la fraction volumique de fibres à l'état initial
- Kc,γ : deux paramètres à identifier sur les courbes expérimentales, avec γ un paramètre lié à la structure en compression.

L'enjeu des essais est donc de pouvoir suivre l'évolution de la fraction volumique de fibres du roving et donc de suivre l'évolution des sections et notamment d'identifier la fraction volumique de fibres

initiale. Or ce sujet est délicat dans le cadre des rovings de lin qui possèdent une grande variabilité de sections.

L'observation de la géométrie du roving (Chapitre II, III page 56) a permis de montrer que les sections du roving RB sont de formes rectangulaires avec une variabilité locale notamment sur la distribution des fibres dans l'épaisseur. Afin de réaliser des essais permettant éventuellement une identification inverse et afin d'étudier la variabilité des propriétés en compression du roving, deux essais ont été respectivement mis en place pour l'étude :

- Un essai de compaction du roving sous microscope numérique (B.1)
- Un essai de compaction/compression du roving avec une machine de traction (B.2)

Comme lors des essais de traction, il est souhaitable de connaître l'impact des effets du tissage sur le comportement en compression des rovings. Des essais à la fois sur roving RB et roving RT, RC ont donc été réalisés. Si, en traction, le tissage a eu pour effet de dégrader la rigidité du roving, nous avons pu constater, par les images issues de tomographie, que le roving subit une modification de forme d'enveloppe, il est donc important de s'interroger sur l'impact du tissage sur la réponse à la compression.

B. Protocole expérimental

1. Essai de compaction sous microscope numérique

a. Principe et objectifs

Afin d'observer finement la déformation de la section du roving lors de la phase de compaction (Figure 63, Etape 1-2), un essai a été mis en place à l'aide d'un microscope numérique KEYENCE VHX 5000 qui permet à la fois de mesurer avec une grande exactitude la géométrie plane mais aussi et surtout l'altitude de tous les points de l'échantillon. Afin de pouvoir comprimer le fil sur la platine du microscope et ainsi bénéficier de la mesure de l'épaisseur en temps réel, un dispositif de compaction a été conçu, réalisé en impression 3D et mis au point (Figure 64). Le principe consiste à guider en translation un plateau sur lequel est fixé une plaque de verre (plaque de verre dédiée à l'observation au microscope) qui permet à la fois d'appliquer la charge et d'observer la mèche par acquisition d'images 3D. Le guidage est réalisé à partir de deux axes parallèles et deux douilles à billes, afin d'assurer à la fois le parallélisme entre plateau et platine, la rigidité et un frottement très faible dans le guidage. Le chargement est effectué avec des masses ajoutées au fur et à mesure de

l'essai, ce qui permet de façon très simple d'avoir une excellente maîtrise de l'effort. Le défaut étant un chargement discontinu et ne permet pas de contrôler la vitesse de déformation de l'échantillon.

Une attention particulière doit être portée sur la vérification du montage afin de s'assurer que la plaque est et reste parallèle à la platine d'observation du microscope lors de l'essai. Des mesures de vérifications ont aussi été mises en place afin de s'assurer que la plaque de verre ne déforme pas l'image obtenue. Il a été constaté que la visualisation à travers la plaque de verre ne perturbe pas le profil perçu, néanmoins le déplacement du plateau entraîne une modification par translation de tous les points de l'image dans la coordonnée Z (hauteur de l'image). Cela ne perturbe pas en absolu l'épaisseur des mèches perçues mais nécessite de recalibrer les images entre elles pour observer le processus de compaction.

Lors de l'acquisition 3D, l'objectif du microscope est fixe et la platine assure le déplacement (plan XY) de l'échantillon pour l'acquisition. Le poids applicable sur la platine est donc limité et il est préconisé par le fabricant de ne pas dépasser 1Kg. Afin d'observer une plage de compression variée, la longueur de la plaque en verre peut être modifiée, pour atteindre la gamme de pression souhaitée. Rappelons malgré tout, que cet essai n'est pas destiné aux fortes pressions puisque c'est la phase de compaction qui est étudiée, c'est-à-dire de réorganisation sous faible charge (Figure 63). Le dispositif a été allégé au maximum de façon à avoir une pression initiale la plus faible possible. A l'heure actuelle, la longueur d'observation maximale du roving est d'environ 12mm.

L'utilisation du microscope numérique couplé au dispositif de compaction permet donc d'obtenir l'évolution des grandeurs caractéristiques des sections (épaisseur et largeur pour le roving RB) en charge sous l'objectif afin d'obtenir une évolution précise de chaque section en cours d'essai. L'idée de cet essai est de permettre une acquisition simple et rapide de l'évolution des sections en compaction avec une mise en place et un temps d'acquisition d'environ 2h pour effectuer une dizaine de mesures. Néanmoins un écueil subsiste sur la possibilité que l'ensemble de l'échantillon ne soit pas totalement en contact avec la platine du microscope ce qui peut induire une erreur sur l'identification de l'épaisseur des mèches. A titre de comparaison, les acquisitions réalisées en tomographies à rayons X (Figure 30, Figure 35) permettent certes d'observer la structure interne mais nécessitent environ 1h30 par chargement pour un voxel d'environ 10 μ m.

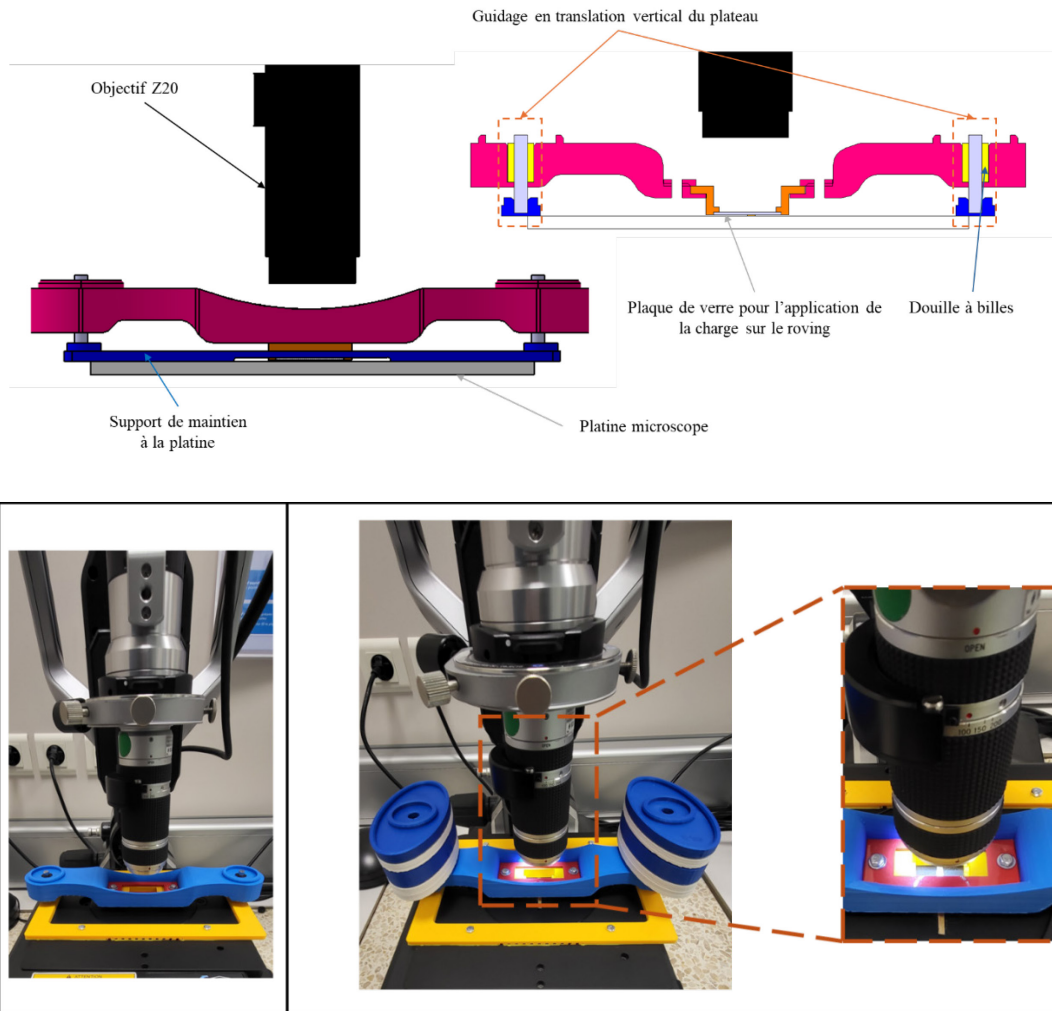


Figure 64 : Dispositif de compaction sous microscope

Une fois l'acquisition terminée, les images sont traitées à l'aide d'un programme Matlab développé pour le post-traitement des profils afin de récupérer l'évolution des dimensions de chaque section pour chaque charge. Il est à noter ici que cet essai permet de calculer deux fractions volumiques de fibres différentes. En effet, à partir de l'évolution de chacune des sections il est possible de calculer une fraction volumique moyenne « réelle » Vf_r (Équation 10) qui prend en compte la variabilité géométrique de l'échantillon. La seconde est une fraction volumique de fibres moyenne apparente Vf_{app} (Équation 11) qui est la fraction volumique communément calculée lors de ce type d'essai et dont l'évolution de la section apparente est corrélée à l'évolution de la hauteur du plateau de compression (plaque de verre). Lorsque l'échantillon a une géométrie peu variable, les deux fractions volumiques de fibres sont équivalentes.

$$Vf_r = \frac{n_f * S_f}{S} = \frac{n_f * S_f}{l * e} \quad \text{Équation 10}$$

$$Vf_{app} = \frac{n_f * s_f}{S_{app}} = \frac{n_f * s_f}{l * h_p} \quad \text{Équation 11}$$

Avec :

- $n_f * s_f$: produit constant qui représente la section occupée par les fibres au sein de la section d'enveloppe (mm^2)
- h_p : distance entre les plateaux de compression (mm)
- l, e : largeur et épaisseur de la section d'enveloppe du roving (mm)

Un autre avantage de cet essai est de pouvoir tester en simulations numériques les échantillons réels afin d'obtenir le comportement du roving par identification inverse et de pouvoir comparer les coupes 3D obtenues avec l'essai expérimental. Les échantillons sont reconstruits (Figure 65) en suivant la procédure décrite au chapitre II (IV.A, page 66).

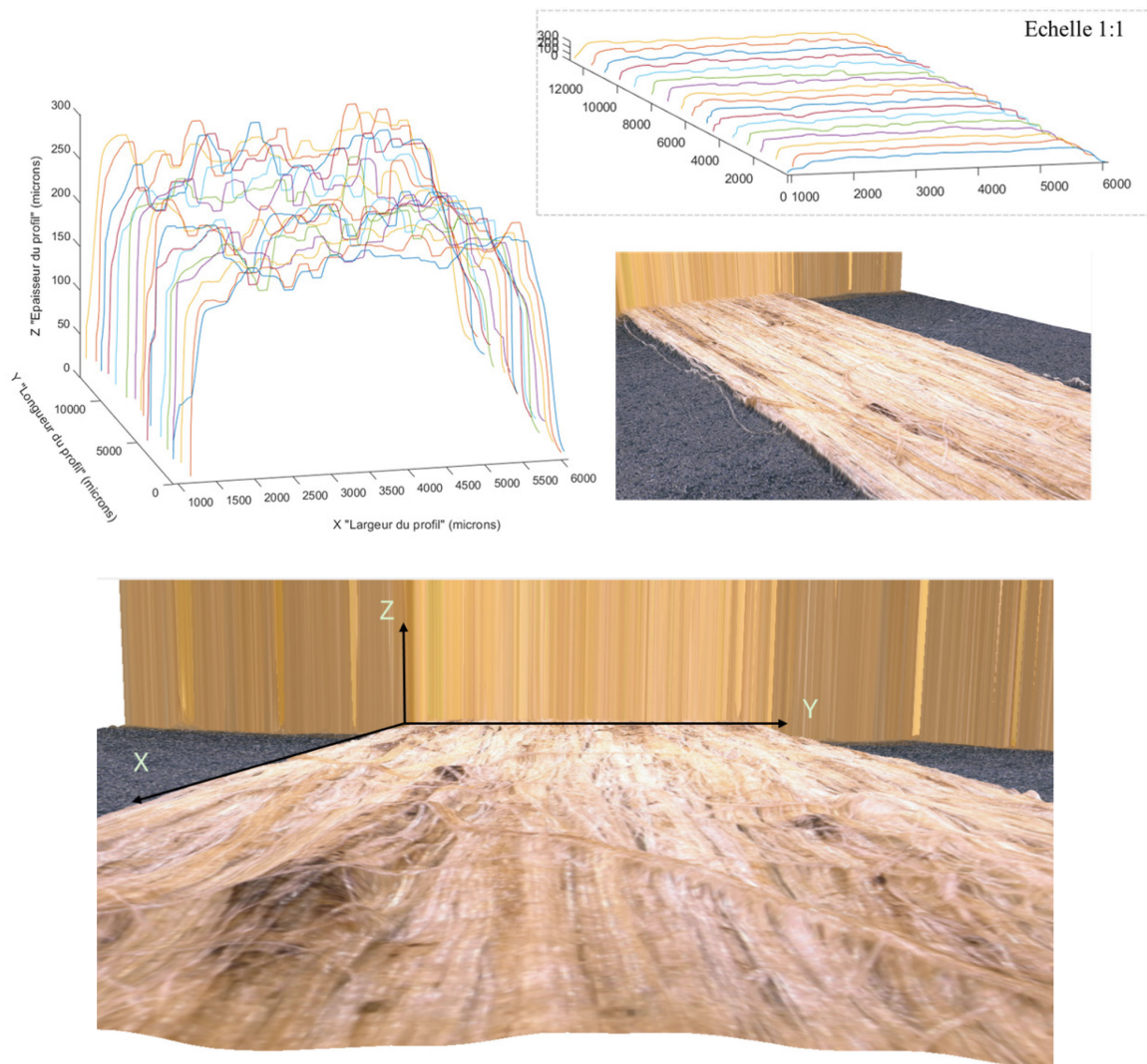


Figure 65 : Exemples de profils d'un échantillon en compaction retenue pour reconstruction 3D et vue 3D de la zone reconstruite

b. Protocole d'essai

Le protocole d'acquisition avec le dispositif de compaction se déroule donc comme suit :

- Un échantillon est placé sous le poids propre du dispositif et constitue l'état initial de l'essai. La plage d'observation et le zoom de l'objectif sont paramétrés (zoom x100 de l'objectif Z20 avec un pixel en XY d'environ 2.2 μ m). L'acquisition est enregistrée à la fois en 3D et en 2D afin de vérifier manuellement la cohérence des mesures sur la largeur.
- A chaque ajout de charge sur le dispositif une acquisition est réalisée sur la même plage d'observation.
- Comme lors des essais de traction, l'hygrométrie est relevée durant l'essai (Température (°C) et Humidité Relative (%)).

Le poinçon en verre utilisé lors des essais est d'une longueur de 18mm. Les masses appliquées sont de 50,100,200, ... ,800g ce qui permet d'avoir une plage de pression apparente d'environ 0.005 à 0.1MPa pour les rovings RB.

1 échantillon de chaque catégorie ont été testés avec ce dispositif (Figure 66). Les résultats sont présentés en III.C.1.

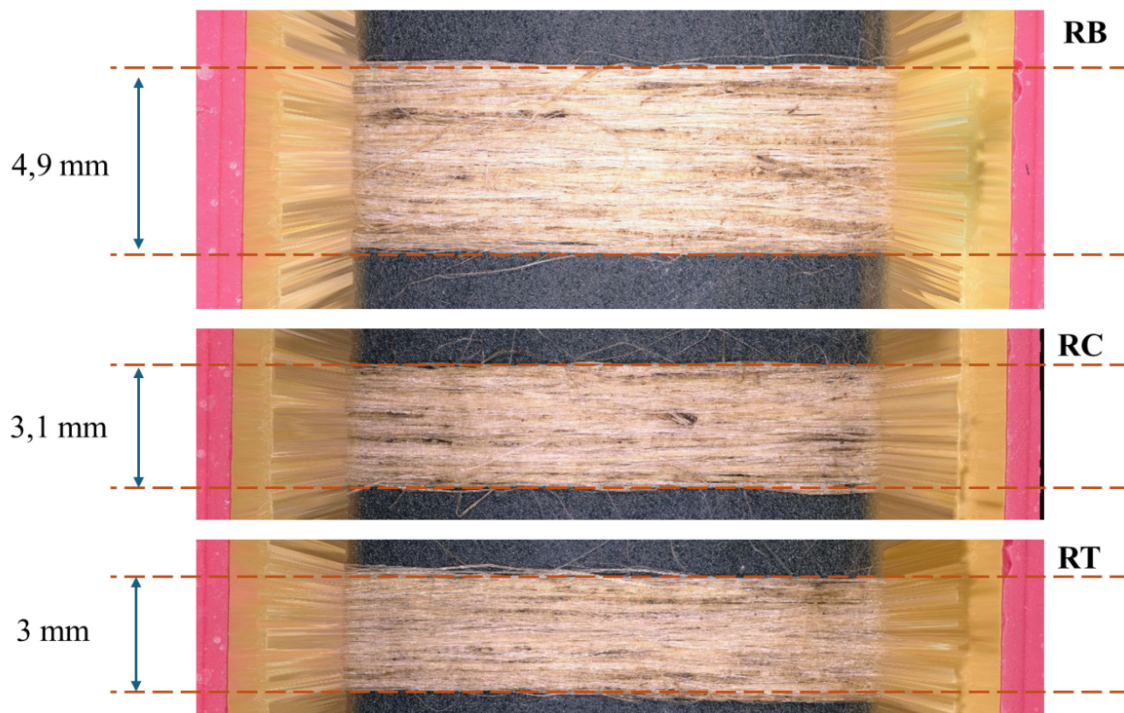


Figure 66 : Visualisation des échantillons testés en compaction sous microscope numérique

On peut noter que la pilosité des échantillons issus du renfort (RC et RT) est visuellement plus élevée que celle de l'échantillon RB.

2. Essai de compaction/compression

a. Principe et objectifs

Afin d'observer la plage de compression des rovings, un essai de compaction/compression est réalisé à l'aide de la machine Zwick. Cet essai a pour but de visualiser la transition entre la réorganisation interne des fibres des rovings et la déformation des fibres liée aux blocages du réseau fibreux (Figure 63 étape 2-3). Cet essai classiquement pratiqué est complémentaire du précédent car s'il est peu précis au niveau du pied de courbe, et donc des phases initiales de compaction, il permet d'atteindre de hautes pressions et donc d'identifier le comportement en compression du roving. L'essai est effectué à l'aide de plateaux dont l'écartement permet de déterminer la hauteur h_p nécessaire au calcul de la fraction volumique de fibre (Équation 11).

b. Protocole d'essai

Les essais sont effectués à l'aide de deux plateaux circulaires auxquels sont ajoutés des plaques rectangulaires en PMMA permettant de maîtriser la longueur de l'échantillon et de pouvoir assurer le suivi rigoureux de l'épaisseur grâce à des marqueurs positionnés sur les plaques et à l'appareil photo Sony évoqué précédemment (Figure 67 A). En effet, l'épaisseur des échantillons mis en jeu dans ces essais sont de quelques dixièmes de millimètres, aussi une attention particulière est portée sur la précision des données recueillies par l'appareil photo. Celui-ci est ainsi placée afin d'obtenir une résolution de 0.007mm/pixel. Le plateau supérieur est un plateau rotulé qui permet de régler avec finesse le parallélisme des deux plateaux avant le début de l'essai, grâce à une mise en contact précontrainte des deux plateaux. Ce réglage est également vérifié par l'utilisation d'un capteur de pression Tekscan intercalé entre les deux plateaux (Figure 67 B). Celui-ci permet en effet de bien valider une répartition homogène de pression entre les deux plateaux lors de la compression. A ces faibles épaisseurs et déplacements, il est en effet, crucial de pouvoir respecter un parallélisme strict et de s'affranchir des jeux et rigidité machine, ce qui est bien mis en œuvre avec ce protocole. Le capteur Tekscan peut également être utilisé (c'est son objectif initial) afin de déterminer la répartition de pression sur l'échantillon en cours d'essai. Malheureusement l'utilisation de ce capteur n'a pas pu être mise en œuvre dans le temps imparti de la thèse. Les essais sont pilotés en déplacement avec une vitesse de 0.125mm/min.

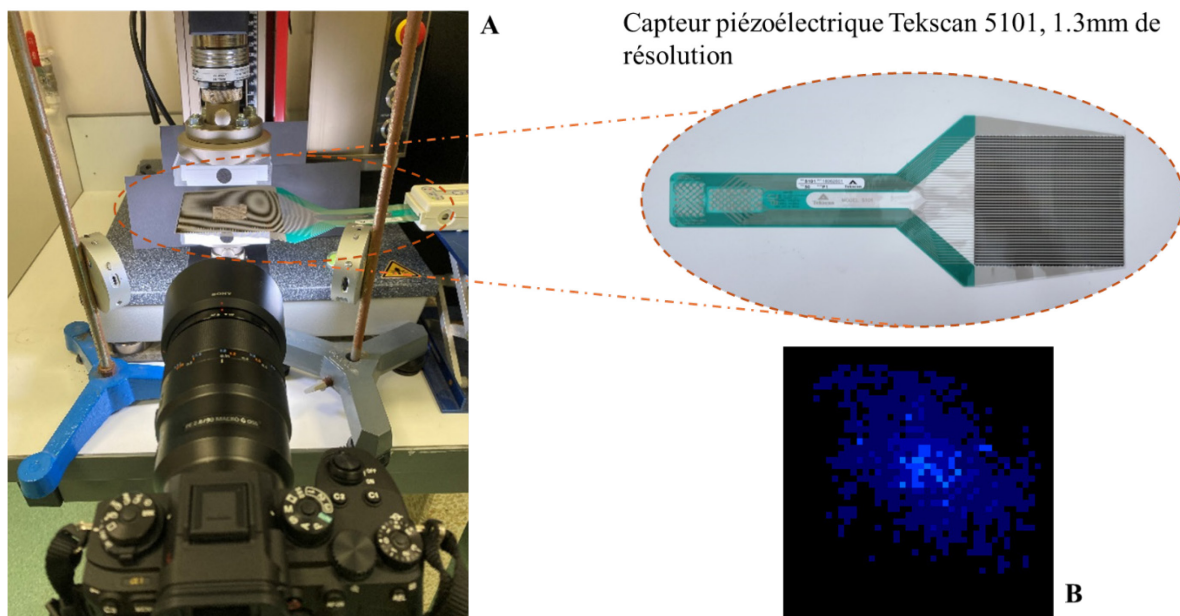


Figure 67 : (A) Montage de l'essai de compression, (B) Visualisation de la répartition de pression observée à partir du capteur Tekscan lors du calibrage de l'orientation des plateaux.

Les résultats des essais en compaction sous microscope ont montré un écart significatif du comportement en compression des rovings avant et après l'étape de tissage. L'objectifs des essais réalisés est de déterminer le comportement des rovings à implémenter en simulation sur renfort. Ainsi, l'étude en compression se concentre sur le comportement des rovings RC et RT avec des essais réalisés sur 2 échantillons dans chaque direction. Avant de réaliser les essais, une acquisition des échantillons est effectuée à l'aide du microscope numérique dans les conditions initiales appliquées en compaction ce qui permet par la suite de calculer la pression apparente moyenne appliquée sur chaque échantillon pendant l'essai. En accord avec les conclusions précédemment obtenues en compaction, la largeur moyenne des rovings est considérée constante.

C. Résultats des essais

1. Essai de compaction sous microscope numérique

3 échantillons ont été testés en compaction avec le dispositif sous microscope numérique (Figure 66). La pilosité des échantillons extraits de renfort a entraîné la mise en difficulté du programme de détermination du contour des profils. Ainsi, et au vu du temps imparti, les 17 profils extractibles permettant de reproduire l'échantillon ont été délimités manuellement.

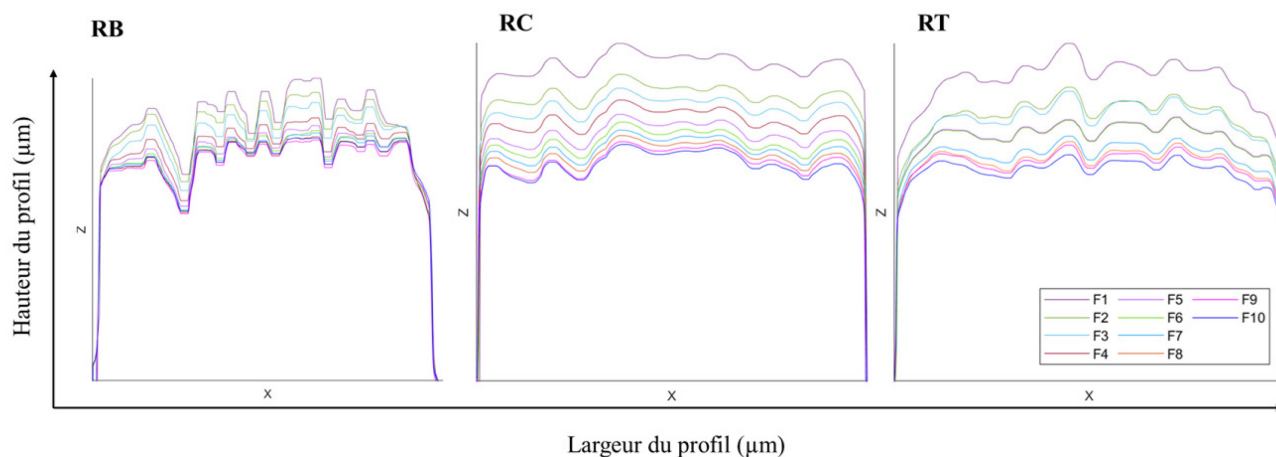


Figure 68 : Superposition et évolution en cours d'essai d'un profil de chaque échantillon



Figure 69 : Vue 3D de l'échantillon RC

On constate que les échantillons [RC, RT] extraits du renfort ont la même forme de profil rectangulaire que les échantillons sortis de bobine (Figure 68, Figure 69) même si celle-ci est elliptique au sein du renfort (Chapitre II, Figure 34), cela illustre l'importance des conditions aux bords pour la forme de la section des fils, mais également l'aspect globalement réversible des déformations de l'enveloppe issues du tissage. Les résultats obtenus avec ces essais sont très intéressants. En effet, pour les 3 types d'échantillons (RB, RT, RC) nous observons une réponse très différente de celle qui était attendue et qui fait échos à celle obtenue en traction. En traction une absence de déformation transverse était attendue, or nous avons vu qu'elle était notable. En

compression, une déformation transverse, classiquement rencontrée dans les fils, liée à la réorganisation des fibres, était attendue, et nous constatons qu'elle n'existe pas.

Nous constatons, en effet, sur la figure précédente, que les profils se superposent sans variation de largeur pour tous les échantillons. Au vu des incertitudes liées à la mesure de la largeur sur les profils, notamment avec la présence de quelques groupes de fibres qui se détachent du roving (Figure 66, Figure 70), on admet un maximum de 2% de la valeur estimée comme étant l'erreur maximale commise sur la largeur des sections calculées (Figure 71). Cela illustre également la difficulté de définir des enveloppes (Chapitre II, Figure 34) et des dimensions (largeur, épaisseur) pour les renforts fibreux. La conclusion n'en est pas moins claire, aucun élargissement de la mèche ne peut être observé pendant la phase de compaction. Ce type de comportement est sans aucun doute attribuable d'une part à l'ensimage des fibres techniques qui freine le déplacement et la réorganisation des fibres et ainsi l'étalement sous faible pression. D'un point de vue de la loi de comportement, il en résulte une indépendance entre les déformations transverses à la direction de la fibre. Il est important de noter que cela n'est pas impacté par le procédé de tissage.

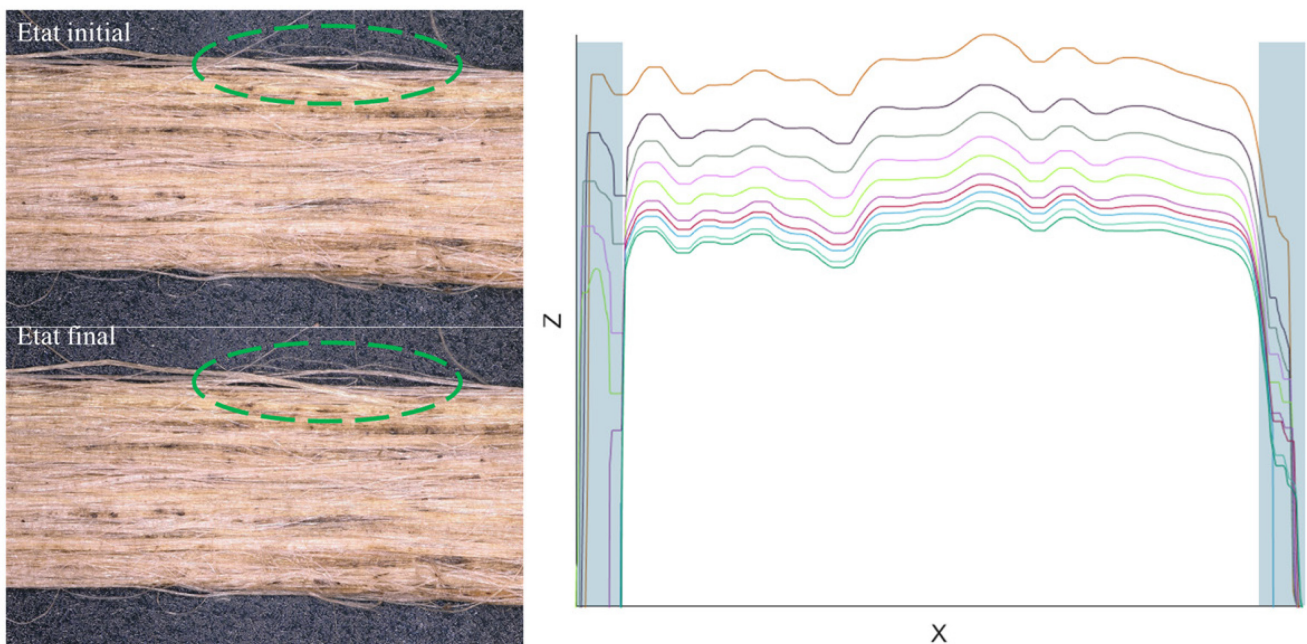


Figure 70 : Influence de la pilosité sur l'estimation de la largeur des profils

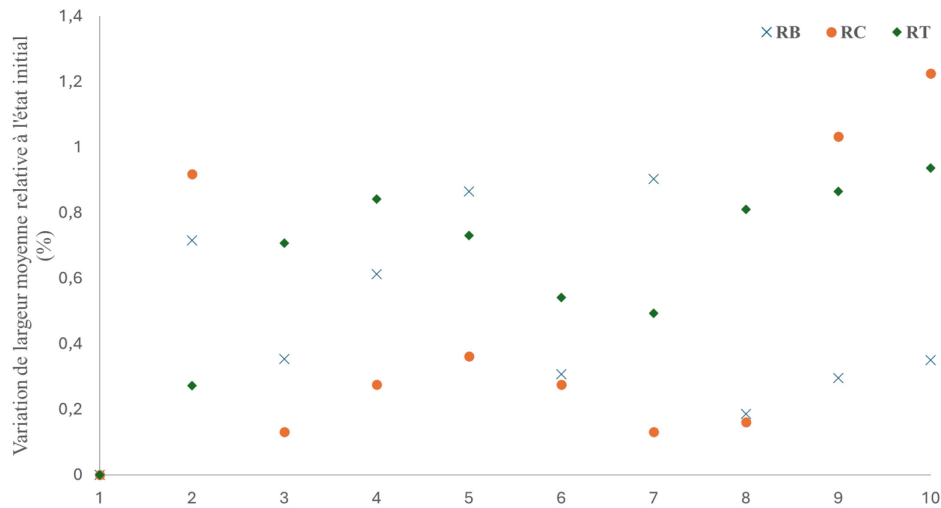


Figure 71 : Variation de la largeur moyenne de chaque échantillon

Un autre phénomène très important peut être constaté sur ces essais. En effet, on pourrait s'attendre à ce que les irrégularités des profils supérieurs soient gommées par la réorganisation des fibres pour aboutir à un profil de plus en plus plat, or ce n'est pas ce qui est obtenu. Si l'on voit une légère diminution des variations d'altitude, on observe clairement que la forme des profils est conservée au cours de la compaction (Figure 72) pour les 3 types d'échantillon (RB, RT, RC). Il pourrait être possible que l'ensemble de l'échantillon ne soit pas tout à fait en contact avec la platine dans la zone d'étude (l'échantillon est d'environ 3cm de longueur pour éviter d'endommager la zone observée lors de la découpe), conduisant à un mouvement de « corps rigide », cependant cette hypothèse envisageable en début d'essai l'est beaucoup moins après l'application des charges et notamment aux pressions proches de 0,1MPa. D'ailleurs, la stagnation de l'évolution notable de l'épaisseur sur les deux derniers incréments de charge peut sembler signifier que la transition vers la phase de compression de la mèche a été atteinte.

Il y a donc un effet d'entraînement du réseau fibreux global. De nouveau, la cohésion du réseau fibreux imposé par la présence d'ensimage et le fait que l'échantillon observé est d'une taille de l'ordre de longueur des fibres unitaires (20-30mm) semblent impacter fortement la réorganisation structurelle. Pour tous les types d'échantillons (avant ou après tissage). La persistance des variations de profils démontre, en effet, une moindre réorganisation locale du réseau de fibre ce qui est tout à fait cohérent avec l'observation précédente sur les déformations transverses. Un autre facteur pouvant aussi privilégier une réorganisation plus globale est la faible fraction volumique de fibre initiale (Figure 74) qui tend à favoriser des mouvements plus globaux de fibres au détriment d'adaptations

locales. Cela confirme, en tout cas, le comportement atypique de ces rovinings qu'il faudra intégrer dans les simulations.

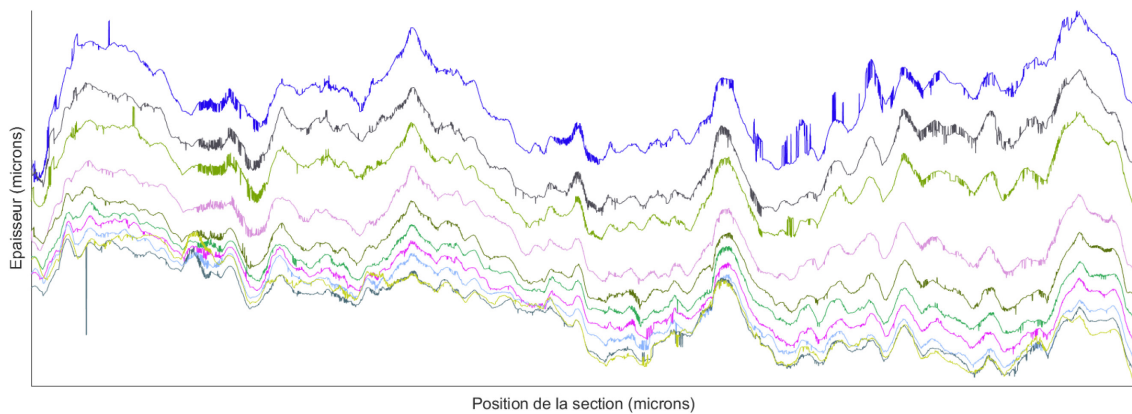


Figure 72 : Evolution de l'épaisseur des profils de l'échantillon RB

Afin de comparer les essais effectués au microscope numérique et ceux effectués à l'aide de la machine de traction, il est nécessaire de calculer la section apparente S_{app} de la mèche. Pour cela, il est nécessaire de calculer la largeur moyenne de la mèche mais aussi d'obtenir la position de la face de la plaque de verre en contact avec l'échantillon soit la hauteur h_p (Équation 11). Afin d'obtenir une estimation de cette position, la hauteur maximale de la mèche a été déterminée à partir de la hauteur maximale de chacun des profils (Figure 73).

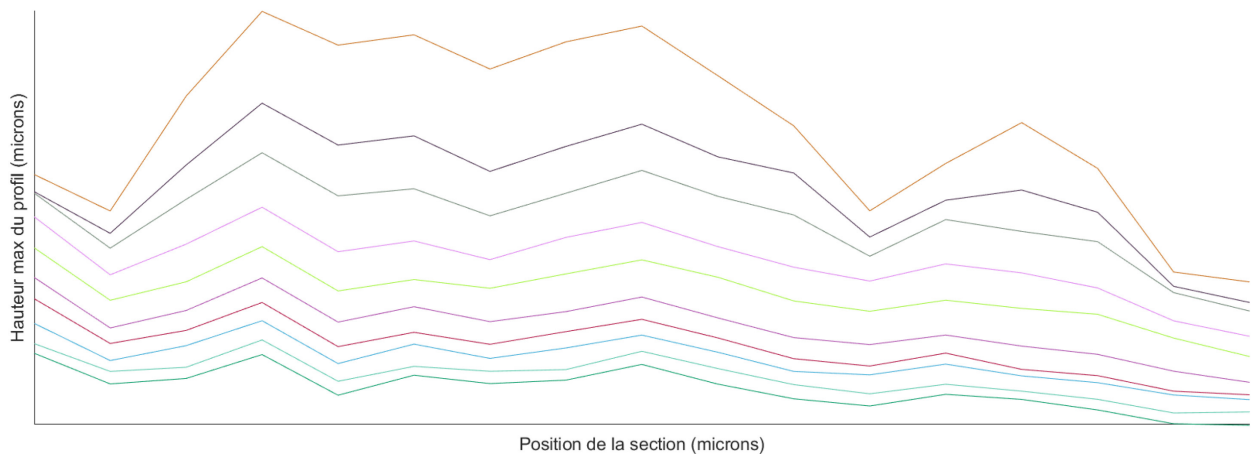


Figure 73 : Hauteur maximale de chaque profil pour chaque ajout de charge sur l'échantillon RC

Il est donc désormais possible de calculer la fraction volumique apparente (Équation 11) ainsi que la fraction volumique réelle (Équation 10) de la mèche (Figure 74) et de les comparer pour les différents échantillons.

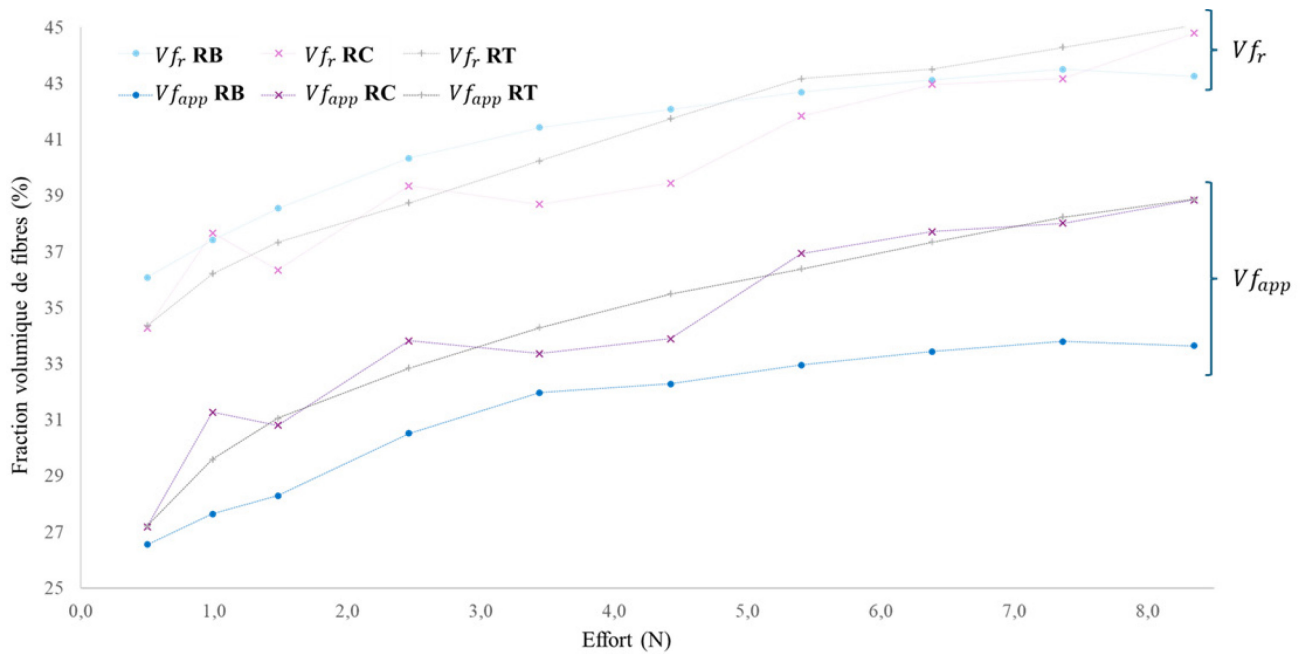


Figure 74 : Evolution de la Fraction Volumique de Fibres apparente et réelle moyenne pour chaque échantillon durant l'essai en fonction de la fraction volumique de fibres apparente RB

On note ici, que la différence d'épaisseur entre deux incréments de charge observé durant l'essai est dans certains cas inférieure à l'ordre de grandeur du diamètre des fibres de l'échantillon ce qui explique l'oscillation de la valeur de Fraction Volumiques de Fibres des essais.

En revanche, les résultats obtenus illustrés Figure 74 sont importants et intéressants. Nous pouvons, en effet, observer un écart conséquent entre les Fractions Volumiques de Fibres apparentes et réelles pour l'ensemble des échantillons. La fraction volumique de fibres apparente est celle qui est utilisée systématiquement lors des essais de compression. Celle-ci suppose que l'écart entre l'enveloppe réelle de l'échantillon et le rectangle enveloppe défini par la distance entre les plateaux et la largeur de la mèche est faible. Nous constatons ici (Figure 73), au contraire que la surface de contact entre l'échantillon et les plateaux est faible même à 0,1 MPa. La fraction volumique réelle moyenne de l'échantillon obtenue par le calcul des sections d'enveloppes réelles est donc très différent du calcul apparent. En effet, plus la variabilité de la section des échantillons est importante et plus l'erreur commise sur la section moyenne vis-à-vis de la hauteur du plateau augmente (Figure 75). Même si globalement ce phénomène s'atténue avec l'augmentation de la pression, cela pose quand même clairement la question de la relation entre la fraction volumique de fibres apparente et réelle pour l'identification du comportement mécanique.

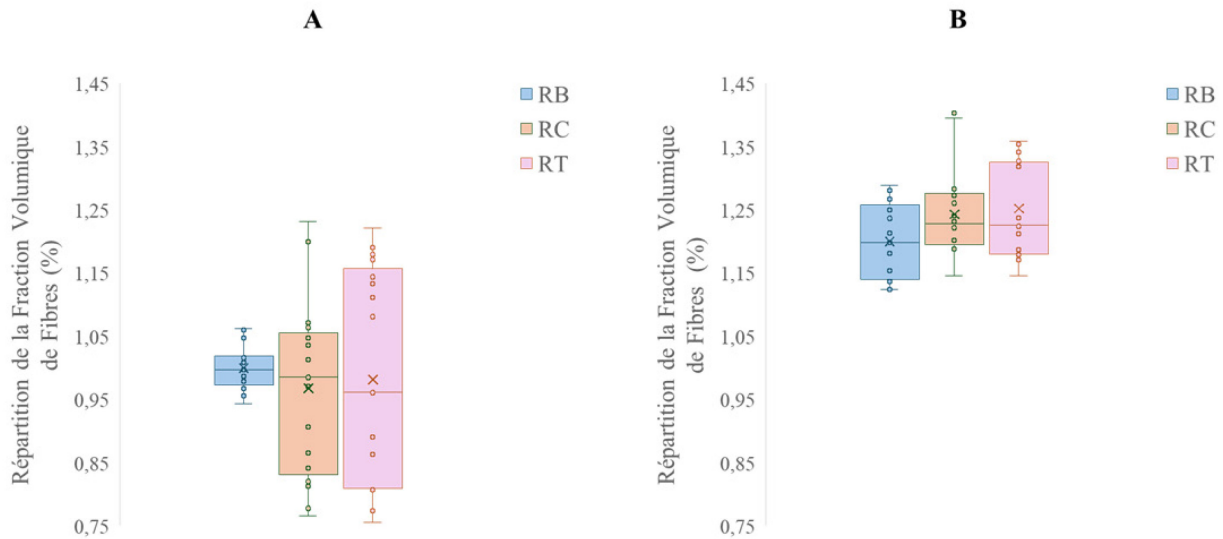


Figure 75 : Variation de Fraction Volumique de Fibres au sein des échantillons : (A) à l'état initial, (B) à l'état final ; par rapport à la moyenne de la fraction volumique de fibres de l'échantillon RB à l'état initial

Ce point est d'autant plus crucial pour l'intégration du comportement dans la simulation avec des sections de fils qui sont très variables, sachant que la fraction volumique intégrée dans les fils correspond à leur enveloppe « réelle ». Il serait donc très intéressant de creuser l'impact de l'approximation de la fraction volumique moyenne de l'échantillon par la fraction volumique de fibres apparente. Nous avons ici trop peu d'échantillons post-traités pour tirer une conclusion définitive sur l'impact du tissage sur le comportement en compression. Cela dit, le tissage conduit à une restructuration profonde de la mèche, qui induit un repliement et des dimensions différentes, il est donc probable que le comportement en compression sera impacté, comme les résultats proposés semblent le suggérer.

Les données des courbes sont interprétées à l'aide de l'algorithme *lsqnonlin* de Matlab. Les données interprétées permettent de déterminer K_c , γ et Vf_0 (Équation 4). Le fitting obtenu est tracé en Figure 76 et les données sont résumés dans les Tableau 13 et Tableau 14.

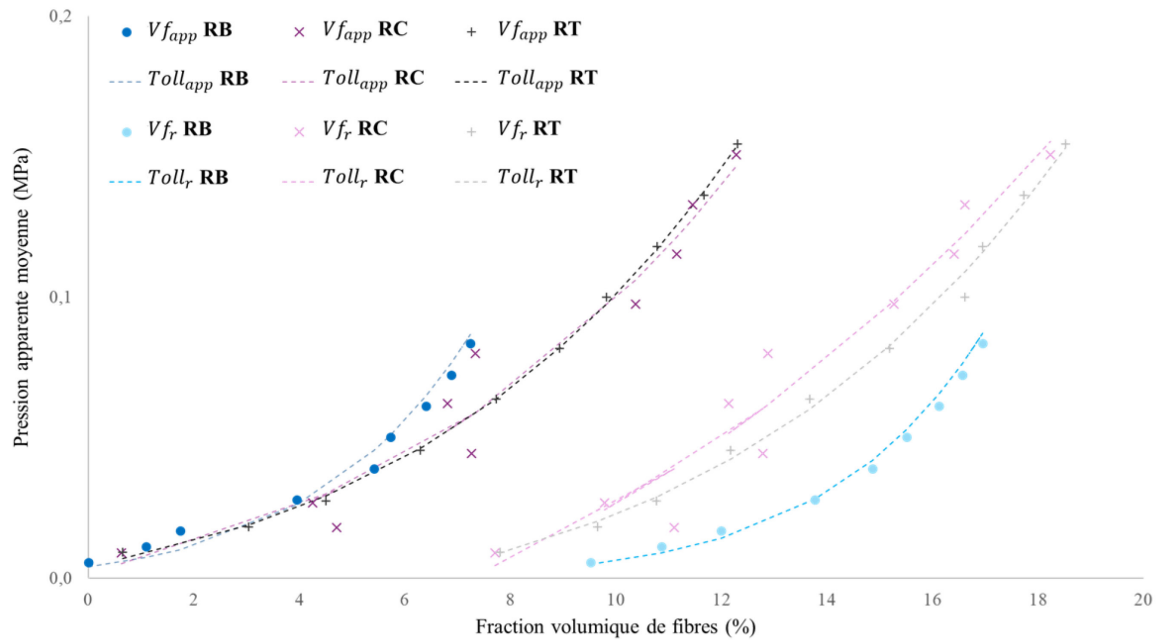


Figure 76 : Interprétation des données par l'équation de Toll

	K_c		γ	
	A	R	A	R
RB	1.000	1.510	1.000	1.356
RC	0.015	0.003	0.600	0.472
RT	0.030	0.020	0.679	0.743

Tableau 13 : Paramètres de Toll obtenus par fitting du comportement de chaque échantillon dans le cas apparent (A) et réel (R) par rapport au couple de valeurs obtenu dans le cas RB apparent

	Vf (initial de l'essai)		Vf_0	
	A	R	A	R
RB	0	36	-10	16
RC	2	47	-3	27
RT	2	57	-6	22

Tableau 14 : Comparaison en pourcent des Fraction Volumique de Fibres initiales de l'essai et obtenues par fitting du comportement de chaque échantillon dans le cas apparent (A) et réel (R) par rapport à la fraction volumique apparente initiale de l'échantillon RB

On peut remarquer entre les échantillons extraits de renfort que l'interprétation des données par l'équation de Toll dans le cas apparent est plus proche que dans le cas réel ce qui est cohérent avec le lissage de la variabilité par la première interprétation. Les pressions mises en jeu lors de ces essais restent faibles pour pouvoir être absorbées par le microscope, l'objectif de ces essais de compaction à faible pression était d'identifier les mécanismes de déformation présents dans la phase de réorganisation. Une campagne plus vaste serait à réaliser mais deux conclusions capitales émergent :

- La phase de compaction ne s'accompagne pas d'une modification de la largeur, ainsi, la réorganisation ne semble pas conduire à un étalement du roving.
- Lors de la compression la surface extérieure n'est que peu modifiée et garde ses irrégularités qui ne sont pas « gommées ».

Ces deux conclusions nous amènent à envisager que la réorganisation du réseau fibreux n'est pas de même nature que pour les fibres longues et que la phase de « compaction » n'est sans doute pas majoritairement une phase de migration des fibres dans les espaces vides. Cela est sans aucun doute dû à la structure particulière des rovings de lin, ainsi qu'à l'ensimage utilisé. De nouveau, il semblerait intéressant de mener des essais de compression sous tomographe pour tenter de visualiser ces mécanismes plus finement.

Enfin, l'intérêt majeur de ce protocole est que les données obtenues vont permettre de recalibrer avec les géométries réelles des échantillons, le comportement du roving de lin par identification inverse en simulation numérique.

2. Essai de compaction/compression

Sur la base du protocole présenté en B, l'obtention du comportement en compression des rovings extraits de renforts est déterminé par l'étude du déplacement des marqueurs et est réalisée à l'aide d'un programme Matlab. Les images sont seuillées en intensité lumineuse dans un cadrage défini par l'utilisateur puis le centre de chaque marqueur est déterminé par son centre d'inertie. A partir de ces données il est donc possible de corréler le déplacement des marqueurs avec l'écart entre les plateaux et ainsi de déterminer la fraction volumique de fibres apparente en fonction de la pression moyenne apparente pour chaque échantillon (Figure 77).

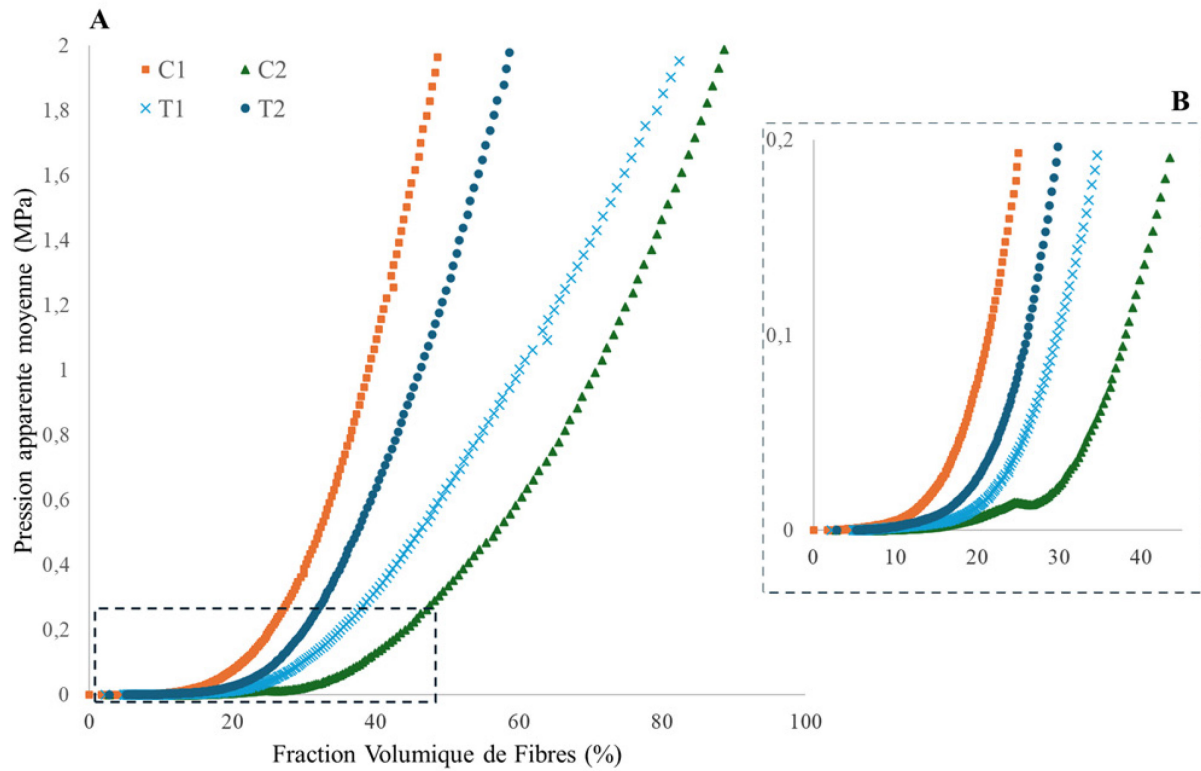


Figure 77 (A) Comportement en compression obtenu pour les différents échantillons en fonction des résultats de l'échantillon C1 à partir de l'analyse d'images. [C1, C2] représentent les échantillons direction chaîne et [T1, T2] représentent les échantillons direction trames. (B) Comportement des échantillons sur la plage 0-0.2MPa

La Figure 77 montre que le comportement en compression des rovings est sujet à une grande variabilité. De plus, comme pour l'essai de compaction, on ne note pas de lien évident entre le comportement obtenu et la direction d'extraction des rovings au sein du renfort. L'échelle d'observation de ces essais est de plus assez faible et les incertitudes sur les mesures amène une grande variation des résultats. La Figure 78 montre en effet qu'une imprécision estimée à 2 pixels sur la position des marqueurs engendrent jusqu'à 2% de différence sur la valeur de fraction volumique de fibres calculée.

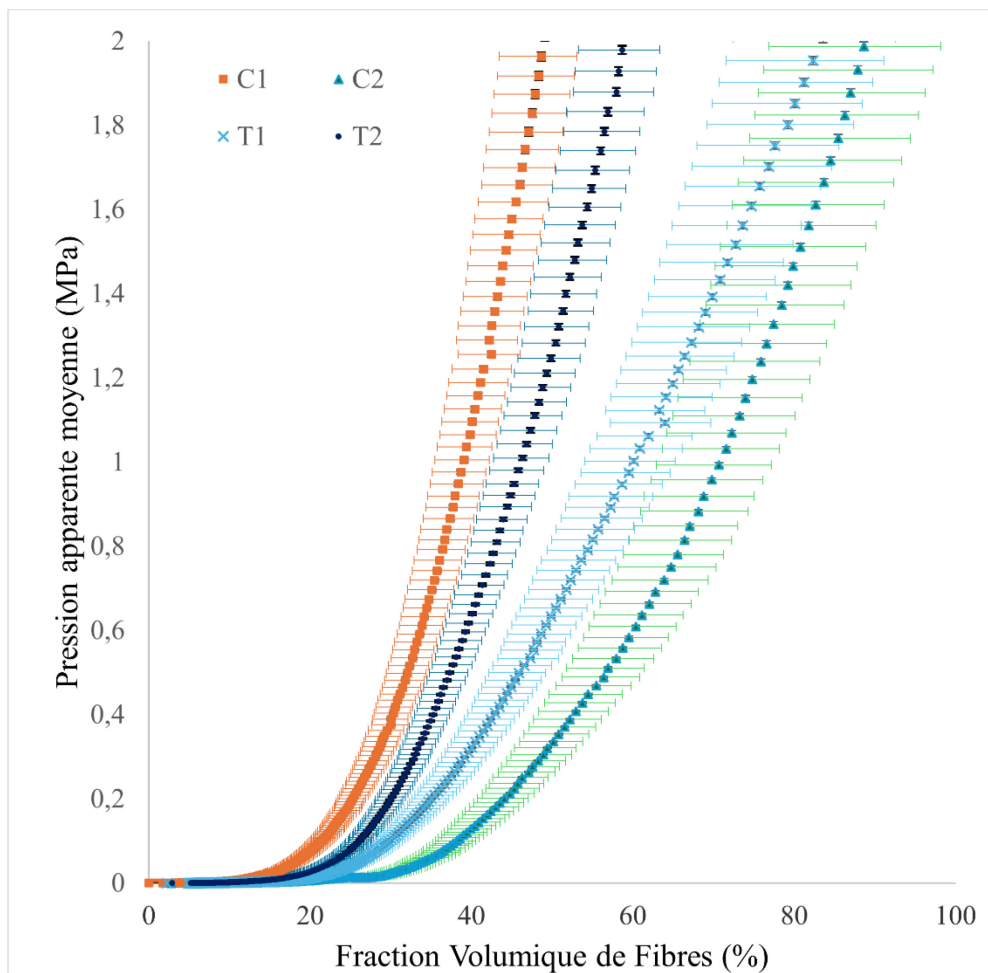


Figure 78 : Incertitudes sur la détermination de la fraction volumique de fibres apparente liées à la détermination de l'écart entre les plateaux

Il est intéressant de noter sur la Figure 77 une variation du comportement du roving [C2] dans la phase de transition entre la réorganisation et la compression du renfort (étape 2-3 Figure 63). L'observation de l'effort de réaction et de l'écart entre les marqueurs montrent une chute de l'effort pour un abaissement continu du plateau (Figure 79). Cela peut signifier qu'un équilibre de l'organisation fibreuse a été rompu ce qui facilite une nouvelle réorganisation en entraînant une baisse de l'effort. Au vu de l'architecture de l'étude et de l'organisation complexe de la structure ce phénomène n'est pas étonnant. Néanmoins, cela montre une fois encore les limites de la similitude qui peut être accordée entre le comportement des fibres synthétiques et celui des fibres naturelles.

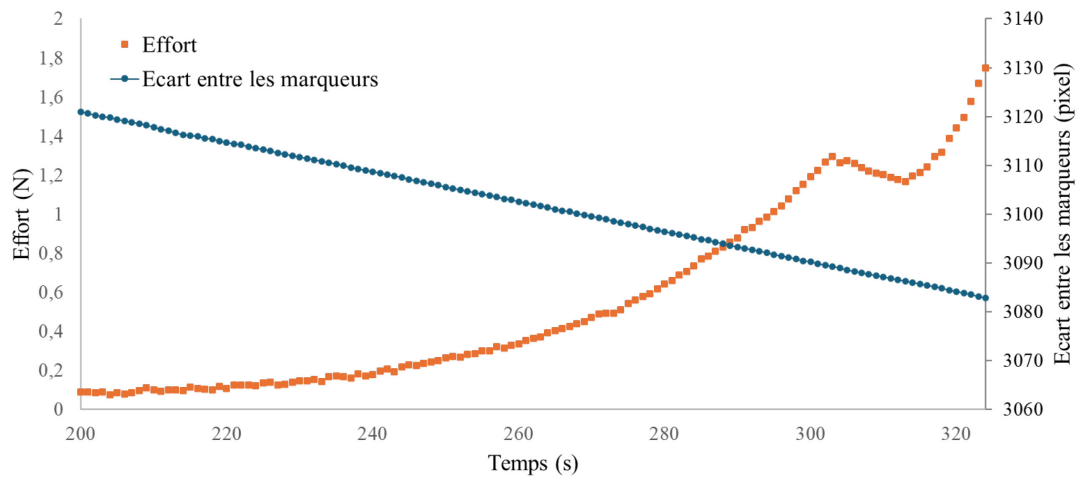


Figure 79 : Observation de l'origine du comportement observé du roving C2 dans la plage de l'essai correspondant à 0-0.2MPa (Figure 77 B).

A ce stade il est désormais possible de comparer le comportement obtenu à l'aide de nos essais à la fois en compaction sous microscope et en compression (Figure 80). Les essais réalisés à partir de ces deux méthodes donnent des résultats cohérents sur une plage de faible pression ce qui valide la méthode mise au point sur le microscope.

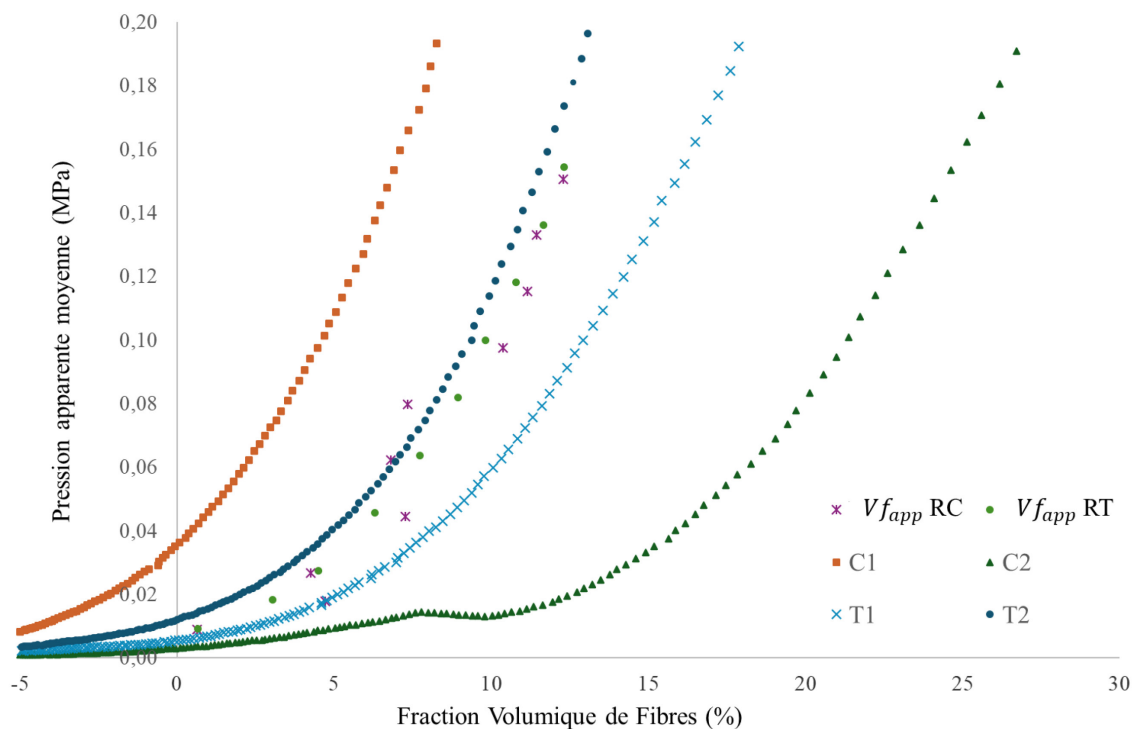


Figure 80 : Comparaison du comportement en compression des rovings obtenus à partir du microscope numérique et par suivi de marqueur sur une mono-colonne par rapport aux résultats de l'échantillon apparent RB

Bien que l'identification du comportement des rovings de fibres naturelles soit difficilement transposable depuis celui des fibres synthétiques, le choix a été fait dans une première approche de modéliser le comportement à l'aide d'une identification des paramètres de Toll (Équation 4). On remarque sur la Figure 81 que le pied de courbe, soit la phase de transition entre la réorganisation et le blocage du réseau (Figure 63), est assez mal représenté par le fitting. Ceci est cohérent avec l'analyse faite des mécanismes de déformation identifiés dans la partie précédente. En effet, il semble que les modifications de structure du roving de lin ne soient pas majoritairement de la « compaction », c'est-à-dire des déplacements de fibres pour occuper les espaces libres. Ainsi, le modèle de Toll & Manson qui est basé sur ce mécanisme n'est sans doute pas celui qu'il faudra conserver à l'avenir si ces hypothèses se confirment.

Les différents coefficients obtenus des paramètres K_c , γ et Vf_0 sont résumés dans les Tableau 15 et Tableau 16.

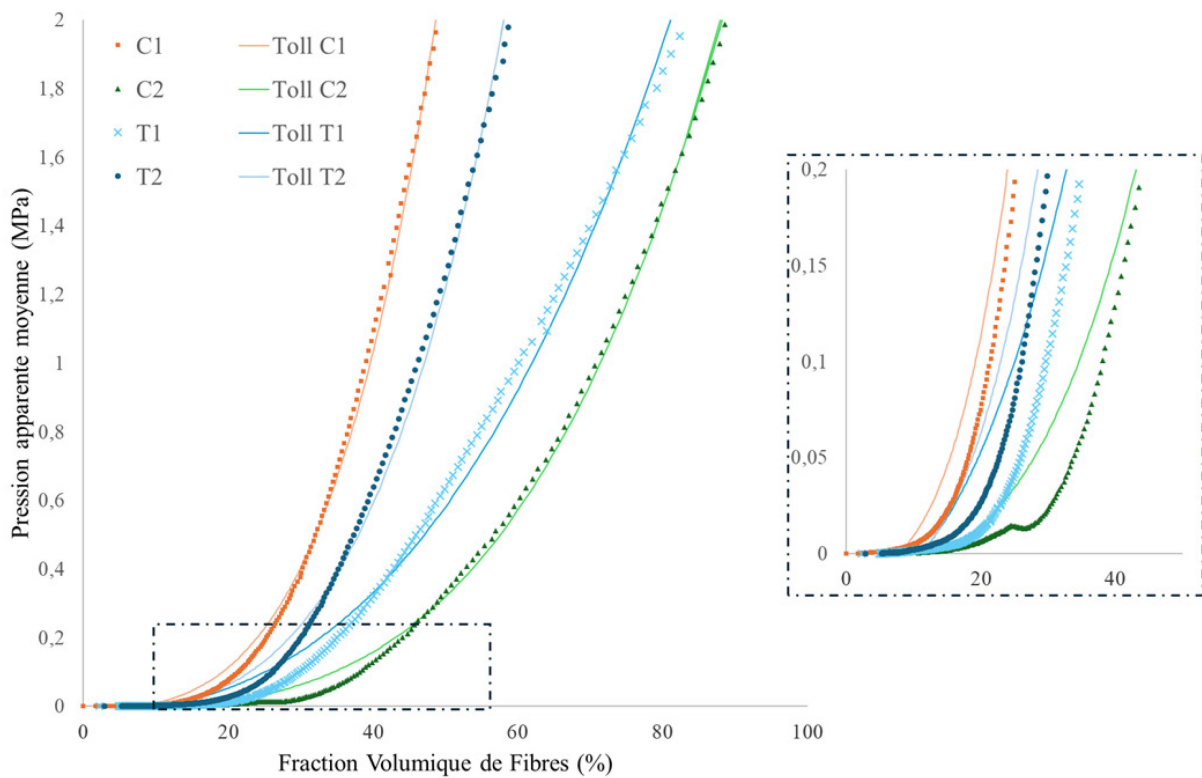


Figure 81 : Fitting du comportement en compression par le modèle de Toll

	C1	C2	T1	T2
K_c	1.0	0.1	0.2	0.5
γ	1.0	0.9	0.7	0.9
Vf_0 (%)	0.0	6.0	3.0	3.0

Tableau 15 : Coefficients du modèle de Toll déterminés sur les échantillons sur la plage 0-2MPa normalisés par rapport au couple K_c, γ de l'échantillon C1

	C1	C2	T1	T2	RC	RT
K_c	0.12	0.00	0.01	0.05	0.02	0.03
γ	0.71	0.42	0.67	0.73	0.60	0.68
Vf_0 (%)	-9	-7	-7	-9	2	1

Tableau 16 : Coefficients du modèle de Toll déterminés sur les échantillons sur la plage 0-0.2MPa normalisés par rapport au couple K_c, γ de l'échantillon RB

Les paramètres de Toll identifiés sur la plage 0-2MPa (Tableau 15) sont du même ordre de grandeur. De la même manière, les coefficients déterminés sur la plage 0-0.2MPa (Tableau 16) sont aussi cohérents et comparable avec les valeurs obtenues avec le dispositif de compaction. On note que le comportement du roving C2 diffère sur la plage des faibles pressions comme identifié plus tôt sur les limites des données recueillis par cette méthode d'identification du comportement.

3. Bilan des essais de compaction/compression

La mise en place de deux essais complémentaires ont permis d'observer le comportement de roving sur des plages de pressions différentes. Si le nombre d'échantillons post-traités incite à la prudence et ne permet pas de tirer des conclusions définitives, des tendances très intéressantes semblent émerger. Les essais menés à l'aide du dispositif de compaction ont permis de mettre en évidence que la modification d'architecture et les dégradations provenant des sollicitations du tissage semblent amener une dissociation du comportement des rovings en sortie de bobine et dans le renfort. La deuxième conclusion de cette étude montre un écart particulièrement important entre la fraction volumique de fibres déterminée à partir des sections réelles de l'échantillon et celle déterminée de façon apparente. La fraction apparente moyenne est celle qui est universellement utilisée pour le

dépouillement des essais de compression, or, le comportement implémenté en simulation dépend de la section réelle du roving (Chapitre IV, I.C page 142). Lorsque l'écart entre les deux est aussi important et que la réorganisation ne permet pas de le gommer aux premiers instants de la compression, la question d'une définition plus rigoureuse de la pression mérite d'être posée. En outre, les mécanismes mis en jeu incitent clairement à questionner les modèles traditionnellement utilisés dans les réseaux de fibres longues.

Enfin, si l'utilisation de l'identification inverse sur la base des essais de compaction sous microscope semble une excellente perspective du fait de la richesse et de la finesse des informations obtenues et de sa relative rapidité (en comparaison avec des essais sous tomographe par exemple), celle-ci soulève un questionnement majeur sur le recalage qui doit être mené. En effet, le recalage du comportement réel sur les échantillons étudiés avec le dispositif de compaction ne concerne qu'une faible plage de pression. Il sera donc nécessaire de valider que l'identification peut avoir une bonne exactitude au regard de la variabilité et être identifié sur cette faible plage.

Pour les simulations, le comportement retenu sera ainsi une loi de Toll & Manson dont les paramètres sont issus des échantillons RC et RT obtenus au microscope.

IV. Conclusion sur le comportement des rovings de lin à intégrer en simulation numérique

Les deux études expérimentales en traction et compression présentées ont mis en évidence des conclusions et des pistes très intéressantes à creuser. Elles font ressortir la nécessité d'appréhender les rovings de lin avec des stratégies très différentes de celles des rovings synthétiques. Elles ont également permis d'atteindre l'objectif de fournir des lois et paramètres de comportement cohérents à implémenter dans les simulations.

- En traction : une loi linéaire de type :

$$F = K_s \epsilon_{11}$$

$$\epsilon_{22} = C_T \epsilon_{11}$$

- En compression : une loi de Toll & Manson différente pour les rovings insérés en direction Chaîne et Trame.

Pour mener à bien des simulations cohérentes, le dernier paramètre important est l'identification des réponses au frottement mèche/mèche. A notre connaissance il n'existe pas d'études réalisées sur ce

type de rovings. C'est pourquoi le laboratoire a lancé une étude spécifique sur la caractérisation des lois de frottement et d'adhérence concernant les rovings de lin. Cette étude est hors du scope de cette thèse mais les premiers résultats permettent de disposer d'une première fourchette de facteurs de frottement et d'adhérence pour alimenter un modèle de Coulomb. Ce sont ces valeurs qui pourront être utilisées pour les simulations dans le cadre de cette thèse.

Configuration	0/0	0/90
Moyenne	0.152	0.134
Ecart type	0.013	0.016

Tableau 17 : Valeurs des facteurs de frottement et d'adhérence dynamiques pour les rovings de lin dans différentes configurations

Chapitre IV : Loi de Comportement

I. Implémentation de la loi de comportement

Après l'obtention de géométrie implémentables dans les codes de calcul et l'identification du comportement spécifiques des rovings de fibres de lin, il est nécessaire de pouvoir implémenter ce comportement dans les logiciels de simulation numérique. A l'échelle mésoscopique, les mèches sont considérées homogènes et il est alors nécessaire de définir le comportement du matériau homogène équivalent représentatif de la structure fibreuse. Ce comportement hérite à la fois du comportement des fibres seules mais également des caractéristiques liées à leur assemblage sous forme de mèches. Il doit en outre intégrer les non-linéarités géométriques (liées aux grands déplacements et grandes déformations des mèches) ainsi que les non-linéarités matérielles. De plus, le comportement spécifique des mèches, avec une rigidité longitudinale largement supérieure aux autres nécessite de suivre parfaitement cette direction. C'est pourquoi, une loi de comportement hypoélastique non linéaire a été implémentée par P. Badel [139] et modifiée par A. Wendling [111]. Elle intègre un suivi des directions matérielles par la mise en place d'une dérivée objective basée sur la rotation dans la direction des fibres et s'écrit de la façon suivante :

$$d\sigma_{ij} = C_{ijkl}d\epsilon_{kl}$$

Avec C_{ijkl} un tenseur de comportement isotrope transverse tel que :

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{2222} & C_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{1212} & 0 & 0 \\ & & & & C_{2323} & 0 \\ & \text{Symétrie} & & & & C_{1313} \end{bmatrix}$$

Les coefficients du tenseur de comportement sont identifiés via des essais sur mèches. Cette stratégie a aussi été mise en œuvre dans la présente étude (Chapitre III). Les calculs et la stratégie globale sont expliqués dans les travaux de A. Wendling [111].

Concernant les simulations, le logiciel Abaqus® est utilisé. Il nécessite de disposer d'un outil appelé Vumat pour l'intégration de lois de comportement non usuelles. Les cas implémentés et testés dans les précédentes études concernaient majoritairement des renforts de mèches à sections constantes le long de la trajectoire et ont donnés des résultats satisfaisants. Or, comme mentionné au Chapitre II, les mèches de fibres de lin présentent une variabilité géométrique importante. Afin de déterminer

l'impact de cette variabilité sur le comportement des roving de lin, il est nécessaire d'adapter la Vumat. Pour cela, il faut comprendre le processus du calcul à l'aide d'une Vumat dans Abaqus®.

A. Fonctionnement d'une Vumat lors d'une simulation sous Abaqus®

Lors d'une simulation numérique avec Abaqus®, il faut disposer à la fois d'un maillage cohérent de la géométrie étudiée et d'un moyen de réaliser sur chaque élément du maillage le calcul de l'impact de la sollicitation appliquée suivant le comportement du matériau. Les éléments utilisés sont de type C3D8R, il s'agit d'éléments hexaédriques à 8 nœuds et 1 point d'intégration.

La Loi de comportement est implémentée dans Abaqus® via une Vumat, qui va permettre de réaliser le calcul sur chaque élément du modèle et en communiquer le résultat au système central d'Abaqus® qui gère le calcul (Figure 82). Au vu du grand nombre d'éléments, le calcul peut ainsi être partitionné en 6 domaines maximum permettant de réduire le temps de calcul. Ainsi, les n éléments numérotés dans la base principale du modèle (B_p) sont renumérotés dans la Vumat dans la base de numérotation de la partition (B_i), avec $i = [1, n_i]$, n_i étant le nombre d'éléments contenu dans la partition. La répartition des éléments dans chaque partition suit une logique propre au logiciel qui n'est pas communiquée lors du lancement du calcul et n'est pas conditionnée par la numérotation dans la base principale. De même, le regroupement des données issues des différentes partitions n'est pas clair à ce jour. Cette singularité sur la numérotation implique que l'élément dans la base B_p du modèle en cours de calcul n'est pas connu lors du passage par la Vumat.

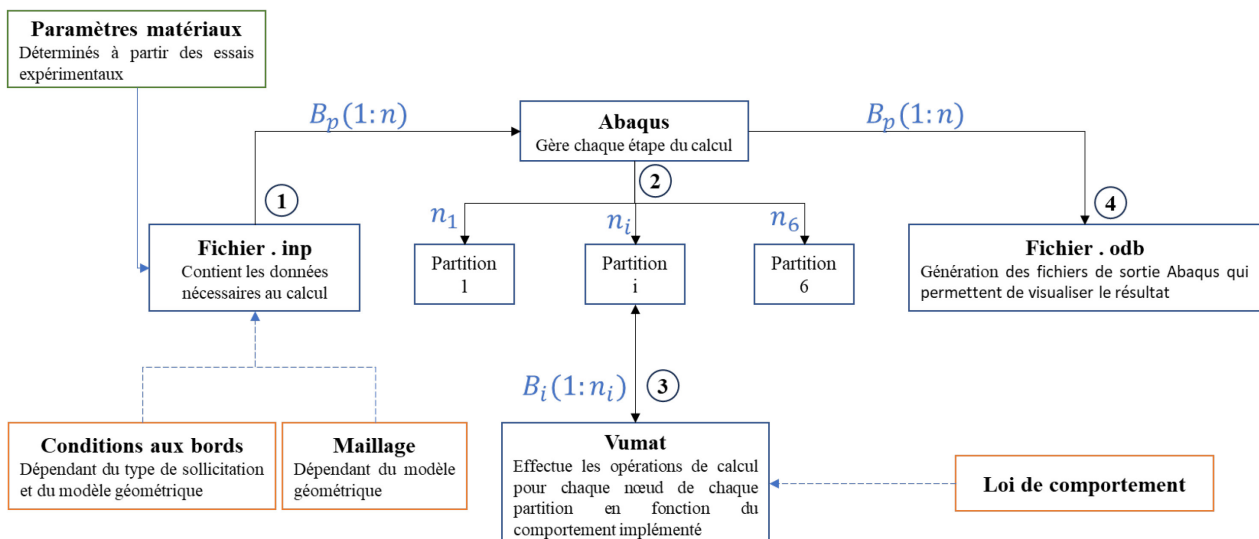


Figure 82 : Représentation schématique de la gestion du calcul numérique en utilisant une Vumat

Les étapes du calcul se déroulent donc comme suit :

- 1 Lecture des caractéristiques du matériau ;
- 2 Répartition des éléments dans chaque domaine ;
- 3 Calcul du comportement de chaque élément, transfert des résultats et bouclage avec Abaqus® ;
- 4 Conversion des résultats et visualisation générale.

Lors d'essais sur la modification de la Vumat il est apparu que l'initialisation des données (caractéristiques matériaux) est réitérée à chaque nouveau calcul sur une partition. Toute donnée qui doit pouvoir être réutilisée et/ou modifiée dans les différentes étapes du calcul doit être systématiquement sauvegardée par l'intermédiaire des données recueillies par Abaqus®.

Il est nécessaire de s'assurer que l'outil permettant le calcul du comportement de chaque élément permet de suivre l'évolution des sections enveloppe des rovings dans l'objectif de déterminer si la variabilité géométrique des sections d'enveloppe d'un roving de lin à un impact significatif sur le comportement général obtenu. Il faut donc comprendre comment est effectué l'attribution du comportement des éléments au sein de la Vumat utilisée au début de cette étude, appelée V0 pour la suite de ce manuscrit, et comment l'adapter aux besoins de l'étude.

B. Fonctionnement de l'attribution du comportement de la Vumat V0

La Vumat V0 a pour principe de fonctionnement l'attribution du comportement de l'élément en fonction de la déformation subie par l'élément. Pour rappel, les hypothèses liées à son cadre d'utilisation sont :

- Section constante du modèle
- Homogénéité de la répartition des fibres
- Comportement isotrope transverse

La stratégie en simulation consiste à intégrer le comportement d'un matériau homogène équivalent du roving. Cette stratégie permet d'attribuer le comportement initial des éléments nécessitant une homogénéisation, tel que :

- Le paramètre de rigidité **K** de la mèche (Chapitre III, II.C page 107) (1) ;
- La fraction volumique de fibres **V_f** (Chapitre III, III.C.3 page 130) (2) ;

sans précisément connaître l'emplacement de l'élément au sein du modèle.

1. Initialisation du module C_{1111} des éléments

La rigidité moyenne K du roving, dans la direction longitudinale 1 des fibres, dépend du nombre de fibres en tension, de rigidité k_f (considérée identique pour chaque fibre). Or, le titre (tex) est considéré constant (Chapitre II, III page 56) ce qui signifie qu'il y a la même quantité de fibres n_f dans chaque section du modèle. Par conséquent, la rigidité K_{S_i} du matériau homogène équivalent est identique dans chaque section S_i du modèle (Figure 83).

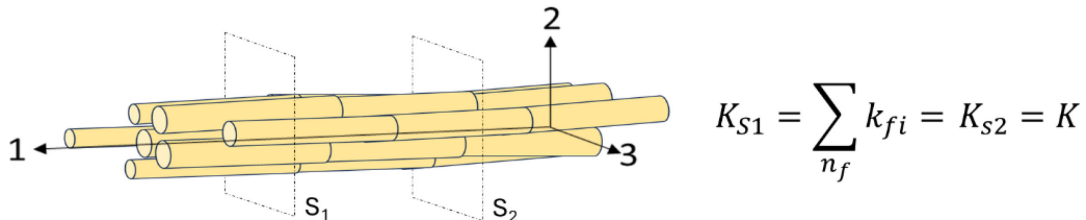


Figure 83 : Hypothèse sur la rigidité de chaque section du roving

D'un point de vue simulation, la répartition homogène des fibres dans la section implique que chaque élément d'une section contient un nombre de fibre proportionnel à la taille de sa section (Figure 84). Cela signifie dans l'exemple Figure 84, que l'élément numéro 4 est 4 fois plus rigide que l'élément numéro 1. Néanmoins, la contrainte supportée par chacun de ces éléments est la même.

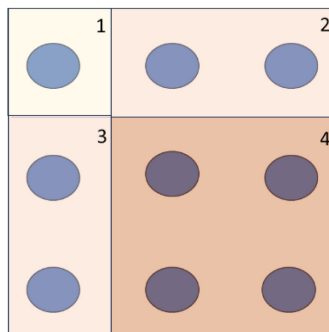


Figure 84 : Répartition homogène des fibres « virtuelles » dans un modèle avec des éléments de sections différentes

Finalement, il est donc possible d'attribuer, de part cette répartition homogène, une contrainte appliquée sur l'élément indépendamment de la taille de la section de l'élément car directement proportionnelle au ratio du nombre de fibres réparti dans la section d'enveloppe du modèle.

Le comportement de l'élément est donc décrit tel que la variation de contrainte dans la direction 1 de l'élément est proportionnelle à la déformation de l'élément dans la direction 1 par la relation Équation 12.

$$d\sigma_{11} = \frac{K}{S} d\varepsilon_{11} = C_{1111} d\varepsilon_{11}$$

Équation 12

Avec :

- K : la rigidité moyenne du roving (N)
- S : la section d'enveloppe du roving (mm²) c'est-à-dire la section du modèle dans le plan (23).

Cette relation est donc identique pour chaque élément du modèle dans le cas où la section d'enveloppe du modèle est constante, et ce indépendamment de la taille de l'élément.

Dans le cas d'un modèle à section non-constante, cette relation est toujours vraie car la masse de fibres qui dépend du titre, et ainsi implicitement le nombre moyen de fibres, par section du modèle reste identique, c'est l'arrangement des fibres au sein de la structure qui est plus ou moins foisonnante (Figure 85) mais reste néanmoins considérée homogène.

Il apparaît alors nécessaire de connaître la taille de la section d'enveloppe du modèle pour attribuer le comportement de chacun des éléments. Or, la Vumat V0 permet au mieux d'injecter la valeur d'une section moyenne ce qui implique la destruction de l'hypothèse sur le titre constant.

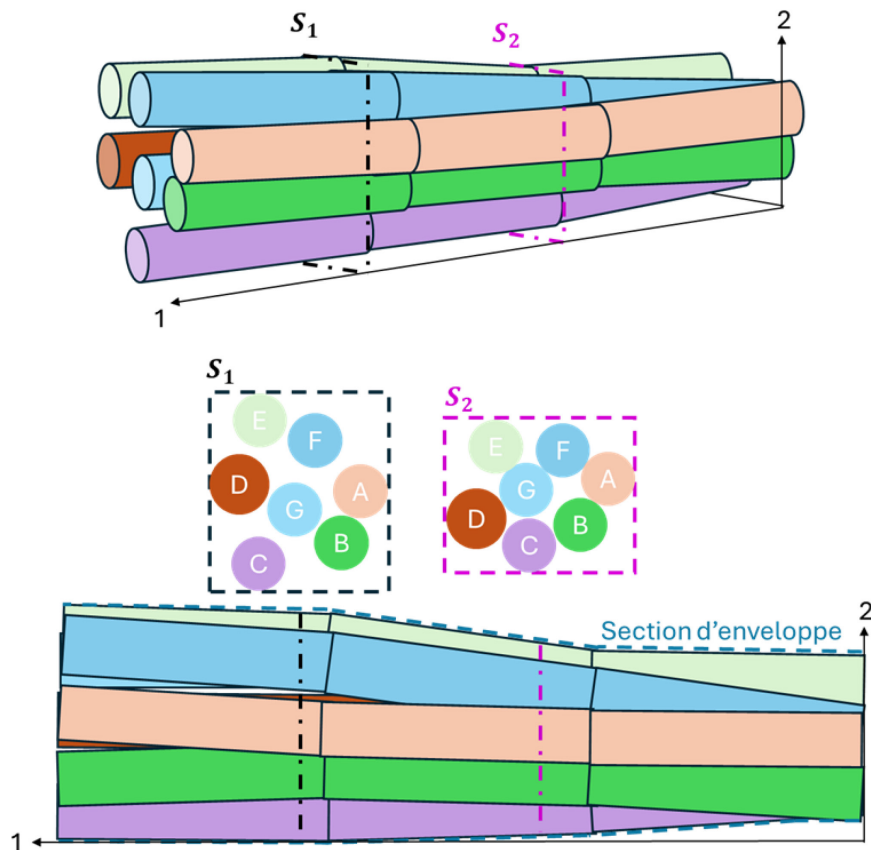


Figure 85 : Modifications de la section d'enveloppe des rovings de lin par l'arrangement fibreux interne

Dans le cas d'un modèle à section non constante il est donc nécessaire de connaître ou calculer la taille de chacune des sections initiales du modèle pour attribuer correctement le comportement de chacun des éléments (Équation 13).

$$d\sigma_{11} = \frac{K}{S_i} d\varepsilon_{11} = E_{11} d\varepsilon_{11} \quad \text{Équation 13}$$

Avec :

- K : la rigidité moyenne du roving (N)
- S_i : la section d'enveloppe numéro i du roving (mm^2) c'est-à-dire la section du modèle dans le plan [23] (Figure 86). Cette numérotation est dépendante du nombre d'éléments dans la direction longitudinal des fibres.

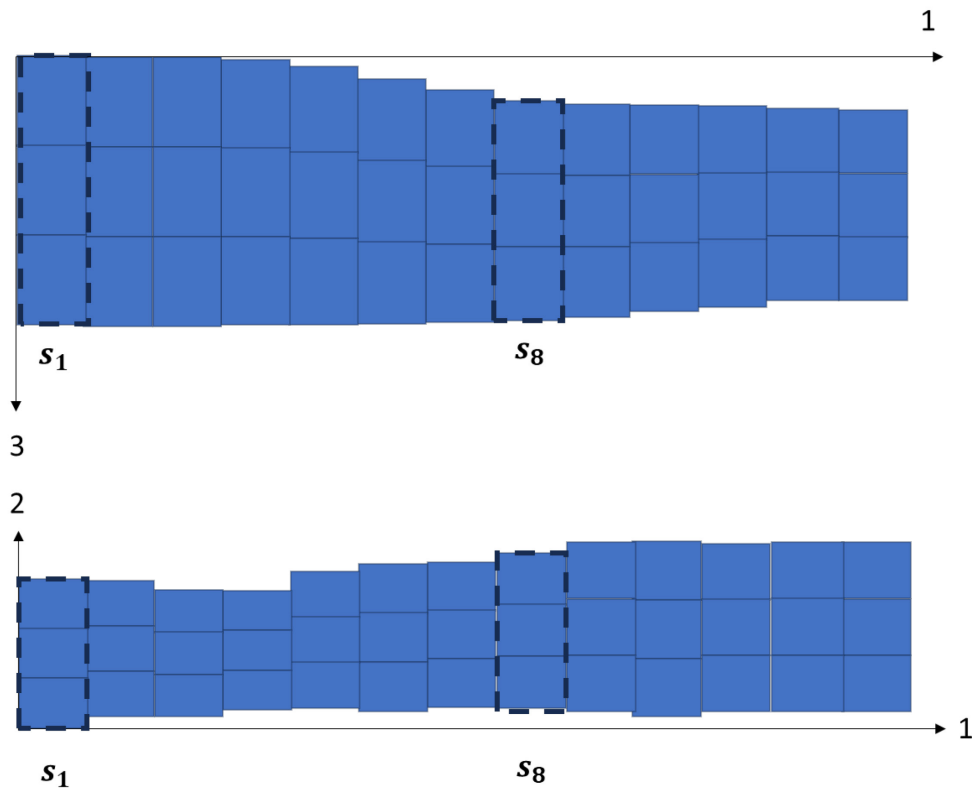


Figure 86 : Numérotation des sections d'enveloppes du modèle

2. Initialisation de la fraction volumique de fibres des éléments

La fraction volumique de fibres V_f permet de déterminer la proportion d'espace occupé par les fibres au sein de l'enveloppe du modèle. Le titre, considéré constant, permet de ramener l'équation à l'identification d'une fraction surfacique de fibres au sein de la section d'enveloppe du modèle. Pour rappel, la section de fibres est déterminée par le nombre de fibres n_f multiplié par la section d'une

fibre s_f , et peut être calculé par une relation entre le titre et la densité des fibres de lin (Chapitre III, III page 108).

La fraction volumique de fibres dépend, d’après les hypothèses précédentes, de la répartition de fibres dans la section. Or celle-ci étant homogène, la fraction volumique initiale de chaque élément V_{fe} est identique à la fraction volumique de fibres de la section du modèle V_f (Équation 14).

$$V_f = \frac{n_f * s_f}{S} \rightarrow V_{fe}(i) = V_f \quad \text{Équation 14}$$

3. Gestion de la déformation au cours du calcul

Nous avons montré que le comportement à implémenté en simulation numérique est dépendant de la section du modèle (Figure 86) dans laquelle se trouve chaque élément. Dans le cas d’une sollicitation, par exemple en compression transverse, les éléments se déforment suivant le comportement prédéfini et entraîne une modification importante de la taille des sections du modèle. La question à ce stade est de savoir comment la modification des sections du modèle entraîne une modification de la valeur des coefficients C_{ijkl} qui dicte le comportement des éléments.

Dans le cas d’une sollicitation en traction longitudinale, la rigidité de la mèche est directement liée au nombre de fibres qui la composent (ou tex), supposé constant, ce qui implique qu’elle est invariable quelle que soit la taille de/des sections du modèle et de ses variations dimensionnelles. Dans le cas d’une modification de la section du modèle, le nombre de fibres, et donc la répartition de rigidité au sein de la section du modèle, doivent donc rester identiques. Cela signifie qu’il faut pouvoir connaître la taille de la section en cours de calcul pour mettre à jour correctement le module C_{1111} de chacun des éléments.

De même, il faut avoir accès à la modification de chaque section du modèle pour s’assurer de la cohérence de la fraction volumique de fibres. En effet, dans le cas cette fois de la compression, la 1^{ère} phase consiste en une réorganisation de la structure ponctuée par une forte variation de la section d’enveloppe (Chapitre III, III page 108). Si les propriétés de l’élément sont attribuées à l’état initial uniquement alors on fixe virtuellement le nombre de fibres au sein de l’élément et ce pour l’intégralité du calcul. Avec cet outil V0, seule la déformation de l’élément est connue et la fraction volumique de fibres est donc calculée par rapport à la déformation de la section de l’élément (Équation 15).

$$V_{fe}(i) = V_{f0} * \frac{S_0}{S_e(i)}$$

Équation 15

- V_{f0} , la fraction volumique de fibres initial de la section du modèle
- S_0 , la section initiale du modèle

Néanmoins, cette méthode n'est adaptée que dans le cas où la section du modèle est et reste un parallélépipède dont tous les éléments se déforment en compression de la même manière que la section totale du modèle. En effet, dans le cas contraire on néglige la restructuration et la migration des fibres d'un élément à un autre pour maintenir l'homogénéité de la répartition (Figure 87). Il est donc possible d'obtenir des éléments déformés avec des fractions volumiques de fibres aberrantes (Figure 87 B).

Il convient donc de maintenir la répartition homogène dans le calcul tant pour le calcul des propriétés en traction avec la rigidité que pour la compression avec le calcul de la fraction volumique de fibres de l'élément.

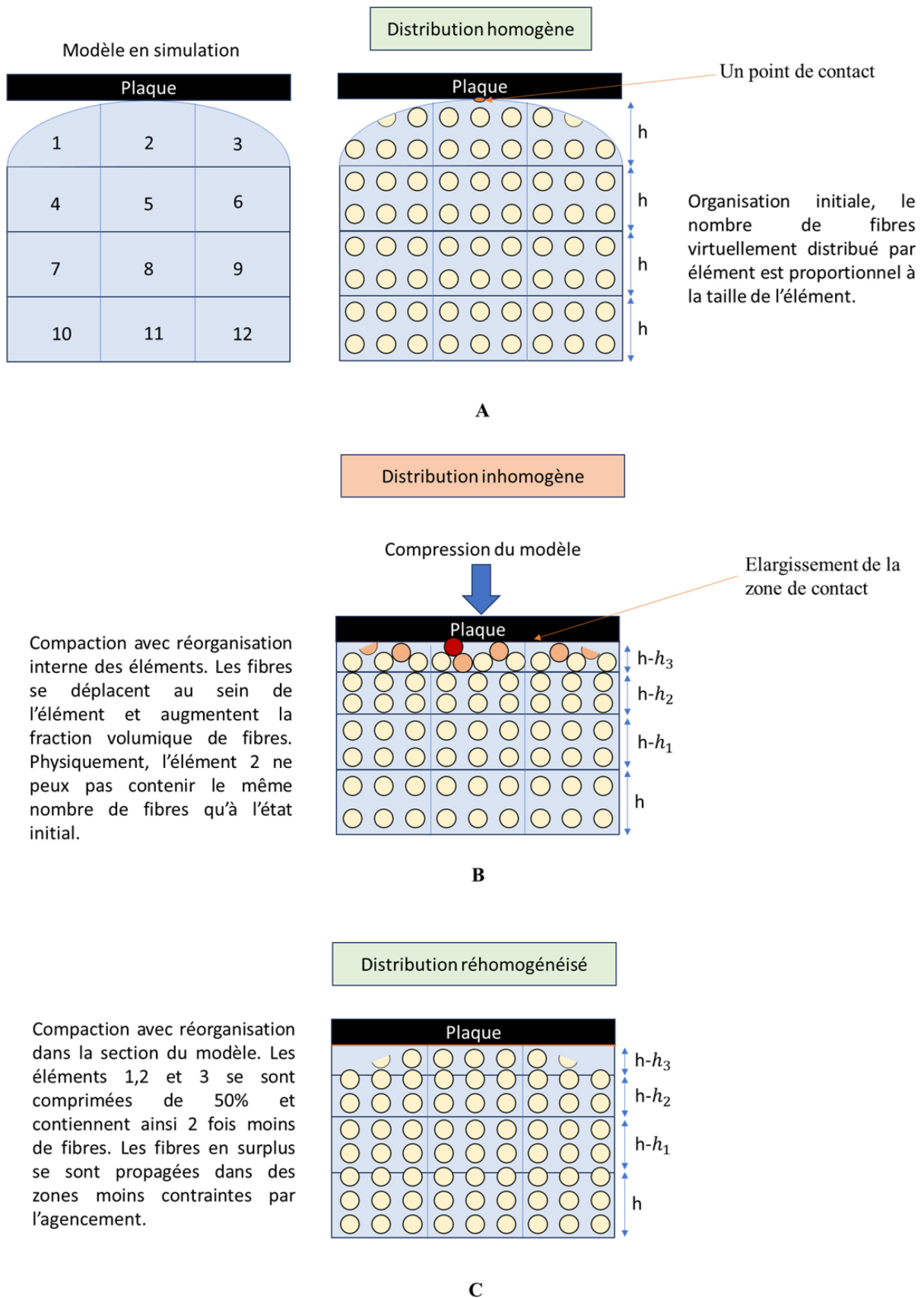


Figure 87 : Représentation de la migration des fibres au sein de la section de chaque élément dans le cadre d'une répartition inhomogène (B) et réhomogénéisée (C) à partir d'une répartition homogène (A)

Les propos précédents mettent donc en évidence la nécessité, de connaître ou de pouvoir calculer :

- La taille de chacune des sections **S_i d'enveloppe** du modèle à l'état initial
- La déformation transverse de chaque section **S_i d'enveloppe** du modèle au cours du calcul ;

Ceci, afin de pouvoir réhomogénéiser la distribution des paramètres matériaux au cours du calcul.

C. Adaptation de l'outil Vumat

Afin de conserver l'homogénéité du comportement des éléments il est nécessaire de pouvoir disposer de la déformation des sections d'enveloppe du modèle. Or, seul le point de vue de la déformation de l'élément est accessible et permet de calculer la déformation de la section transverse de l'élément.

Pour réhomogénéiser les propriétés de l'élément en cours de calcul il faut non seulement connaître le numéro de la section d'enveloppe à laquelle appartient l'élément mais aussi les caractéristiques d'évolution de ladite section d'enveloppe.

1. Principe

La section d'enveloppe du roving **S_i** peut être calculée à partir de la somme de la taille de chaque section transverse d'éléments qui la compose. L'introduction de la taille initiale de chaque section d'élément **S_{e0}** permet donc de recalculer la taille de la section d'enveloppe à chaque étape du calcul à partir de la déformation des éléments (Équation 16 qui la compose) (Figure 90).

$$S_i = \sum_{n_{Si}} S_{e0}(i) * Jp_e(i) \quad \text{Équation 16}$$

- **n_{Si}** : nombre d'éléments appartenant à la section **S_i**. Ce nombre est invariant au sein d'une même Part/mèche de par la construction du maillage (Chapitre II, A page 66) ;
- **Jp_e(i)** : taux de déformation de l'élément par rapport à sa section initiale.

Bien qu'un paramètre de la Vumat du nom de « JInfoArray » existe et permette en théorie de connaître l'élément en cours de calcul dans la base B_p, sa mise en place n'as pas rencontré de succès. Une méthode a donc été mise en place (Figure 88) et consiste à connaître initialement les coordonnées du point d'intégration de chaque élément qui sont injectés dans la Vumat à partir des propriétés matériaux. Pour rappel, les éléments utilisés sont des C3D8R et possèdent donc un seul point

d'intégration en leur centre. Cela permet de constituer une base de données dans laquelle chaque triplet de coordonnées de point d'intégration correspond à un numéro d'élément unique. Lorsqu'un élément « passe » dans la Vumat, les coordonnées de tous les points d'intégrations sont comparées à celles fournies par Abaqus® ce qui permet d'identifier l'élément. Les coordonnées de la base de données doivent être mises à jour en cours de calcul pour suivre le déplacement des éléments. Une vigilance particulière est de mise sur le facteur de comparaison des coordonnées afin d'identifier le bon élément et ce même si le centre des éléments se « rapprochent » les uns des autres lors du calcul, ce qui est notamment le cas en compression.

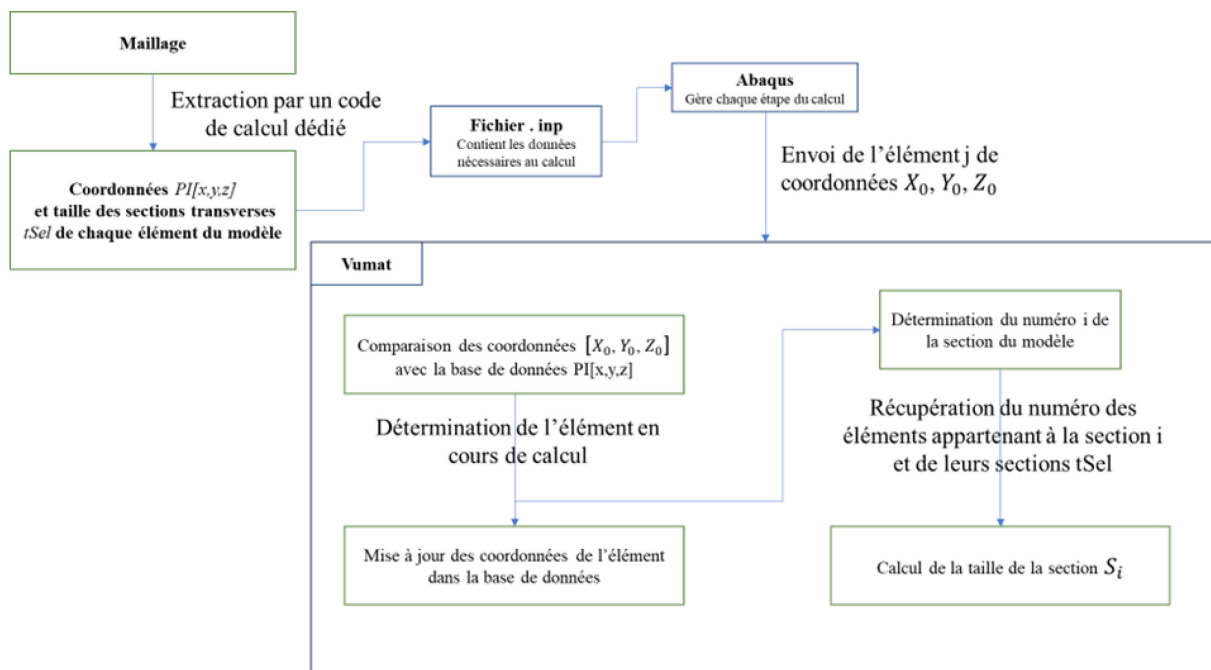


Figure 88 : Méthode d'identification et de calcul de la section d'enveloppe au cours de la simulation

Si l'élément en cours de calcul peut être identifié à partir de ces coordonnées, il est nécessaire de pouvoir à partir de ce numéro d'élément connaître tous les éléments appartenant à la même section pour calculer la taille de la section d'enveloppe. Après étude de l'attribution de la numérotation des éléments du maillage (Figure 89), il apparaît possible de connaître par le numéro de l'élément, la section d'enveloppe à laquelle il appartient.

La Figure 89 présente 2 types de maillage différents d'un même modèle, nommés A et B. Ces maillages sont obtenus par l'attribution automatique de la numérotation des éléments par Abaqus® sans partitionnement du maillage. Des variations de cette numérotation sur le point de départ et le

mode de propagation, X croissant à partir du bord droit sur le cas A ou Z croissant à la place de Y décroissant pour le cas B par exemple, ont été observés mais ne modifient pas les conclusions sur le mode de calcul permettant de retrouver le numéro de la section du modèle à partir du numéro de l'élément. Ainsi, dans le cas du maillage A, le numéro de l'élément et le nombre de section du modèle permettent de retrouver le numéro de la section (Équation 17). Par exemple, le reste de la division euclidienne du numéro d'élément 25 par le nombre de section du modèle, ici 6, donne bien la section numéro 1. Dans le cas B, le calcul est moins direct et dépend du nombre d'éléments dans chaque section (Équation 18). Ce calcul est possible car la stratégie de maillage consiste à modifier la taille des éléments plutôt que le nombre dans chaque section du modèle. Dans le renfort, la stratégie de maillage utilise le partitionnement, et le pilotage de la numérotation des éléments ne correspond pas aux deux cas présentés. Néanmoins, le réordonnancement des données injectées pour l'association du numéro d'élément et du numéro de section du modèle permet dans le cas du renfort d'employer cette stratégie de détermination du numéro de section du modèle même si la vérification n'apparaît pas directement dans les données de visualisation des résultats du calcul.

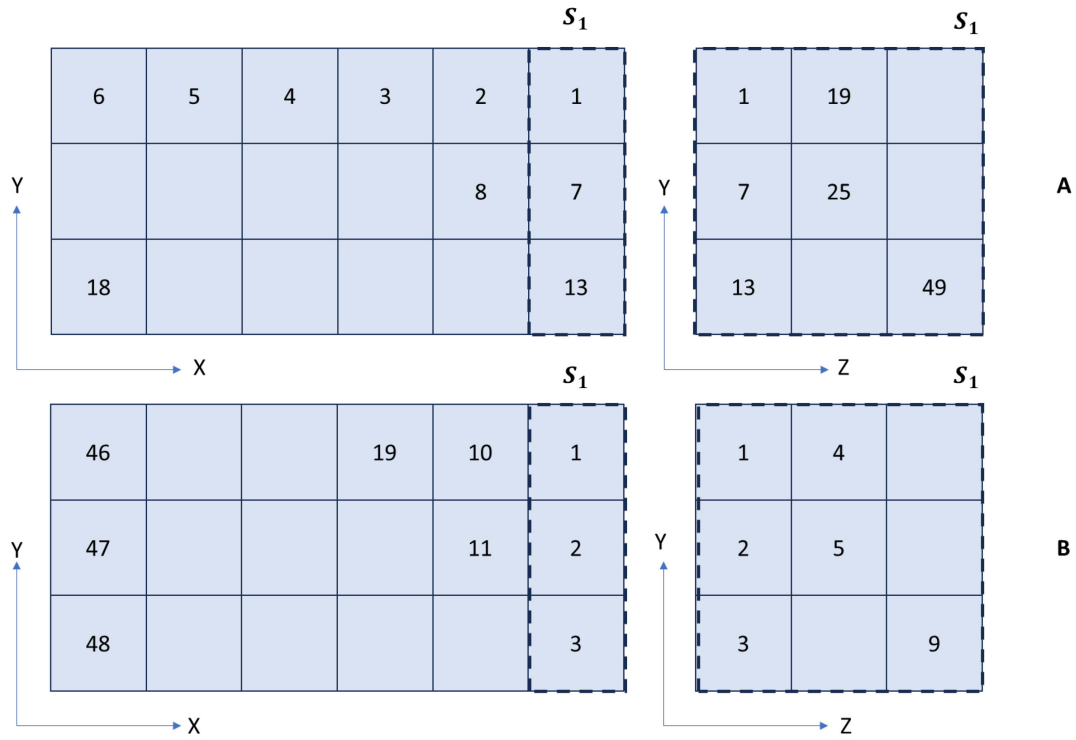


Figure 89 : Observation de la relation entre le numéro d'élément et le numéro de la section du modèle à laquelle il appartient en fonction de la numérotation du maillage pour une numérotation de type « ligne » (A) ou « colonne » (B) d'un modèle contenant 54 éléments et 6 sections d'enveloppe

$$\text{Maillage A : } numS = \text{modulo}(elem, nbS) \quad \text{Équation 17}$$

$$\text{Maillage B : } numS = \frac{elem - \text{modulo}(elem, nbS)}{nbS} + 1 \quad \text{Équation 18}$$

Avec :

- NumS : Numéro de la section d'enveloppe S_i
- elem : Numéro de l'élément dans le maillage
- nbelS : Nombre d'éléments par section. Ce nombre est défini par l'utilisateur dans GeoFab
- nbS : Nombre de section du modèle ($nbS = \sum elem / nbelS$)

Une fois ces éléments mis en place, le calcul se déroule comme suit :

- L'élément en cours de calcul et la section d'enveloppe à laquelle il appartient sont identifiés ;
- La taille de la section de l'élément et celle de la section d'enveloppe sont mises à jour ;
- Le comportement matériau de l'élément est réhomogénéisé par le recalcul des coefficients C_{ijkl}

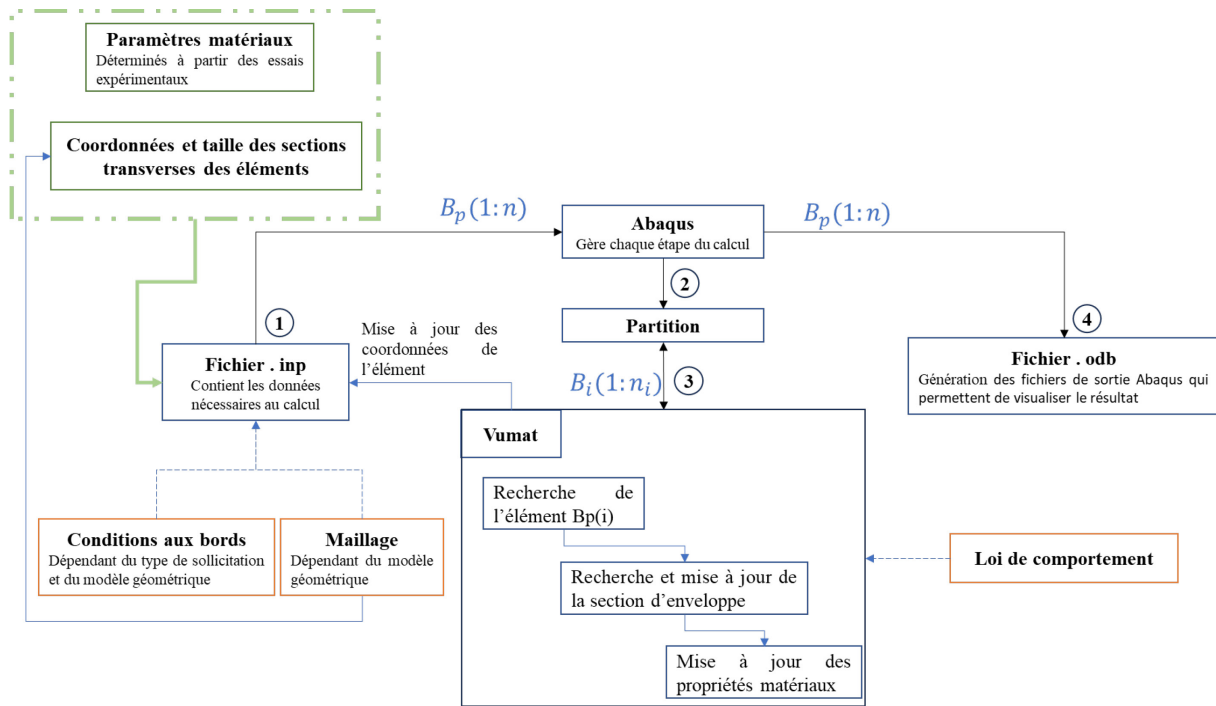


Figure 90 : Représentation schématique de la gestion du calcul numérique en utilisant une Vumat adaptée à un modèle à section non constante

2. Validations de la nouvelle Vumat V2

La procédure permettant l'homogénéisation des propriétés a donc été identifiée au vu des possibilités offertes par l'implémentation dans Abaqus®. Il convient donc de vérifier le bon fonctionnement de cette nouvelle version et sa capacité à assurer la ré-homogénéisation du comportement.

Un modèle cubique de dimensions $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ est testé en simulation avec une section d'enveloppe constante mais un maillage partitionné avec des éléments volontairement de taille différentes (Figure 91). Le modèle contient 6 éléments (C3D8R) par section et tous les éléments du modèle sont orientés suivant les directions globales d'Abaqus® avec X la direction principale des fibres.

L'objectif de ce test est de montrer que la déformation de la section globale du modèle et/ou des éléments ne modifie pas les propriétés en traction du modèle. Pour cela, le modèle est testé avec l'application de deux cycles de chargements consécutifs (Figure 91) : un cycle de compression de 10% de la section transverse (direction -Y) puis un cycle de traction dans la direction des fibres (direction X).

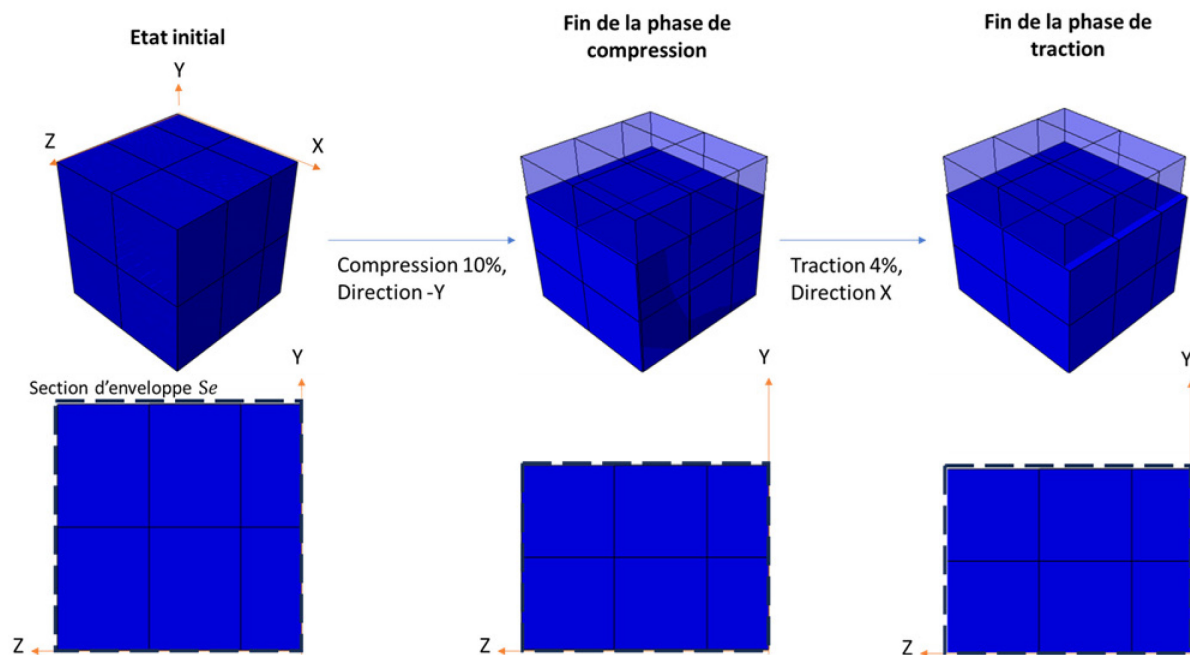
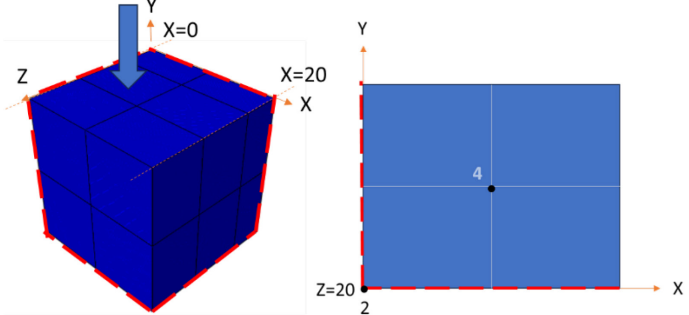
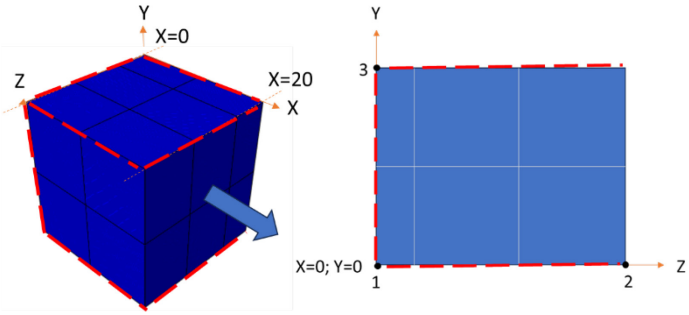


Figure 91 : Résumé des sollicitations appliquées lors du test

Les conditions appliquées pour chaque sollicitation dans les deux phases du test sont résumées dans le tableau suivant :

Conditions aux bords	Visualisation
Sollicitation : Compression Déplacement imposé des nœuds : - Face $Y=20\text{mm}$, direction $-Y$, $U_2 = 2\text{mm}$ Blocage des nœuds : - Face $Y=0\text{mm}$, direction Y - Face $Z=0\text{mm}$, direction Z - Face $X=0\text{mm}$, direction X Les nœuds de la face $Z=20\text{mm}$ sont contraints au même déplacement que le nœud numéro 4 pour conserver la section droite.	
Sollicitation : Traction Déplacement imposé des nœuds : - Face $X=20\text{mm}$, direction X, $U_1 = 1\text{mm}$ Blocage des nœuds : - Face $X=0\text{mm}$, direction X ; - Numéros 2 et 3 respectivement dans les directions Y et Z ; - Numéro 1 dans les 3 directions pour éviter un déplacement de corps rigide. - Face $Y=0$ et $Y=20\text{mm}$, direction Y.	

a. Attribution des paramètres initiaux

Afin de réaliser cette simulation, les paramètres permettant de calculer les coefficients C_{ijkl} du comportement (I page 133) sont ici fixés avec :

- $K = 5000$ N, pour être de l'ordre de grandeur des propriétés du roving de lin
- $S_f = 111,43 \text{ mm}^2$, la section de fibres utilisée pour le calcul de la fraction volumique de fibres. Celle-ci a été fixée pour correspondre à un taux proche de celui que l'on retrouve dans les rovings de lin (~20-30%)
- K_c, γ : les paramètres de compression de Toll sont repris d'une identification sur roving de lin
- n et ν_{23} , Ces paramètres n'ont pas été identifiés pour ce cas et ont été repris de simulations effectuées sur des rovings de fibres synthétiques.
- $MCis_{12}$, ce module n'a pas été identifié et doit être faible pour réaliser les calculs

La densité appliquée aux éléments est celle du lin ($1,4 \cdot 10^{-9} \text{ t/mm}^3$). Les déplacements imposés sont réalisés avec des amplitudes de type smooth.

b. Résultats

En premier lieu, il convient de vérifier que chacun des éléments du modèle est bien soumis à la même contrainte ou la même variation de contrainte $d\sigma_{11}$ (Figure 92) et que chacun des éléments contient bien la même fraction volumique de fibres (Figure 93) indépendamment de la taille de la section de l'élément et lors de l'intégralité du calcul.

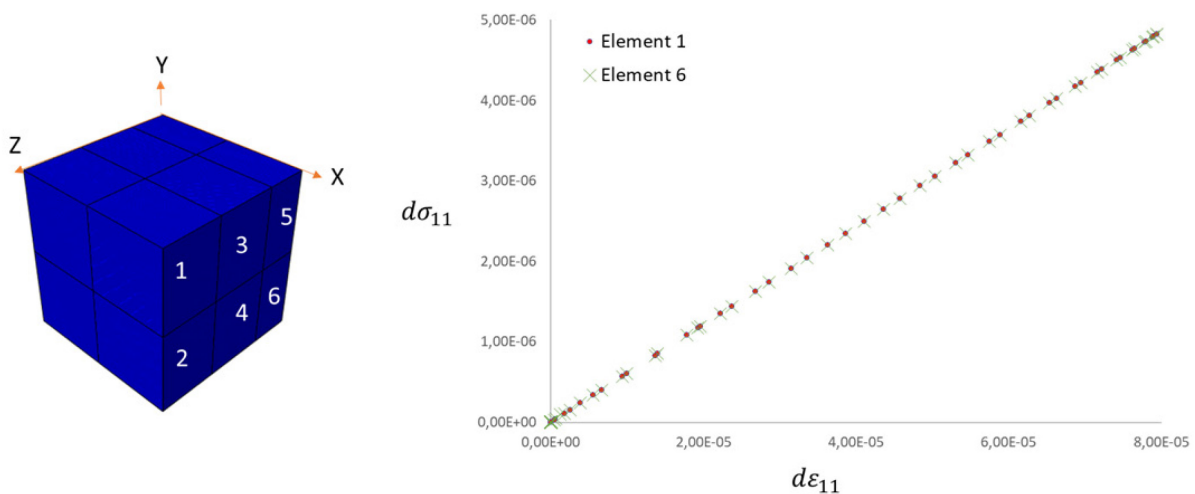


Figure 92 : Variation de contrainte $d\sigma_{11}$ en fonction de la variation de déformation $d\epsilon_{11}$ pour deux éléments avec des sections de tailles différentes

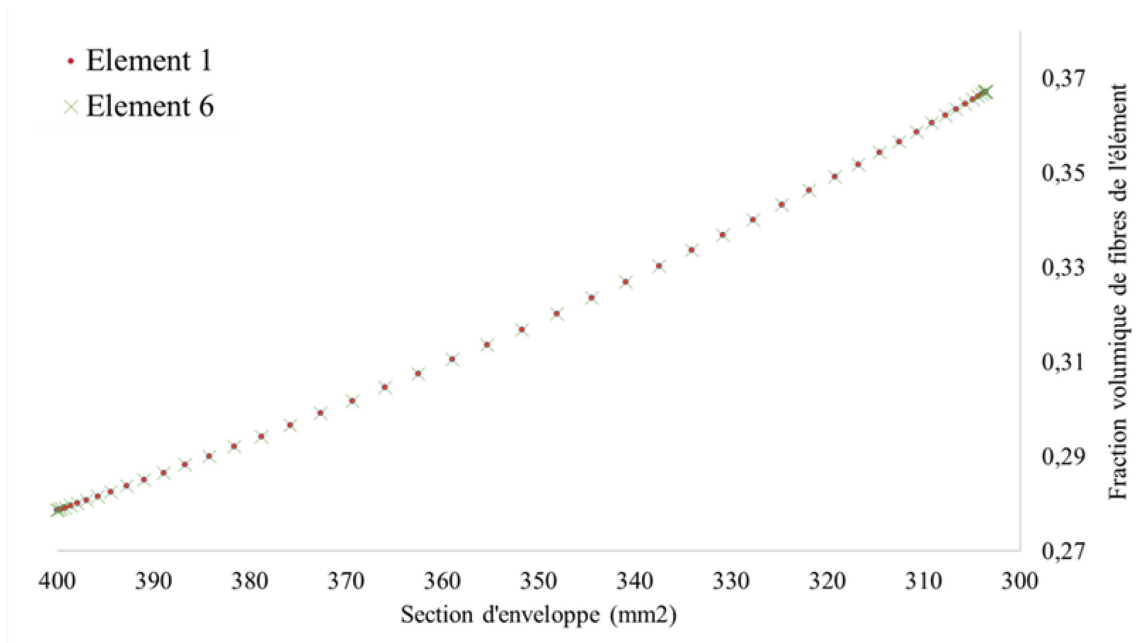


Figure 93 : Evolution de la fraction volumique de fibres de deux éléments avec une section de taille différente situés dans la même section d'enveloppe

Les éléments possèdent donc des propriétés équivalentes tout au long du calcul. Il faut désormais vérifier que les propriétés en traction des éléments correspondent à la rigidité du modèle attendue. Ainsi, la pente correspondant à la rigidité K entre l'effort et la déformation du modèle est recalculée à partir de la somme des réactions sur les nœuds et du déplacement global dans la direction X (Figure 94 A). De plus, la rigidité incrémentale $\frac{dF_{11}}{d\varepsilon_{11}}$ recalculée à partir de la taille de la section des éléments (Équation 19) montre là aussi que la rigidité globale du modèle est fidèle au paramètre de consigne (Figure 94 B).

$$\frac{dF_{11}}{d\varepsilon_{11}} = \frac{\sum_{i=1}^6 d\sigma_{11}(i) * S_{el}(i)}{d\varepsilon_{11}} \quad \text{Équation 19}$$

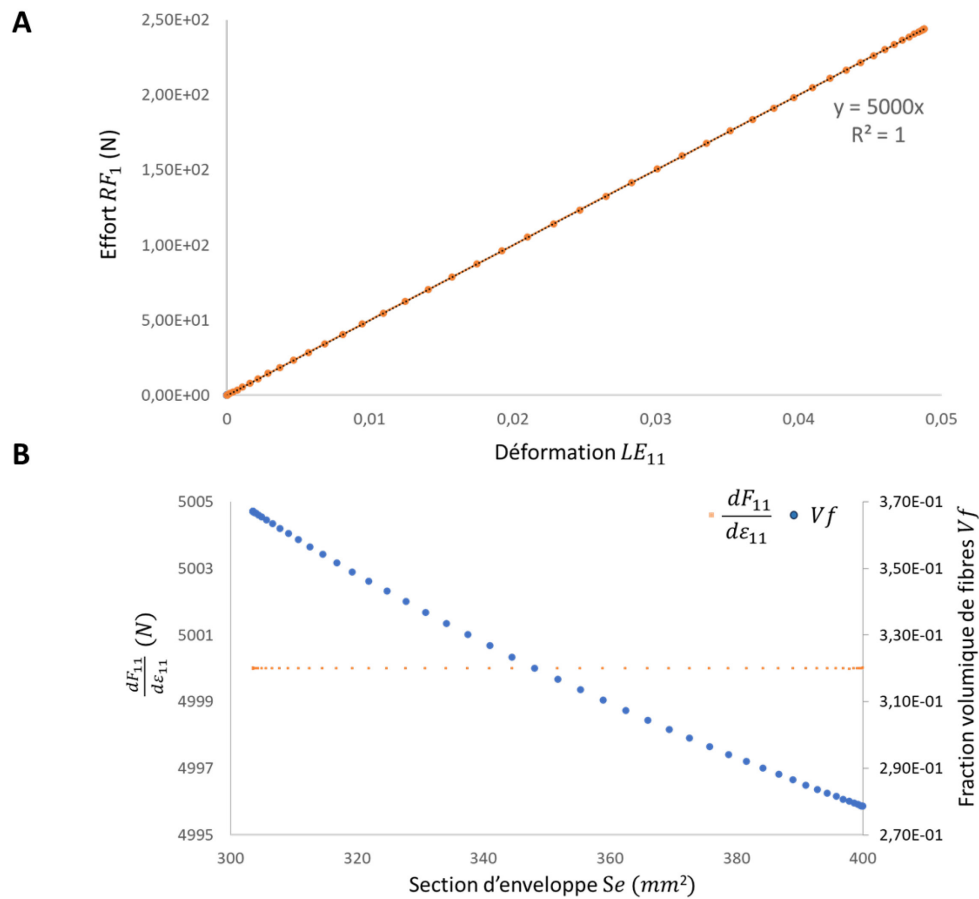


Figure 94 : Evolution de la rigidité du modèle lors du calcul

La Figure 94 (A) montre que la rigidité K globale du modèle est bien celle attendue avec la pente reliant l'effort et la déformation dans la direction 1 dont la valeur est de 5000N. De plus, la Figure 94 B montre que l'évolution de la rigidité des sections du modèle évoluent avec une rigidité là encore de 5000N ce qui signifie que le résultat global en rigidité n'est pas dû à un effet de moyennage et ce même lors de la phase de compression du roving impliquant une modification de la section d'enveloppe.

3. Conclusion sur l'utilisation de l'outil V2

L'utilisation de modèle à section non constante en simulation, afin de déterminer l'impact de la variabilité géométrique des rovings de lin, nécessite de mettre en place un outil spécifique. Cet outil doit pouvoir assurer la bonne attribution du comportement matériau de chacun des éléments à la fois à l'initialisation et pour toutes les étapes du calcul. Cela signifie mettre en place une stratégie permettant d'être capable d'identifier l'appartenance d'un élément à une section d'enveloppe du modèle et de connaître la déformation de cette section d'enveloppe pour homogénéiser les propriétés qui nécessitent de l'être.

Après vérification de la capacité de l'outil à réaliser correctement l'attribution du comportement de chaque élément, l'outil a été adapté pour permettre à la fois de prendre en charge une simulation avec un modèle de roving unique, mais aussi pour une multitude de modèles et donc la réalisation d'essais numériques sur VER. Il est donc désormais possible d'utiliser cet outil pour étudier l'impact de la variabilité géométrique des rovings de lin sur leurs comportements.

II. Validation du comportement en simulation sur roving

A. Simulation du comportement en traction sur roving de lin

Afin de vérifier que le modèle permet de reproduire le comportement en traction des rovings de lin, un échantillon a été scanné au microscope avant d'être testé expérimentalement. On note ici qu'un changement de titrage est survenu après ce test qui porte sur une géométrie et un roving de 500tex au lieu de 520tex. La méthode reste néanmoins la même et permet de conclure sur la faisabilité de l'essai.

Deux modèles ont donc été testés en simulation :

- Un modèle variable, nommé ROV500v (Figure 95 A) issu de la reconstruction par microscopie numérique
- Un modèle moyen, nommé ROV500c (Figure 95 B) avec section constante dont la largeur et l'épaisseur correspondent aux valeurs moyennes relevées sur l'échantillon.

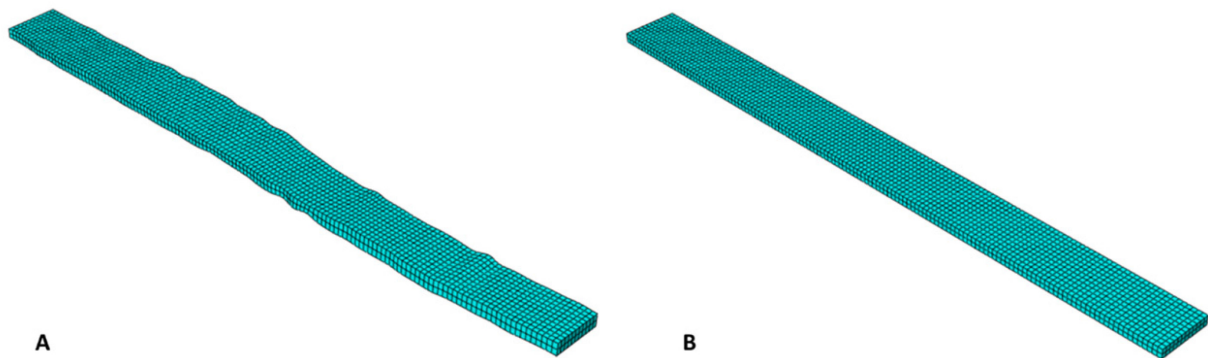


Figure 95 : Modèles testés en traction : A ROV500v, B ROV500c

On rappelle, d'après les hypothèses précédentes que le comportement de ces deux modèles sont identiques en traction.

1. Conditions de simulations

Les deux modèles sont maillés avec 2 éléments dans l'épaisseur et d'une taille d'environ 0.25mm. Chacun des deux modèles est testé en simulation avec Vumat V2. Au vu des résultats de la simulation précédente (C.2) il est attendu que la simulation réalisée avec le modèle ROV500c permette de reproduire l'exacte rigidité de consigne. Aussi cette simulation permet de voir si l'incorporation des nombreux paramètres nécessaires au calcul (Points d'intégrations et Sections de tous les éléments) ou si l'introduction de la variabilité géométrique induisent une augmentation significative du temps de calcul.

L'essai de traction expérimental donne une rigidité $K = 4957 \text{ N}$. Les paramètres de la loi de comportement nécessaires aux simulations sont la valeur de rigidité K , le module de cisaillement dans les directions 1 et 2 MCis12 et la taille de la ou des sections suivant la Vumat utilisées. En effet, par la construction de la loi de comportement, qui découple la traction des autres sollicitations, les autres paramètres n'interviennent pas durant le calcul. Les conditions au bord des modèles sont identiques à celles utilisées pour la validation de l'outil.

L'amplitude de traction est de type smooth. Un mass scaling est appliqué pour diminuer le temps de calcul.

2. Résultats

L'un des enjeux des simulations réalisées et de pouvoir suivre les éléments en cours de calcul pour attribuer le comportement des éléments en fonction des dimensions de la section dans laquelle ils se trouvent. On constate que les éléments (Figure 96 A) sont tous détectés (le maillage est de type « ligne » Figure 89) et les numéros des sections d'enveloppe (Figure 96 B) sont bien identifiés. Ce qui permet ainsi de recalculer les dimensions des sections d'enveloppes en cours de calcul (Figure 97).

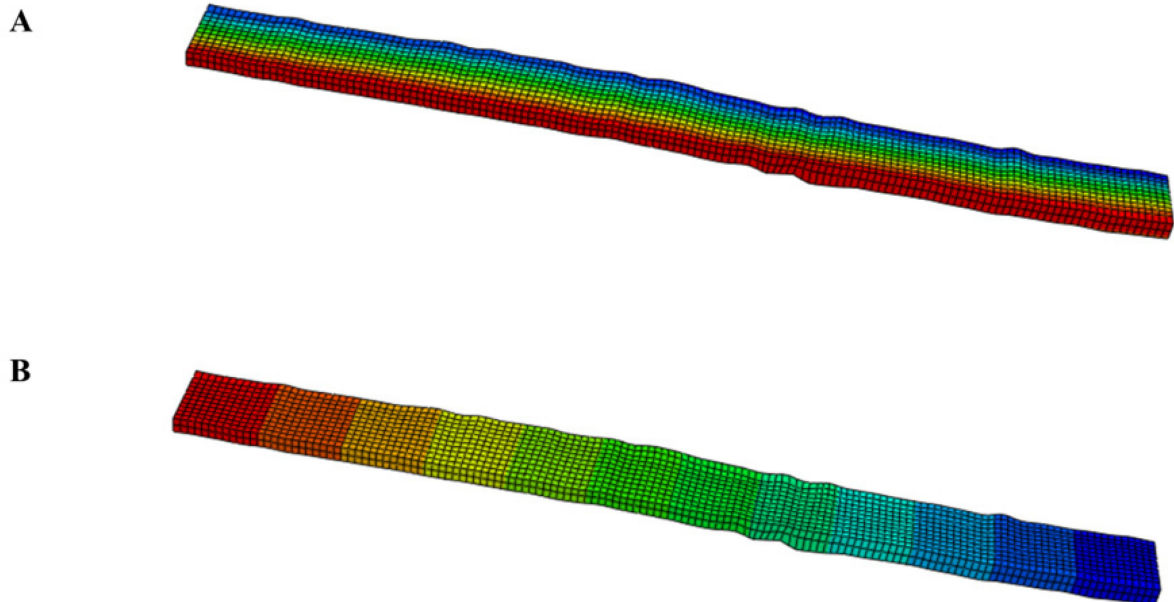


Figure 96 : Suivi des éléments (A) et des sections (B) au cours du calcul (ici à 1% de déformation de la mèche dans la direction 1)

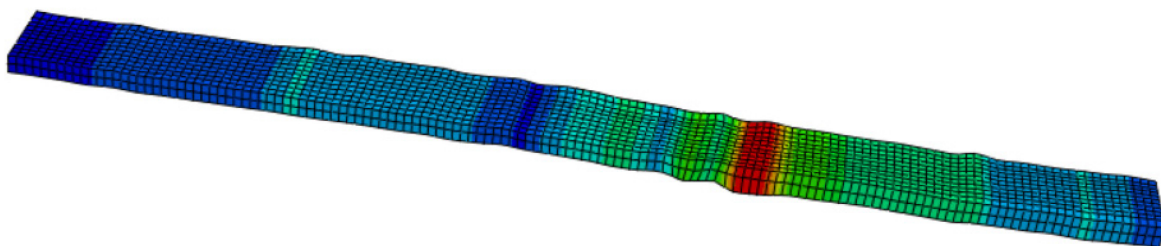


Figure 97 : Recalcul des dimensions des sections d'enveloppe en cours de calcul

Afin d'obtenir le comportement en traction du modèle ROV500v il est nécessaire de recalculer la déformation moyenne. En effet, la déformation indiquée par Abaqus® concerne la déformation de l'élément. Ainsi, à partir du déplacement (imposé) des nœuds il est possible de recalculer la déformation moyenne LE_{11} de la mèche (Équation 20).

$$LE_{11} = \ln \left(1 + \frac{U_1}{L_0} \right) \quad \text{Équation 20}$$

Avec :

- L_0 : Longueur initiale de la mèche (mm)
- U_1 : Le déplacement imposé dans la direction 1 aux nœuds (identiques pour tous les nœuds sur lequel il est appliqué) (mm)

L'effort appliqué sur la mèche est recalculé à partir de la somme des efforts de réactions sur les mêmes nœuds. A ce stade, on note que les résultats obtenus au Chapitre III n'ont pas encore pu être totalement intégrés dans le code de calcul. Ainsi, la déformation transverse n'a pas été implémenté pour ce calcul et est donc nulle.

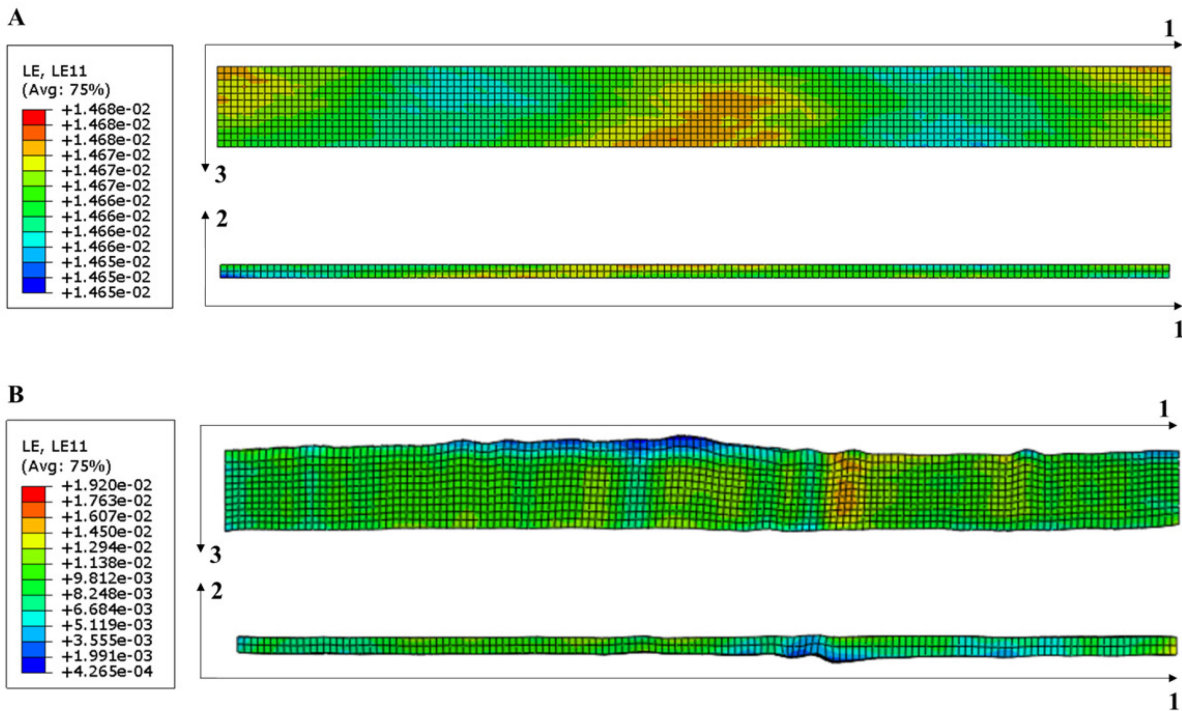


Figure 98 : Visualisation de la déformée obtenue pour le modèle ROV500c (A) et ROV500v (B)

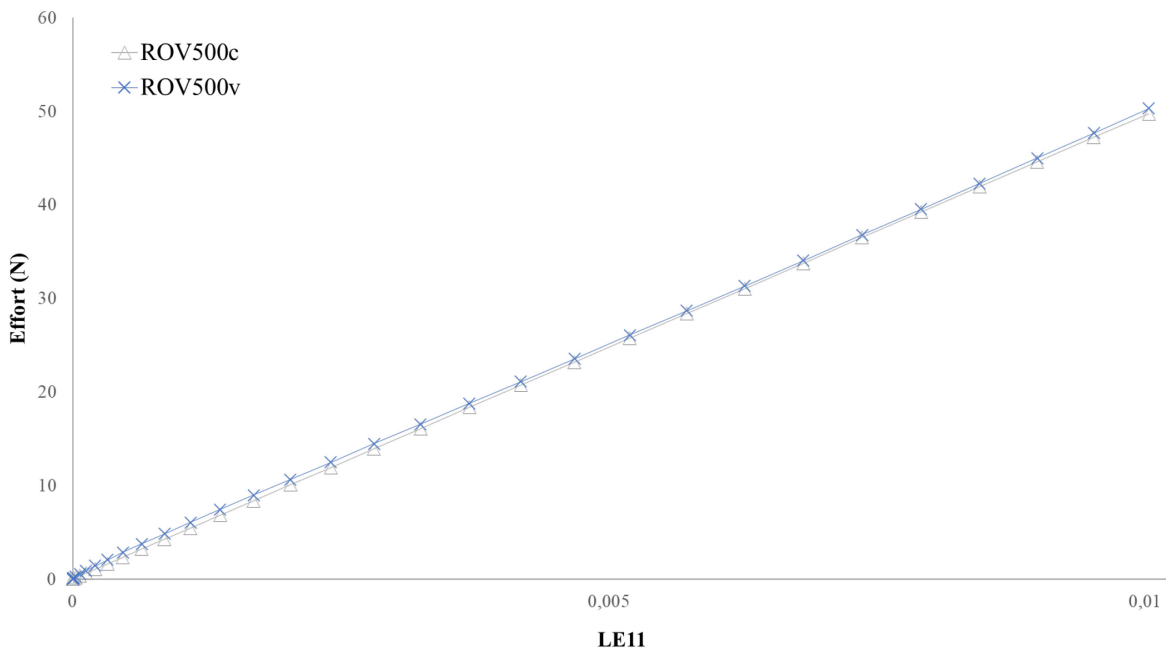


Figure 99 : Comportement en traction des modèles

Après calcul, la rigidité globale de la mèche pour le modèle ROV500c est de 4957N soit la consigne initiale. Ce résultat était attendu au vu de la vérification effectuée pour l'utilisation de la Vumat V2. Concernant le modèle ROV500v le calcul rend compte d'une rigidité de la mèche de 5018N soit 1.2% de plus que la consigne.

Même si le comportement moyen du modèle ROV500v est bien celui attendu, on remarque Figure 98 B que la déformation des éléments n'est pas identique. En effet, on remarque sur le modèle une ondulation dans le plan 13. Cela amène à solliciter les éléments dans des directions de cisaillement des éléments pour lequel le comportement n'est pas prévu. Ainsi, les éléments sollicités le plus fortement dans des directions éloignées de la direction 1 se comportent de manière non prévue.

Ce point devra être étudié en menant notamment des essais de flexions sur les mèches pour caractériser le comportement et les coefficients en cisaillements. Néanmoins, les résultats obtenus sur le comportement global des mèches est très positif. De plus, les problèmes rencontrés n'impactent pas la simulation sur renfort pour lesquelles il n'y a pas de variation brutale de l'orientation des éléments.

B. Simulation du comportement en compression sur roving de lin

Contrairement au comportement en traction, le comportement en compression est dépendant de la géométrie de la mèche à la fois par sa forme et par la taille des sections qui sont des indicateurs de l'enchevêtrement du réseau (Figure 85). Nous avons vu, à travers les essais expérimentaux (Chapitre III) qu'il est possible d'identifier des paramètres suivant la loi de Toll pour décrire le comportement en compression de la mèche. De plus, les essais effectués sous microscope numérique montrent que le comportement local des sections et le comportement global moyen de la mèche en compression ne sont pas identiques. Il faut donc s'assurer d'une part d'être capable de reproduire correctement un comportement imposé à partir des paramètres de Toll et de mettre en place une stratégie efficace permettant d'identifier le comportement d'un échantillon à géométrie variable.

A partir d'un essai de compression, un jeu de paramètres de Toll a été identifié sur un roving de 500tex. Ce jeu a été utilisé avec le modèle ROV500c et testé en simulation dans les mêmes conditions de compression que la simulation de validation de la Vumat (I.C.2) mais avec des conditions de blocage symétriques (Figure 100). On remarque que la simulation suit parfaitement la compression de la mèche (Figure 101).

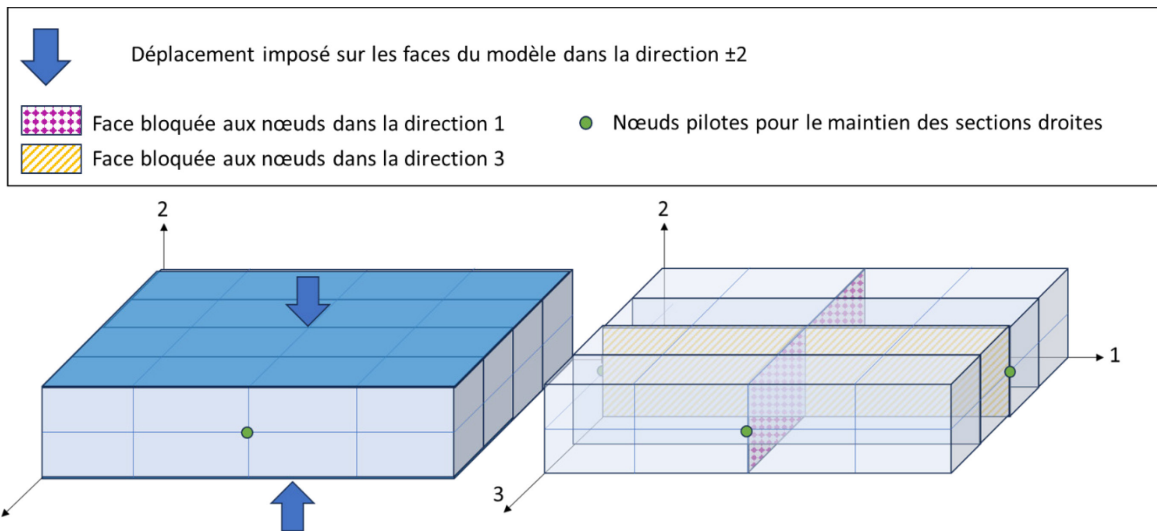


Figure 100 : Conditions de simulation appliquée au modèle ROV500c

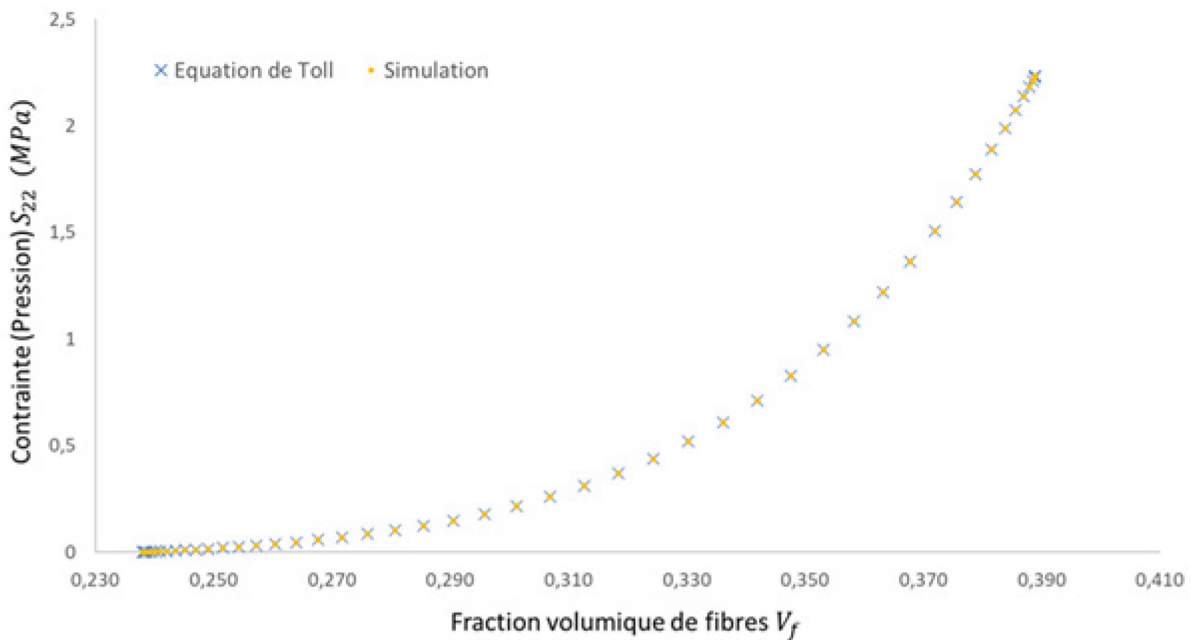


Figure 101 : Comportement en compression du modèle ROV500c

La variabilité des sections et la compression différenciée induite ne permet pas d'identifier le comportement de la mèche par l'utilisation de grandeurs de pression et de fraction volumique de fibres apparente à injecter directement dans la simulation. Pour le montrer, un essai de compression avec le modèle ROV500v a été conduit avec les paramètres de Toll précédents (Figure 102). La compression est imposée par le déplacement entre deux plaques analytiques rigides dont l'espacement initial est de 0.8mm.

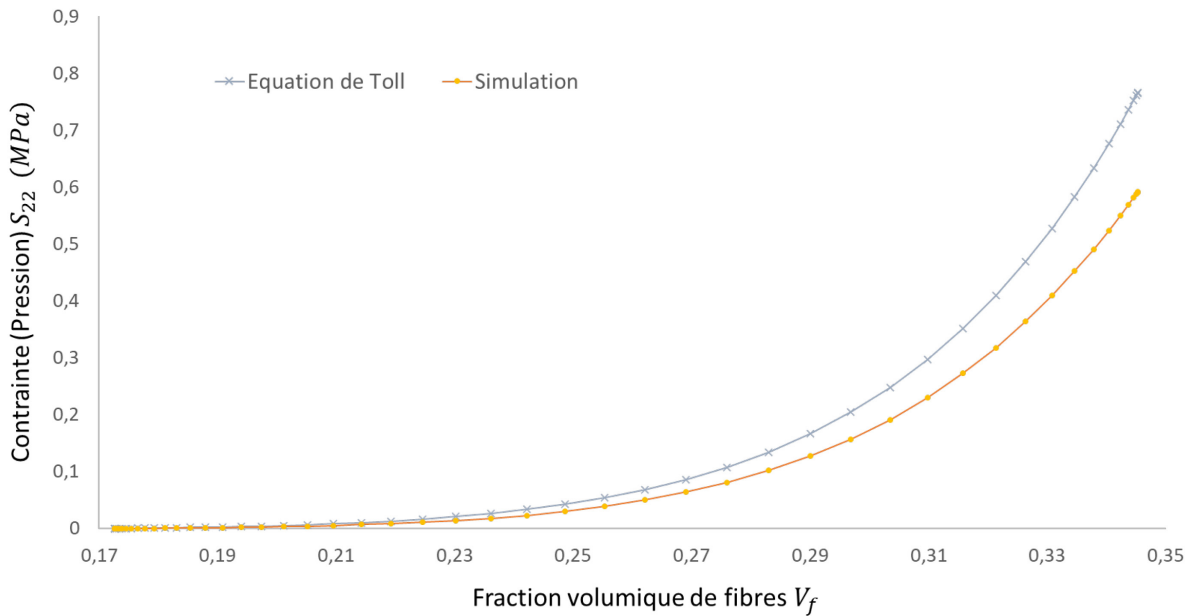


Figure 102 : Comportement en compression attendu et comportement apparent de la mèche obtenu en simulation avec le modèle ROV500v

On remarque assez rapidement une divergence entre le comportement en compression attendu et le comportement apparent moyen de la mèche. Il est donc nécessaire de réaliser une identification inverse du comportement de la mèche en compression. Les calculs étant assez longs au vu du nombre d'éléments, il a été nécessaire d'optimiser les temps de calcul en ajustant les paramètres du schéma explicite (vitesse, mass scaling). Un damping de 10000 est également ajouté pour stabiliser le calcul ; les énergies ont été vérifiées pour chaque calcul. Pour réaliser l'identification inverse du comportement de la mèche, les échantillons exploités avec l'essai de compaction sous microscope doivent être reconstruits suivant la méthode explicité au Chapitre II. Ces simulations n'ont malheureusement pas pu être effectuées dans le temps imparti de la thèse.

III. Conclusion du Chapitre IV

Le comportement des rovings est dirigé par le nombre et l'agencement des fibres au sein de la mèche et, d'autant plus dans le cas des rovings de lin étudié ici, dépendant de la surface de la section enveloppe du modèle. Afin d'intégrer cette particularité à la loi de comportement, il est nécessaire de maîtriser le fonctionnement et les spécificités des outils permettant le calcul comme pour la Vumat Abaqus®. En effet, la prise en compte des sections du modèle à l'initialisation et en cours de calcul est fondamentale et a donc été implémenté. L'ensemble de la chaîne de calculs a alors été testée et a permis de montrer que le comportement du roving en traction n'est pas modifié par le changement de

section et la variabilité géométrique de la mèche, ce qui reste cohérent avec les hypothèses et résultats d'essais. Le comportement en compression sur un modèle moyen constant est bien suivi mais l'identification du comportement de la mèche nécessite de réaliser des simulations par identification inverse, qui n'ont malheureusement pas pu être faites dans le temps imparti.

Chapitre V : Résultats et validations de la simulation sur renfort

L'objectif de l'étude est de mettre en place tous les éléments nécessaires à la simulation numérique du comportement d'un renfort sous sollicitations simples à l'échelle mésoscopique. Le comportement mécanique et la géométrie des mèches (rovings) ont été étudiés dans les chapitres II et III. Une simulation numérique du renfort peut donc être envisagée avec les données obtenues. Afin de valider les résultats de simulation numérique sur le renfort, une acquisition d'un essai de compression en tomographie à rayons X a été réalisée. Cet essai permet à la fois d'acquérir des données permettant une reconstruction fiable de l'échantillon réel et de comparer le comportement obtenu en compression.

I. Acquisition/Exploitation d'un essai sur renfort en tomographie à rayons X

Un essai de compression d'un renfort de sergé 2X2 est réalisé grâce au tomographe à rayons X disponible au laboratoire. L'échantillon d'une taille de $3 \times 3 \text{ cm}^2$ représente environ 4 VER (Figure 103). L'échantillon est placé entre 2 plaques de PMMA fixées à un dispositif de compression (DEBEN), équipé d'un capteur 5kN. La compression de l'échantillon est réalisée par le déplacement du plateau inférieur, l'acquisition est réalisée après l'atteinte d'un effort prédéfini et le blocage du plateau. Dix acquisitions sont réalisées entre 15N et 4.5kN avec un voxel d'environ $14 \mu\text{m}$. Chaque acquisition est d'une durée d'environ 1h30. La température de l'enceinte n'est pas régulée et avoisine la température ambiante autour de 25°C .

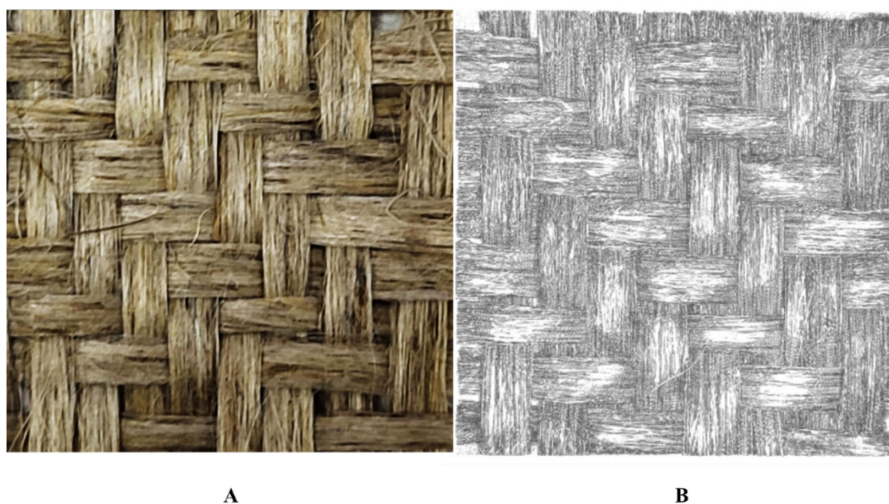


Figure 103 : Echantillon de sergé 2x2 testé en compression : (A) Photo de l'échantillon après essai, (B) Reconstruction de l'échantillon sous ImageJ à partir des coupes réalisées en tomographie à rayons X à l'état initial

A. Résultats en compression

Le découpage de l'échantillon a pour effet de faciliter à la fois le mouvement des mèches en cisaillement et le glissement des mèches les plus à l'extérieures. C'est pourquoi l'étude des résultats se concentre sur un VER délimité au centre de l'échantillon (Figure 104 A).

Comme pour l'essai en compaction sous microscope, il est possible de déterminé la Fraction Volumique de Fibres apparente et réelle (Vf_{app} , Vf_r) des mèches en compression au sein du renfort (Chapitre III, III.B.2 page 116 ; Équation 10 et Équation 11).

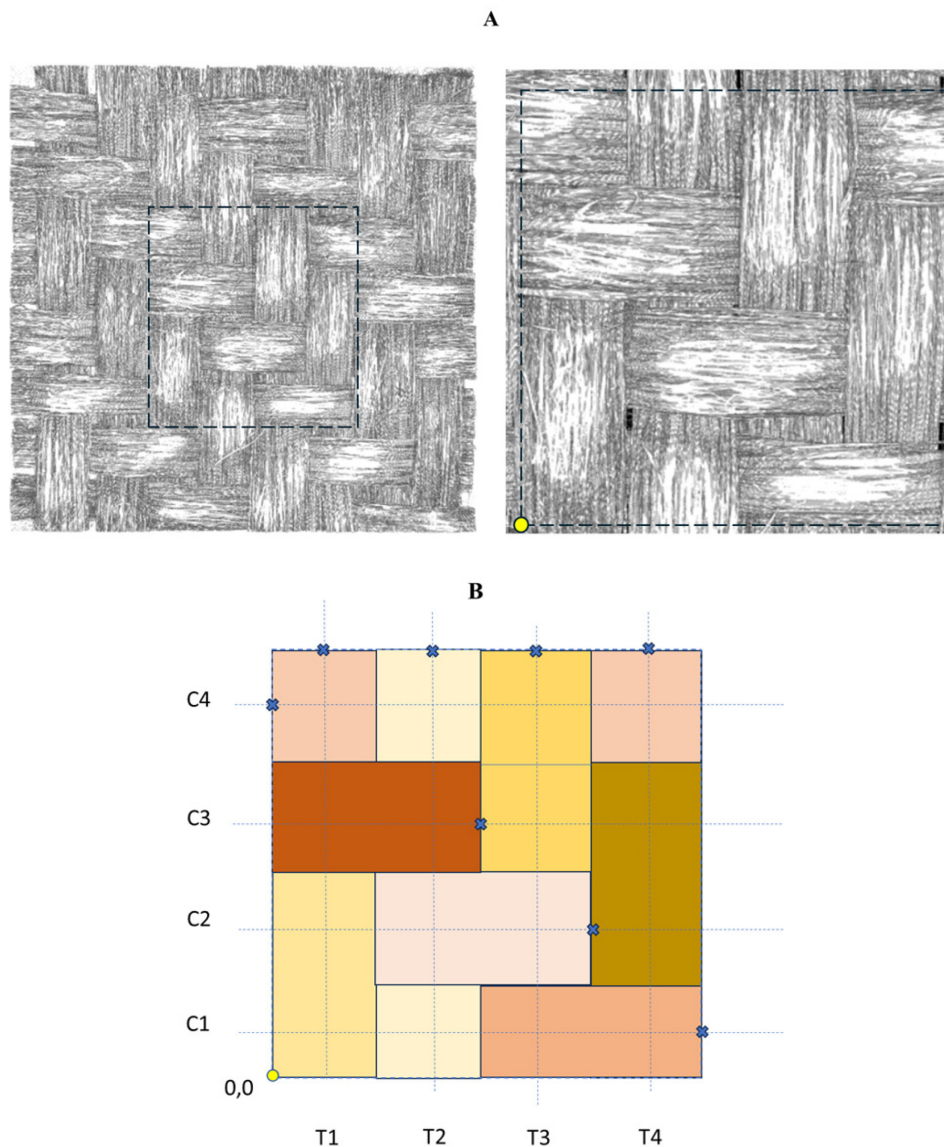


Figure 104 : Echantillon de sergé 2X2 testé : (A) Zone d'exploitation de l'échantillon de sergé acquis par tomographie à rayons X ; (B) Méthode d'exploitation manuelle des résultats

La Figure 104 A, met en évidence la variabilité de largeur des mèches et la différence d'écartement entre les mèches par rapport au modèle idéalisé.

Les fibres de lin absorbent peu le rayonnement et il n'a pas été possible de mettre en place, dans le temps imparti, une méthode de détermination automatique du contour des mèches au sein du renfort. Ainsi, les coupes issues des acquisitions ont été exploitées manuellement au centre et aux zones de transitions pour toutes les mèches du VER (Figure 104 B).

L'exploitation des résultats consistent pour chaque acquisition à :

- Détourer les sections réelles de chacune des mèches manuellement (Figure 105) et par recalage d'une section elliptique. Cela permet d'avoir la section réelle et son centre ainsi qu'une estimation de la largeur et de l'épaisseur des mèches en accord avec les observations sur la forme des mèches dans le renfort.
- Déterminer l'épaisseur et le volume du renfort entre les plateaux

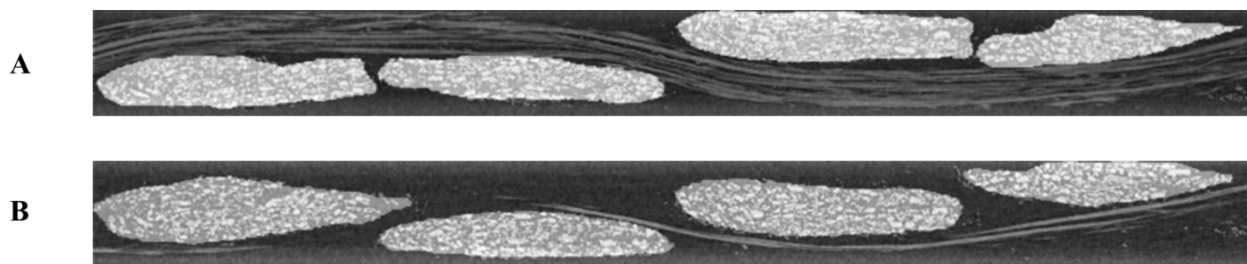


Figure 105 : Détourage manuel des sections des mèches (en surbrillance) dans le VER au centre (A) et dans les zones de transitions (B) du motif. La coupe A provient du centre de C3 et la coupe B de la zone de transition C2-C3 (Figure 104)

On remarque sur les coupes de la Figure 105 la variation de sections au sein des mèches. Ainsi, la section des mèches retenues pour l'étude représente la moyenne des résultats obtenus pour chaque mèche (Figure 106).

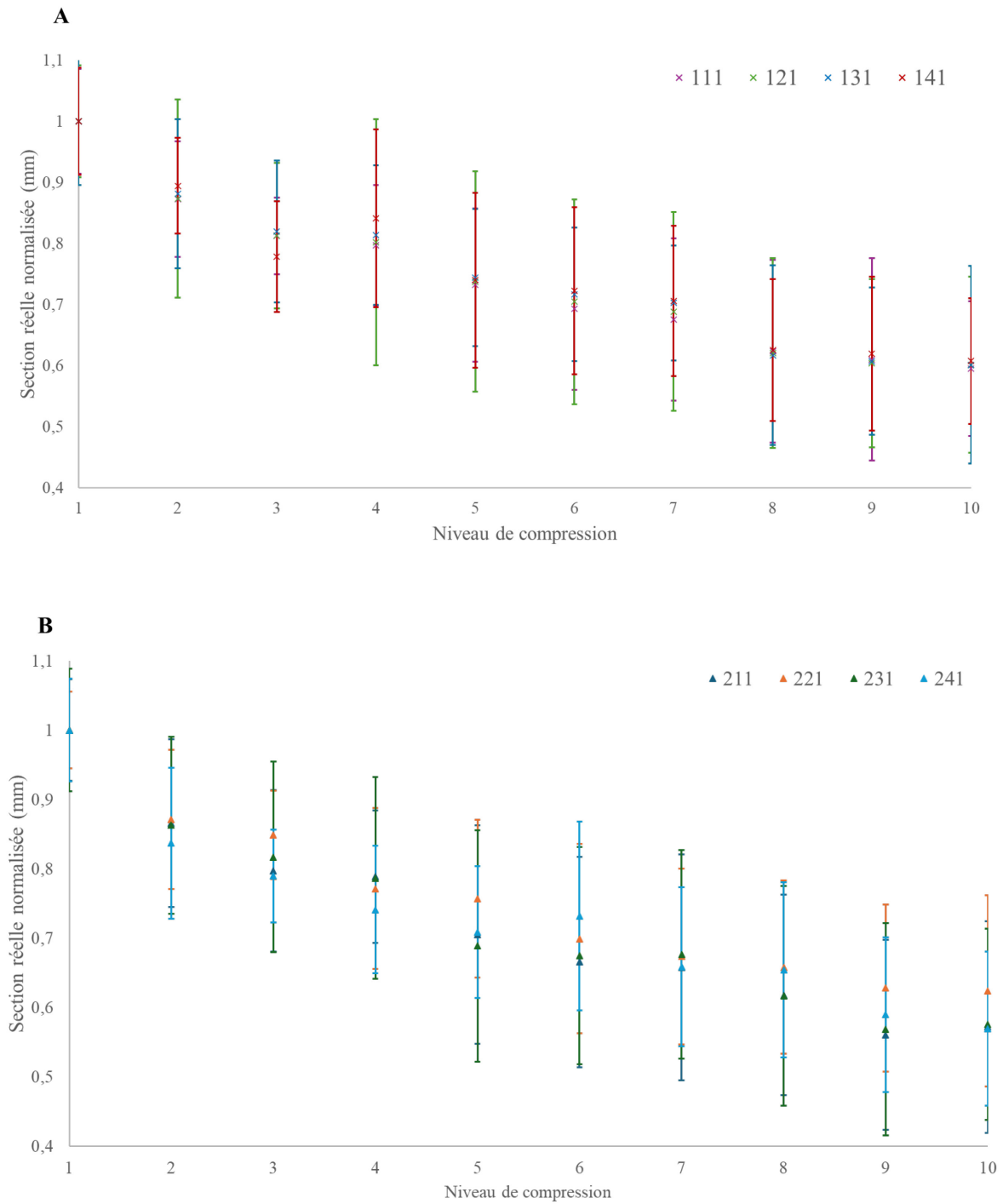


Figure 106 : Visualisation de la section réelle moyenne normalisée par la section initiale de la mèche et de l'écart type associé de chaque mèche pour chaque acquisition de l'essai dans la direction trame (A) et la direction chaîne (B)

On remarque sur la Figure 106 une augmentation de la variation de sections des mèches au sein du renfort. Cela peut provenir d'une différence de mise en compression locale des mèches avec une répartition non-homogène de la pression appliquée sur le renfort mais cela peut aussi provenir de la difficulté à détourner manuellement les mèches (Figure 107). Cette difficulté provient à la fois des

mèches en contact dont le contour devient alors difficile à déterminer mais aussi, dans le cas de l'étude, en fin d'essai car un fort taux de compression a été appliqué et la distinction air-fibres est parasitée par la précision du voxel. On remarque de plus, même si des mesures complémentaires seraient nécessaires pour s'en assurer dans le cas général, que les sections de la direction trame sont et restent plus importantes que celles de la direction chaîne (à l'exception de T4) lors de la compression.

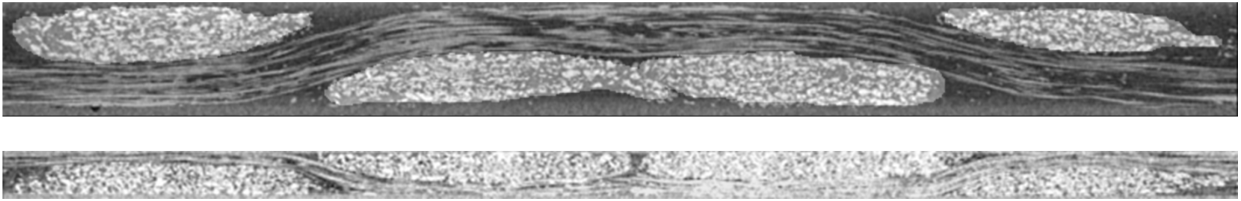


Figure 107 : Visualisation des sources d'incertitudes sur les mesures manuelles

A partir des mesures de sections réelles et de l'hypothèse sur la constance du titre au sein des rovings (Chapitre II, III page 56), il est possible de calculer la Fraction Volumique de Fibres pour chacune des mèches en fonction de l'effort appliqué. De plus, la mesure de l'épaisseur du renfort (la distance entre les deux plateaux de compression) et le volume de fibres contenues au sein du renfort permettent de calculer la fraction Volumique de Fibres apparente du renfort (Équation 10). La comparaison des Fractions Volumiques de Fibres aux deux échelles (mèche, renfort) sont tracées en Figure 108.

$$Vf_{appR} = \frac{S_{fibres} * nbm * (L + l)}{L * l * h_p} \quad \text{Équation 21}$$

Avec :

- S_{fibres} : Section occupée par des fibres au sein du roving [mm²]
- nbm : Nombre de mèches par direction dans le VER (ici 4)
- L : Largeur du renfort (direction chaîne) [mm]
- l : Longueur du renfort (direction trame) [mm]
- h_p : Hauteur entre les plateaux de compressions [mm]

On note ici, que l'embuvage n'est pas pris en compte dans la longueur des mèches.

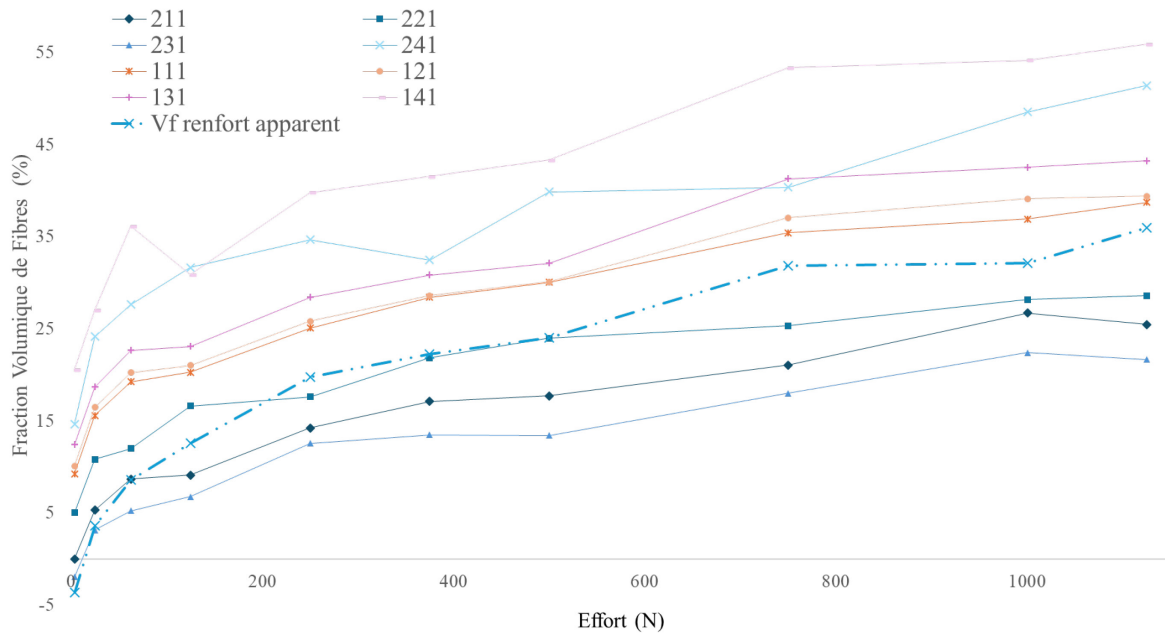


Figure 108 : Comparaison de la Fraction Volumique de Fibres apparente du VER et de celles de chacune des mèches par rapport à la fraction volumique de fibres initiale de la mèche 211

Les différences de sections au sein des mèches induisent des différences importantes de Fractions Volumiques de Fibres. Néanmoins on observe que la Fraction Volumique de Fibres apparente du renfort représente une moyenne des résultats obtenus. Le comportement en compression apparent du renfort peut être comparé aux résultats précédemment obtenus avec la machine de traction Zwick. Ces essais sont réalisés sur des échantillons de sergé de dimensions identiques au sergé testé en tomographie. Le protocole de compression est identique aux essais menés sur roving et décrits dans le Chapitre III. Bien que les efforts appliqués soient faibles pour les renforts testés avec la machine de traction et que le capteur de pression (capteur piézoélectrique Tekscan) ait pu induire une augmentation artificielle de la rigidité obtenue, les résultats semblent cohérents entre eux (Figure 109). En effet, aux faibles efforts le capteur de la DEBEN est peu précis, de plus les résultats obtenus en compaction/compression montrent une variabilité importante du comportement. L'écart observé n'est donc pas surprenant.

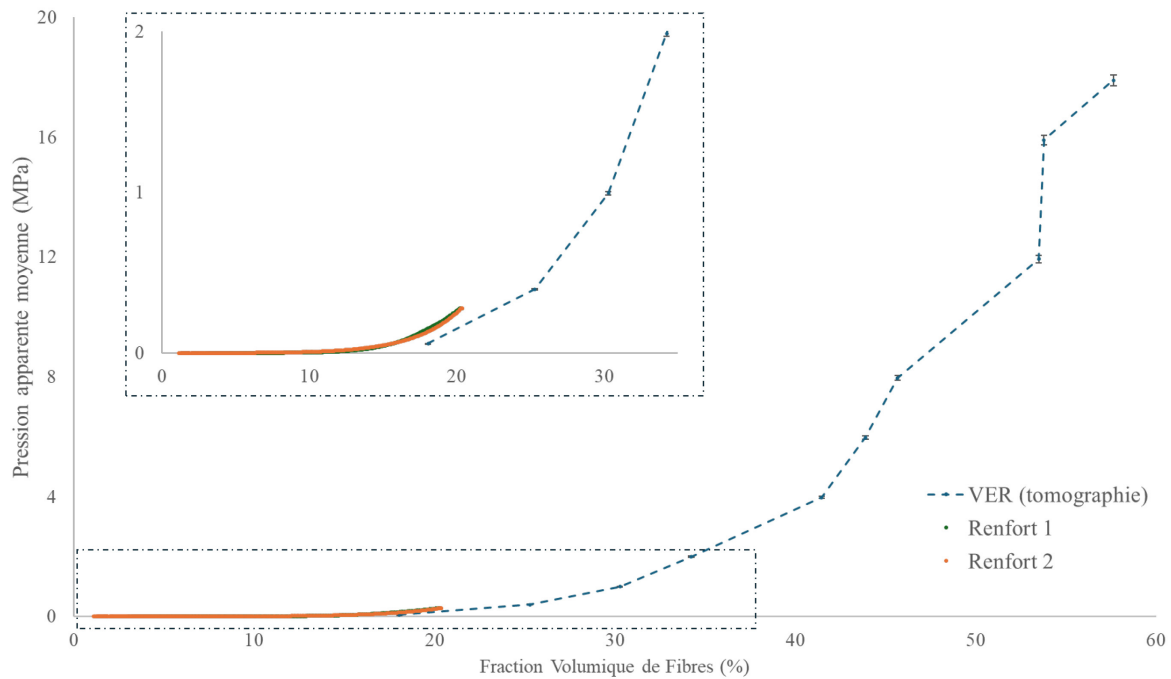


Figure 109 : Comparaison des résultats du comportement apparent en compression de renforts effectués en tomographie à rayons X et avec une machine de traction par rapport aux résultats de l'échantillon Renfort 1

Le comportement en compression du renfort a été étudié afin de valider le comportement des rovings implémenté en simulation numérique. Ainsi, il est nécessaire de reproduire la géométrie du VER ce qui fait l'objet du paragraphe suivant.

B. Reconstruction du modèle géométrique du VER de l'échantillon

A partir des observations réalisées sur le renfort en tomographie, la forme de la section des mèches peut être assimilée à une ellipse. A partir des sections détournées manuellement, un profil elliptique a été déterminé, là encore manuellement, pour chaque section ce qui a permis de déterminer une largeur, une épaisseur ainsi qu'un ratio de forme permettant d'introduire ces données dans l'outil GeoFab décrit en (Chapitre II, IV.B page 68) et permettant de réaliser deux modèles géométriques (Figure 110) :

- Un modèle variable [REv] qui prend en compte la différence de largeur et le décalage entre les mèches avec une épaisseur moyenne identique
- Un modèle moyenné [REm] avec une largeur, une épaisseur et un décalage identique entre les mèches

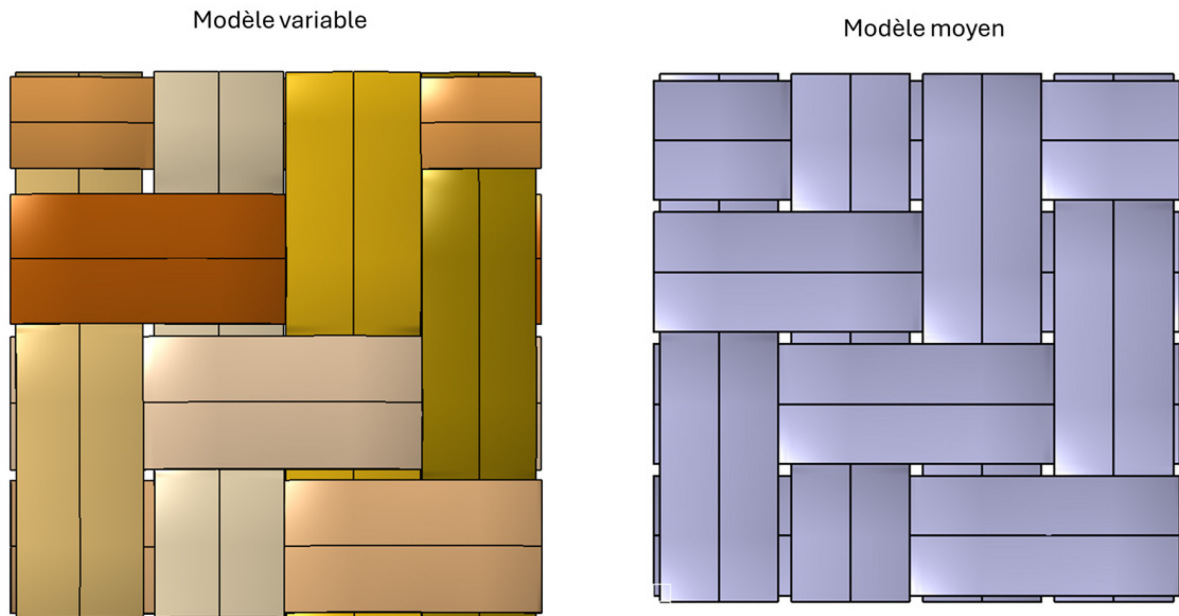
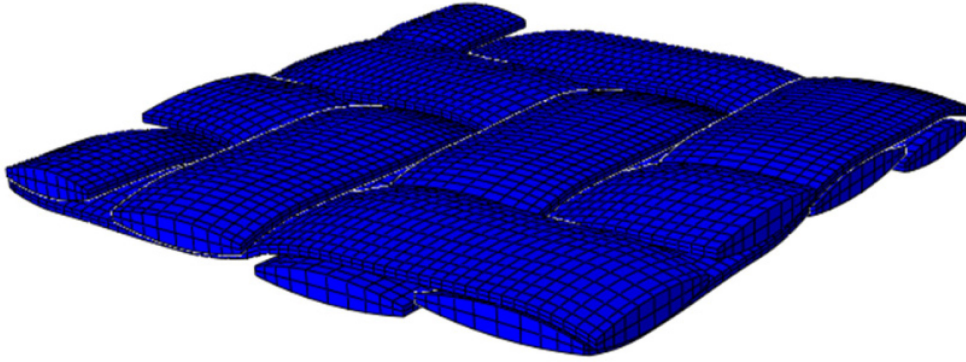


Figure 110 : Modèles géométriques moyen et variable réalisés à partir des données tomographiques.

Les données recueillies donnent une largeur moyenne de 2.6mm pour une épaisseur moyenne de 0.4mm. Les sections elliptiques moyennes présentent un écart entre 0.3 et 8.9% par rapport aux sections réelles moyennes (Figure 41). Comme indiqué dans le Chapitre II, en plus d'une vérification qualitative de la reproduction (Figure 41) des sections des rovings du renfort, il est possible de vérifier la cohérence du modèle par la mesure de l'embuvage. Là encore cette vérification a été effectuée dans le Chapitre II avec une mesure autour de 0.8% dans le cas réel et pour le modèle.

Un modèle fiable de la géométrie du renfort testé expérimentalement en compression a donc été reproduit. Une loi de comportement du roving a été déterminée précédemment avec un outil permettant de prendre en compte dans le calcul numérique les spécificités de ce comportement. Les modèles ont été maillés avec deux éléments dans l'épaisseur et dix dans la largeur. Il est donc possible de réaliser des simulations numériques sur le renfort.

A



B

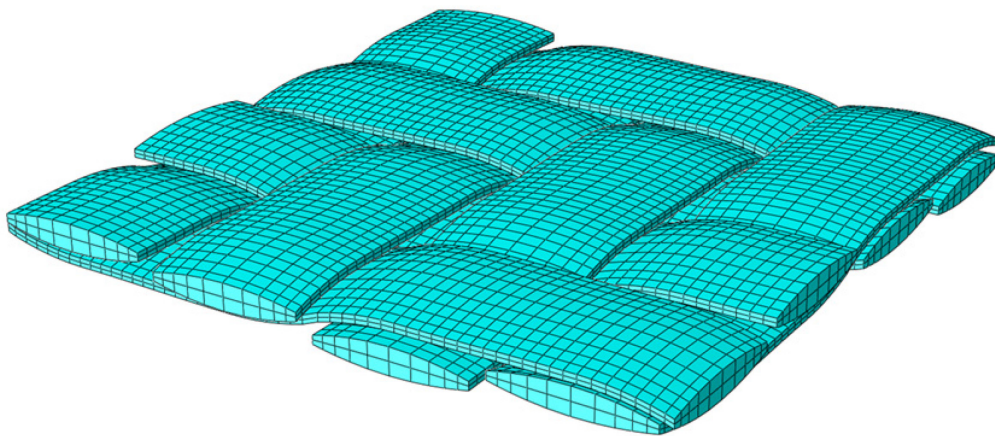


Figure 111 : Maillage des modèles géométriques : (A) Maillage du modèle variable Rev, (B) Maillage du modèle moyen Rem

Une fois le maillage réalisé, le calcul et l'importation des coordonnées des points d'intégrations de chaque élément de chaque mèche ainsi que leurs sections initiales est réalisé pour permettre le calcul avec la Vumat V2 (Chapitre IV, I.C page 142).

II. Simulation du comportement du renfort en compression

Afin de comparer les résultats de la compression réalisée en tomographie et la simulation numérique associée les modèle géométriques Rev et Rem sont testés en compression entre deux plans rigides. Le modèle moyen Rem doit permettre une comparaison de l'impact entre les résultats obtenus entre un modèle moyen et un modèle représentatif d'un échantillon réel. Une compression de 50% de l'épaisseur du renfort est appliquée par le déplacement opposé des plans rigides. Les coefficients de

frottements entre les mèches déterminés expérimentalement (Chapitre III, IV page 131) sont appliqués. Des conditions de périodicité sont appliquées aux extrémités des mèches. Le comportement implémenté en compression est piloté à partir des coefficients de Toll déterminés par essai de compaction sur l'échantillon RT (Chapitre III, IV page 131). Le comportement du renfort en simulation peut être comparé à l'essai expérimental en tomographie aussi bien concernant la fraction volumique de fibres apparente du renfort que la fraction volumique de fibres réelle de chaque mèche. En effet, la Vumat V2 nécessitant de recalculer la taille de chaque section transversale de chaque mèche afin d'attribuer le comportement des éléments (Chapitre IV, I.B page 135), la section moyenne des mèches en cours d'essai mais aussi localement peut être facilement récupérée. Il en est de même pour la fraction volumique de fibres (Figure 112).

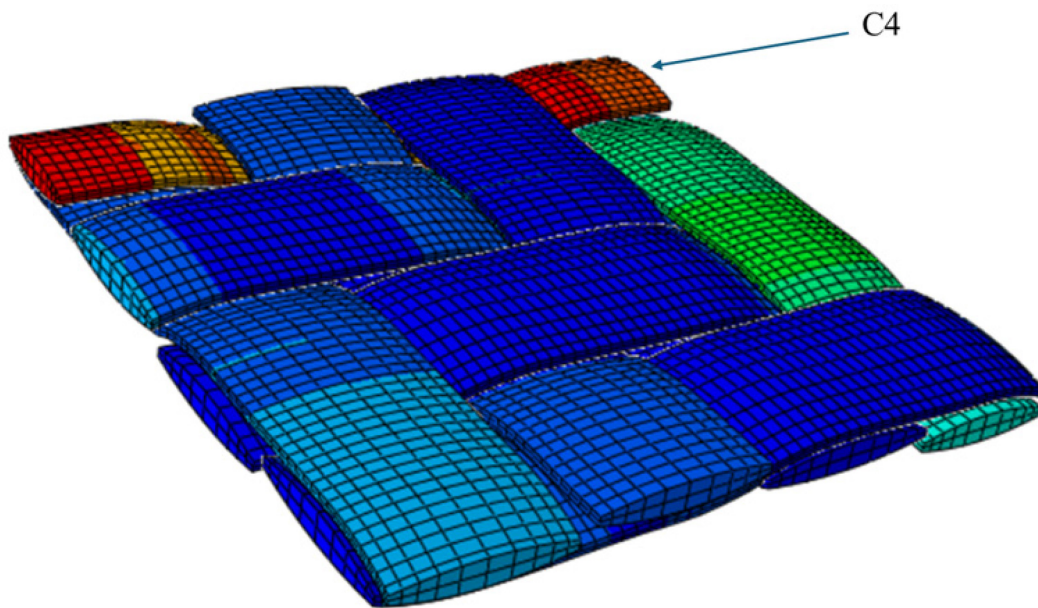


Figure 112 : Visualisation de la fraction volumique de fibres réelle de chaque mèche en simulation.

Dans la simulation réalisée, le comportement des mèches directions trames et chaines est identique. Néanmoins, l'accessibilité du numéro d'élément en cours de calcul et de son appartenance à une mèche spécifique permet de discriminer le comportement attribué dans chacune des directions et pour chaque mèche du renfort.

III. Résultats des simulations

A partir de l'évolution de la fraction volumique de fibres de chaque mèche en simulation, il est possible de comparer la cinématique de déformation des mèches entre l'essai expérimental et la simulation (Rev) qui possède la géométrie la plus proche de l'échantillon réel hormis sur l'épaisseur

de chaque mèche (Chapitre II V B 2 page 69). Les résultats présentés en Figure 113 montrent, après recalage de la fraction volumique initiale, que d'un point de vue cinématique, les résultats sont cohérents.

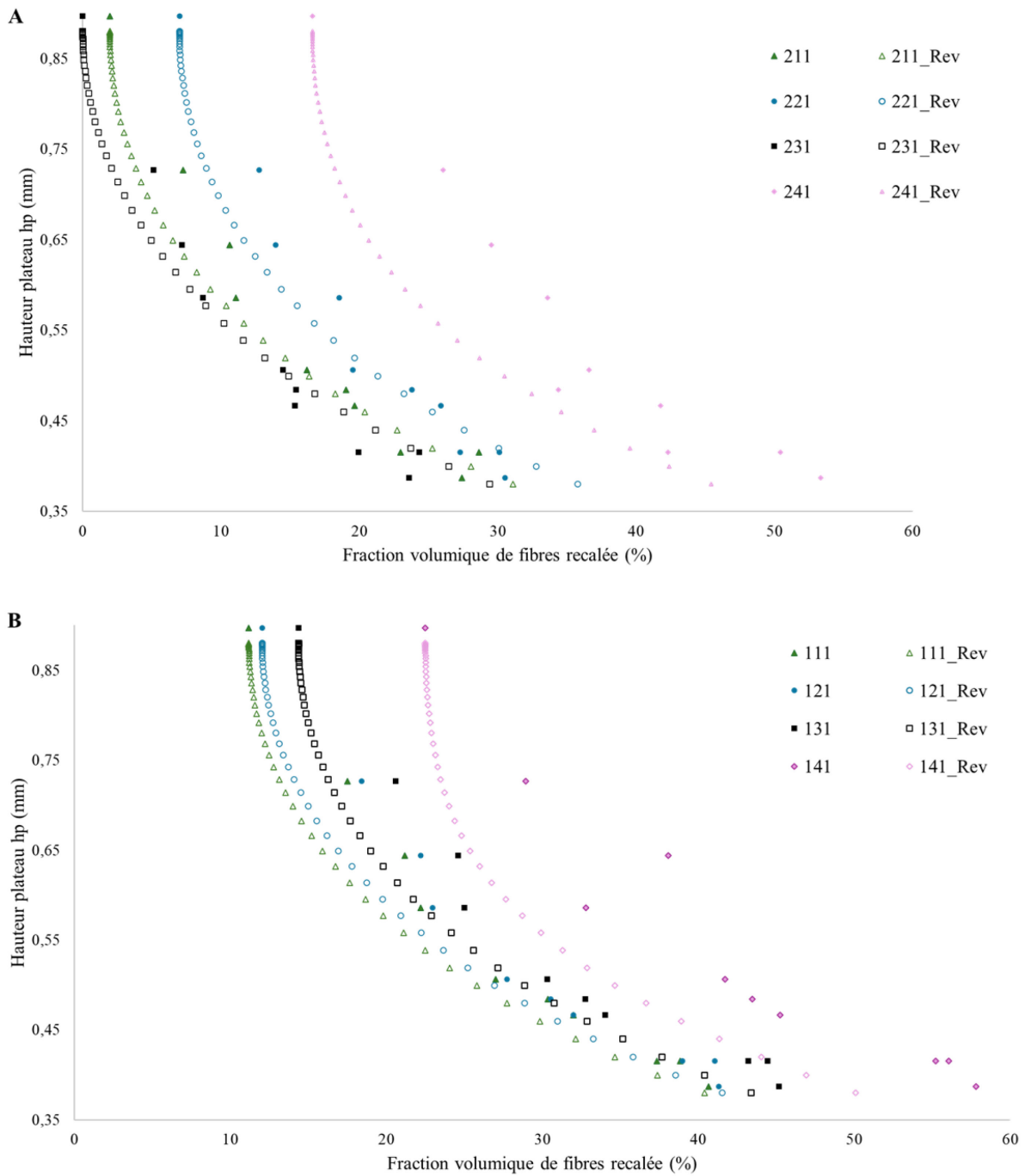


Figure 113 : Comparaison de l'évolution de la Fraction Volumique de Fibres des mèches du renfort réel et en simulation (Rev) : (A) dans la direction Chaîne ; (B) dans la direction Trame

De la même manière, la cinétique d'évolution de la fraction volumique de fibres du modèle Rem est semblable à celle du modèle Rev. Néanmoins, le comportement de la mèche étant piloté par à la fois l'évolution et la valeur de la fraction volumique initiale, le comportement des mèches et du renfort

diffère entre les deux simulations. On remarque de plus, que l'évolution la moins semblable entre les deux simulations correspond à la mèche (141) avec l'écart de fraction volumique initial le plus important entre les deux géométries (53% pour Rev et 41% pour Rem). Cette modification du comportement des mèches entraine une modification du comportement moyen du renfort et qui est visible (Figure 115). Cependant, les résultats obtenus sur le comportement moyen du renfort en simulation sont très encourageants avec un comportement proche de celui observé expérimentalement.

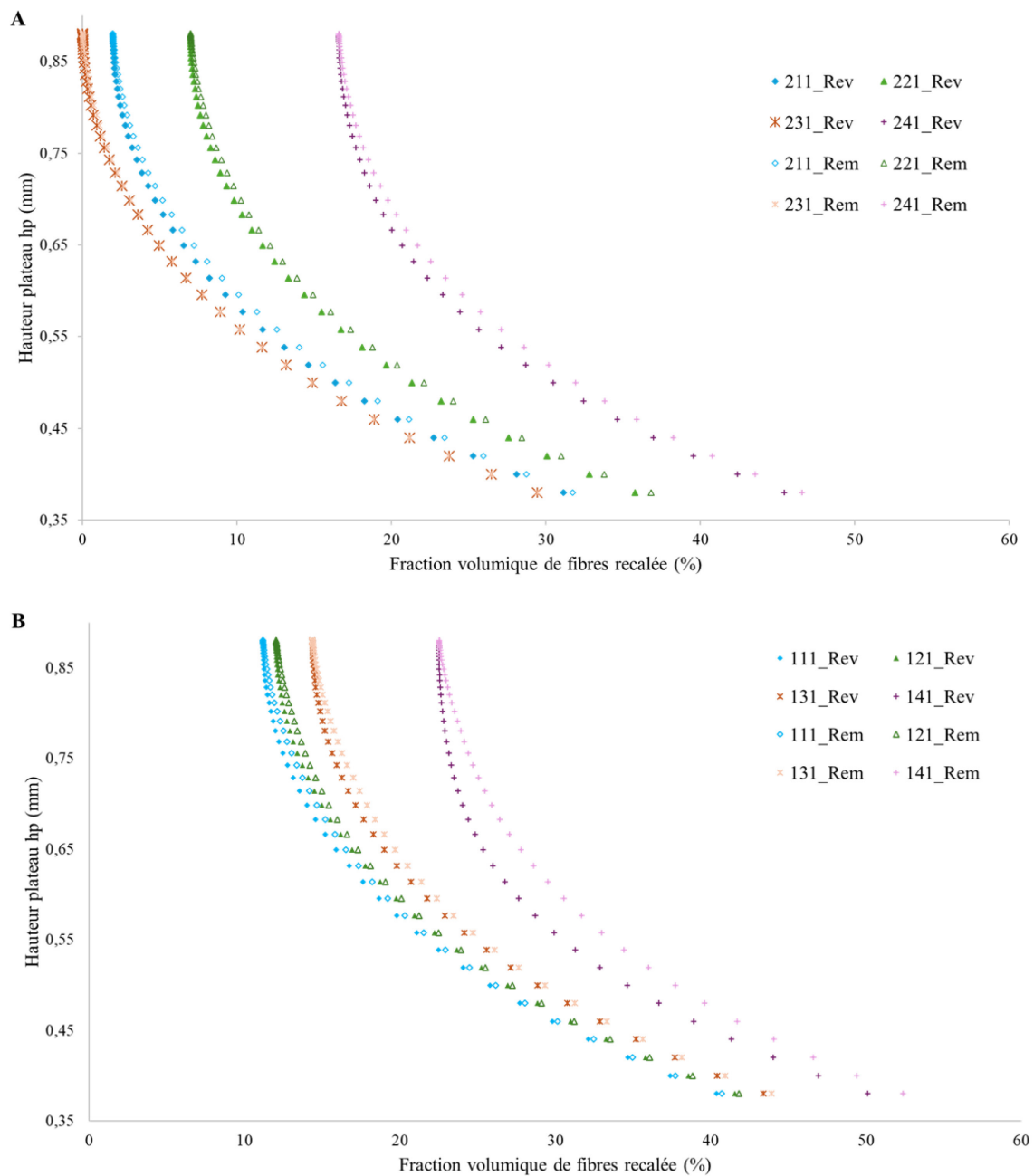


Figure 114 : Comparaison de l'évolution en simulation de la Fraction Volumique de Fibres du modèles Rev et Rem : (A) dans la direction Chaîne ; (B) dans la direction Trame

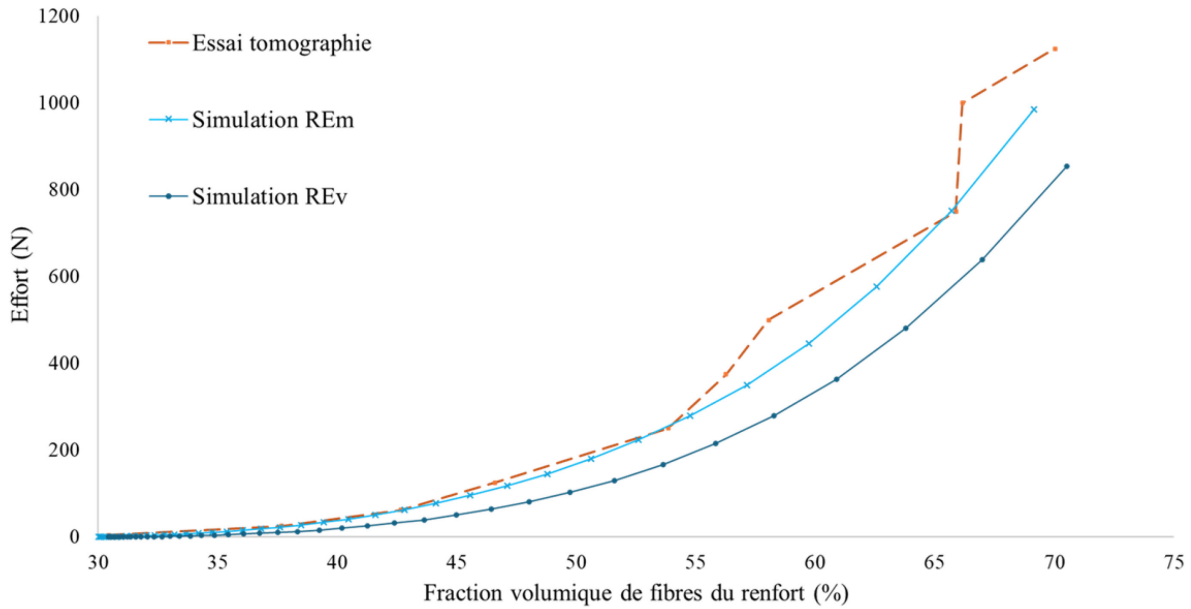


Figure 115 : Comparaison du comportement apparent en compression du renfort expérimentalement et en simulation.

Le comportement implémenté étant identique on remarque l'influence de la géométrie initiale sur le comportement moyen du renfort. Les futures investigations devront intégrer les modifications à la fois sur la loi de comportement qui n'ont pu être pris en compte dans cette étude mais aussi la variabilité géométrique au niveau de l'épaisseur des mèches afin de prendre en compte notamment la répartition de pression sur les mèches (renvoi figure).

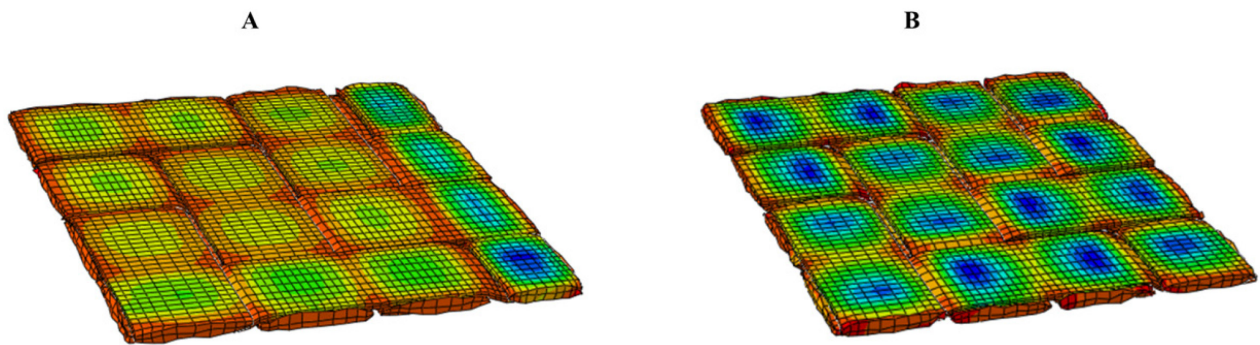


Figure 116 : Répartition de la contrainte (S33) sur les éléments du renfort à l'état final pour les modèles Rev (A) et Rem (B)

IV. Conclusion du Chapitre V

Dans le suivi de la stratégie du laboratoire, un essai de compression sous tomographie à rayons X a été réalisé dans le but d'obtenir l'évolution de la mésostructure initiale et déformée en fonction de la pression de compression. Ces éléments sont nécessaires afin de mettre au point et valider la mésostructure initiale et déformée obtenue en modélisation et simulation. A l'état initial, la comparaison entre la tomographie et le modèle numérique montre que la stratégie de modélisation mise au point permet de représenter avec une fidélité très intéressante la mésostructure très variable du renfort. Cela montre la capacité de cette stratégie à être exploitée à l'avenir dans une approche statistique, via :

- La modélisation d'un coupon de renfort contenant plusieurs VER avec ou sans variabilité
- D'une étude paramétrique sur un VER unique

Deux perspectives émergent pour la génération de mésostructures :

- Automatiser la mise en données de la modélisation des VER à partir de paramètres issus d'un tirage gaussien
- Automatiser le post-traitement des tomographies à l'aide d'une analyse d'images.

A l'état déformé, la stratégie de simulation a montré son potentiel. Les résultats sur la cinématique de déformation des mèches sont encourageants et ouvrent de nombreuses perspectives, pour la détermination de l'espace poral à l'état déformé par exemple.

Concernant le comportement moyen du renfort, là encore les résultats sont très encourageants et montrent l'impact de la configuration géométrique initiale du renfort sur le comportement. Plusieurs paramètres restent à identifier et implémenter mais la méthode semble en bonne voie. L'un des freins restants concerne le temps de calcul autour de 2-3 jours mais qui devrait pouvoir être optimisé.

Conclusions et Perspectives

L'objectif de l'étude est de pouvoir reproduire le comportement d'un renfort tissé en lin lors de sollicitations telles que celles appliquées dans le cadre de la mise en forme du procédé de fabrication LCM. Pour cela, la stratégie de l'étude vise à modéliser le renfort sous forme de Volume Élémentaire Représentatif à l'échelle mésoscopique, soit l'échelle des mèches du renfort. Au vu des nombreuses possibilités offertes de tissage et de mèches existantes, l'étude se concentre sur la modélisation de roving au sein d'un renfort type sergé 2x2. L'étude s'articule ainsi autour de trois grands axes :

- L'observation du roving et du renfort permettant de disposer de modèles géométriques cohérents (Chapitre II)
- La caractérisation expérimentale du comportement des rovings en traction longitudinal et compression transversale des fibres (Chapitre III)
- L'implémentation d'une loi de comportement adaptée aux spécificités du lin et notamment de l'importante variabilité géométrique des échantillons (Chapitre IV).

L'axe d'observation de la géométrie des renforts a nécessité la mise en place de protocoles d'observations spécifiques avec notamment un couplage d'informations obtenues au microscope numérique et en tomographie à rayons X. Les géométries obtenues à partir du microscope numérique permettent la reconstruction de modèles précis permettant de réaliser une étude par identification inverse en simulation et d'étudier l'impact de la variabilité géométrique des échantillons sur le comportement. Les résultats ont montré un impact du tissage sur la forme des rovings qui a pu être pris en compte dans les modèles géométriques de renforts et différents modèles géométriques de roving et de renforts ont été réalisés. La comparaison de ces modèles avec la tomographie montre une très bonne cohérence, démontrant la pertinence des outils développés, mais également leur capacité à être mis en œuvre dans une approche statistique qui semble la mieux adaptée à la variabilité des VER de rovings de lin. Il sera nécessaire, pour plus d'efficacité, de pouvoir automatiser la sélection de paramètres issus de tirages statistiques et leur mise en données.

L'axe de caractérisation expérimentale a mis au jour un comportement mécanique des rovings de lin fondamentalement différent de celui des rovings de fibres synthétiques. En effet, la structure du roving, composé de fibres techniques, qui sont des fibres non continues, induit une réponse très différente aux sollicitations mécaniques. En traction, il est ainsi nécessaire de prendre en compte la longueur de jauge et une variabilité très significative (de ± 10 à 20%). De plus, une déformation transverse très importante a pu être observée et estimée dans une première approche linéaire. Cela a permis d'aboutir à la nécessité d'intégrer cette relation entre les déformations longitudinales et

latérales dans la loi de comportement. L'étude de cette déformation transverse nécessite de réaliser des essais supplémentaires avec notamment une étude plus locale de la déformation pour comprendre quels sont les causes profondes expliquant ce comportement particulier et une instrumentalisation permettant de visualiser les deux directions transverses lors de l'essai afin d'avoir une vision complète de la variation de volume, et les relations entre les évolutions dimensionnelles dans les 3 directions. L'étude en traction longitudinale a également permis de quantifier le comportement dans la direction des fibres par une relation linéaire de type $F = K_s \epsilon_{11}$ avec un abattement des propriétés des rovings dans le renfort différent entre les directions trames (20%) et chaines (36%).

La caractérisation en compaction/compression du roving a nécessité la mise en place de deux expériences complémentaires. La première consiste à observer finement la modification des sections du roving pour de faibles charges et à observer la phase de compaction de la mèche. Les quelques essais réalisés avec cette méthode montrent des résultats très intéressants. La phase de compaction ne s'accompagne pas d'une modification de la largeur, ainsi, la réorganisation ne semble pas conduire à un étalement du roving. Ensuite, lors de la compression la surface extérieure n'est que peu modifiée et garde ses irrégularités qui ne sont pas « gommées ». Ces deux conclusions semblent témoigner que la réorganisation du réseau fibreux n'est pas de même nature que pour les fibres longues et que la phase de « compaction » n'est sans doute pas majoritairement une phase de migration des fibres dans les espaces vides. Cela est sans aucun doute dû à la structure particulière des rovings de lin, ainsi qu'à l'ensimage utilisé. De plus, le comportement du roving avant et après tissage ne semble pas identique ce qui implique de prendre en compte l'impact de l'étape de tissage dans le comportement en compression. Enfin, les variations de sections des rovings impliquent que la pression apparente classiquement utilisée pour le dépouillement de essais de compression et la pression réelle moyenne peuvent être significativement différentes. Cela pose la question de la définition et de la mesure plus rigoureuse de la pression et de la géométrie de la mèche pendant la compression. Les essais de compaction réalisés sous microscope numérique semblent être une piste prometteuse. Au total cette partie expérimentale a permis d'atteindre son objectif de définir le comportement mécanique des rovings de lin mais a surtout permis de faire émerger la nécessité de changer les modèles, les approches et les lois utilisées pour les fibres synthétiques. Cette partie a également permis de tracer une feuille de route pour la caractérisation et la modélisation du comportement mécanique des rovings de lin.

L'axe d'implémentation de la loi de comportement a nécessité la modification d'une partie de la Vumat Abaqus® pour adapter le comportement des éléments à des simulations portant sur des géométries variables et à rendre compte de la migration des fibres lors de la compression. Les outils mis en place ont été testés et permettent d'envisager de nouvelles perspectives pour la modélisation

du comportement des rovings et du renfort. En effet, le comportement des éléments est attribué en fonction du positionnement de l'élément dans le modèle. Son identification lors du calcul permettrait dans des simulations sur renfort d'attribuer un comportement différent à chacune des mèches et même d'attribuer un comportement différent pour certains éléments (par exemple une rigidité altérée). Cette voie nécessiterait d'être explorée à l'avenir, de même que l'implémentation de la déformation transverse. Néanmoins, les résultats obtenus sont prometteurs.

La stratégie de simulation a montré son potentiel. Les résultats sur la cinématique de déformation des mèches sont encourageants et ouvrent de nombreuses perspectives, pour la détermination de l'espace poral à l'état déformé par exemple. Le comportement moyen cohérent du renfort en simulation et l'impact de la géométrie initiale ont pu être mis en avant avec les deux modèles géométriques présentés. De plus, des variations de l'épaisseur des rovings doivent être implémentées dans le modèle géométrique pour rendre compte de la répartition réelle de la pression. Néanmoins les possibilités offertes par l'ajustement du comportement des éléments et la déformation cohérente du renfort sont des avancées particulièrement intéressantes.

Références

1. Marsh G (2003) Next step for automotive materials. *Materials Today* 6:36–43. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(03\)00429-2](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(03)00429-2)
2. Miller SA (2018) Natural fiber textile reinforced bio-based composites: Mechanical properties, creep, and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production* 198:612–623. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.038>
3. Van der Werf HMG, Turunen L (2008) The environmental impacts of the production of hemp and flax textile yarn. *Industrial Crops and Products* 27:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.05.003>
4. Pil L, Bensadoun F, Pariset J, Verpoest I (2016) Why are designers fascinated by flax and hemp fibre composites? *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 83:193–205. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.11.004>
5. Baley C, Morvan C, Grohens Y (2005) Influence of the Absorbed Water on the Tensile Strength of Flax Fibers. *Macromolecular Symposia* 222:195–202. <https://doi.org/10.1002/masy.200550425>
6. Martin N, Mouret N, Davies P, Baley C (2013) Influence of the degree of retting of flax fibers on the tensile properties of single fibers and short fiber/polypropylene composites. *Industrial Crops and Products* 49:755–767. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.06.012>
7. Wambua P, Ivens J, Verpoest I (2003) Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology* 63:1259–1264. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00096-4](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00096-4)
8. Shanwan A, Allaoui S, Gillibert J, Hivet G (2022) Development and Implementation of an Experimental Machine to Study Woven Fabric Preforming Defects. *Exp Tech* 46:299–316. <https://doi.org/10.1007/s40799-021-00483-z>
9. Azzouz R, Allaoui S, Moulart R (2021) Composite preforming defects: a review and a classification. *Int J Mater Form* 14:1259–1278. <https://doi.org/10.1007/s12289-021-01643-7>
10. Corbin A-C, Soulat D, Ferreira M, Labanieh A-R (2022) 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* 19:714–726. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1761925>
11. Corbin A-C, Boussu F, Ferreira M, Soulat D (2020) Influence of 3D warp interlock fabrics parameters made with flax rovings on their final mechanical behaviour. *Journal of Industrial Textiles* 49:1123–1144. <https://doi.org/10.1177/1528083718808790>
12. Goutianos S, Peijs T, Nyström B, Skrifvars M (2007) Textile Reinforcements Based on Aligned Flax Fibres for Structural Composites
13. Lansiaux H, Labanieh AR, Soulat D, Boussu F (2020) Flax roving twisting preparation for weaving and effect of the weft layers number on the physical and mechanical properties of 3D interlock flax fabric. *SN Appl Sci* 2:249. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2047-2>

14. Tephany C (2014) Analyse de la formabilité de renforts composites à base de fibres naturelles. PHD Dissertation, University of Orleans
15. Hakam M, Hashima WA, Kouritem SA, Ahmed H (2024) Composites of multilayer fabrics by modified roving – Experimental and theoretical study. *Alexandria Engineering Journal* 103:366–375. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.05.108>
16. Kashani MH, Hosseini A, Sassani F, et al (2017) Understanding different types of coupling in mechanical behavior of woven fabric reinforcements: A critical review and analysis. *Composite Structures* 179:558–567. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.069>
17. Ko FK, Du GW (1998) Textile Preforming. In: Peters ST (ed) *Handbook of Composites*. Springer US, Boston, MA, pp 397–424
18. Chowdhury IR, Summerscales J (2024) Woven Fabrics for Composite Reinforcement: A Review. *Journal of Composites Science* 8:280. <https://doi.org/10.3390/jcs8070280>
19. Moulage par injection de résine à basse pression ou procédé RTM. In: *Techniques de l'Ingénieur*. <https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.univ-orleans.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-plastiques-et-composites-tiaam/archive-1/moulage-par-injection-de-resine-a-basse-pression-ou-procede-rtm-a3728/>. Accessed 23 Feb 2025
20. Charlet K, Jernot JP, Gomina M, et al (2009) Influence of an Agatha flax fibre location in a stem on its mechanical, chemical and morphological properties. *Composites Science and Technology* 69:1399–1403. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.09.002>
21. Charlet K, Baley C, Morvan C, et al (2007) Characteristics of Hermès flax fibres as a function of their location in the stem and properties of the derived unidirectional composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 38:1912–1921. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.03.006>
22. His I, Andème-Onzighi C, Morvan C, Driouich A (2001) Microscopic Studies on Mature Flax Fibers Embedded in LR White: Immunogold Localization of Cell Wall Matrix Polysaccharides. *J Histochem Cytochem* 49:1525–1535. <https://doi.org/10.1177/002215540104901206>
23. Gautreau M, Durand S, Paturel A, et al (2022) Impact of cell wall non-cellulosic and cellulosic polymers on the mechanical properties of flax fibre bundles. *Carbohydrate Polymers* 291:119599. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119599>
24. Gogoli K, Gehring F, Poilâne C, Morales M (2021) Analysis of morphological variations of flax fibre bundles by Fraunhofer diffraction. *Industrial Crops and Products* 171:113856. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113856>
25. Thomason JL, Carruthers J, Kelly J, Johnson G (2011) Fibre cross-section determination and variability in sisal and flax and its effects on fibre performance characterisation. *Composites Science and Technology* 71:1008–1015. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.03.007>
26. Barbulée A, Gomina M (2017) Variability of the mechanical properties among flax fiber bundles and strands. *Procedia Engineering* 200:487–493. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.068>

27. Barbulée A (2015) Compréhension des effets du défibrage sur la morphologie, les propriétés et le comportement mécanique des faisceaux de fibres de lin : étude d'un composite dérivé lin/époxyde. PHD Dissertation, University of Caen
28. Coroller G, Lefeuvre A, Le Duigou A, et al (2013) Effect of flax fibres individualisation on tensile failure of flax/epoxy unidirectional composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 51:62–70. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.03.018>
29. Bourmaud A, Ausias G, Lebrun G, et al (2013) Observation of the structure of a composite polypropylene/flax and damage mechanisms under stress. *Industrial Crops and Products* 43:225–236. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.07.030>
30. Wang C, Wang N, Liu S, et al (2020) Investigation of Microfibril Angle of Flax Fibers Using X-Ray Diffraction and Scanning Electron Microscopy. *Journal of Natural Fibers* 17:1001–1010. <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1546639>
31. Melelli A, Jamme F, Legland D, et al (2020) Microfibril angle of elementary flax fibres investigated with polarised second harmonic generation microscopy. *Industrial Crops and Products* 156:112847. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112847>
32. Astley OM, Donald AM (2003) The tensile deformation of flax fibres as studied by X-ray scattering. *Journal of Materials Science* 38:165–171. <https://doi.org/10.1023/A:1021186421194>
33. Djemiel C, Grec S, Hawkins S (2017) Characterization of Bacterial and Fungal Community Dynamics by High-Throughput Sequencing (HTS) Metabarcoding during Flax Dew-Retting. *Front Microbiol* 8:2052. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02052>
34. Hock CW (1942) Microscopic structure of flax and related bast fibers. *J RES NATL BUR STAN* 29:41. <https://doi.org/10.6028/jres.029.024>
35. Thuault A (2013) Numerical study of the influence of structural and mechanical parameters on the tensile mechanical behaviour of flax fibres. <https://journals.sagepub.com/doi/epub/10.1177/1528083713481835>. Accessed 7 Nov 2023
36. Morgillo L, Brionne L, Melelli A, et al (2023) Elucidating links between the mechanical performance of flax fibres and their structural defects. *Industrial Crops and Products* 206:117722. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117722>
37. Singhal A, Banu M, Taub A (2023) Improving the process of stem breaking for damage reduction in extracted natural fibers. *Journal of Manufacturing Processes* 86:143–151. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.12.037>
38. Zeng X, Mooney SJ, Sturrock CJ (2015) Assessing the effect of fibre extraction processes on the strength of flax fibre reinforcement. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 70:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.12.004>
39. Peyrache T, Chabbert B, Aguié-Béghin V, et al (2024) Multiscale assessment of the heterogeneity of scutched flax fibers. *Industrial Crops and Products* 220:119260. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119260>

40. De Prez J, Van Vuure AW, Ivens J, et al (2019) Effect of enzymatic treatment of flax on chemical composition and the extent of fiber separation. *BioRes* 14:3012–3030. <https://doi.org/10.15376/biores.14.2.3012-3030>
41. Fukuta (1984) 15th Textile Research Symposium, the Textile Machinery Society of Japan, Osaka. p pp 36-38
42. Abida M, Gehring F, Mars J, et al (2020) Hygro-mechanical coupling and multiscale swelling coefficients assessment of flax yarns and flax / epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 136:105914. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105914>
43. Tewani H, Cyvas J, Perez K, Prabhakar P (2025) Ar χ i-Textile composites: Role of weave architecture on mode-I fracture energy in woven composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 188:108499. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108499>
44. Uzakova U, Murodkhujaeva K (2022) Optimization of the technological process of weaving and fabric transportation. *Transportation Research Procedia* 63:2933–2940. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.342>
45. Mendoza A, Schneider J, Parra E, Roux S (2019) Measuring yarn deformations induced by the manufacturing process of woven composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 120:127–139. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.02.008>
46. Jeyaguru S, Thiagamani SMK, Siengchin S, et al (2024) Effect of various weaving architectures on mechanical, vibration and acoustic behavior of Kevlar-Hemp intra-ply hybrid composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 176:107845. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107845>
47. Erol O, Powers BM, Keefe M (2017) Effects of weave architecture and mesoscale material properties on the macroscale mechanical response of advanced woven fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 101:554–566. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.07.016>
48. Tournalias M, Bueno M-A (2016) Experimental simulation of friction and wear of carbon yarns during the weaving process. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 80:228–236. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.07.024>
49. Walther J, Tournalias M, Decrette M, Bueno M-A (2023) Influence of multifilament yarn twist on yarn-to-yarn friction behaviour: Application to carbon fibre weaving. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 174:107737. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107737>
50. Soukupova V, Boguslavsky L, AnandJiwala RD (2007) Studies on the Properties of Biodegradable Wipes made by the Hydroentanglement Bonding Technique. *Textile Research Journal* 77:301–311. <https://doi.org/10.1177/0040517507078239>
51. Lefeuvre A, Bourmaud A, Morvan C, Baley C (2014) Tensile properties of elementary fibres of flax and glass: Analysis of reproducibility and scattering. *Materials Letters* 130:289–291. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.05.115>
52. Morgillo L, Goudenhooff C, Melelli A, et al (2025) Impact of flax fibre kink-bands on local longitudinal mechanical properties and cell wall ultrastructure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 191:108754. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.108754>

53. Richely, Bourmaud A, Placet V, et al (2022) A critical review of the ultrastructure, mechanics and modelling of flax fibres and their defects. *Progress in Materials Science* 124:100851. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100851>
54. Charlet K, Béakou A (2011) Mechanical properties of interfaces within a flax bundle – Part I: Experimental analysis. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 31:875–881. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.08.008>
55. Baley C (2002) Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 33:939–948. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00040-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00040-4)
56. Richely E, Nuez L, Pérez J, et al (2022) Influence of defects on the tensile behaviour of flax fibres: Cellulose microfibrils evolution by synchrotron X-ray diffraction and finite element modelling. *Composites Part C: Open Access* 9:100300. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100300>
57. Thygesen LG, Eder M, Burgert I (2007) Dislocations in single hemp fibres—investigations into the relationship of structural distortions and tensile properties at the cell wall level. *J Mater Sci* 42:558–564. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-1113-5>
58. Lefeuvre A, Bourmaud A, Morvan C, Baley C (2014) Elementary flax fibre tensile properties: Correlation between stress–strain behaviour and fibre composition. *Industrial Crops and Products* 52:762–769. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.11.043>
59. Placet V, Cissé O, Lamine Boubakar M (2014) Nonlinear tensile behaviour of elementary hemp fibres. Part I: Investigation of the possible origins using repeated progressive loading with in situ microscopic observations. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 56:319–327. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.11.019>
60. Alix S, Lebrun L, Marais S, et al (2012) Pectinase treatments on technical fibres of flax: Effects on water sorption and mechanical properties. *Carbohydrate Polymers* 87:177–185. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.07.035>
61. Baley C (2020) Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. In: *Techniques de l'Ingénieur*. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/materiaux-composites-presentation-et-renforts-42142210/fibres-naturelles-de-renfort-pour-materiaux-composites-am5130/>. Accessed 9 Nov 2023
62. Baley C, Bourmaud A (2014) Average tensile properties of French elementary flax fibers. *Materials Letters* 122:159–161. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.02.030>
63. Bensadoun (2017) Impregnated fibre bundle test for natural fibres used in composites - F Bensadoun, I Verpoest, J Baets, J Müssig, N Graupner, P Davies, M Gomina, A Kervoelen, C Baley, 2017. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0731684417695461>. Accessed 9 Nov 2023
64. Bourmaud A, Gibaud M, Baley C (2016) Impact of the seeding rate on flax stem stability and the mechanical properties of elementary fibres. *Industrial Crops and Products* 80:17–25. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.10.053>

65. Bourmaud A, Morvan C, Baley C (2010) Importance of fiber preparation to optimize the surface and mechanical properties of unitary flax fiber. *Industrial Crops and Products* 32:662–667. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.08.002>
66. Gibaud M, Bourmaud A, Baley C (2015) Understanding the lodging stability of green flax stems; The importance of morphology and fibre stiffness. *Biosystems Engineering* 137:9–21. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.06.005>
67. Goudenhoof C, Bourmaud A, Baley C (2017) Varietal selection of flax over time: Evolution of plant architecture related to influence on the mechanical properties of fibers. *Industrial Crops and Products* 97:56–64. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.11.062>
68. le Duigou A, Bourmaud A, Balnois E, et al (2012) Improving the interfacial properties between flax fibres and PLLA by a water fibre treatment and drying cycle. *Industrial Crops and Products* 39:31–39. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.02.001>
69. Lefeuvre A, Bourmaud A, Lebrun L, et al (2013) A study of the yearly reproducibility of flax fiber tensile properties. *Industrial Crops and Products* 50:400–407. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.07.035>
70. Martin N, Davies P, Baley C (2014) Comparison of the properties of scutched flax and flax tow for composite material reinforcement. *Industrial Crops and Products* 61:284–292. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.07.015>
71. Pillin I, Kervoelen A, Bourmaud A, et al (2011) Could oleaginous flax fibers be used as reinforcement for polymers? *Industrial Crops and Products* Accepted: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.05.016>
72. Roussière F, Baley C, Godard G, Burr D (2012) Compressive and Tensile Behaviours of PLLA Matrix Composites Reinforced with Randomly Dispersed Flax Fibres. *Appl Compos Mater* 19:171–188. <https://doi.org/10.1007/s10443-011-9189-8>
73. Tanguy M, Bourmaud A, Beaugrand J, et al (2018) Polypropylene reinforcement with flax or jute fibre; Influence of microstructure and constituents properties on the performance of composite. *Composites Part B: Engineering* 139:64–74. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.061>
74. Huguet E, Corn S, Le Moigne N, Ienny P (2024) Single-fibre tensile testing of plant fibres: Set-up compliance as a key parameter for reliable assessment of their mechanical behaviour. *Industrial Crops and Products* 222:119762. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119762>
75. Negi V, Picu RC (2019) Mechanical behavior of cross-linked random fiber networks with inter-fiber adhesion. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 122:418–434. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2018.09.027>
76. Ahmed S, Ulven CA (2018) Dynamic In-Situ Observation on the Failure Mechanism of Flax Fiber through Scanning Electron Microscopy. *Fibers* 6:17. <https://doi.org/10.3390/fib6010017>
77. Gogoli K (2022) Contribution à l'étude des faisceaux de fibres de lin: analyse des relations morphologie-comportement mécanique-ultrastructure. PHD Dissertation, University of Caen

78. Eichhorn SJ, Baillie CA, Zafeiropoulos N, et al (2001) Review: Current international research into cellulosic fibres and composites. *Journal of Materials Science* 36:2107–2131. <https://doi.org/10.1023/A:1017512029696>
79. Melelli A, Durand S, Arnould O, et al (2021) Extensive investigation of the ultrastructure of kink-bands in flax fibres. *Industrial Crops and Products* 164:113368. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113368>
80. Romhány G, Karger-Kocsis J, Czigány T (2003) Tensile fracture and failure behavior of technical flax fibers. *Journal of Applied Polymer Science* 90:3638–3645. <https://doi.org/10.1002/app.13110>
81. Charlet K (2008) Contribution à l'étude de composites unidirectionnels renforcés par des fibres de lin : relation entre la microstructure de la fibre et ses propriétés mécaniques. PHD Dissertation, University of Caen
82. Capelle E, Ouagne P, Duriatti D, Soulat D (2016) Influence of the Textile Parameters on the Complex Shape Forming Properties of Flax Based Fabrics. *Journal of Fashion Technology & Textile Engineering* 4:. <https://doi.org/10.4172/2329-9568>
83. Moothoo J, Allaoui S, Ouagne P, Soulat D (2014) A study of the tensile behaviour of flax tows and their potential for composite processing. *Materials & Design* 55:764–772. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.10.048>
84. Le Gall M, Davies P, Martin N, Baley C (2018) Recommended flax fibre density values for composite property predictions. *Industrial Crops and Products* 114:52–58. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.01.065>
85. Aldroubi S, Kasal B, Yan L, Bachtar EV (2023) Multi-scale investigation of morphological, physical and tensile properties of flax single fiber, yarn and unidirectional fabric. *Composites Part B: Engineering* 259:110732. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110732>
86. Amiri A, Triplett Z, Moreira A, et al (2017) Standard density measurement method development for flax fiber. *Industrial Crops and Products* 96:196–202. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.11.060>
87. Omrani F (2017) Caractérisation de la variabilité des propriétés mécaniques aux échelles fils, renforts et composites à base de lin. PHD Dissertation, University of Lille
88. Blanchard JMFA, Sobey AJ, Blake JIR (2016) Multi-scale investigation into the mechanical behaviour of flax in yarn, cloth and laminate form. *Composites Part B: Engineering* 84:228–235. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.086>
89. Omrani F, Peng W, Damien S, et al (2017) Analysis of the deformability of flax-fibre nonwoven fabrics during manufacturing. *Composites Part B: Engineering* 116:471–485. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.003>
90. Goudenhooff C (2018) Multi-scale characterization of flax stems and fibers : structure and mechanical performances. PHD Dissertation, University of Nantes
91. Haag K, Padovani J, Fita S, et al (2017) Influence of flax fibre variety and year-to-year variability on composite properties. *Industrial Crops and Products* 98:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.12.028>

92. Pisupati A, Willaert L, Goethals F, et al (2021) Variety and growing condition effect on the yield and tensile strength of flax fibers. *Industrial Crops and Products* 170:113736. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113736>
93. Bourmaud A, Siniscalco D, Foucat L, et al (2019) Evolution of flax cell wall ultrastructure and mechanical properties during the retting step. *Carbohydrate Polymers* 206:48–56. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.10.065>
94. Lecoublet M, Khennache M, Leblanc N, et al (2021) Physico-mechanical performances of flax fiber biobased composites: Retting and process effects. *Industrial Crops and Products* 173:114110. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114110>
95. Singhal A, Jin J, Banu M, Taub A (2023) Effect of enzyme retting conditions on bast bundle differentiation and mechanical properties of flax technical fibers. *Industrial Crops and Products* 205:117478. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117478>
96. Nilsson T (2006) Micromechanical Modelling Of Natural Fibres For Composite Materials. PHD Dissertation, University of Lund
97. Nyholm K, Ander P, Bardage S, Geoffrey D (2001) Dislocations in pulp fibres – their origin, characteristics and importance – a review. *Nordic Pulp & Paper Research Journal* 16:376–384. <https://doi.org/10.3183/npprj-2001-16-04-p376-384>
98. Thygesen LG, Bilde-Sørensen JB, Hoffmeyer P (2006) Visualisation of dislocations in hemp fibres: A comparison between scanning electron microscopy (SEM) and polarized light microscopy (PLM). *Industrial Crops and Products* 24:181–185. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2006.03.009>
99. Rajakumaran V, Melelli A, Quiles A, et al (2024) Experimental and numerical approach to understand the role of defects in damage mechanisms of flax fibers at bundle scale. *Industrial Crops and Products* 218:119025. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119025>
100. Kozlova L, Petrova A, Chernyad'ev A, et al (2022) On the origin of bast fiber dislocations in flax. *Industrial Crops and Products* 176:114382. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114382>
101. Bourmaud A, Pinsard L, Guillou E, et al (2022) Elucidating the formation of structural defects in flax fibres through synchrotron X-ray phase-contrast microtomography. *Industrial Crops and Products* 184:115048. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115048>
102. Chatron-Michaud P, Trillaud V, Lesaint B, et al (2024) Towards dynamic in situ observation of flax fibres under varying water contents through environmental SEM and X-ray tomography. *Industrial Crops and Products* 215:118654. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118654>
103. Masseteau B, Michaud F, Irle M, et al (2014) An evaluation of the effects of moisture content on the modulus of elasticity of a unidirectional flax fiber composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 60:32–37. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.01.011>
104. Lu MM, Fuentes CA, Van Vuure AW (2022) Moisture sorption and swelling of flax fibre and flax fibre composites. *Composites Part B: Engineering* 231:109538. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109538>

105. Nuez L, Richely E, Perez J, et al (2022) Exploring the effect of relative humidity on dynamic evolution of flax fibre's microfibril angle through in situ tensile tests under synchrotron X-ray diffraction. *Industrial Crops and Products* 188:115592. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115592>
106. Rougier V (2021) Modélisation multi-échelle de l'imprégnation d'un milieu fibreux : morphologie, mouillage et perméabilité. PHD Dissertation, Normandie Université
107. Chen B, Chou T-W (2000) Compaction of woven-fabric preforms: nesting and multi-layer deformation. *Composites Science and Technology* 60:2223–2231. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00017-8)
108. Chen Z-R, Ye L (2006) A micromechanical compaction model for woven fabric preforms. Part II: Multilayer. *Composites Science and Technology* 66:3263–3272. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.07.010>
109. Cadinot S (2002) Aspects rhéologiques de la compressibilité d'un renfort fibreux pour matériaux composites : études en compression et relaxation
110. Yong AXH, Aktas A, May D, et al (2021) Experimental characterisation of textile compaction response: A benchmark exercise. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 142:106243. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106243>
111. Wendling-Hivet A (2013) Simulation à l'échelle mésoscopique de la mise en forme de renforts de composites tissés. These de doctorat, Lyon, INSA
112. Greenwood JH, Rose PG (1974) Compressive behaviour of Kevlar 49 fibres and composites. *J Mater Sci* 9:1809–1814. <https://doi.org/10.1007/BF00541750>
113. Peijs T, van Vught RJM, Govaert LE (1995) Mechanical properties of poly(vinyl alcohol) fibres and composites. *Composites* 26:83–90. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(95\)90407-Q](https://doi.org/10.1016/0010-4361(95)90407-Q)
114. Li L, Zhao Y, Yang J, et al (2015) An experimental investigation of compaction behavior of carbon non-crimp fabrics for liquid composite molding. *J Mater Sci* 50:2960–2972. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-8860-0>
115. Li Y, Zhang W, Yan S (2024) Characterization of pressure-dependent nonlinear bending behavior of yarns and its application in modeling the compression of 2D woven fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 185:108346. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108346>
116. Somashekar AA, Bickerton S, Bhattacharyya D (2011) Compression deformation of a biaxial stitched glass fibre reinforcement: Visualisation and image analysis using X-ray micro-CT. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 42:140–150. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.10.017>
117. Wei K, Liang D, Mei M, et al (2019) Preforming behaviors of carbon fiber fabrics with different contents of binder and under various process parameters. *Composites Part B: Engineering* 166:221–232. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.143>
118. Latil P, Orgéas L, Geindreau C, et al (2011) Towards the 3D *in situ* characterisation of deformation micro-mechanisms within a compressed bundle of fibres. *Composites Science and Technology* 71:480–488. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.12.023>

119. Matsudaira M, Qin H (1995) Features and Mechanical Parameters of a Fabric's Compressional Property. *The Journal of The Textile Institute* 86:476–486. <https://doi.org/10.1080/00405009508658774>
120. Gauvin R, Chibani M (1986) The Modelling of Mold Filling in Resin Transfer Molding. *International Polymer Processing* 1:42–46. <https://doi.org/10.3139/217.860042>
121. Jönsson KA-S, Jönsson BTL (1992) Fluid flow in compressible porous media: I: Steady-state conditions. *AIChE Journal* 38:1340–1348. <https://doi.org/10.1002/aic.690380904>
122. Chen X, Papathanasiou TD (2006) On the variability of the Kozeny constant for saturated flow across unidirectional disordered fiber arrays. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37:836–846. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.01.018>
123. Toll S, Månson J -a. E (1994) An analysis of the compressibility of fibre assemblies. *6th Int Conf Fibre Reinf Compos* 25:1–10
124. Toll S (1998) Packing mechanics of fiber reinforcements. *Polymer Engineering & Science* 38:1337–1350. <https://doi.org/10.1002/pen.10304>
125. Kandar MIM, Akil HM (2016) Application of Design of Experiment (DoE) for Parameters Optimization in Compression Moulding for Flax Reinforced Biocomposites. *Procedia Chemistry* 19:433–440. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.035>
126. Alsubari S, Zuhri MYM, Sapuan SM, Ishak MR (2020) Quasi-static compression behaviour of interlocking core structures made of flax fibre reinforced polylactic acid composite. *Journal of Materials Research and Technology* 9:12065–12070. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.101>
127. Bambach MR (2017) Compression strength of natural fibre composite plates and sections of flax, jute and hemp. *Thin-Walled Structures* 119:103–113. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.05.034>
128. Chevallier A, Akleh W, Govilas J, et al (2025) Moisture effects on the transverse compressive behaviour of single flax fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 188:108509. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108509>
129. Govilas J, Chevallier A, Akleh W, et al (2024) Mechanical behavior and apparent stiffness of flax, hemp and nettle fibers under single fiber transverse compression tests. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 185:108321. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108321>
130. Acera Fernández J, Le Moigne N, Caro-Bretelle AS, et al (2016) Role of flax cell wall components on the microstructure and transverse mechanical behaviour of flax fabrics reinforced epoxy biocomposites. *Industrial Crops and Products* 85:93–108. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.02.047>
131. Shah DU, Porter D, Vollrath F (2014) Opportunities for silk textiles in reinforced biocomposites: Studying through-thickness compaction behaviour. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 62:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.03.008>

132. Mbakop RS, Lebrun G, Brouillette F (2019) Effect of compaction parameters on preform permeability and mechanical properties of unidirectional flax fiber composites. *Composites Part B: Engineering* 176:107083. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107083>
133. Cherouat A, Borouchaki H, Billoët J-L (2005) Geometrical and mechanical draping of composite fabric. *Revue Européenne des Éléments Finis* 14:693–707. <https://doi.org/10.3166/reef.14.693-707>
134. Aono M, Breen DE, Wozny MJ (1994) Fitting a woven-cloth model to a curved surface: mapping algorithms. *Computer-Aided Design* 26:278–292. [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(94\)90074-4](https://doi.org/10.1016/0010-4485(94)90074-4)
135. Potluri P, Sharma S, Ramgulam R (2001) Comprehensive drape modelling for moulding 3D textile preforms. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 32:1415–1424. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00040-9](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00040-9)
136. Van Der Weeën F (1991) Algorithms for draping fabrics on doubly-curved surfaces. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 31:1415–1426. <https://doi.org/10.1002/nme.1620310712>
137. Spencer AJM (2000) Theory of fabric-reinforced viscous fluids. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 31:1311–1321. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00006-3)
138. Yu WR, Pourboghrat F, Chung K, et al (2002) Non-orthogonal constitutive equation for woven fabric reinforced thermoplastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 33:1095–1105. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00053-2](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00053-2)
139. Badel P, Vidal-Sallé E, Maire E, Boisse P (2008) Simulation and tomography analysis of textile composite reinforcement deformation at the mesoscopic scale. *Composites Science and Technology* 68:2433–2440. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.04.038>
140. Boisse P, Gasser A, Hagege B, Billoet J-L (2005) Analysis of the mechanical behavior of woven fibrous material using virtual tests at the unit cell level. *J Mater Sci* 40:5955–5962. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-5069-7>
141. Wang J, Wang P, Hamila N, Boisse P (2022) Meso-Macro Simulations of the Forming of 3D Non-Crimp Woven Fabrics. *Textiles* 2:112–123. <https://doi.org/10.3390/textiles2010006>
142. Gatouillat S, Bareggi A, Vidal-Sallé E, Boisse P (2013) Meso modelling for composite preform shaping – Simulation of the loss of cohesion of the woven fibre network. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 54:135–144. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.07.010>
143. ten Thije RHW, Akkerman R, Huétink J (2007) Large deformation simulation of anisotropic material using an updated Lagrangian finite element method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 196:3141–3150. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2007.02.010>
144. Xue P, Peng X, Cao J (2003) A non-orthogonal constitutive model for characterizing woven composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 34:183–193. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00052-0](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00052-0)

145. King MJ, Jearanaisilawong P, Socrate S (2005) A continuum constitutive model for the mechanical behavior of woven fabrics. *International Journal of Solids and Structures* 42:3867–3896. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.10.030>
146. Durville D (2005) Numerical simulation of entangled materials mechanical properties. *J Mater Sci* 40:5941–5948. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-5061-2>
147. Duhovic M, Bhattacharyya D (2006) Simulating the deformation mechanisms of knitted fabric composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37:1897–1915. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.12.029>
148. Kyosev Y, Renkens W (2010) 6 - Modelling and visualization of knitted fabrics. In: Chen X (ed) *Modelling and Predicting Textile Behaviour*. Woodhead Publishing, pp 225–262
149. Song X (2024) Experimental characterization, modelling and simulation at the microscale of the mechanical behavior of fibre bundles. Phdthesis, Université d'Orléans
150. Zhou G, Sun X, Wang Y (2004) Multi-chain digital element analysis in textile mechanics. *Composites Science and Technology* 64:239–244. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00258-6](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00258-6)
151. Wendling A, Hivet G, Vidal-Sallé E, Boisse P (2014) Consistent geometrical modelling of interlock fabrics. *Finite Elements in Analysis and Design* 90:93–105. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2014.05.010>
152. Wendling A, Daniel JL, Hivet G, et al (2015) Meshing Preprocessor for the Mesoscopic 3D Finite Element Simulation of 2D and Interlock Fabric Deformation. *Appl Compos Mater* 22:869–886. <https://doi.org/10.1007/s10443-015-9441-8>
153. Nauman S (2011) Geometrical modelling and characterization of 3D warp interlock composites and their on-line structural health monitoring using flexible textile sensors. These de doctorat, Lille 1
154. Capelle E (2015) Conception et fabrication de renforts tissés à base de fibres de lin pour la réalisation de pièces composites à géométries complexes. These de doctorat, Orléans
155. Moothoo J (2013) Analyse de la faisabilité d'éco-conception de pièces composites à base de ressources renouvelables pour applications médicales. These de doctorat, Orléans
156. (2023) Test de Wilcoxon équivalent non paramétrique au test T de Student. In: *STAT Inférentielle*. <https://statinferentielle.fr/test-de-wilcoxon/>. Accessed 1 Mar 2025

SIMULATION A L'ECHELLE MESOSCOPIQUE D'UN RENFORT TISSE EN FIBRES DE LIN

Aujourd'hui dans un contexte de développement durable et d'allègement des structures, l'intégration de pièces composites à base de fibres de lin est de plus en plus plébiscitée par les industriels. L'une des catégories de procédés permettant la fabrication de ces pièces est le Liquid Composite Moulding (LCM). Ce type de procédé consiste en une étape de préformage d'un renfort à l'état sec dans un moule puis à une étape d'injection de la résine. Néanmoins, le préformage de pièces complexes à partir de renforts tissés en fibres de lin dans ces procédés constituent un frein majeur à la généralisation de l'utilisation de ce matériau. Lors du préformage des pièces, les renforts subissent différentes sollicitations qui induisent des modifications à la fois structurelles du renfort et de ses propriétés dont l'impact est à ce jour assez peu maîtrisé, notamment dans le cas des fibres naturelles. Afin d'apporter une réponse à cette problématique et dans une dynamique de maîtrise des procédés, il est envisagé de mettre en place une simulation à but prédictif d'un renfort tissé en fibres de lin. Les renforts tissés disposent de différentes échelles d'étude dont chacune présente des avantages et inconvénients sur la nature des informations qu'elles proposent et sur le temps de calcul associé. Pour disposer à la fois de résultats globaux et locaux des mécanismes de déformation du renfort et d'un temps de calcul raisonnable, les simulations réalisées dans cette étude sont à l'échelle dite mésoscopique, c'est-à-dire l'échelle des mèches et de leur entrelacement. Cette simulation nécessite donc de disposer d'une géométrie fiable et cohérente d'une cellule élémentaire de renfort et d'une loi de comportement représentative du comportement des mèches de lin. Sachant qu'il existe différents types d'architectures de renforts et différents types de mèches, la présente étude s'intéresse à un renfort de type sergé 2x2 tissé avec des mèches de type roving, c'est-à-dire des mèches de fibres quasiment parallèles. L'étude s'appuie sur de précédents travaux menés à cette échelle pour des renforts tissés avec des roving de fibres synthétiques. La mise en place d'une cellule élémentaire de renfort est assurée sans interpénétration des mèches et avec un maillage efficace. La loi de comportement du matériau homogène équivalent des mèches de fibres de lin représente l'un des enjeux de cette étude. En effet, le caractère naturel et discontinu des fibres implique à la fois une variabilité géométrique des mèches fabriquées à partir de ces fibres et une variabilité des propriétés mécaniques hérité de l'assemblage fibreux. L'objectif de la présente étude est donc de déterminer, à l'aide de l'analyse d'essais expérimentaux sur rovings, le comportement très spécifique de ces rovings de lin lors de différentes sollicitations afin d'alimenter la loi de comportement nécessaire aux simulations.

Mots clés : Modélisation numérique, Simulation mésoscopique, Roving de Lin, Renfort tissé, Comportement mécanique, Matériau hétérogène

SIMULATION AT THE MESOSCOPIC SCALE OF FLAX FIBERS WOVEN REINFORCEMENTS BEHAVIOR

Today, in a context of sustainable development and the lightening of structures, the integration of composite parts based on flax fibers is increasingly popular with manufacturers. One of the categories of processes used to manufacture these parts is Liquid Composite Moulding (LCM). This type of process consists of a step of reinforcement preforming in a dry state in a mold and then a step of injection of the resin. Nevertheless, the preforming of complex parts from woven flax fiber reinforcements in these processes is a major obstacle to the widespread use of this material. During the preforming of the parts, the reinforcements undergo various stresses that induce structural modifications to both the reinforcement and its properties, the impact of which is currently poorly controlled, especially in the case of natural fibers. In order to provide an answer to this problem and in a process control dynamic, it is planned to set up a predictive simulation of a woven flax fiber reinforcement. Woven reinforcements have different study scales, each of which has advantages and disadvantages in terms of the nature of the information they offer and the associated calculation time. In order to have both global and local results of the reinforcement deformation mechanisms and a reasonable computation time, the simulations carried out in this study are at the so-called mesoscopic scale, i.e. the scale of the yarn and their interlacing. This simulation therefore requires reliable and coherent geometry, an elementary reinforcement cell and a behavior law representative of the behavior of flax yarn. Knowing that there are different types of reinforcement architectures and different types of yarns, the present study focuses on a 2x2 twill type reinforcement woven with roving-type yarn, i.e. almost parallel fiber yarns. The study builds on previous work carried out at this scale for reinforcements woven with synthetic fiber roving. The installation of an elementary reinforcement cell is ensured without interpenetration of the yarns and with an efficient mesh. The behavior law of the equivalent homogeneous material of flax fiber yarns is one of the challenges of this study. Indeed, the natural and discontinuous character of the fibers implies both a geometric variability of the yarns made from these fibers and a variability in the mechanical properties inherited from the fibrous assembly. The objective of the present study is therefore to determine, with the help of the analysis of experimental tests on rovings, the very specific behavior of these flax rovings during different loads in order to feed the behavioral law necessary for the simulations.

Keywords : Numerical modelling, Mesoscopic scale simulation, Flax roving, Woven reinforcement, Mechanical behavior, Heterogeneous material