

Développement d'un non-tissé structurel à base de fibres naturelles

par

Kaoutar BENSAID

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 24 NOVEMBRE 2016

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés, Kaoutar Bensaid, 2016

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Éric David, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme Patricia Dolez, codirecteur de mémoire
Groupe CTT

M. Souheil-Antoine Tahan, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Vincent Demers, membre du jury
Département de génie mécanique à l'école de technologie supérieure

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY

LE 21 NOVEMBRE 2016

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire de maîtrise a été possible grâce à plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.

En premier lieu, je voudrais remercier Patricia Dolez, ma superviseure en milieu industriel, pour m'avoir fait confiance et donné cette possibilité de travailler au sein du Groupe CTT. Ses conseils, ses encouragements, son soutien ainsi que son regard critique sur mon travail, ont grandement contribué à mon évolution professionnelle et m'ont aidée à mener ce projet à bord.

Je voudrais remercier également mon directeur de recherche Monsieur Éric David de m'avoir accepté parmi ses étudiants. Son soutien, sa disponibilité, ainsi que ses judicieux conseils ont contribué à alimenter mes réflexions et à améliorer mon sens d'analyse.

Je réserve aussi mes sincères remerciements à tout le personnel du Groupe CTT, qui ont été toujours présents pour avoir partagé avec moi leurs connaissances et répondu à mes questions et surtout ceux qui ont réservé des plages horaires pour m'aider lors de quelques tests. Ainsi que mes collègues de bureau pour avoir partagé quelques astuces pour améliorer la productivité au travail.

Mes remerciements vont aussi aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette recherche en acceptant d'évaluer ce travail et de l'enrichir grâce à leurs commentaires et suggestions.

Une pensée très particulière à mes parents qui, malgré la distance et le décalage horaire, ont été présents en permanence afin de me redonner confiance en moi durant les moments difficiles, ainsi que ma grande famille et mes amis qui m'ont apporté leur soutien moral tout au long de ma maîtrise.

DÉVELOPPEMENT D'UN NON-TISSÉ STRUCTUREL À BASE DE FIBRES NATURELLES

Kaoutar BENSAID

RÉSUMÉ

Dans une optique de fabrication durable et de protection des ressources et de l'environnement, l'utilisation des ressources biosourcées apparaît comme une avenue de choix à explorer, autant pour des applications générales à caractère non-structurel que pour des pièces composites structurelles. Le Groupe CTT a donc entrepris avec ses partenaires industriels d'étudier la possibilité de produire des renforts non-tissés à base de fibres naturelles pour remplacer éventuellement un voile de verre utilisé comme renfort dans le domaine de génie civil. Deux types de fibres ont été sélectionnés pour les travaux : du jute recyclé et du kénaf vierge. Le non-tissé produit est constitué de 85% de fibres naturelles et de 15% de fibres synthétiques bicomposantes. Après une caractérisation des propriétés physiques et mécaniques des différentes fibres entrant dans la fabrication des non-tissés, une optimisation des différents paramètres textiles du procédé de mise en forme par voie sèche et de la température de thermoliage a été réalisée pour les deux types de fibres afin d'obtenir les performances mécaniques les plus élevées. Dans le cas du jute, les performances mécaniques optimales obtenues sont 12% plus faibles en sens machine que celles du voile de verre mais plus de 120% plus élevées en sens travers. Les non-tissés en fibre de kénaf sont 50% plus résistants en sens machine et 400% en sens travers. L'obtention de performances élevées est attribuée entre autres à l'utilisation d'une fibre bicomposante hydrophile. Il est aussi mis en évidence qu'une augmentation du pourcentage de fibre bicomposante dans le non-tissé augmente encore les performances mécaniques. Ces résultats confirment le potentiel incroyable des fibres naturelles, même recyclées, pour la production de renfort pour les pièces composites, y compris pour les applications structurelles.

Mots clés: fibre naturelle, fibre bicomposante, non-tissé, performances mécaniques

DEVELOPMENT OF A STRUCTURAL NONWOVEN BASED ON NATURAL FIBRES

Kaoutar BENSAID

ABSTRACT

In a perspective of sustainable production and protection of resources and environment, the use of bio-based materials appears as a choice path to explore both for common non-structural applications and structural composite parts. CTT Group has undertaken to study with its industrial partners the possibility of producing nonwoven reinforcements made of natural fibers to replace eventually a fiberglass mat used as a reinforcement in civil engineering applications. Two types of fibers were selected for the work: recycled jute and virgin kenaf. The nonwoven produced is composed of 85% of natural fibers and 15% of bicomponent synthetic fibers. After characterizing the physical and mechanical properties of the various fibers used in the production of the nonwovens, an optimization of the textile parameters of the drylaid forming process and thermal bonding temperature was conducted for the two types of natural fibers in order to obtain the highest mechanical performance. For jute, the best results in terms of mechanical performance are 12% lower than the fiberglass mat in the machine direction but more than 120% higher in the cross direction. Kenaf fiber nonwovens are 50% stronger in the machine direction and 400% higher in the cross direction compared to the fiberglass mat. The high performance obtained is attributed, among other things, to the use of a hydrophilic bicomponent fiber. It is also shown that an increase in the bicomponent fiber content in the nonwovens improves their mechanical performance. These results confirm the enormous potential of natural fibers, even from recycled origin, for the production of composite part reinforcement, including for structural applications.

Keywords: natural fiber, bicomponent fiber, nonwoven, mechanical performance

TABLE DES MATIÈRES

		Page
INTRODUCTION		1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE		3
1.1 Généralités		3
1.1.1 Fibres textiles		3
1.1.2 Fibres naturelles		3
1.1.3 Classement des fibres naturelles		4
1.1.4 Domaines d'application		6
1.2 Fibres naturelles		7
1.2.1 Propriétés physiques		7
1.2.2 Propriétés chimiques		8
1.2.2.1 Caractérisation chimique des fibres végétales		8
1.2.2.2 Les différents composants chimiques des fibres végétales		9
1.2.2.3 Dégradation de différents composés chimiques de la fibre végétale		12
1.2.2.4 Le taux de cristallinité		12
1.2.3 Propriétés thermiques		13
1.2.4 Propriétés physicomécaniques		15
1.2.5 Avantages et inconvénients des fibres naturelles		16
1.2.5.1 Avantages		16
1.2.5.2 Inconvénients		17
1.2.6 Facteurs affectant les performances des fibres naturelles		18
1.3 Fibre bicomposante		20
1.4 Structures textiles		22
1.4.1 Différents types de structures textiles		22
1.4.1.1 Production de fil		22
1.4.1.2 Structures textiles tissées		23
1.4.1.3 Structures textiles tricotées		24
1.4.1.4 Structures textiles tressées		25
1.4.1.5 Structures textiles non-tissés		25
1.4.2 Avantages des non-tissés		26
1.4.3 Les inconvénients des non-tissés		27
1.4.4 Domaines d'application des non-tissés en général		27
1.5 Procédés de fabrication des non-tissés		30
1.5.1 Généralités		30
1.5.2 Les processus de formation du voile		31
1.5.2.1 Voie sèche		32
1.5.2.2 Voie humide		36
1.5.2.3 Voie fondue		37
1.5.3 Procédé de consolidation		39
1.5.3.1 Consolidation mécanique		39

	1.5.3.2	Consolidation chimique	41
	1.5.3.3	Consolidation thermique.....	42
	1.5.4	Processus de finition	43
1.6		Non-tissés techniques à base de fibres naturelles	44
	1.6.1	Introduction.....	44
	1.6.2	Performances mécaniques des fibres naturelles pour les non-tissés techniques	45
	1.6.3	Applications des non-tissés techniques à base des fibres naturelles dans les composites.....	49
1.7		Procédé de fabrication des non-tissés par voie sèche	51
	1.7.1	Pourquoi la voie sèche	51
	1.7.2	De la fibre au non-tissé	51
	1.7.2.1	La fibre naturelle.....	51
	1.7.2.2	Ouvraison.....	53
	1.7.2.3	Cardage	53
	1.7.2.4	Étaleur nappeur	55
	1.7.2.5	Aiguilletage.....	56
	1.7.2.6	Consolidation thermique.....	56
CHAPITRE 2 MÉTHODE ET MATÉRIAUX.....			59
2.1		Méthodes de caractérisation des fibres	59
	2.1.1	Longueur des fibres naturelles	59
	2.1.2	Diamètre des fibres	59
	2.1.3	Résistance et allongement à la rupture.....	60
	2.1.4	Mouillabilité.....	60
	2.1.5	Analyse de composition.....	61
	2.1.6	Analyse thermogravimétrique (TGA).....	61
	2.1.7	Détermination de la température de fusion pour les fibres bicomposante	62
2.2		Procédé de fabrication des non-tissés	63
	2.2.1	Matériaux	63
	2.2.2	Ouvraison.....	64
	2.2.3	Cardage	64
	2.2.4	Aiguilletage.....	65
	2.2.5	Thermoliage	65
2.3		Méthodes de caractérisation des non-tissés	66
	2.3.1	Masse surfacique et épaisseur des non-tissés.....	66
	2.3.2	Force et allongement à la rupture des non-tissés	67
2.4		Fibre de jute recyclé.....	68
	2.4.1	Longueur de la fibre de jute recyclée.....	68
	2.4.2	Diamètre de la fibre de jute recyclée	69
	2.4.3	Force et allongement à la rupture de la fibre de jute recyclée	70
	2.4.4	Température de décomposition de la fibre de jute recyclée	70
	2.4.5	Analyse de composition pour la fibre de jute recyclée	71
	2.4.6	Mouillabilité.....	72
2.5		Fibre de kénaf	72

2.5.1	Longueur de la fibre de kénafe vierge	72
2.5.2	Diamètre équivalent de la fibre de kénafe vierge	72
2.5.3	Force et allongement à la rupture de la fibre de kénafe vierge.....	73
2.5.4	Analyse de composition des fibres de kénafe vierge.....	74
2.6	Fibre bicomposante.....	75
2.6.1	Fibre bicomposante PET/coPET (Bico3).....	75
2.6.1.1	Longueur de la fibre.....	75
2.6.1.2	Diamètre des fibres	75
2.6.1.3	Force et allongement à la rupture.....	76
2.6.1.4	Température de fusion	77
2.6.1.5	Température de décomposition.....	78
2.6.1.6	Analyse de composition.....	78
2.6.1.7	Mouillabilité.....	79
2.6.2	Fibre Bicomposante HDPE/PP (Bico10).....	79
2.6.2.1	Longueur de la fibre.....	79
2.6.2.2	Diamètre des fibres	80
2.6.2.3	Force et allongement à la rupture.....	80
2.6.2.4	Température de fusion	81
2.6.2.5	Température de décomposition.....	82
2.6.2.6	Analyse de composition.....	82
2.6.2.7	Mouillabilité.....	83
2.6.3	Fibre Bicomposante PET/coPET (Bico11).....	83
2.6.3.1	Longueur de la fibre.....	83
2.6.3.2	Diamètre de la fibre	84
2.6.3.3	Force et allongement à la rupture.....	84
2.6.3.4	Température de fusion de la fibre	85
2.6.3.5	Température de décomposition.....	85
2.6.3.6	Analyse de composition.....	86
2.6.3.7	Mouillabilité.....	86

CHAPITRE 3 OPTIMISATION DES PARAMÈTRES TEXTILES POUR LA PRODUCTION DE NON-TISSÉS À BASE DE FIBRE DE JUTE RECYCLÉ

		87
3.1	Optimisation des paramètres de l'ouvraison.....	87
3.1.1	Introduction.....	87
3.1.2	Essais préliminaires	87
3.1.3	Plan d'expérience.....	88
3.1.4	Résultats.....	89
3.1.5	Discussion.....	90
3.2	Optimisation de la vitesse de la carde.....	91
3.2.1	Introduction.....	91
3.2.2	Masse surfacique des non-tissés	92
3.2.3	Épaisseur des non-tissés.....	93
3.2.4	Force de rupture des non-tissés.....	93
3.2.5	Discussion.....	95

3.3	Optimisation de la profondeur des aiguilles de l'aiguilleteuse	96
3.3.1	Introduction.....	96
3.3.2	Masse surfacique des non-tissés	97
3.3.3	Épaisseur des non-tissés.....	98
3.3.4	Force de rupture des non-tissés.....	98
3.3.5	Discussion	100
3.4	Optimisation de la fréquence d'aiguilletage	102
3.4.1	Introduction.....	102
3.4.2	Masse surfacique des non-tissés	102
3.4.3	Épaisseur des non-tissés.....	103
3.4.4	Force de rupture des non-tissés.....	104
3.4.5	Discussion	106
3.5	Optimisation de la vitesse d'entrée/ sortie du tapis de l'aiguilleteuse	107
3.5.1	Introduction.....	107
3.5.2	Masse surfacique des non-tissés	108
3.5.3	Épaisseur des non-tissés.....	108
3.5.4	Force de rupture des non-tissés.....	109
3.5.5	Discussion	111
3.6	Optimisation de la température de thermoliage à l'aide d'une presse chauffante	112
3.6.1	Introduction.....	112
3.6.2	Choix de conditions	113
3.6.3	Performances mécaniques des non-tissés thermoliés	114
3.6.4	Discussion	114
3.6.5	Conclusion	115
3.7	Conclusion de l'optimisation des non-tissés à base de fibre de jute recyclée	115

CHAPITRE 4 OPTIMISATION DES PARAMÈTRES TEXTILES POUR LA PRODUCTION DE NON-TISSÉS À BASE DE FIBRE DE KÉNAF VIERGE.....

4.1	Performances de non-tissés de kénafe réalisés avec les paramètres optimaux pour la fibre de jute recyclé.....	117
4.1.1	Masse surfacique des non-tissés	118
4.1.2	Épaisseur des non-tissés.....	118
4.1.3	Force de rupture	119
4.1.4	Discussion	121
4.2	Optimisation des paramètres de l'ouvraison.....	121
4.2.1	Introduction.....	121
4.2.2	Plan d'expérience.....	121
4.2.3	Résultats.....	122
4.2.4	Discussion	123
4.3	Optimisation de la vitesse de la carde.....	124
4.3.1	Introduction.....	124
4.3.2	Masse surfacique des non-tissés	125
4.3.3	Épaisseur des non-tissés.....	126
4.3.4	Force de rupture des non-tissés.....	126

4.3.5	Discussion	128
4.4	Optimisation de la profondeur des aiguilles de l'aiguilleuse	128
4.4.1	Introduction	128
4.4.2	Masse surfacique des non-tissés	129
4.4.3	Épaisseur des non-tissés	129
4.4.4	Force de rupture des non-tissés	130
4.4.5	Discussion	132
4.5	Optimisation de la fréquence d'aiguilletage	133
4.5.1	Introduction	133
4.5.2	Masse surfacique des non-tissés	134
4.5.3	Épaisseur des non-tissés	135
4.5.4	Force de rupture des non-tissés	136
4.5.5	Discussion	137
4.6	Optimisation des paramètres de l'aiguilleuse	138
4.6.1	Introduction	138
4.6.2	Plan d'expérience	138
4.6.3	Résultats	139
4.6.4	Discussion	141
4.7	Optimisation de la température de thermoliage à l'aide d'une presse chauffante	146
4.7.1	Introduction	146
4.7.2	Résultats	146
4.7.3	Discussion	149
4.8	Conclusion sur l'optimisation des non-tissés à base de fibre de kénaf vierge	150

CHAPITRE 5 ETUDE DE L'EFFET DU CARACTÈRE

	HYDROPHOBE/HYDROPHILE DE LA FIBRE BICOMPOSANTE	151
5.1	Introduction	151
5.2	Résultats	152
5.2.1	Non-tissés réalisés avec la fibre bicomposante Bico3	152
5.2.1.1	Masse surfacique des non-tissés	152
5.2.1.2	Épaisseur des non-tissés	153
5.2.1.3	Force de rupture et allongement à la rupture des non-tissés	154
5.2.2	Non-tissés réalisés avec la fibre bicomposante Bico10	155
5.2.2.1	Masse surfacique des non-tissés	155
5.2.2.2	Épaisseur des non-tissés	155
5.2.2.3	Force de rupture et allongement à la rupture des non-tissés	156
5.2.3	Non-tissés réalisés à base de la fibre bicomposante Bico11	157
5.2.3.1	Masse surfacique des non-tissés	157
5.2.3.2	Épaisseur des non-tissés	158
5.2.3.3	Force de rupture et allongement à la rupture des non-tissés réalisés	158
5.3	Analyses des résultats	159
5.3.1	Thermoliage	159
5.3.2	Masse surfacique des non-tissés	160
5.3.3	Épaisseur des non-tissés	161

5.3.4	Force de rupture des non-tissés	161
5.3.5	Allongement à la rupture des non-tissés	163
5.4	Conclusion	165
CHAPITRE 6 EFFET DU POURCETANGE DE FIBRE BICOMPOSANTE SUR LES PERFORMANCES DES NON-TISSÉS À BASE DE FIBRE DE JUTE RECYCLÉ		
6.1	Introduction	167
6.2	Fabrication des non-tissés	167
6.3	Résultats	168
6.3.1	Masse surfacique	168
6.3.2	Épaisseur	168
6.3.3	Force de rupture	169
6.4	Discussion	170
6.5	Conclusion	170
CHAPITRE 7 DISCUSSION GÉNÉRALE		171
CONCLUSION		175
BIBLIOGRAPHIE		177

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Estimation moyenne de la production mondiale de fibres naturelles en million de tonnes par année tiré de (Yan, Chouw et Jayaraman, 2014)	5
Tableau 1.2 Composition chimique d'une sélection de fibres végétales tiré de (Eichhorn, 2009b; Fakirov, 2007; Jawaïd et Abdul Khalil, 2011).....	9
Tableau 1.3 Taux de cristallinité et angle des microfibrilles de certaines fibres naturelles cellulosiques tiré de (Fakirov, 2007; Mwaikambo et Ansell, 1999; Reddy et Yang, 2007).....	13
Tableau 1.4 Propriétés physicomécaniques des fibres naturelles tiré de (Fakirov, 2007; Faruk et al., 2012; Indran et Raj, 2015; Kozłowski, 2012; Savage et Evans, 2014).....	16
Tableau 1.5 Prix des fibres naturelles par rapport à d'autres matériaux	17
Tableau 1.6 Facteurs affectant la qualité de la fibre pendant les différentes étapes de production d'une fibre naturelle tiré de (Dittenber et Gangarao, 2012)	20
Tableau 1.7 Production annuelle de non-tissés en 2011 en volume, million de tonnes (Mt) tiré de (Browaeys, 2012).....	29
Tableau 1.8 Différents procédé de consolidation d'un voile tiré de (Mao, 2014)	39
Tableau 1.9 Comparaison entre les non-tissés consolidés chimiquement et ceux aiguilletés tiré de (Ghosh, 2014).....	42
Tableau 2.1 Résultats individuels par la détermination de diamètre de la fibre de jute recyclée	69
Tableau 2.2 Détermination des diamètres des fibres Bico3 par MEB.....	76
Tableau 2.3 Mesure d'angle de contact de la fibre Bico10	83
Tableau 3.1 Essais préliminaires pour l'optimisation de l'ouvraison.....	88
Tableau 3.2 Variables codées et réelles pour le plan d'expérience.....	89
Tableau 3.3 Résultats des tests pour l'optimisation des paramètres de l'ouvraison	90

XVIII

Tableau 4.1	Plan d'expérience pour l'optimisation de l'ouverture de la fibre de kénaf.....	122
Tableau 4.2	Résultats des tests d'optimisation d'ouvraison pour la fibre de kénaf vierge.....	123
Tableau 4.3	Plan d'expérience pour l'optimisation des paramètres de consolidation des non-tissés de kénaf.....	139
Tableau 4.4	Résultat du plan d'expérience pour l'optimisation des paramètres textiles des non-tissés.....	140
Tableau 4.5	Complément au plan d'expérience pour l'optimisation des paramètres de consolidation pour les non-tissés fabriqués en kénaf.....	141
Tableau 5.1	Tableau récapitulatif des résultats obtenus avec les différentes fibres bicomposantes.....	164

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Production mondiale de fibres naturelles en million de tonnes en 2009 selon la FAO tirée de (Müssig, 2010).....6
Figure 1.2	Structure d'une fibre végétale tirée de (Azwa et al., 2013).....8
Figure 1.3	Structure moléculaire de la cellulose tirée de (Valentin, 2011).....10
Figure 1.4	Les principales liaisons covalentes entre la lignine et les polysaccharides tirée de (Delmas, 2011)11
Figure 1.5	Les trois monomères constitutifs de la lignine tirée de (Schorr, 2014)11
Figure 1.6	Relation entre les composants chimiques des fibres lignocellulosiques et leur dégradation tirée de (Azwa et al., 2013; Graham-Jones, 2016)12
Figure 1.7	Processus de décomposition d'une fibre naturelle14
Figure 1.8	Processus de décomposition d'une fibre végétale14
Figure 1.9	Quelques structures des fibres bicomposantes tirée de (Hindman, 2010)21
Figure 1.10	Les trois armures fondamentales pour les textiles tissés tirée de (Renoud, 1999)23
Figure 1.11	Les deux formes de mailles, jetée et cueillie24
Figure 1.12	Schéma d'une structure textile tressée tirée de (Ratner, 2013)25
Figure 1.13	Exemples de surface de non-tissés différents tirée de (Coste, 2011).....26
Figure 1.14	Production des non-tissés en Europe en 2012 en milliers de tonnes tirée de (Edana, 2015)29
Figure 1.15	Répartition du marché des non-tissés durables en 2011 par secteur en Amérique du nord tirée de (Browaeys, 2012).....30
Figure 1.16	Processus de fabrication d'un non-tissé par voie sèche (mécanique) tirée de (Edana)33

Figure 1.17	Processus de fabrication d'un non-tissé par voie sèche (aérodynamique) tirée de (Edana).....	34
Figure 1.18	Processus de fabrication d'un non-tissé par voie humide tirée de (Edana).....	37
Figure 1.19	Procédé de fabrication d'un non-tissé par voie fondue tirée de (Edana).....	38
Figure 1.20	Processus de consolidation d'un non-tissé par aiguilletage tirée de (Edana).....	40
Figure 1.21	Processus de consolidation chimique d'un non-tissé tirée de (Edana).....	41
Figure 1.22	Processus de consolidation d'un non-tissé par calandrage tirée de (Edana).....	43
Figure 1.23	Disposition de fibres naturelles utilisées comme renfort dans le marché européen tirée de (Shah, 2013; Shah, Schubel et Clifford, 2013).....	45
Figure 1.24	Organes de la carde et leurs garnitures (Fayala, 2013).....	54
Figure 1.25	Principe de fonctionnement d'un étaleur-nappeur	55
Figure 2.1	Dépôt d'une goutte d'eau sur une pastille préparée avec la fibre de kénaf vierge.....	61
Figure 2.2	Courbe de TGA pour l'analyse de la fibre du kénaf.....	62
Figure 2.3	Graphe d'analyse DSC de la fibre bicomposante (Exo up) (Bico4).....	63
Figure 2.4	Cylindre en plexiglas pour ouvraison des fibres.....	64
Figure 2.5	La carde et l'étaleur nappeur de la ligne non-tissé du Groupe CTT	65
Figure 2.6	Presse chauffante utilisée pour le thermoliage des échantillons des non-tissés produits	66
Figure 2.7	Distribution des fibres de jute selon leur longueur	68
Figure 2.8	Distribution des fibres de jute selon la force de rupture (en cN)	70
Figure 2.9	Perte de masse du jute recyclé en fonction de la température	71
Figure 2.10	Analyse de la composition de la fibre du jute recyclé	71

Figure 2.11	Graphe de distribution des mesures de longueur de la fibre de kénaf vierge.....	72
Figure 2.12	Mesure de diamètre de la fibre de kénaf vierge à l'aide du MEB	73
Figure 2.13	Graphe de distribution des allongements à la rupture de la fibre du kénaf.....	74
Figure 2.14	Analyse de composition de la fibre de kénaf	74
Figure 2.15	Distribution des fibres selon leurs longueurs en mm.....	75
Figure 2.16	Distribution des fibres selon l'allongement	77
Figure 2.17	Température de fusion de la fibre Bico3 (Exo up)	77
Figure 2.18	Perte de masse du bico3 en fonction de la température	78
Figure 2.19	Analyse de composition de la fibre Bico3	79
Figure 2.20	Distribution de la fibre Bico10 selon la longueur	79
Figure 2.21	Mesure de diamètre pour la fibre Bico10	80
Figure 2.22	Graphe de distribution de l'allongement à la rupture de la fibre Bico10	81
Figure 2.23	Température de fusion de la gaine et du cœur de la fibre Bico10 (Exo up)	81
Figure 2.24	Température de décomposition de la fibre Bico10	82
Figure 2.25	Graphe IFTR de la fibre Bico10	82
Figure 2.26	Graphe de distribution de la longueur de la fibre Bico11	83
Figure 2.27	Mesure de diamètre de la fibre Bico11	84
Figure 2.28	Allongement à la rupture de la fibre Bico11	84
Figure 2.29	Température de fusion de la fibre Bico11 (Exo up)	85
Figure 2.30	Graphe de TGA de la fibre Bico11	85
Figure 2.31	Analyse de composition de la fibre Bico11 à l'aide d'un IFTR	86
Figure 2.32	Dépôt d'une goutte d'eau sur une pastille préparée avec la fibre Bico11	86

Figure 3.1	Masse surfacique des non-tissés fabriqués en jute recyclée en fonction de la vitesse de cardage	92
Figure 3.2	Épaisseur des non-tissés fabriqués en jute recyclée en fonction de la vitesse de cardage	93
Figure 3.3	Force de rupture de différents non-tissés en fonction de la vitesse de cardage	94
Figure 3.4	Valeur de la force de rupture des différents non-tissés en fonction de la masse volumique en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)	94
Figure 3.5	Valeur de la force de rupture des différents non-tissés en fonction de la masse volumique en sens travers (la ligne est un guide pour les yeux)	95
Figure 3.6	Effet de la vitesse de la carte sur la force de rupture des non-tissés en sens machine	95
Figure 3.7	Dessin illustrant la profondeur des aiguilles lors de l'aiguilletage des non-tissés.....	97
Figure 3.8	Masse surfacique des non-tissés fabriqués en jute recyclé en fonction de la profondeur des aiguilles	97
Figure 3.9	Épaisseur des non-tissés réalisés avec le jute recyclé en fonction de la profondeur des aiguilles.....	98
Figure 3.10	Variation de la force de rupture des non-tissés en jute recyclé en fonction de la profondeur des aiguilles.....	99
Figure 3.11	Force de rupture des différents non-tissés de jute recyclé en sens machine en fonction de la masse volumique (la ligne est un guide pour les yeux).....	100
Figure 3.12	Force de rupture des différents non-tissés de jute recyclé en sens travers en fonction de la masse volumique (la ligne est un guide pour les yeux).....	100
Figure 3.13	Force de rupture des non-tissés de jute recyclé en fonction de la profondeur d'aiguilletage en sens machine	101
Figure 3.14	Force de rupture des non-tissés de jute recyclée en fonction de la profondeur d'aiguilletage en sens travers.....	101

Figure 3.15	Masse surfacique des non-tissés fabriqués en jute recyclé en fonction de la fréquence d'aiguilletage	103
Figure 3.16	Épaisseur des non-tissés fabriqués en jute recyclé en fonction de la fréquence d'aiguilletage	103
Figure 3.17	Force de rupture des non-tissés de jute recyclé fabriqués en fonction de la fréquence d'aiguilletage	104
Figure 3.18	Force de rupture des non-tissés de jute recyclé réalisés en sens machine en fonction de la masse volumique (la ligne est un guide pour les yeux).....	105
Figure 3.19	Force de rupture des non-tissés de jute recyclé réalisés en sens travers en fonction de la masse volumique (la ligne est un guide pour les yeux)	105
Figure 3.20	Force de rupture des non-tissés en jute recyclé en fonction de la fréquence d'aiguilletage en sens machine.....	106
Figure 3.21	Force de rupture des non-tissés en jute recyclé en fonction de la fréquence d'aiguilletage en sens travers	107
Figure 3.22	Masse surfacique des non-tissés de jute recyclé réalisés en fonction de la vitesse du tapis d'aiguilleteuse	108
Figure 3.23	Épaisseur des différents non-tissés de jute recyclé réalisés en fonction de la vitesse du tapis de l'aiguilleteuse	109
Figure 3.24	Force de rupture des non-tissés de jute recyclé réalisés en fonction de la vitesse du tapis de l'aiguilleteuse.....	109
Figure 3.25	Force de rupture des non-tissés réalisés en fonction de la masse volumique en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux).....	110
Figure 3.26	Force de rupture des non-tissés réalisés en fonction de la masse volumique en sens travers (la ligne est un guide pour les yeux)	110
Figure 3.27	Force de rupture des non-tissés en fonction de la vitesse du tapis de l'aiguilleteuse en sens machine	111
Figure 3.28	Force de rupture des non-tissés de jute recyclé en fonction de la vitesse du tapis de l'aiguilleteuse en sens travers.....	112
Figure 3.29	Non-tissé thermoliés à 210°C	113
Figure 3.30	Photos au MEB des non-tissés thermoliés à différentes températures	114

Figure 4.1	Comparaison de la masse surfacique des non-tissés en kénaf vierge par rapport aux non-tissés en jute recyclé.....	118
Figure 4.2	Comparaison de l'épaisseur des non-tissés en kénaf vierge par rapport aux non-tissés en jute recyclé.....	119
Figure 4.3	Comparaison de la force de rupture des non-tissés de kénaf vierge par rapport aux non-tissés de jute recyclé.....	119
Figure 4.4	Force de rupture des non-tissés en fonction de la masse volumique en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux).....	120
Figure 4.5	Force de rupture des non-tissés en fonction de la masse volumique en sens travers (la ligne est un guide pour les yeux)	120
Figure 4.6	Masse surfaciques des non-tissés réalisés en kénaf en fonction de la vitesse de carde	125
Figure 4.7	Épaisseur des non-tissés réalisés en kénaf en fonction de la vitesse de la carde	126
Figure 4.8	Force de rupture des non-tissés réalisés en kénaf en fonction de la vitesse de la carde	127
Figure 4.9	Force de rupture en fonction de la masse volumique des non-tissés en kénaf réalisés en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)	127
Figure 4.10	Force de rupture en fonction de la masse volumique des non-tissés en kénaf réalisés en sens travers (la ligne est un guide pour les yeux).....	128
Figure 4.11	Masse surfacique des non-tissés réalisés en kénaf en fonction de la profondeur des aiguilles de l'aiguilleteuse	129
Figure 4.12	Épaisseur des non-tissés réalisés en kénaf en fonction de la profondeur des aiguilles.....	130
Figure 4.13	Force de rupture des non-tissés réalisés en kénaf en fonction de la profondeur des aiguilles.....	130
Figure 4.14	Force de rupture en fonction de la masse volumique des non-tissés en kénaf en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux).....	131
Figure 4.15	Force de rupture en fonction de la masse volumique des non-tissés en kénaf en sens travers (la ligne est un guide pour les yeux).....	132
Figure 4.16	Force de rupture en fonction de la profondeur des aiguilles pour des échantillons de kénaf en sens machine	133

Figure 4.17	Force de rupture en fonction de la profondeur des aiguilles pour des échantillons de kénaf en sens travers	133
Figure 4.18	Masse surfacique des non-tissés réalisés en kénaf en fonction de la fréquence d'aiguilletage	135
Figure 4.19	Épaisseur des non-tissés réalisés en kénaf en fonction de la fréquence d'aiguilletage	135
Figure 4.20	Force de rupture des non-tissés réalisés en kénaf en fonction de la fréquence d'aiguilletage	136
Figure 4.21	Force de rupture des non-tissés en kénaf en fonction de la masse volumique en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)	137
Figure 4.22	Force de rupture des non-tissés en kénaf en fonction de la masse volumique en sens travers (la ligne est un guide pour les yeux)	137
Figure 4.23	Force de rupture normalisée par masse volumique en fonction de la fréquence d'aiguilletage des échantillons de kénaf en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)	142
Figure 4.24	Force de rupture normalisée par masse volumique en fonction de la vitesse du tapis de l'aiguilleteuse des échantillons de kénaf en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)	143
Figure 4.25	Force de rupture normalisée par la masse volumique en fonction de la profondeur d'aiguilletage des échantillons de kénaf en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)	144
Figure 4.26	Force de rupture normalisée par la masse volumique en fonction de la densité d'aiguilletage en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)	145
Figure 4.27	Force de rupture normalisée par la masse volumique en fonction de la densité d'aiguilletage en sens travers (la ligne est un guide pour les yeux)	145
Figure 4.28	Force de rupture en fonction de la température de thermoliage pour les non-tissés en kénaf en sens machine	147
Figure 4.29	Force de rupture en fonction de la masse volumique pour trois températures de thermoliage des échantillons de kénaf en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)	147

Figure 4.30	Force de rupture en fonction de la masse volumique pour trois températures de thermoliage des échantillons de kénaf en sens travers (la ligne est un guide pour les yeux)	148
Figure 4.31	Force de rupture en fonction de la masse volumique pour trois températures de thermoliage pour les non-tissés en kénaf en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux).....	148
Figure 4.32	Force de rupture en fonction de la température de thermoliage de thermoliage des échantillons en kénaf en sens machine	149
Figure 5.1	Masse surfacique des non-tissés fabriqués avec Bico3.....	153
Figure 5.2	Épaisseur des non-tissés fabriqués avec Bico3	153
Figure 5.3	Force de rupture des non-tissés réalisés avec Bico3	154
Figure 5.4	Allongement à la rupture (%) des non-tissés réalisés avec Bico3	154
Figure 5.5	Masse surfacique des non-tissés réalisés avec Bico10	155
Figure 5.6	Épaisseur des non-tissés réalisés avec Bico10.....	156
Figure 5.7	Force de rupture des non-tissés réalisés avec Bico10	156
Figure 5.8	Allongement à la rupture des non-tissés réalisés avec Bico10	157
Figure 5.9	Masse surfacique des non-tissés réalisés avec Bico11	157
Figure 5.10	Épaisseur des non-tissés réalisés avec Bico11	158
Figure 5.11	Force de rupture des non-tissés réalisés avec Bico11	158
Figure 5.12	Allongement à la rupture des non-tissés réalisés avec Bico11	159
Figure 5.13	Aspect des non-tissés thermoliés a) Bico3 b) Bico10 c) Bico11	160
Figure 5.14	Comparaison des masses surfaciques des différents non-tissés réalisés.....	160
Figure 5.15	Épaisseur des différents non-tissés réalisés	161
Figure 5.16	Comparaison des forces de rupture des différents non-tissés réalisés	162
Figure 5.17	Force de rupture en fonction de la masse volumique en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)	162

Figure 5.18	Force de rupture en fonction de la masse volumique en sens travers (la ligne est un guide pour les yeux)163
Figure 5.19	Comparaison de l'allongement à la rupture des non-tissés réalisés.....164
Figure 6.1	Masse surfacique des non-tissés réalisés à partir de différents pourcentages de la fibre bicomposante168
Figure 6.2	Épaisseur des non-tissés réalisés avec différents pourcentages de la fibre bicomposante.....169
Figure 6.3	Force de rupture des non-tissés réalisés avec différents pourcentages de la fibre bicomposante169

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASTM	American Society for Testing and Material
Bico	Bicomposante
CD	Cross-machine Direction
CoPA6	Copolyamide
CoPET	Copolymère de Poly(Téréphtalate) d'Éthylène
CTT	Centre de Technologies Textile
CV	Coefficient de Variation
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EDANA	European Nonwovens and Disposables Association
HDPE	Polyéthylène à Haute Densité
HR%	Humidité Relative
IFTR	Infrarouge à Transformée de Fourier
ISO	International Standard Organisation
MD	Machine Direction
MEB	Microscopie Électronique à Balayage
NaOH	Hydroxyde de sodium
PA6	Polyamide
PET	Poly(Téréphtalate) d'Éthylène
PLEA	Poly (Ethylene adipate-co-L-lactic Acid)
PP	Polypropylène
PVA	PolyAcétate de Vinyle

XXX

SM Sens Machine

ST Sens Travers

TGA ThermoGravimetric Analysis

UV Ultra-Violet

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE BASE

m mètre

°C degré Celsius

Aire

m² mètre carré

cm² centimètre carré

Volume

m³ mètre cube

cm³ centimètre cube

UNITÉS GÉOMÉTRIQUES

Longueur

km kilomètre

m mètre

cm centimètre

mm millimètre

µm micromètre

UNITÉS DE MASSE

Masse

kg kilogramme

g gramme

Masse volumique

g/cm³ gramme par centimètre cube

UNITÉS MÉCANIQUES

Vitesse

m/min mètre par minute

Angle

° degré

UNITÉS DE TEMPS

h heure

min minute

s seconde

Contrainte, pression

psi livre-force par pouce carré

MPa mégapascale

kPa kilopascale

UNITÉS DE TEMPS

Vitesse angulaire

r/min tour par minute

Force

N newton

cN centinewton

INTRODUCTION

La société humaine a toujours utilisé les plantes depuis le début des temps. Des vêtements et des cordes ont été fabriqués par nos ancêtres à partir des végétaux poussant à l'état sauvage (Akil et al., 2011). Dans une optique de développement durable, la recherche dans les matériaux composites est actuellement dirigée vers l'utilisation des fibres naturelles en alternative aux fibres synthétiques comme renfort pour les pièces composites à matrice thermoplastique et thermodurcissable, en raison de leur caractère renouvelable (Aziz et Ansell, 2004). Ces fibres de renfort permettent une reprise des contraintes transmises par la matrice et améliorent sa résistance et sa rigidité. En particulier, les fibres naturelles apparaissent comme un substitut intéressant pour remplacer les fibres de verre car elles sont moins denses et moins chères, et elles peuvent être facilement recyclées. Cependant, étant donné qu'elles sont hydrophiles, les fibres naturelles doivent d'abord être traitées pour augmenter leur compatibilité avec les matrices polymériques hydrophobes.

Actuellement, plusieurs chercheurs sont dans une voie de développement des matériaux d'ingénierie de haute performance à partir de ressources renouvelables (Pothan, Oommen et Thomas, 2003). Les avantages écologiques des matières premières renouvelables sont clairs : ils économisent des ressources non-renouvelables précieuses, sont écologiques, ont de bonnes propriétés mécaniques spécifiques, offrent des performances intéressantes en termes d'isolation thermique et acoustique et sont non toxiques pour la santé et l'environnement (Ridzuan et al., 2016). Les fibres naturelles ont déjà fait leur entrée comme matériau de renfort dans des pièces automobiles composites non-structurelles. Les fibres naturelles comme le sisal, le jute, le coco sont maintenant utilisés dans des matrices thermodurcissables et thermoplastiques.

La prochaine étape est leur emploi dans les pièces structurelles. Cependant, le niveau d'exigences est dans ce cas beaucoup plus élevé, à la fois en termes de performances en valeur absolue, en particulier mécanique, mais également en termes de variabilité, qui doit être la plus faible possible. La fibre naturelle peut également affecter la performance

biologique des composites en raison de leur caractère hygroscopique (Ridzuan et al., 2016). Elle doit pouvoir conserver ses performances suite au procédé de mise en forme de la pièce composite qui peut éventuellement impliquer une exposition à des températures élevées (El-Sabbagh, Steuernagel et Ring, 2016).

Le but de ce projet est donc d'explorer la possibilité de produire des renforts non-tissés à base de fibres naturelles pour des pièces composites structurelles. Des types de fibres ont été sélectionnés pour les travaux : du jute recyclé et du kéraf vierge. L'étude commence par l'analyse des fibres utilisées pour la fabrication des non-tissés par voie sèche et thermoliage. Dans un second temps, une optimisation est réalisée des différents paramètres textiles du procédé de mise en forme du non-tissé et de la température de thermoliage pour l'obtention des performances mécaniques les plus élevées possible pour les non-tissés. Les travaux incluent également une analyse de l'effet de l'hydrophobicité de la fibre synthétique utilisée comme liant et de l'effet du pourcentage de cette fibre sur les performances des non-tissés.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Généralités

1.1.1 Fibres textiles

Les fibres textiles sont classées principalement en fonction de leur origine (Bralla, 2007). Il existe deux grandes familles, naturelle et artificielle. Toutes les fibres d'origine naturelle, détaillées dans la section suivante, sont issues soit d'une source végétale, d'une source animale, ou minérale. En ce qui concerne les fibres artificielles, on parle de fibres organiques et inorganiques (E.T.N., 2014; Eichhorn, 2009b). Les fibres artificielles organiques comprennent les fibres produites à partir de la cellulose régénérée comme la viscose, le modal, le cupros, l'acétate, etc. ou de polymères fabriqués comme l'acrylique, le nylon, le polyéthylène, le polypropylène, etc. Les fibres inorganiques comprennent toutes les fibres produites à partir de métaux ou de céramiques.

1.1.2 Fibres naturelles

Les fibres naturelles sont considérées comme des matériaux qui répondent mieux au souci de respecter l'environnement que les fibres artificielles, grâce à leur nature renouvelable et biodégradable (Milanese, Cioffi et Voorwald, 2012; Satyanarayana et al., 1990; Thakur, Thakur et Gupta, 2014) . Elles offrent aussi un faible coût et de bonnes performances. Elles présentent aujourd'hui une bonne alternative aux renforts en fibres synthétiques. Parmi les propriétés spécifiques des fibres naturelles, on trouve une faible densité, une bonne ténacité, la recyclabilité, un faible coût, la résistance à la corrosion, et de bonnes propriétés thermiques. Ces caractéristiques spécifiques ont attiré l'attention des manufacturiers pour une utilisation des fibres naturelles dans la production des matériaux composites à faible poids.

1.1.3 Classement des fibres naturelles

Les fibres naturelles sont généralement classées selon leur origine, soit animale, végétale ou minérale (Eichhorn, 2009b). Chaque classe contient plusieurs sources. Par exemple les fibres végétales peuvent être récoltées à partir des tiges, des feuilles ou des graines de différentes plantes. En ce qui concerne les fibres issues de la tige, elles sont appelées les fibres « libériennes ». Parmi ces fibres, on trouve le lin, le chanvre, et le jute. En ce qui concerne les fibres issues de feuilles, comme le sisal, et l'abaca, elles sont plus grossières que les fibres libériennes, et généralement utilisées dans les cordes de liage (Dittenber et Gangarao, 2012). Finalement, les fibres obtenues à partir des graines et des feuilles comme le coton et le coco ont tendance à être plus grossières et plus fragiles que les fibres libériennes.

En général, les différentes fibres végétales sont extraites de (Kozlowski, 2012) :

- Bois : bois dur ou bois d'œuvre.
- Céréales : blé, maïs et orge.
- Fruit : noix de coco.
- Graine : coton, kapok, etc..
- Plantes libériennes : lin, chanvre, jute, kénaf, ramie, etc..
- Tige : maïs, avoine, riz, etc..
- Canne : bambou, bagasse, etc..
- Feuille : abaca, banane, sisal, ananas, etc..

En ce qui concerne les fibres animales, leur composition est contrôlée par la source :

- Kératine : soit à base de :
 - Laine : laine d'alpaga, laine d'angora, laine de chèvre ou cachemire, etc..
 - Cheveux : crinière de cheval, cheveux humains, crinière du yak, etc..
 - Plume : canard, oie, etc..
- Fibroïne : Soie d'araignées, bombyx du mûrier, etc..
- Collagène : les tendons.

Et finalement les fibres minérales sont issues de :

- Argile : fibre de palygorskite ou l’halloysite.
- Inosilicates : wollastonite, amiante.
- Céramique : fibre de verre.

En ce qui concerne la production de ces fibres, chacune des fibres se cultive dans un environnement spécifique. Yan et al. (Yan, Chouw et Jayaraman, 2014) ont compilé la production annuelle ainsi que les principaux pays producteurs pour une série de fibres végétales (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 Estimation moyenne de la production mondiale de fibres naturelles en million de tonnes par année tiré de (Yan, Chouw et Jayaraman, 2014)

Fibres	Production annuelle (Million de tonnes)	Principaux pays producteurs
Lin*	0,5 – 1,5	Chine, France, Belgique, Belarus, Ukraine
Chanvre**	0,10	Chine
Jute	2,5	Inde, Bengladesh
Kénaf	0,45	Chine, Inde, Thaïlande
Ramie	0,15	Chine
Sisal	0,30	Brésil, Chine, Tanzanie, Kenya
Coton	25	Chine, USA, Inde, Pakistan
Abaca	0,10	Philippines, Équateur
Noix de coco	0,45	Inde, Sri Lanka
Soie	0,10	Chine, Inde

* : La production réelle du lin a été sous-estimée parce que la production de lin au Canada n’est pas prise en considération dans le calcul.

** : La Chine a annoncé son intention d’augmenter la production de chanvre utilisé pour les textiles à 1,5 million de tonnes de fibre par année pendant les prochaines années.

Ces statistiques correspondent parfaitement à celles publiées par la FAO (Organisation des Nations Unies pour l’Alimentation et l’Agriculture) en 2009 concernant la production mondiale des différentes fibres naturelles (Figure 1.1).

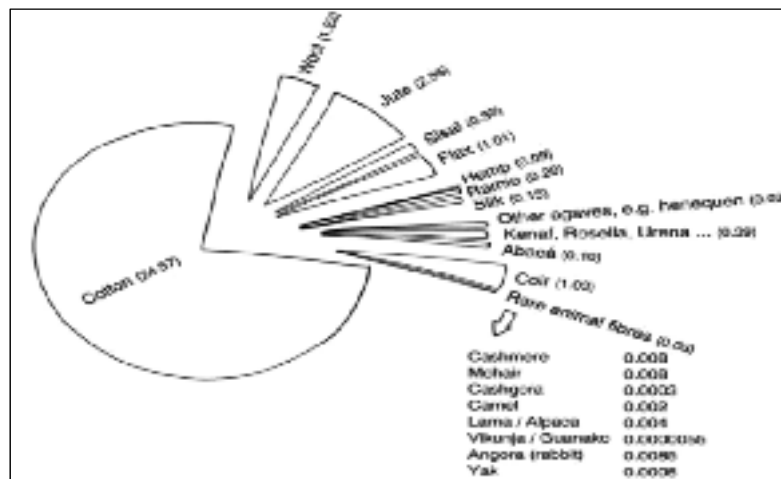


Figure 1.1 Production mondiale de fibres naturelles en million de tonnes en 2009 selon la FAO tirée de (Müssig, 2010)

1.1.4 Domaines d’application

La diversité des fibres naturelles permet une vaste utilisation dans presque tous les domaines, en partant de ce qui est simple comme la lingerie jusqu’aux industries les plus techniques comme l’aviation et l’espace. La première application des fibres végétales dans le domaine spécifique des géosynthétiques correspond à l’utilisation d’un géotextile de coton dans la construction des routes qui a eu lieu aux États-Unis en 1930 (Kozlowski, 2012).

Dans le domaine des matériaux fibreux, une première révolution pourrait être le remplacement progressif de la fibre de verre dans les composites, qui représente, à l’heure actuelle, le concurrent principal des fibres naturelles (Scarponi et Andreotti, 2009). Une telle révolution intéressera l’agriculture, les marchés internationaux, l’industrie, les centres de recherches, etc. Parmi les avantages des composites à base de fibres naturelles figure la possibilité de les brûler pour produire de l’énergie.

Grâce à la durabilité, la biocompatibilité, les bonnes propriétés mécaniques et aussi la possibilité de produire de l'énergie lors du recyclage, les fibres naturelles peuvent être une bonne alternative pour plusieurs domaines comme : l'agriculture, la construction, l'industrie automobile, les télécommunications, l'ingénierie biomédicale, etc.

1.2 Fibres naturelles

1.2.1 Propriétés physiques

Les fibres naturelles peuvent être considérées comme des composites de fibrilles de cellulose creuses maintenues ensemble par une matrice composée de la lignine et d'hémicellulose (John et Thomas, 2008; Thomas, 2008). Chaque fibrille a une structure stratifiée complexe constituée d'une paroi principale mince dont la première couche est déposée au cours de la croissance des cellules entourant une paroi secondaire (Figure 1.2). La paroi cellulaire de la fibre n'est pas une membrane homogène. Elle est constituée de trois couches dont la couche intermédiaire définit les propriétés mécaniques de la fibre. Cette dernière couche est formée d'une série de microfibrilles cellulaires enroulées en hélice et formées à partir de molécules de cellulose à chaîne longue. L'angle entre l'axe de la fibre et les microfibrilles est appelé angle microfibrillaire. Sa valeur varie d'une fibre à une autre.

Transversalement, toutes les fibres naturelles contiennent une cavité centrale qu'on appelle le lumen. Ce dernier a une forme ronde, elliptique ou polygonale. Sa taille dépend de la source de la fibre ainsi que l'épaisseur de la paroi de la cellule (Reddy et Yang, 2005). Par exemple, la présence d'un lumen creux diminue la densité apparente de la fibre et agit comme un isolant thermique et acoustique.

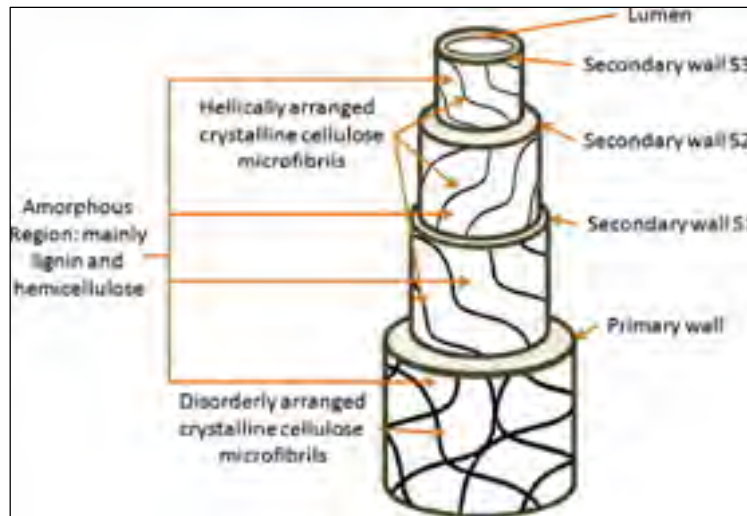


Figure 1.2 Structure d'une fibre végétale tirée de (Azwa et al., 2013)

1.2.2 Propriétés chimiques

1.2.2.1 Caractérisation chimique des fibres végétales

Toutes les fibres végétales sont constituées de trois éléments essentiels. Il s'agit en premier lieu de la cellulose qui est présente en plus grande quantité, d'hémicellulose en deuxième lieu et enfin de lignine. On peut trouver aussi de la pectine et de la cire, mais avec des pourcentages très faibles par rapport aux trois composés principaux. Le tableau ci-dessous montre la composition de quelques fibres végétales.

Tableau 1.2 Composition chimique d'une sélection de fibres végétales tiré de (Eichhorn, 2009b; Fakirov, 2007; Jawaïd et Abdul Khalil, 2011)

Fibre	Cellulose (%m)	Hémicellulose (%m)	Lignine (%m)	Pectine (%m)	Teneur en humidité (%m)
Lin	60 – 81	14 – 20,6	2,2 – 5	1 – 4	8 – 12
Chanvre	70 – 92	17,9 – 22,4	3 – 5,7	0,9 – 1	6,2 – 12
Jute	51 – 84	12 – 20,4	5 – 13	0,2	12,5 – 13,7
Kénaf	44 – 87	21,5 – 22	8 – 19	2 – 5	-----
Ramie	68 – 76,2	13 – 16,7	0,6 – 1	1,9 – 2	7,5 – 17
Sisal	43 – 78	10 – 24	4 – 14	0,8 – 10	10 – 22
Coton	82 – 96	2 – 6,4	0 – 5	0 – 1	7,85 – 8,5
Banane	60 – 65	6 – 19	5 – 12	3 – 5	10 – 12
Feuille d'ananas	70 – 82	16 – 19	5 – 12,7	2 – 3	11,8
Noix de coco	32 – 46	0,15 – 0,25	40 – 46	3 – 4	8
Kapok*	13 – 64	--	13 – 21,5	--	--

* : les autres constituants chimiques du kapok sont le pentosan et le xylan

1.2.2.2 Les différents composants chimiques des fibres végétales

La cellulose

La cellulose reste la principale molécule dans les parois cellulaires des plantes végétales (Wertz, 2010). C'est une molécule qui se trouve de manière abondante dans l'univers. De fait, il y a plus de cellulose dans la biosphère que toute autre substance. En 1930, il a été démontré que la cellulose est un polymère basé sur un motif de glucose. Il s'agit d'un polysaccharide semi-cristallin composé d'unités de D-anhydroglucose (Figure 1.3) liées les uns aux autres par des chaînes de β -1,4-glucosidic. Son degré de polymérisation (DP) est d'environ 10000 (John et Thomas, 2008). Chaque unité répétitive contient trois groupements

hydroxyyles. C'est le groupement hydroxyle qui est responsable des propriétés hydrophiles de la cellulose (Li, Tabil et Panigrahi, 2007). En général, les fibres naturelles ayant une teneur plus élevée en cellulose présentent une meilleure stabilité thermique (Moriani et al., 2014). Cette résistance à la dégradation au cours de la fabrication ou lors du cycle de vie du produit peut être très intéressante lorsqu'elles sont utilisées comme renforts dans les matériaux composites.

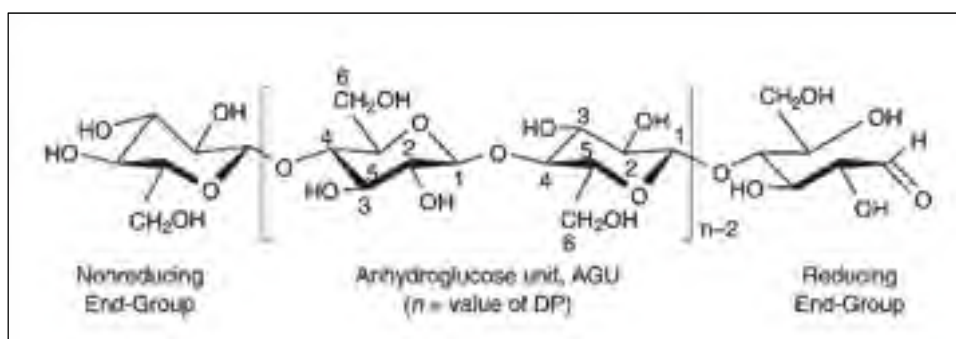


Figure 1.3 Structure moléculaire de la cellulose tirée de (Valentin, 2011)

L'hémicellulose

L'hémicellulose est une substance chimique qui se trouve à des pourcentages différents dans toutes les plantes vertes (Wertz, 2011). Cependant, étant donné que l'hémicellulose prend différentes formes selon la structure végétale, c'est un composé très mal connu. Le xylane est le glucide principalement trouvé dans l'hémicellulose (Pérez et al., 2002). Généralement les hémicelluloses sont des polysaccharides composés de résidus de β -(1-4)-glucoses et de courtes chaînes latérales de xylose, galactose et fucose. L'hémicellulose est une substance amorphe partiellement soluble dans l'eau (Abdul Khalil et al., 2015). Son degré de polymérisation (DP) est d'environ 50-300 (John et Thomas, 2008). Son rôle dans les parois cellulaires de la fibre est de créer un lien entre les fibrilles de cellulose et la lignine.

La lignine

La lignine reste le polymère le plus abondant dans le monde après la cellulose. La lignine est un polymère qui a une structure aromatique tridimensionnelle (Abdul Khalil et al., 2015). Elle peut être traitée sous différentes formes selon l'usage auquel elle est destinée. Elle joue principalement le rôle de matériau de renfort (Figure 1.4) entre les molécules de cellulose et d'hémicellulose (Delmas, 2011; Forêts, 2013).

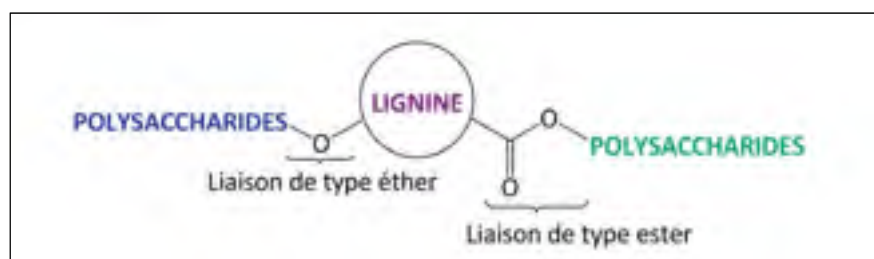


Figure 1.4 Les principales liaisons covalentes entre la lignine et les polysaccharides tirée de (Delmas, 2011)

En ce qui concerne sa structure, la lignine a une structure amorphe, poly-phénolique non soluble dans l'eau. Les trois monomères principaux à la base de la lignine sont présentés à la Figure 1.5.

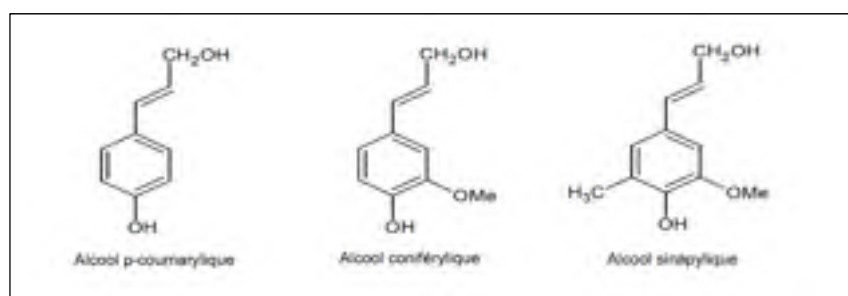


Figure 1.5 Les trois monomères constitutifs de la lignine tirée de (Schorr, 2014)

1.2.2.3 Dégradation de différents composés chimiques de la fibre végétale

Comme il a été mentionné ci-dessous, les fibres cellulosiques contiennent plusieurs composants chimiques. Chacun de ces composants est responsable d'une ou de plusieurs propriétés de la fibre. Ils sont également à l'origine de la sensibilité des fibres cellulosiques aux différents agents de dégradation environnementale. La figure suivante (Figure 1.6) présente les différents modes de dégradation de la fibre végétale ainsi que les composants chimiques qui en sont responsables.

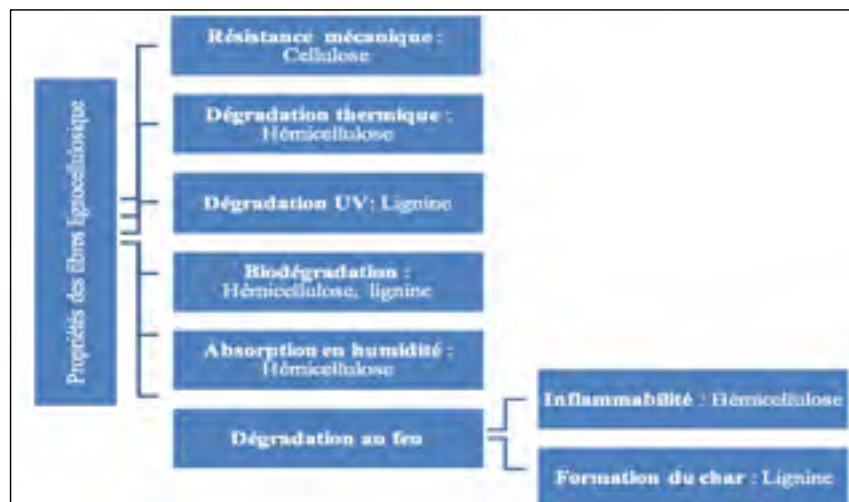


Figure 1.6 Relation entre les composants chimiques des fibres lignocellulosiques et leur dégradation tirée de (Azwa et al., 2013; Graham-Jones, 2016)

1.2.2.4 Le taux de cristallinité

Le taux de cristallinité est un paramètre important des matériaux (Fakirov, 2007; Mwaikambo et Ansell, 1999). Il permet de mesurer la proportion de matière se trouvant dans un état cristallin. Le taux de cristallinité est défini par le rapport de la masse des phases cristallines par rapport à la masse de l'échantillon étudié. C'est un paramètre important puisqu'il contrôle la microstructure du matériau, ce qui affecte les propriétés de la matière comme la densité, le module de Young, l'allongement à la rupture, etc.

En ce qui concerne les fibres naturelles, le tableau suivant (Tableau 1.3) présente les valeurs de taux de cristallinité et de l'angle des microfibrilles de certaines fibres. Il est à noter que la cristallinité diminue avec les traitements chimiques, ce qui a des conséquences par exemple pour les applications composites (Fakirov, 2007).

Tableau 1.3 Taux de cristallinité et angle des microfibrilles de certaines fibres naturelles cellulosiques tiré de (Fakirov, 2007; Mwaikambo et Ansell, 1999; Reddy et Yang, 2007)

Fibre	Taux de cristallinité (%)	Angle des microfibrilles (°)
Lin	65 – 70	6 – 10
Chanvre	88	9 – 10
Jute	78	7 – 9
Kénaf	61 – 69	10
Ramie	-	7,5 – 12
Sisal	71	10 – 12 / 20
Bagasse (canne de sucre)	47	-
Feuille d'ananas	55 – 75	8 – 15
Noix de coco	-	30 – 45
Banane	-	10 – 12

1.2.3 Propriétés thermiques

Les fibres naturelles sont composées de matériaux organiques, ce qui, par conséquent, peut influencer les performances thermiques de la fibre. Leur sensibilité à la dégradation thermique peut générer des changements physico-chimiques au niveau de la fibre (Saheb et Jog, 1999).

Les propriétés thermiques peuvent être étudiées avec la TGA (Thermogravimetric analysis) ou la DSC (Differential Scanning Calorimetry). Par exemple les figures ci-dessous (Figure

1.7 et Figure 1.8) représentent deux graphes de TGA et DSC respectivement pour une fibre végétale typique.

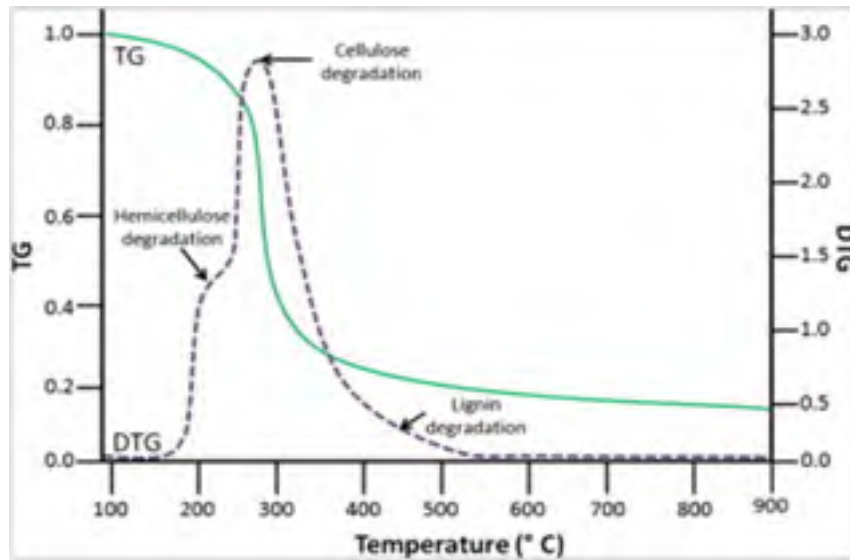


Figure 1.7 Processus de décomposition d'une fibre naturelle végétale selon la TGA tirée de (Azwa et al., 2013)

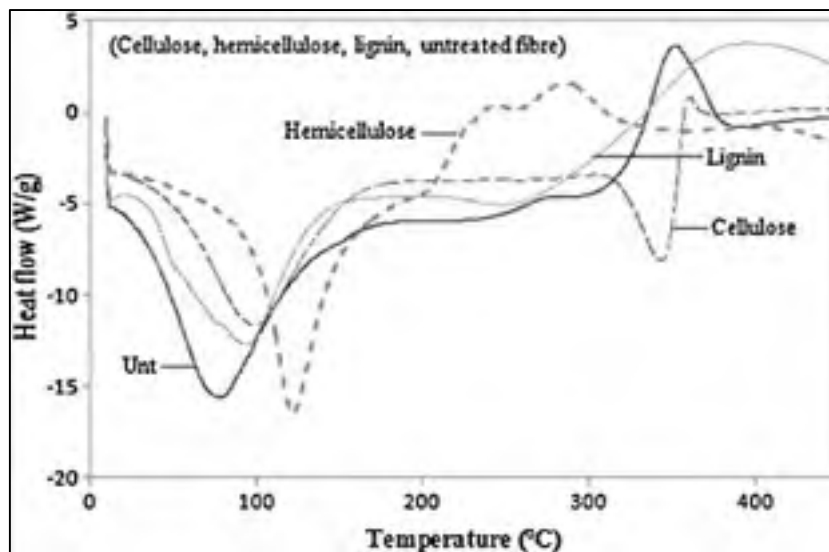


Figure 1.8 Processus de décomposition d'une fibre végétale selon la DSC tirée de (Kabir et al., 2013)

Les résultats des analyses thermiques des fibres lignocellulosiques montrent que le comportement thermique de ces fibres peut être divisé en trois régions principales (Ornaghi Junior, Zattera et Amico, 2014). La première région présente la perte ou la libération d'humidité (autour de 100°C). Certaines variations peuvent être remarquées selon la fibre, ce qui peut être attribué à la variété des fibres étudiées, de l'âge des plantes, etc. La deuxième région est celle associée à la perte de poids principal en raison de la pyrolyse des composés organiques de la fibre. La troisième région correspond à la décomposition thermique finale de la fibre par combustion des cendres.

La plupart des processus de décomposition de fibres ligno-cellulosiques sont similaires. Approximativement 60% de la décomposition thermique des fibres naturelles s'effectue entre 215 et 310 °C (Azwa et al., 2013). En ce qui concerne chaque composant, l'hémicellulose est le principal composant responsable de l'absorption de l'humidité : elle se dégrade plus rapidement que la cellulose et la lignine (Kabir et al., 2013; Ornaghi Junior, Zattera et Amico, 2014). La cellulose montre une meilleure stabilité thermique par rapport aux autres composants et la lignine se dégrade dans une large plage de températures.

1.2.4 Propriétés physicomécaniques

L'émergence des fibres naturelles dans des domaines spécifiques comme l'automobile, le bâtiment, etc. est due à leurs performances mécaniques spécifiquement élevées. Le tableau suivant montre les propriétés physicomécaniques d'une sélection de fibres naturelles. Ces propriétés sont définies par la composition chimique de la fibre, ainsi que par d'autres facteurs naturels.

Tableau 1.4 Propriétés physicomécaniques des fibres naturelles tiré de (Fakirov, 2007; Faruk et al., 2012; Indran et Raj, 2015; Kozlowski, 2012; Savage et Evans, 2014)

Fibre	Résistance en traction (MPa)	Module de Young (GPa)	Allongement à la rupture (%)	Densité (g/cm ³)	Humidité (%)	Longueur (mm)	Diamètre (µm)
Lin	343 – 1500	27 – 80	2,7 – 3,2	1,4 – 1,5	3,9	100	-----
Chanvre	580 – 1110	3 – 90	1,4 – 4,7	1,4 – 1,5	6,2	25	-----
Jute	187 – 773	3 – 55	1,4 – 3,1	1,3 – 1,5	1.1	60	40 – 350
Kénaf	427 – 930	23 – 53	1,6	1,31	6 – 12	10	65 – 71
Ramie	220 – 938	24 – 128	2 – 3,8	1,5	7,5 – 17	120	50
Sisal	511 – 635	9 – 22	2,0 – 2,5	1,5	10 – 22	50	50 – 300
Bagasse	20 – 290	19 – 27	1,1	1,2 – 1,25	---	---	200 – 400
Bambou	140 – 503	11 – 36	1,4	0,6 – 1,1	0,91	100	240 – 330
Feuille d'ananas	400 – 627	1,44	14,5	0,8 – 1,6	-----	20 – 80	----
Noix de coco	175 – 593	4 – 6	30	1,2	-----	20 – 150	100 – 450

1.2.5 Avantages et inconvénients des fibres naturelles

1.2.5.1 Avantages

Pour pouvoir compétitionner avec les fibres synthétiques, il faut trouver une alternative écologique, bon marché et avec de bonnes performances. Dans ce sens, les fibres naturelles présentent des avantages très spécifiques qui leur permettent de répondre aux exigences techniques tout en restant conformes par rapport au respect de l'environnement (Jawaid et

Abdul Khalil, 2011; John et Thomas, 2008; Thakur, Thakur et Gupta, 2014). Globalement les fibres naturelles ont des densités plus faibles et sont généralement moins chères que les fibres synthétiques. Bien que leur résistance mécanique soit habituellement moins élevée, les fibres naturelles peuvent être des clients potentiels pour les applications où la rigidité et le poids sont des préoccupations majeures (Dittenber et Gangarao, 2012). Parmi les propriétés uniques des fibres naturelles, on note leur faible coût (Tableau 1.5), leur biodégradabilité, leur recyclabilité, leur caractère renouvelable, leur force spécifique acceptable, leur faible densité, leur haute ténacité, leur bonnes propriétés d'isolant thermique, leur isolation acoustique, l'absence de déchets toxiques, le caractère non-irritant pour la peau, la récupération d'énergie et la neutralité vis-à-vis l'émission de CO₂ (Jawaid et Abdul Khalil, 2011; John et Thomas, 2008).

Tableau 1.5 Prix des fibres naturelles par rapport à d'autres matériaux de renfort tiré de (Yeh, 2013)

Fibre	Carbone	Acier	Verre	Sisal	Jute	Coco
Prix (USD/kg)	200	30	3,25	0,36	0,3	0,25

1.2.5.2 Inconvénients

Les fibres naturelles disposent de certaines qualités qui permettent aux industriels de les utiliser dans des domaines et applications spécifiques. Toutefois, elles ont aussi des inconvénients qui peuvent parfois nuire à leur bonne utilisation (Drzal, Mohanty et Misra, 2003; Kozlowski, 2012). Parmi les inconvénients des fibres naturelles végétales, on trouve leur haute absorption d'humidité (hygroscopicité), leur faible résistance à la dégradation biologique, leur faible résistance thermique au feu, les variations de la qualité selon le lieu et la saison, la concentration élevée en fibres défectueuses, et le dégagement d'odeurs lors de traitements à haute température. Presque tous les chercheurs ayant travaillé dans le domaine des composites renforcés par des fibres naturelles indiquent qu'il y a des défis majeurs, surtout pour les domaines basés sur des applications structurelles (Dittenber et Gangarao,

2012). En général, les fibres naturelles sont souvent limitées à des applications d'intérieur ou non-structurelles en raison de leurs performances mécaniques inférieures et de leur faible résistance à l'humidité, même si ces caractéristiques peuvent être améliorées grâce à l'utilisation de traitements de surface, de résines, d'additifs et de revêtements. Les autres difficultés sont l'adhérence fibre/matrice, la durabilité, la non-résistance au feu et la variabilité de la qualité.

La biodégradabilité des fibres cellulosiques a toujours été un avantage pour justifier l'utilisation de ces fibres. Par contre, pour plusieurs applications, cela peut être un handicap si le produit doit avoir une vie utile de plusieurs années. Dans ce cas, il peut être nécessaire de contrôler la dégradation naturelle de la fibre afin d'augmenter son cycle de vie (Jawaid et Abdul Khalil, 2011).

1.2.6 Facteurs affectant les performances des fibres naturelles

La production des fibres naturelles compte plusieurs étapes. Au niveau de chaque étape, il existe plusieurs facteurs qui peuvent influencer la qualité des fibres, comme le montre le Tableau 1.6. Par exemple, au niveau de la croissance des plantes, la qualité des fibres est affectée par la nature des cultivars, la production agricole, l'emplacement et le climat. Deux autres facteurs très influents aussi par rapport aux propriétés de la fibre sont les températures auxquelles les fibres sont cultivées et l'emplacement de la fibre par rapport à la plante (Ochi, 2008). Par exemple S. Ochi a réalisé une étude sur l'influence du climat sur la qualité de la fibre de kénaf. Deux régions ont été choisies pour cultiver la fibre de kénaf au Japon : une région froide avec une température moyenne de 22°C (condition A) et une région chaude avec une température moyenne de 30°C (condition B). Les résultats ont montré que la longueur de la fibre, la force de rupture et le module d'élasticité ont été influencés par le choix de l'emplacement.

D'après la littérature (Yeh, 2013), il existe trois types de production pour les fibres naturelles utilisées comme renfort pour les composites :

- Des fibres qui sont spécifiquement cultivées pour une utilisation comme matériaux à usage technique ;
- Des fibres qui sont des sous-produits extraits de plantes utilisées pour d'autres applications ;
- Des déchets fibreux.

La récolte joue aussi un rôle très important en ce qui concerne les propriétés des fibres, puisque, au fur et à mesure que les fibres mûrissent, la paroi cellulaire secondaire occupe de plus en plus de place dans la tige de la plante et augmente sa résistance mécanique (Dittenber et Gangarao, 2012). Toutefois les fibres deviennent plus grosses et adhèrent fermement les unes aux autres, ce qui rend leur extraction de plus en plus difficile. La dernière étape est celle d'extraction. Elle implique un processus de rouissage ou de décortication par lequel les fibres sont séparées les unes des autres.

Tableau 1.6 Facteurs affectant la qualité de la fibre pendant les différentes étapes de production d'une fibre naturelle tiré de (Dittenber et Gangarao, 2012)

Étapes	Facteurs affectant la qualité de la fibre
La croissance des plantes	Espèces de plantes Mode de culture Lieu de culture Localisation de la fibre dans la plante Climat local
La récolte	La maturité de la fibre, qui affecte : • L'épaisseur de la paroi cellulaire • Le diamètre des fibres • L'adhérence entre les fibres et la structure environnante
L'extraction de la fibre	Processus de décortication Type de rouissage
La distribution	Conditions du transport Conditions du stockage Âge de la fibre

1.3 Fibre bicomposante

Les fibres bicomposantes sont constituées de deux polymères ou plus, de nature ou de qualité différentes disposés selon des structures simples à beaucoup plus complexes (Eichhorn, 2009a). Les composants peuvent être présents sous forme de fibres individuelles ou en couches (Rouette, Lindner et Schwager, 2001).

On peut définir quatre classes de fibres bicomposantes (Kulshreshtha et Vasile, 2002):

- La structure S/S (side/side ou cote-à-cote): chaque polymère est divisé le long de la longueur en deux ou plusieurs régions distinctes de la section transversale (Figure 1.9).

- Les structures C/S (core/sheath ou cœur/gaine), C/C (cover/core) et M/C (mantle-core) : l'un des composants de base est entièrement entouré par un autre composant (gaine, enveloppe, etc).
- La structure M/F (Matrix/Fibers ou matrice/fibres) : des fibrilles fines d'un polymère sont dispersées d'une façon aléatoire en taille et en emplacement dans une matrice d'un autre composant, mais en gardant un alignement axial.
- Les microfibrilles (MF) : elles sont produites par fractionnement (splitting) contrôlé.

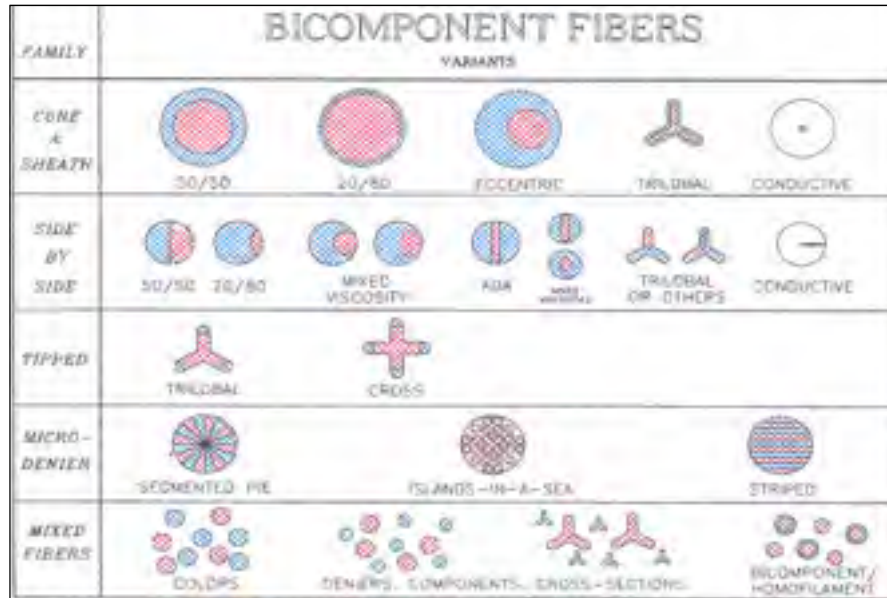


Figure 1.9 Quelques structures des fibres bicomposantes tirée de (Hindman, 2010)

Parmi les avantages des fibres bicomposantes, la présence du second composant peut améliorer certains aspects des performances mécaniques des fibres, apporter certaines valeurs ajoutées comme la facilité à teindre les fibres. Il est également possible de faire fondre la gaine tout en gardant le cœur, de créer des fibres creuses avec la structure îles/mer, etc.

Une des difficultés avec les fibres bicomposantes est liée au processus de fabrication. Par exemple, Huang et al. ont montré que les fibres bicomposantes qui sont constituées d'un polymère avec un point de fusion plus bas et un polymère cristallin liquide supérieure à ce point de fusion sont très sensibles à la température de traitement (Advani et Hsiao, 2012). Le procédé d'extrusion thermoplastique est plus facile quand la différence de point de fusion entre les deux polymères est élevée.

1.4 Structures textiles

1.4.1 Différents types de structures textiles

Après la production des fibres ou des fils, selon l'utilisation, il est alors possible de les employer dans une structure textile en vue d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées. Chaque structure textile est utilisée pour des applications techniques différentes tout dépend des propriétés que le fabricant cherche (Fangueiro, 2011). Les quatre structures textiles plus utilisées sont les tissés, les tricotés, les non-tissés et les tressés. D'autres facteurs peuvent être pris en considération, comme le choix des fibres, leur orientation et leur morphologie. Par exemple, pour une application dans le domaine de l'isolation acoustique, un non-tissé sera plus approprié car il offre une densité plus faible. D'autre part, un textile tissu, avec des fibres orientées à 0° et 90° , est mieux adapté pour un renfort structurel qu'un textile tricoté. Chaque type de structure a ses avantages et ses inconvénients, et, dans la plupart des cas, le choix final reste un compromis entre les exigences souhaitées et celles que la structure pourra satisfaire (Ratner, 2004).

1.4.1.1 Production de fil

Passer de la fibre au fil est un processus qui nécessite l'assemblage d'une ou de plusieurs fibres afin de créer un fil selon les caractéristiques recherchées au niveau du produit fini (Carisconi, 2002; Fangueiro, 2011; Lawrence, 2003).

Il existe deux procédés de production de fil : il s'agit de la filature de type coton et la filature de type laine. Les machines utilisées diffèrent pour les deux procédés mais les étapes restent généralement les mêmes (Lord, 2003) :

- La préparation de la fibre : l'ouverture, le mélange et le nettoyage des fibres.
- Le cardage : traitement du mélange des fibres pour former un voile à la sortie.
- L'étirage : superposition de plusieurs voiles sortant de la carde et étirage afin de fixer la finesse du ruban.
- Affinage : transformation du ruban sortant du banc d'étirage en mèche à l'aide du banc à broches.
- La filature : transformation de la mèche en fil en choisissant une torsion adéquate en « S » ou en « Z ».

1.4.1.2 Structures textiles tissées

Le terme tissé est utilisé pour décrire une structure textile basée sur des fils de base orientés à 90° les uns par rapport aux autres (Ratner, 2013). Les fils disposés dans la direction de la machine sont appelés « les fils de chaîne » et ceux dans la direction transversale sont appelés « les fils de trame ». En raison de la disposition orthogonale des fils de chaîne par rapport aux fils de trame, les tissés présentent un faible allongement et une très forte résistance à la rupture dans les deux directions. Plusieurs armures tissées existent mais les trois les plus employés sont la toile, le sergé et le satin. La figure ci-dessous présente ces armures :

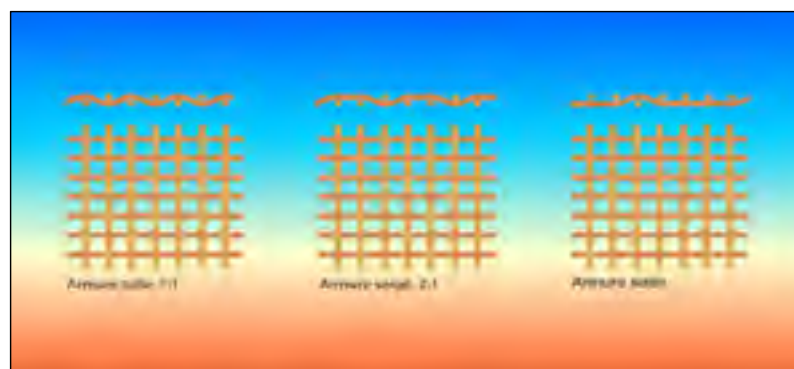


Figure 1.10 Les trois armures fondamentales pour les textiles tissés tirée de (Renoud, 1999)

1.4.1.3 Structures textiles tricotées

La bonneterie est le terme associé à la production de structures textiles tricotées (Ben Abdesslem, 2013; CSMO, 2009; Ratner, 2013). Ces structures sont fabriquées à base de boucles entrelacées, qu'on appelle aussi « mailles ». Les structures tricotées sont plus douces, plus souples et facilement adaptables, et ont de meilleures caractéristiques de manipulation que les structures tissées.

Il existe deux sortes de tricots :

- ✓ Tricot de chaîne ou à maille jetée ;
- ✓ Tricot de trame ou à maille cueillie.

Les tricots de chaîne sont des tricots où les mailles formées par un même fil appartiennent à une ou plusieurs colonnes (Figure 1.11). Ces derniers sont connus pour leur résistance : ils sont qualifiés d'indémaillable. Le Jacquard est un des tricots les plus connus dans cette catégorie. Pour les tricots de trame, les mailles formées par un même fil sont disposées dans une même rangée. Ces tricots sont facilement détricotables. Le Jersey est l'un des plus connus dans cette catégorie.

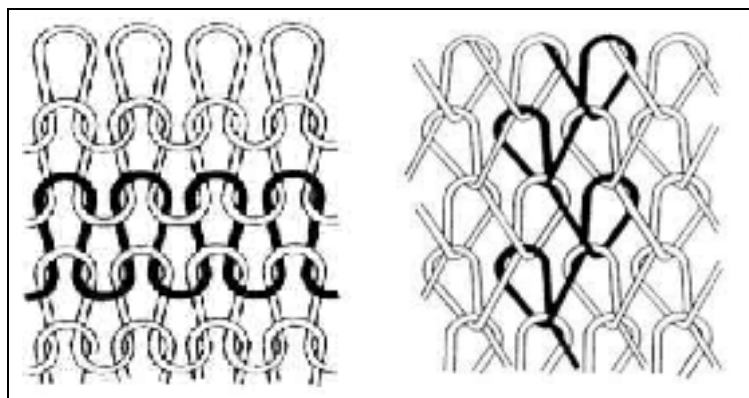


Figure 1.11 Les deux formes de mailles, jetée et cueillie

1.4.1.4 Structures textiles tressées

Les structures tressées sont des structures textiles fabriquées en entrelaçant un certain nombre de fils entre eux à des angles et des fréquences différents (Ratner, 2013). La distance de répétition horizontale l (ou ligne), la distance de répétition verticale s , la largeur de fil et l'angle de tressage θ entre les directions de fil et de machine sont tous des paramètres variables dans la fabrication d'une tresse. La figure (Figure 1.12) ci-dessous montre ces différentes variables dans une structure tressée.

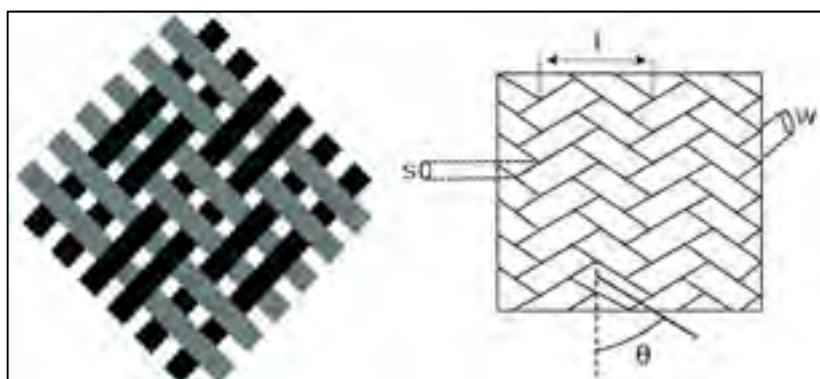


Figure 1.12 Schéma d'une structure textile tressée tirée de (Ratner, 2013)

1.4.1.5 Structures textiles non-tissés

Les non-tissés sont parmi les structures textiles les plus vendues dans le monde, surtout grâce à leur processus de fabrication très simple et à la diversité d'applications auxquelles ils peuvent répondre. Ils consistent en un réseau de fibres disposées plus ou moins au hasard (Figure 1.13). Les textiles non-tissés restent l'unique catégorie qui permet de réaliser des produits finaux à partir de la fibre directement sans passer par la production des fils (El Mogahzy, 2009; Ratner, 2004). Parmi les caractéristiques les plus importantes des non-tissés, on peut citer leur vitesse de production, qui est généralement beaucoup plus rapide que toutes les autres formes de production (Fung et Hardcastle, 2001). Par exemple, l'extrusion qui est

un des procédés de fabrication des non-tissés par voie fondue est à peu près 2000 fois plus rapide que le processus du tissage.

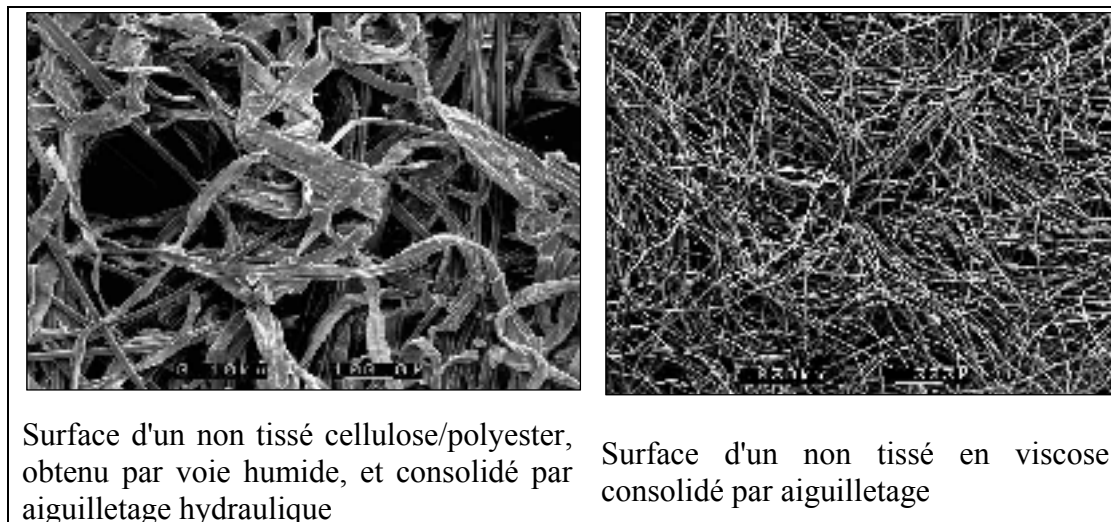


Figure 1.13 Exemples de surface de non-tissés différents tirée de (Coste, 2011)

1.4.2 Avantages des non-tissés

Parmi les avantages majeurs des non-tissés pour l'industrie figure essentiellement le fait de passer directement de la matière première au produit fini à l'aide d'un seul processus en continu (Horrocks et Anand, 2000). De plus le coût de fabrication des non-tissés reste généralement abordable puisque la matière première est utilisée directement sans passer par d'autres processus de finissage comme dans les autres procédés de fabrication des textiles. En dehors de cette approche de production de masse, l'industrie des non-tissés peut également produire une très large gamme de produits. Allant des non-tissés pour l'isolation qui contiennent juste 2 à 3% de fibres en volume à des renforts rigides où la teneur en fibres dépasse les 80% en volume. Les différents processus de fabrication se divisent en deux grandes parties, la préparation des fibres pour produire un voile en continu et la consolidation de l'empilement de ces derniers.

Les techniques de formation des non-tissés jouent aussi un rôle important dans le processus de fabrication, à savoir qu'on peut avoir des types des produits différents en changeant uniquement de technique de consolidation, ce qui permet un large choix pour les fabricants et l'obtention d'une multitude de produit avec des coûts de fabrication moins élevés. Finalement le choix des non-tissés permet de recycler plusieurs matières contrairement aux textiles tissés ou tricotés. Les processus de fabrication des non-tissés permettent aussi d'utiliser de très courtes fibres pour certaines applications, trop courtes pour la filature.

1.4.3 Les inconvénients des non-tissés

Les non-tissés ont également certains inconvénients qui limitent leur utilisation. Par exemple, leur performance mécanique est généralement moins élevée par rapport aux textiles tissés. Il existe aussi certaines fibres que l'industrie des non-tissés est pour l'instant incapable de traiter. La fibre de carbone en est un exemple, même si certaines études (ACMA, 2014) ont montré que l'industrie des non-tissés peut utiliser la fibre de carbone recyclée pour des structures non-tissés.

1.4.4 Domaines d'application des non-tissés en général

Les non-tissés ont de très nombreuses applications. Ils sont présents dans la plupart de nos utilisations quotidiennes, par exemple dans une lingette jetable ou pour les renforts utilisés dans le bâtiment, en génie civil, dans le transport, etc.

Les domaines où sont utilisés les non-tissés incluent par exemple (Edana; Wilson, 2006) :

- ✓ Les produits d'hygiène comme : les couches pour bébés, les serviettes hygiéniques, les tampons, les disques démaquillants, les sous-vêtements jetables, etc..
- ✓ Les lingettes comme : les lingettes jetables (sèches ou pré humidifiées), les dépoussiéreurs, les torchons, les serpillières, etc..
- ✓ Les produits médicaux et chirurgicaux comme : les éponges, blouses, masques et bonnets chirurgicaux, les moulages orthopédiques, les pansements, etc..

- ✓ Les vêtements de protection : les vêtements jetables, les combinaisons de laboratoire, les vêtements de protection contre les incendies, les vêtements à haute visibilité, les vêtements de protection contre les produits chimiques, etc..
- ✓ Les produits pour la filtration (gaz et liquide) : les sachets de thé, les filtres pour les boissons, l'absorption d'huile, la filtration des gaz industriels, le contrôle des odeurs, etc..
- ✓ Les produits de rembourrage de meubles et de literie : les couvre-matelas, les ouates et mousses, draps et couvertures, stores, etc..
- ✓ Les revêtements du sol : les dalles de moquettes, les tapis, les garnitures pour tapis, tapis et garnitures automobiles, etc..
- ✓ Les produits pour le bâtiment et la toiture : Garnitures de toit, d'isolation thermique et phonique, revêtement intérieur de toit, etc..
- ✓ Le domaine du génie civil et des géosynthétiques : les membranes de filtration, les systèmes de drainage, les systèmes de contrôle de l'érosion et de stabilisation des sols, etc..

Selon un article publié en juin 2012 par l'Institut français de la mode (Browaeys, 2012), la production mondiale de non-tissés en volume a dépassé 7 millions de tonnes dans le monde. Le tableau suivant (Tableau 1.7) montre la production annuelle de non-tissés en 2011 en million de tonne (Mt) découpée par zone géographique.

Tableau 1.7 Production annuelle de non-tissés en 2011 en volume, million de tonnes (Mt) tiré de (Browaeys, 2012)

	Monde (Total)	Europe	Amérique du nord	Chine	Reste de l'Asie Pacifique	Japon	Moyen- Orient	Reste du monde
Production de non-tissés volume (Mt)	7,61	1,95	1,87	1,65	0,59	0,33	0,32	0,90
Croissance prévue entre 2011-2016 (%/an)	7,8	5,9	3,3	12	5,7	1,2	7,7	14,6

L'Edana a publié l'évolution de la production des non-tissés en Europe entre 2000 et 2012. Cette production a doublé pendant cette période (voir Figure 1.14).



Figure 1.14 Production des non-tissés en Europe en 2012 en milliers de tonnes tirée de (Edana, 2015)

Finalement la figure ci-dessous (Figure 1.15) montre la répartition du marché des non-tissés durables par secteur en Amérique du nord. Le marché total de ces non-tissés représente 476 000 tonnes de non-tissés (Browaeys, 2012).

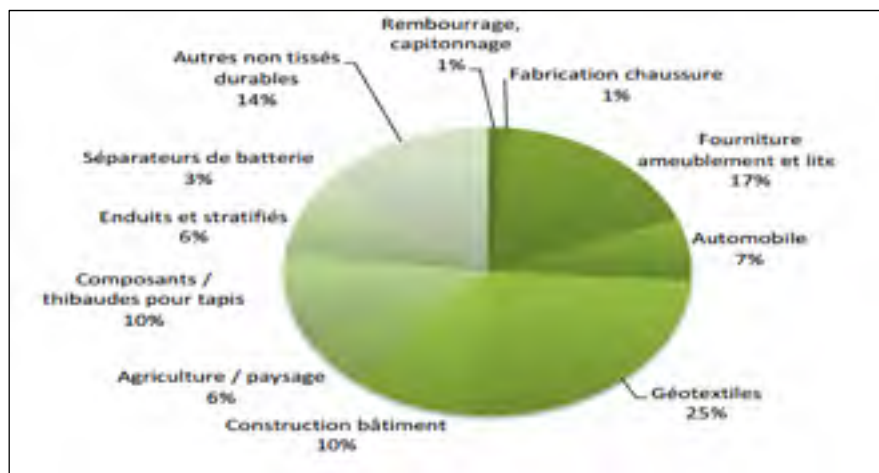


Figure 1.15 Répartition du marché des non-tissés durables en 2011 par secteur en Amérique du nord tirée de (Browaeys, 2012)

1.5 Procédés de fabrication des non-tissés

1.5.1 Généralités

Les non-tissés sont des textiles fabriqués à base de fibres plus ou moins longues qui sont solidarisiées entre elles par divers procédés de liaison (Ghosh, 2014). Selon la norme DIN 61210 (DIN Standard, 1982), ils sont définis comme "des tissus qui se composent entièrement ou en grande partie de fibres". Ils restent parmi les structures textiles les plus vendues dans le monde, avec un processus de fabrication très simple et des produits finis très variés (El Mogahzy, 2009; Ratner, 2004). En ce qui concerne les fibres qui définissent le caractère des non-tissés, elles peuvent être orientées dans une certaine direction, mises en parallèle, croisées ou réparties d'une manière aléatoire (Wulfhorst, Gries et Veit, 2006).

Pour séparer les non-tissés des papiers, la masse volumique apparente reste le paramètre à prendre en considération. Cette valeur doit être inférieure à $0,40 \text{ g/m}^3$ pour être un non-tissé et le produit doit avoir plus de 30% de matière fibreuse (Wulfhorst, Gries et Veit, 2006).

Selon la même norme DIN61210, les principaux avantages de la production des non-tissés par rapport aux tissus classiques ou aux tricots sont (DIN Standard, 1982) :

- L'élimination de l'étape de production de fils ;
- Une vitesse de production beaucoup plus élevée que les autres procédés textiles ;
- La possibilité de faire la finition du produit en même temps que la consolidation.

Ces processus se divisent en deux grandes parties :

- La formation du voile ;
- La consolidation.

La formation du voile peut être réalisée par trois grandes catégories de techniques :

- Processus par voie humide ;
- Processus sec, qui inclut les voies mécanique et aérodynamique ;
- Processus par voie fondue.

Parfois, selon l'usage final du produit, un processus de finition peut être nécessaire pour produire les spécificités requises.

1.5.2 Les processus de formation du voile

Le processus de fabrication des non-tissés est basé sur la formation d'un voile de fibres, parallèles ou mélangées les unes aux autres (Wulfhorst, Gries et Veit, 2006). Tous les types de fibres, naturelles, ou synthétiques, peuvent être utilisés pour la fabrication des non-tissés. Cependant, le choix de la fibre, et du procédé de fabrication et du processus de consolidation

contrôle les performances du non-tissé produit (Ghosh, 2014). Il est à noter que le type et la longueur des fibres utilisées peuvent affecter le choix du processus de formation du voile (Russell, 2006; Wulfhorst, Gries et Veit, 2006) :

- Pour des fibres de 15 à 250 mm, les non-tissés sont fabriqués par voie mécanique ;
- Pour des fibres de 5 à 40 mm, les non-tissés sont fabriqués par voie aérodynamique ;
- Pour des fibres de 1 à 20 mm, les non-tissés sont fabriqués par voie humide ;
- En ce qui concerne les filaments polymériques thermoplastiques, la voie fondue reste le processus de fabrication le plus souvent utilisé.

1.5.2.1 Voie sèche

Mécanique

En ce qui concerne la voie mécanique, les voiles sont formés à partir des fibres coupées à une longueur entre 15 et 250 mm en utilisant une cardé (Russell, 2006). Il existe deux types de cardes : cardé de type coton pour les fibres courtes, spécifiquement entre 28 et 45 mm, utilisée dans le domaine d'hygiène féminine ou des produits médicaux, et les cardes de type laine, qui sont utilisées pour les fibres ayant une longueur de 45 à 100 mm. La cardé de type coton n'est pas très utilisée car sa largeur maximale est de 1,5 m et son taux de production n'est pas aussi élevé.

Le choix de la fibre reste un facteur essentiel qui déterminera par la suite la qualité du non-tissé obtenu. Les caractéristiques de la fibre peuvent influencer l'uniformité du voile, la réaction de la fibre par rapport au cardage, la masse surfacique du voile, etc.

En ce qui concerne la voie sèche, quatre étapes sont essentielles pour la fabrication des non-tissés : l'ouverture des fibres, le mélange et l'homogénéisation, le cardage, et enfin la fabrication des nappes. Ces étapes sont détaillées dans la section 1.7.2 (de la fibre au non-tissé) et sont illustrées dans la figure suivante (Figure 1.16).

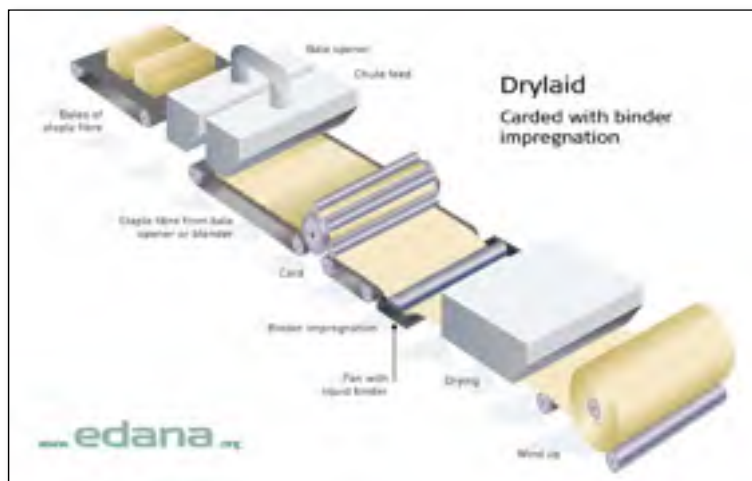


Figure 1.16 Processus de fabrication d'un non-tissé par voie sèche (mécanique) tirée de (Edana)

Aérodynamique

Parmi les procédés utilisés dans la formation des voiles par voie sèche, on trouve le procédé aérodynamique, inventé dans les années 60 par Karl Kroyer au Danemark (Dahiya, 2004; Russell, 2006; Smith, 2000; Wilson, 2010; Wulfhorst, Gries et Veit, 2006). Il est utilisé dans la fabrication des produits jetables, formés à base de fibres courtes à usage unique, comme les lingettes, les couches absorbantes et les emballages alimentaires, etc. Ce procédé est aussi utilisé pour la fabrication des produits durables, réalisés à partir de fibres longues, comme les matériaux de filtration, les composants automobiles, etc. La figure suivante (Figure 1.17) présente le processus de fabrication d'un non-tissé par voie sèche (aérodynamique).

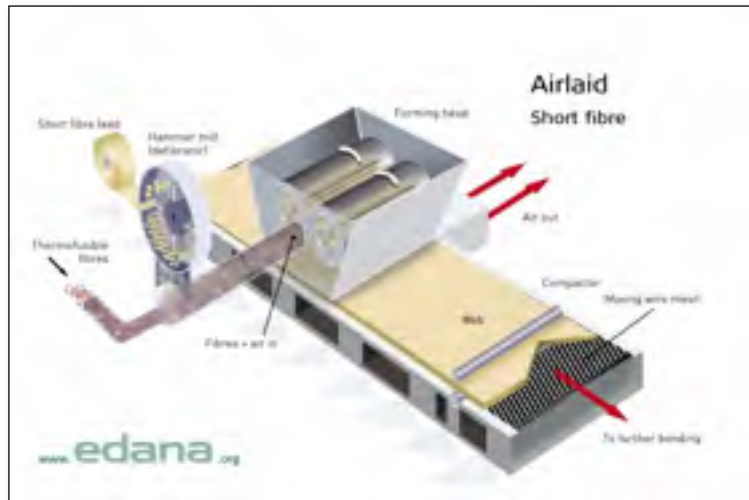


Figure 1.17 Processus de fabrication d'un non-tissé par voie sèche (aérodynamique) tirée de (Edana)

Il existe deux technologies de fabrication par voie aérodynamique. Selon la première technologie, les pâtes de fibres et de flocons sont tamisées à travers un gros tamis et aspirées à l'aide du vide sur une toile de formation placée en dessous. La deuxième technologie se base sur l'utilisation de gabarits. Les fibres passent à travers une série de trous ou de fentes dans un grand cylindre qui couvre la largeur du voile formé.

Une des caractéristiques des voiles formés par voie aérodynamique est leur isotropie, c'est à dire que leurs performances sont identiques dans le sens machine et travers. En ce qui concerne l'ouverture des fibres, les fibres utilisées dans ce processus peuvent être moins ouvertes que celles utilisées dans une carte (processus mécanique).

Comme chaque technologie, le processus aérodynamique a des avantages comme des limites. Parmi ses avantages, on note :

- Les propriétés isotropes du voile ;
- La porosité élevée (95-99%) ;
- La forte capacité d'absorption ;
- La bonne résilience ;
- La souplesse ;

- La production des structures tridimensionnelle si le poids de base est supérieur à 50g/m et la densité est très faible ;
- Une compatibilité avec une grande variété de fibres, allant des fibres naturelles jusqu'aux métaux tel que l'acier, les aramides et d'autres fibres à haute performance.

Mais parmi ses limites figurent :

- L'uniformité du produit final qui dépend largement de l'ouverture et l'individualisation des fibres pendant la préparation des nappes ;
- L'irrégularité du débit d'air au voisinage des parois qui peut causer des variabilités au niveau du non-tissé final ;
- Des défauts du voile qui peuvent apparaître à cause de l'enchevêtrement des fibres avec les courants d'air.

De manière générale, le processus aérodynamique est considéré comme plus efficace par rapport au cardage, surtout qu'il permet de produire des voiles de masse surfacique de 150 à 200 g/m² avec des taux de production allant jusqu'à 250 kg/h.

Quelques exemples de produits formés par voie aérodynamique sont donnés ci-dessous. Ils sont classés selon le procédé de consolidation utilisé (décrit dans la section 1.5.3) :

- ✓ Liaison chimique : serviettes, nappes et lingettes.
- ✓ Liaison thermique : couches pour bébés, produits d'hygiène féminine, produits d'isolation.
- ✓ Hydroliage : textiles médicaux (blouses jetables, rideaux, pansements), lingettes humides et sèches pour applications domestique et industrielles, textiles de filtration.
- ✓ Aiguilletage : doublures de chaussures, produits médicaux, géotextiles, isolants pour toiture, composants automobiles, etc..

1.5.2.2 Voie humide

Le processus de fabrication des non-tissés par voie humide a été développé à partir de l'industrie de la papeterie (Smith, 2000; Wilson, 2010; Woodings, 2001). Il s'agit d'un procédé de production très rapide par rapport aux autres procédés textiles. Au départ, les non-tissés par voie humide ont été fabriqués en utilisant des machines de fabrication de papier modifiées. Les fibres destinées à ce procédé sont très courtes (6-20 mm) par rapport aux standards utilisés dans l'industrie textile. Elles sont néanmoins relativement longues par rapport aux fibres de bois utilisées dans l'industrie de la papeterie. De fait, l'EDANA (European Nonwovens and Disposables Association) définit qu'un matériau est appelé « non-tissé par voie humide » si plus de 50% de sa masse est constituée de fibres avec un rapport de longueur/diamètre supérieure à 300, ou bien, plus que 30% des fibres ont une densité inférieure à 0,40 g/cm³.

Le procédé par voie humide (Figure 1.18) a été développé dans les années 1930 par Dexter, une compagnie qui a été achetée par Ahlstrom en 2000. Cette dernière est considérée comme un leader des non-tissés par voie humide (Wilson, 2010).

Il y a quatre étapes nécessaires dans la fabrication d'un non-tissé par voie humide :

1. Le gonflement et la dispersion de la fibre dans l'eau ;
2. Le transport de la suspension sur un écran en continu ;
3. La formation du voile sur le dispositif de filtration ;
4. Le séchage et la consolidation.

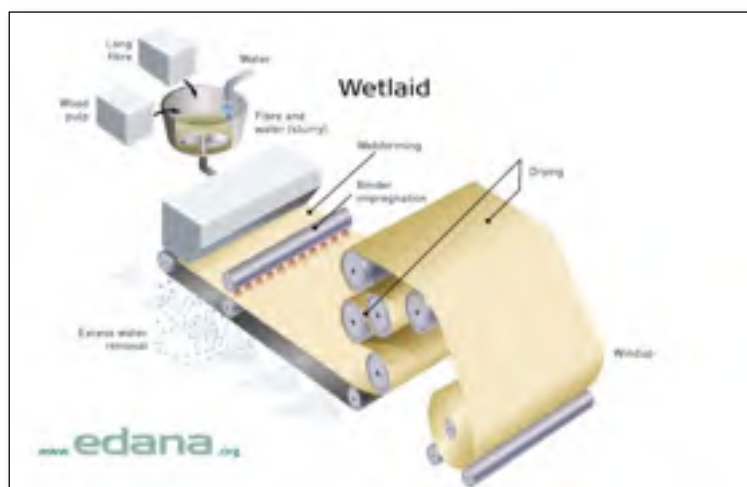


Figure 1.18 Processus de fabrication d'un non-tissé par voie humide tirée de (Edana)

1.5.2.3 Voie fondue

Le processus de la voie fondue a été développé à la fin des années 1950 par Freudenberg (Allemand) et DuPont (USA) (Russell, 2006; Smith, 2000; Wilson, 2010; Woodings, 2001; Wulfhorst, Gries et Veit, 2006). C'est un procédé qui se base sur la conversion de polymères thermoplastiques en produits finis. Il existe trois techniques de base par voie fondue, l'extrusion (Spunlaid : Figure 1.19), l'extrusion soufflage (Meltblown) et le filage éclair (Flash-spun). Les autres procédés de fabrication ne sont que des combinaisons de ces trois techniques.

L'extrusion et l'extrusion soufflage reste les deux procédés les plus utilisés actuellement. Le premier permet d'avoir des fils de diamètre de 13 à 16 μm et le deuxième permet de produire des fils très fins avec des diamètres de 2 à 5 μm .

Le procédé d'extrusion (spunbond) , au sens étroit du terme, comprend trois étapes dans une seule opération : le filage en fusion des polymères thermoplastiques, la collecte des filaments continus sur une plateforme mobile afin de former des bandes, et enfin le liage des filaments dans les bandes pour produire un non-tissé (Nakajima, 1994). Ce procédé a une productivité

élevée et permet d'avoir des non-tissés avec d'excellentes propriétés mécaniques. L'industrie des non-tissés annonce chaque année l'agrandissement d'installations de production pour ce procédé.

Le meltblown (extrusion soufflage) et le flashspun (filage-éclair) pourraient aussi être appelés, au sens large, des procédés d'extrusion (spunbond), car ils consistent en une seule étape de la filature à la consolidation. Cependant ils diffèrent du procédé spunbond dans la nature de l'étape de filage pendant laquelle les polymères sont amincis pour former des filaments. Cela signifie que les propriétés et la forme de filaments réalisés par chaque procédé sont différentes et par conséquent, les non-tissés formés à partir de chaque procédé sont très différents les uns des autres dans leurs propriétés.

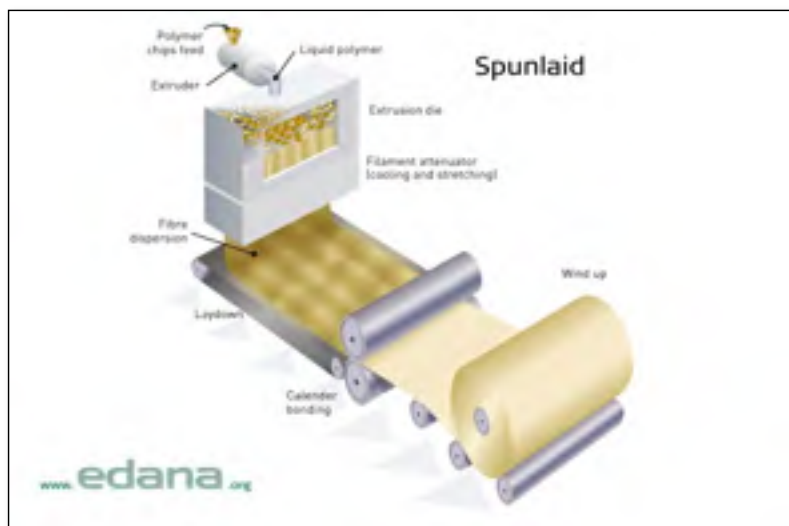


Figure 1.19 Procédé de fabrication d'un non-tissé par voie fondue tirée de (Edana)

En ce qui concerne les polymères utilisés pour chaque procédé, on peut dire d'une manière générale que les polymères qui ont un poids moléculaire élevé ainsi qu'une large distribution de la masse moléculaire tels que le polypropylène, le polyester et le polyamide peuvent être traités par filage direct (spunbond) pour produire des nappes uniformes. Par contre les polymères ayant un poids moléculaire faible et une distribution de masses moléculaires

relativement étroite sont mieux adaptés pour le procédé meltblown (extrusion-soufflage) (Russell, 2006).

1.5.3 Procédé de consolidation

Les non-tissés consolidés diffèrent des non-tissés non consolidés par leurs propriétés. Un non-tissé non-consolidé se compose d'un ensemble de fibres juxtaposées, alors la consolidation fait en sorte de lier ces fibres (Fung et Hardcastle, 2001). Cette consolidation conditionne en grande partie les performances mécaniques du non-tissé. L'étape de consolidation intervient généralement après celle de formation de la nappe mais peut parfois y être combinée. Dans certains cas, plusieurs procédés de consolidation sont combinés afin d'obtenir un non-tissé avec les performances recherchées.

La consolidation d'un voile peut être mécanique, chimique ou thermique (Russell, 2006). Le degré de liaison est un facteur très important pour la détermination des propriétés mécaniques des non-tissés, en particulier la résistance, la porosité, la flexibilité, la douceur et enfin la densité. Le tableau suivant montre les différents procédés de consolidation d'un non-tissé.

Tableau 1.8 Différents procédé de consolidation d'un voile tiré de (Mao, 2014)

Liaison chimique	Liaison mécanique	Liaison thermique	Autres
Par saturation Par pulvérisation Par mousse Par collage	Aiguilletage Hydroliage Stitchbonding	Par calandrage Par four Par des ultrasons	La combinaison de plusieurs méthodes par exemple (Thermoliage + aiguilletage) Par solvant Par poudre

1.5.3.1 Consolidation mécanique

La consolidation mécanique inclut plusieurs technologies à savoir l'aiguilletage, l'hydroliage et le stitchbonding (Fung et Hardcastle, 2001; Wulforth, Gries et Veit, 2006). Parmi ces trois

procédés, l'aiguilletage reste le plus largement utilisé. Il est basé sur l'utilisation d'une aiguilleteuse, souvent alimentée par une carte et un étaleur nappeur.

L'aiguilletage (Figure 1.20) se base sur l'enchevêtrement des fibres à l'aide du mouvement du haut vers le bas et du bas vers le haut d'aiguilles munies de barbes. Une grande variété de produits finaux peut être obtenue en utilisant des aiguilles spécialement conçues pour certaines utilisations ou en modifiant les paramètres de l'aiguilleteuse, à savoir le nombre de coups/min, la vitesse d'entrée et de sortie, la hauteur du voile par rapport aux aiguilles et la profondeur des aiguilles dans le voile.

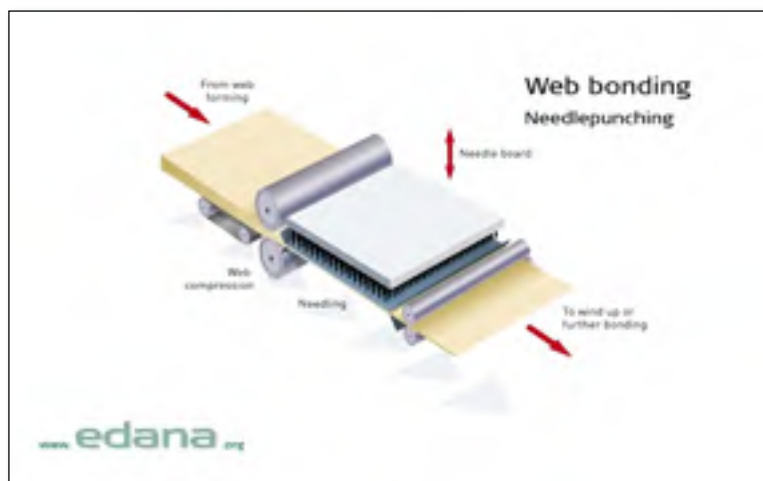


Figure 1.20 Processus de consolidation d'un non-tissé par aiguilletage tirée de (Edana)

En ce qui concerne l'hydroliage, il reste l'un des procédés les plus efficaces pour la liaison d'un voile. En effet il n'affecte pas les propriétés des matériaux utilisés. Le principe de l'hydro-enchevêtrement se base sur l'utilisation des jets d'eau à haute vitesse pour entremêler les fibres entre elles (Bartels, 2011; Wang, 2011). C'est un processus qui peut être très avantageux pour les applications médicales puisqu'il ne nécessite pas, ou en quantité très faible, de liant chimique. Aussi, l'enchevêtrement par l'eau ne comporte aucun risque d'endommagement de la fibre. Il n'est cependant généralement pas adapté pour les fibres naturelles qui gonflent dans l'eau.

1.5.3.2 Consolidation chimique

Ce procédé consiste à traiter le voile, en partie ou en la totalité, avec un agent de liaison dans le but de coller les fibres ensemble (Smith, 2000). Bien que de nombreux agents de liaison puissent être utilisés, les groupes les plus souvent rencontrés sont les liants à base de polymères et de copolymères d'acrylate, des copolymères styrène-butadiène et des copolymères d'éthylène-acétate de vinyle. La figure suivante (Figure 1.21) illustre le processus de consolidation chimique par impression d'un non-tissé.

Lorsque l'agent de liaison est appliqué, il est essentiel qu'il mouille les fibres, sinon une faible adhérence sera atteinte. Plusieurs méthodes d'application sont offertes. Parmi ces méthodes on trouve l'imprégnation, l'enduction, la pulvérisation et l'impression.

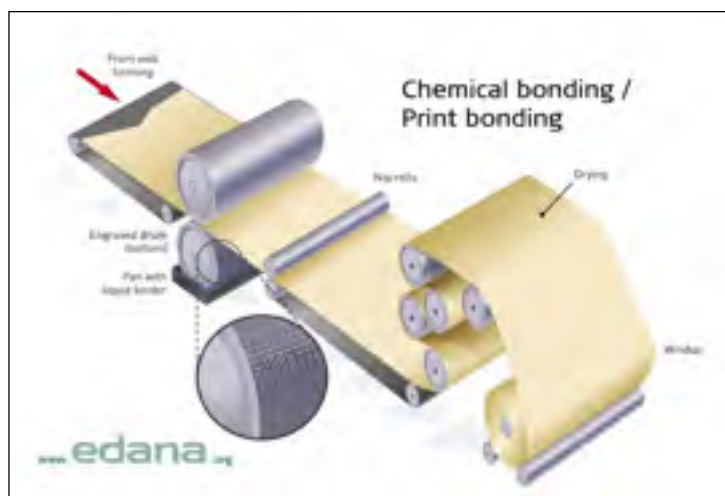


Figure 1.21 Processus de consolidation chimique d'un non-tissé tirée de (Edana)

Le tableau ci-dessous présente une comparaison entre les non-tissés consolidés par voie chimique et ceux consolidés mécaniquement, plus précisément par aiguilletage.

Tableau 1.9 Comparaison entre les non-tissés consolidés chimiquement et ceux aiguilletés tiré de (Ghosh, 2014)

Non-tissés consolidés chimiquement	Non-tissés aiguilletés
La formation du voile peut être faite par voie sèche, humide ou fondue.	Les non-tissés aiguilletés sont consolidés en utilisant des aiguilles poinçonnées directement dans le voile.
Dans ce procédé, les nappes sont superposées les unes sur les autres ; ensuite elles sont liées par des produits chimiques et une source de température	Les non-tissés aiguilletés se basent sur un enchevêtrement direct entre les fibres
Les couches du voile sont contrôlées par les spécifications et la qualité du non-tissé voulue	La qualité du produit dépend de la densité, de l'intensité et du nombre de coups
Les non-tissés consolidés avec un liant chimique ou adhésif ont une faible aération	Les non-tissés aiguilletés ont une meilleure aération
<u>Application</u> : automobile, génie civil, produits sanitaires et produits médicaux, etc.	<u>Application</u> : filtres, feutres d'isolation, revêtements muraux, etc.

1.5.3.3 Consolidation thermique

La consolidation thermique est un processus qui se base sur l'utilisation de la chaleur souvent combinée à de la pression pour ramollir les fibres thermoplastiques pour qu'elles se soudent sans provoquer la fusion.

Il existe plusieurs techniques de consolidation thermique, comme :

- ✓ Le calandrage qui s'effectue par passage entre deux rouleaux chauffés en exerçant une pression (Figure 1.22).
- ✓ Le passage dans un four avec un courant d'air chaud soigneusement contrôlé.

- ✓ Les ultrasons qui permettent d'exciter les molécules des fibres par une énergie de haute fréquence, ce qui crée la production d'une chaleur interne qui permet de ramollir les fibres.

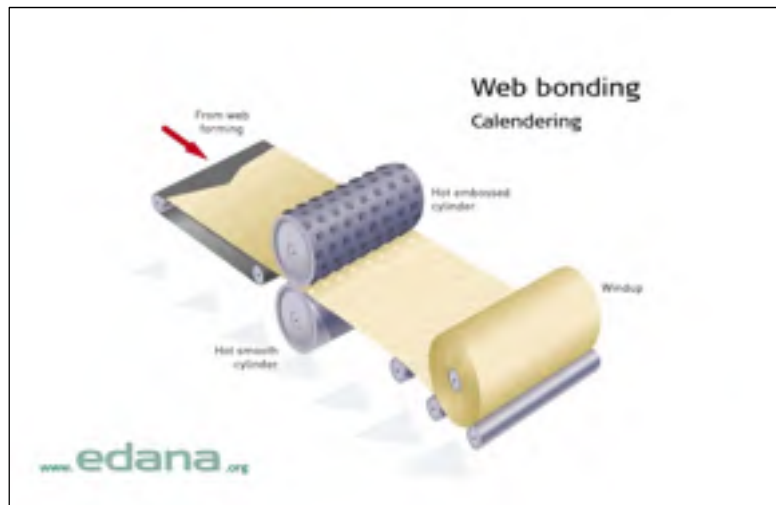


Figure 1.22 Processus de consolidation d'un non-tissé par calandrage tirée de (Edana)

1.5.4 Processus de finition

Le processus de finition des non-tissés est d'une importance croissante. En effet, les manufacturiers cherchent toujours à ajouter de la valeur aux textiles fabriqués en augmentant les fonctionnalités techniques, l'apparence ou l'esthétique pour améliorer l'aptitude aux fins recherchées (Russell, 2006).

Certains procédés de finition des non-tissés comme la teinture, le rembourrage et le calandrage ont évolué à partir de l'industrie textile traditionnelle, tandis que d'autres prennent leur origine dans les industries du papier et de finition de cuir. D'autres procédures supplémentaires ont été développées spécifiquement pour les non-tissés et ils sont rarement appliqués dans la finition des textiles traditionnels. Par conséquent, il n'y a aucun standard pour les procédés de finition des non-tissés : le choix des procédés ainsi que les effets de finition introduits dépendent de l'utilisation finale de chaque non-tissé produit.

Traditionnellement, le procédé de finition est classé sous trois formes : sèche, humide ou chimique. Parmi les procédés de finition les plus connus on trouve le calandrage, le lavage, l'imprégnation chimique, la teinture, le gaufrage, et l'émerisage.

1.6 Non-tissés techniques à base de fibres naturelles

1.6.1 Introduction

Pendant des siècles, le béton, l'acier et le bois étaient les composants les plus importants pour les infrastructures. Or, les coûts de construction sont, essentiellement en raison du prix de ces matériaux, considérablement en hausse ces dernières années (Dittenber et Gangarao, 2012; Thakur, Thakur et Gupta, 2014). Au fil du temps, les renforts synthétiques issus des ressources pétrolières pour les composites ont été une bonne alternative en raison de plusieurs facteurs comme : la résistance spécifique élevée, la rigidité spécifique élevée, une meilleure résistance à la fatigue, une capacité d'absorption de l'énergie d'impact, la facilité de fabrication, le contrôle des performances structurelles, la productivité, une meilleure résistance à la corrosion, une longue durée de vie et une non-conductivité électrique et thermique. Par exemple, pendant les 50 dernières années, la fibre de verre, une fibre structurelle fabriquée artificiellement, est devenue un matériau incontournable comme renfort. Elle est considérée comme la fibre la moins chère par rapport aux autres fibres synthétiques et elle offre un très large éventail pour de nombreuses applications structurelles (Beckwith, 2003).

En même temps, le monde a connu une utilisation accrue de la fibre naturelle surtout comme renfort dans des matériaux composites à base de polymères. Ces fibres offrent plusieurs avantages économiques, techniques et écologiques par rapport aux renforts synthétiques (Ratna Prasad et Mohana Rao, 2011; Shah, Schubel et Clifford, 2013). Ces renforts sont éventuellement plus légers, moins coûteux, faciles à manipuler, et ont des bonnes propriétés d'isolation thermique et acoustique. Ils offrent aussi un potentiel de fabrication des composants structuraux biodégradables en utilisant seulement des ressources renouvelables.

Cependant, malgré l'intérêt porté à l'utilisation des fibres naturelles comme renfort, ces dernières représentent tout juste 6,1% des 2,4 millions de tonnes des fibres utilisées comme renfort en Europe (Figure 1.23). En effet, la variabilité de leurs performances et leur caractère hydrophile entre autres freinent leur adoption comme renfort technique de composites.

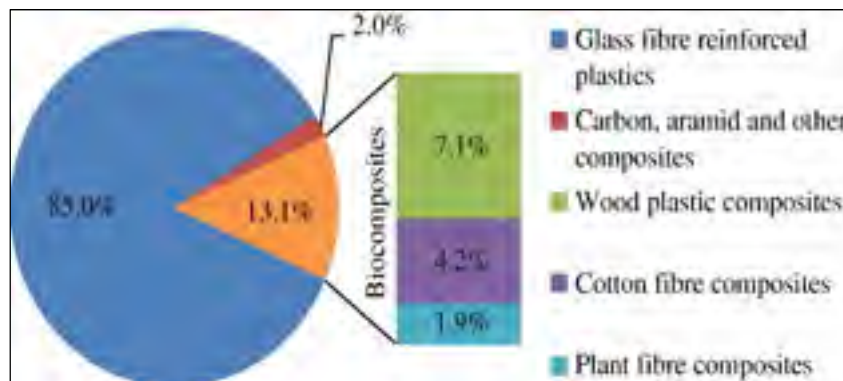


Figure 1.23 Disposition de fibres naturelles utilisées comme renfort dans le marché européen tirée de (Shah, 2013; Shah, Schubel et Clifford, 2013)

1.6.2 Performances mécaniques des fibres naturelles pour les non-tissés techniques

Généralement les fibres libériennes ont de meilleures propriétés mécaniques par rapport aux autres fibres naturelles (Beckwith, 2003). Parmi ces fibres, le lin offre les meilleures performances en combinant un faible coût, un poids léger et une très bonne résistance mécanique. Le jute aussi est connu pour ses propriétés mais il n'est pas aussi résistant et rigide que le lin. Globalement, les fibres naturelles ont des densités plus faibles et peuvent être beaucoup moins chères par rapport à la fibre de verre. Bien que leurs forces soient moins élevées, les fibres naturelles ont un énorme potentiel pour les applications où la rigidité et le poids sont des préoccupations majeures.

Thakur et al. (Thakur, Singha et Thakur, 2013) ont réalisé une étude sur les performances mécaniques (force à la rupture, résistance à la flexion et à l'usure) et la dégradation des composites renforcés avec différents pourcentages (10, 20, 30, et 40%) de la fibre cellulosique Oseille de Guinée. Cette étude a montré que les propriétés mécaniques des

composites renforcés à base de fibre naturelles sont largement influencées par les conditions environnementales lors de la production de la fibre et la qualité de fibre utilisée pour la fabrication du renfort. Cette étude a montré aussi que la présence de la fibre cellulosique dans un composite affecte la stabilité thermique de ce dernier. Il a été conclu que le composite est thermiquement moins stable que la résine utilisée comme matrice.

Toujours à propos des textiles techniques à base des fibres naturelles, A. Rawal et R. Anandjiwala ont fait une étude comparative entre les propriétés de non-tissés cardés aiguilletés fabriqués à base de polyester et de fibre de lin pour une application comme géotextile (Rawal et Anandjiwala, 2007). Cette étude a été basée sur une matrice expérimentale avec trois paramètres variables : le débit d'alimentation pour le cardage, le nombre de coups par minute et la pénétration des aiguilles dans les non-tissés. L'étude a montré que les non-tissés en fibres de polyester sont plus denses par rapport à ceux en fibres de lin, ce qui peut être attribué à la reprise élastique élevée de la fibre du polyester. La force de rupture des non-tissés à base de fibre de lin a varié entre 43 et 113 N/50mm en sens machine et 52 et 148 N/50mm en sens travers. En ce qui concerne les non-tissés à base de polyester, la force de rupture était située entre 107 et 289 N/50mm en sens machine et 164 et 467 N/50mm en sens travers. La perte de résistance a été attribuée aux grandes variations de longueur et de finesse inhérentes à la fibre de lin. Un effet de cette variabilité a aussi été observé au niveau de la porosité des non-tissés : il a été remarqué une grande variation des diamètres des pores par les non-tissés de lin par rapport aux non-tissés de polyester.

Une autre étude a été faite par Pratik K. Ichhaporia (Ichhaporia, 2008) sur des renforts à base de fibres naturelles. Il a été trouvé que pour un renfort à 100% de fibre de chanvre :

- ✓ La perméabilité à l'air diminue quand le poids du non-tissé augmente. Par contre le nombre de passage à travers l'aiguilleteuse n'avait pas un grand effet sur les résultats (passages de 1 à 4 fois dans l'aiguilleteuse).
- ✓ La résistance à la traction a été améliorée en augmentant la masse surfacique du non-tissé.

- ✓ Le poids du non-tissé ainsi que le nombre de passage dans l'aiguilleteuse changent la rigidité ainsi que le module à la flexion du non-tissé. L'amélioration de ces deux paramètres est le résultat d'une augmentation du poids du non-tissé et une réduction du nombre de passages dans l'aiguilleteuse.

Dans la même étude (Ichhaporia, 2008), des non-tissés à base d'un mélange de chanvre et de fibre synthétique (acide polylactique) ont été produits avec différents pourcentage de fibres synthétiques (25, 50 et 75%). Les auteurs ont montré que :

- ✓ La perméabilité à l'air du non-tissé diminue en augmentant le pourcentage de fibres synthétiques dans le mélange de fibres ;
- ✓ Pour une même masse surfacique des non-tissés, la perméabilité à l'air augmente en augmentant le nombre de passage par l'aiguilleteuse ;
- ✓ Le nombre de passage à l'aiguilleteuse n'affecte pas vraiment la résistance à la traction des non-tissés ;
- ✓ La résistance à la traction augmente de manière proportionnelle avec le pourcentage de fibres synthétiques dans le non-tissé.

Une autre étude sur des non-tissés réalisés avec des fibres de Lin et de PVA (polyacétate de vinyle) et des fibres de lin avec une fibre bicomposante PA6(CoPA6) (Polyamide : Copolyamide) a donné les résultats suivants (Fages et al., 2013) :

- ✓ Les tests de caractérisation de la masse surfacique réalisés sur les deux types de renforts ont montré que les trois non-tissés à base de fibres de lin/PVA, même avec des pourcentages différents (90/10, 80/20 et 70/30), ont une masse surfacique de 400 g/m² avec un coefficient de variation de 30%. D'autre part les renforts fabriqués à base de fibres de lin/PA6(CoPA6) avec des pourcentages différents (90/10, 80/20 et 70/30) ont une masse surfacique de 440 g/m² avec une variation de 5%. Ceci indique que les non-tissés réalisés à base de fibre de lin et de la fibre bicomposante PA6/CoPA6 sont plus homogènes que ceux réalisés avec la fibre de lin et de PVA.

- ✓ Les résultats des tests mécaniques faits sur les non-tissés fabriqués à partir des fibres de lin et de PVA ont été relativement faibles avec une force maximale de 100N pour le sens machine et 72N pour le sens travers. Les valeurs de résistance mécanique trouvées pour 10%, 20% et 30% de la fibre synthétique PVA sont 91, 72 et 61 N respectivement. Quand le pourcentage de fibre synthétique augmente, la résistance diminue, possiblement à cause de la non-homogénéité des deux fibres.
- ✓ En ce qui concerne les renforts réalisés avec la fibre de lin et la fibre bicomposante PA6/CoPA6, les résistances mécaniques trouvées variaient entre 174N et 489N en sens machine et entre 145N et 341N en sens travers respectivement. Ces valeurs augmentent quand le pourcentage de la fibre bicomposante augmentait de 10 à 30%.
- ✓ L'allongement à la rupture des non-tissés réalisés à base du Lin/PVA a été inférieur par rapport à celui des non-tissés réalisés avec le lin/PA6(CoPA6). Par contre la variation des pourcentages des fibres naturelles dans les non-tissés n'affecte pas cette propriété.
- ✓ En ce qui concerne les valeurs d'isolation acoustique et thermique, les non-tissés réalisés à base de fibre bicomposante étaient les plus performants.
- ✓ Dans cette étude, la voie humide a été utilisée comme technique de fabrication des non-tissés suivie par un calandrage pour la consolidation. Les performances mécaniques des non-tissés à base du lin/PVA ont été moins élevées que celles obtenues par les non-tissés lin/PA6(CoPA6). Plusieurs hypothèses peuvent être avancées, par exemple que la température utilisée pour le calandrage n'a pas été suffisante pour faire fondre la fibre de PVA pour une bonne adhésion et consolidation du non-tissé, ou que, pour ce genre de renfort, les fibres bicomposantes sont les meilleures, puisque, suite au thermoliage, la température ne fait fondre que la gaine et n'affecte pas le cœur, qui garde ainsi toutes ses propriétés mécaniques et assure un lien entre les fibres naturelles. Une autre explication possible est qu'au niveau de la composition chimique, la fibre bicomposante a une meilleure compatibilité avec la fibre de lin et assure une

meilleure adhésion avec la fibre naturelle ce qui améliore les performances du non-tissé.

1.6.3 Applications des non-tissés techniques à base des fibres naturelles dans les composites

La relation entre les fibres naturelles et les matériaux composites remonte à des milliers d'années quand les gens utilisaient tout ce qu'ils trouvaient afin de construire des abris, des maisons, des murs et des bâtiments (Beckwith, 2003). Selon la littérature, l'utilisation des matériaux argileux renforcés par la paille remonte à au moins 3000 ans en Égypte. Les produits du bois ont également été fréquemment utilisés pour différentes applications. Par exemple on trouve, dans la Chine ancienne, le "Tulou", un des plus anciens bâtiments bois-argile utilisés jusqu'aujourd'hui qui date d'il y a 1200 années et peut encore être observé dans le sud de la Chine (Hodzic et Shanks, 2014).

Les composites à renfort fibreux naturel ont récemment été employé dans différentes applications commerciales comme les composants pour portes, fenêtres, meubles, les installations sportives, l'industrie d'automobile et d'emballage, etc. (Thakur, Thakur et Gupta, 2014). Les matériaux composites faits à partir de fibres cellulosiques comme les fibres végétales montrent des avantages économiques et environnementaux remarquables (Gassan et Gutowski, 2000). Normalement les fibres cellulosiques sont intrinsèquement polaires en raison de la présence de groupes hydroxyles et carboxyliques dans leur structure (Ratna Prasad et Mohana Rao, 2011). Mais malgré cette polarité inhérente qui nuit à la compatibilité avec la matrice polymère, les matériaux composites faits de fibres naturelles non-modifiées présentent souvent des propriétés mécaniques satisfaisantes.

Parmi les aspects uniques des matériaux de renfort conçus avec des fibres, les propriétés mécaniques des matériaux peuvent être modifiées pour être adaptées selon l'application (Zampaloni et al., 2007). En changeant l'orientation ou le placement des fibres, le matériau conçu peut présenter des propriétés isotropes ou fortement anisotropes selon le résultat final désiré.

L'hydrophobicité des fibres végétales et leur sensibilité aux températures élevées constituent néanmoins les défis les plus importants pour une application comme renfort dans les composites.

Marques et al. (Marques et al., 2014) ont réalisé une étude sur l'amélioration des propriétés mécaniques d'un composite contenant 10% de fibres naturelles (Curauà, jute et lin) et de 90% de polypropylène à l'aide d'un traitement alcalin sur les fibres. Après l'immersion de la fibre naturelle dans 5% en masse d'hydroxyde de sodium (NaOH), il a été remarqué que tous les composites à base de fibres traitées ont été plus performants mécaniquement que ceux basés sur des fibres non-traitées. Les fibres traitées ont aussi connu une amélioration en ce qui concerne les propriétés thermiques, et une augmentation du degré de cristallinité. Le composite fabriqué avec la fibre Curauà avait la meilleure amélioration puisque la fibre avait une meilleure distribution et adhésion dans le composite.

Un nombre important d'études ont été réalisées sur la modification chimique des fibres. Yan L et al. (Yan, Chouw et Yuan, 2012) ont trouvé que le traitement alcalin améliore les propriétés en flexion des composites renforcés de fibres naturelles. Par rapport aux composites non-traités, le lin/époxy, le linen/époxy et le bambou/époxy ont connu respectivement 16,1%, 16,7% et 13,6% d'augmentation en résistance à la flexion et 7,2%, 9,1% et 6,3% d'augmentation du module de flexion.

Une comparaison a été faite entre des composites réalisés à base de fibres naturelles/Époxy et d'autre réalisés à partir de fibres de verre/Époxy (Yan, Chouw et Yuan, 2012). Trois composites ont été préparés à partir d'Époxy/Lin, Époxy/Linen et Époxy/Bambou. Les résultats en traction ont été de 120, 105 et 54 MPa respectivement. Par comparaison l'époxy pur a donné 82 MPa.

De leur côté, Rong et al. (Rong et al., 2001) ont trouvé que les composites réalisés avec de la fibre de sisal non-traitée et de l'époxy ont pu atteindre 391 ± 45 MPa. Par comparaison, des

composites réalisés à partir de fibre de verre/Époxy ont donnés de résultats en traction de 400 MPa (Asi, 2009).

1.7 Procédé de fabrication des non-tissés par voie sèche

1.7.1 Pourquoi la voie sèche

Le choix de la voie sèche provient principalement de l'impossibilité d'utiliser un procédé de fabrication humide, puisque le projet se base sur la fibre de jute et de kénafr, des fibres naturelles sensibles à l'eau. Par ailleurs le procédé aérodynamique n'offre pas un niveau d'enchevêtrement permettant d'atteindre les performances mécaniques recherchées dans le projet. Il est à noter que le Groupe CTT possède une ligne de prototype de non-tissés comportant un cylindre d'ouvraison, une carde, un étaleur-nappeur et une aiguilleteuse.

1.7.2 De la fibre au non-tissé

1.7.2.1 La fibre naturelle

La fibre du jute est une fibre naturelle disponible en très grande quantité (Debnath et Madhusoothanan, 2010). C'est une fibre peu couteuse mais relativement grossière par rapport au coton, à la laine, à la soie, etc. C'est pour cette raison que l'usage industriel de cette fibre se concentre sur les matériaux d'emballage, les textiles pour l'ameublement et les géotextiles. En particulier l'utilisation du jute sous forme de non-tissé pour les géotextiles est liée à la disponibilité de la fibre et à son prix relativement moins élevé par rapport à d'autres fibres. La fibre de jute est essentiellement cultivée dans les régions équatoriales, tropicales et subtropicales (Khan et Khan, 2015; Roy et Lutfar, 2012). Parmi les pays producteurs de la fibre de jute, on trouve le Thaïlande, la Chine, l'Inde, et le Bangladesh. Celui-ci fournit plus de 90% de la production mondiale de jute brut et de fibre de jute.

Malgré l'existence de plusieurs espèces de fibre de jute, appelée scientifiquement *Corchorus*, seules deux variétés sont cultivées pour être commercialisées. Il s'agit du *C. capsularis* connu

sous le nom de «White Jute» qui est le plus utilisé dans le domaine du textile, et le *C. Olitorius* connu sous le nom du «Tossa jute» (Krishnan, Doraiswamy et Chellamani, 2005).

Après le rouissage des plantes, les fibres de jute sont extraites traditionnellement à la main, lavées à l'eau propre froide pour éliminer toutes les saletés et exposées pendant 4 à 7 jours sous le soleil pour le séchage avant le stockage. Parmi les principaux paramètres contrôlant la qualité de la fibre de jute, il existe la couleur, la texture, la longueur, la force, etc.

La fibre de kénaf (*Hibiscus cannabinus*, L. Family Malvaceae) est une plante annuelle herbacée qui peut être cultivée dans un large éventail de conditions climatiques (Nishino et al., 2003). Par exemple, elle peut pousser à une vitesse de plus de 3 m en 3 mois, même dans des conditions ambiantes moyennement clémentes. L'Homme a fait usage du kénaf depuis les temps anciens, traditionnellement comme corde, toile et sac. Le kénaf a été cultivé activement ces dernières années pour deux raisons principales. La première est que le kénaf absorbe l'azote et le phosphore, et la deuxième est que le kénaf accumule du dioxyde de carbone à un taux relativement élevé. Cette plante a donc un large intérêt environnemental.

La fibre de kénaf a également de nombreux avantages qui lui valent d'être utilisée comme renfort de matériaux composites (Nishino et al., 2003). En effet, en plus d'être une source cellulosique avec des avantages économiques et écologiques, le kénaf présente une faible densité, une absence d'abrasivité au cours du traitement, des propriétés mécaniques spécifiques élevées, etc. Récemment, le kénaf a aussi été utilisé comme matière première en alternative au bois dans les pâtes à papier afin d'éviter la destruction des forêts. Il est également utilisé pour la fabrication de tapis non-tissés pour l'industrie automobile.

Les filaments de kénaf sont constitués de fibres individuelles discrètes, généralement de 2 à 6mm de long. Ces caractéristiques peuvent varier selon la source, l'âge, la technique de séparation et l'histoire de la fibre (Akil et al., 2011). Le rendement et la composition des composants de la plante de kénaf peuvent également être affectés par de nombreux facteurs,

y compris le cultivar, la date de plantation, la photosensibilité, la durée de la saison de croissance, les populations de plantes et la maturité de plantes.

1.7.2.2 Ouvraison

Dans la tradition textile, l'adage dit « mieux ouverts, moitié cardés ». Le besoin de l'ouverture des fibres et du mélange est né de la nécessité de s'attaquer à l'incohérence dans et entre les lots de fibres, d'autant qu'à une certaine époque, les fibres utilisées dans le cardage étaient principalement des fibres naturelles : leurs propriétés physiques étaient souvent affectées par des facteurs saisonniers et environnementaux. En particulier, elles exigeaient un nettoyage mécanique pour éliminer les impuretés (Russell, 2006).

Le processus d'ouverture de fibres se base sur la conversion des grandes balles de fibres en des petites touffes ou même des fibres individuelles dans certains cas. L'objectif de l'ouverture des fibres est de maximiser le degré de fibres ouvertes tout en minimisant leur endommagement, surtout la rupture. Industriellement, l'ouverture se réalise avec des machines spécifiques, en sélectionnant le système d'ouverture ainsi le débit adéquat pour chaque type de fibre. En général les variations de débit d'alimentation à travers une machine d'ouverture ont tendance à entraîner des variations dans le degré d'ouverture des fibres ainsi que leur détérioration.

Le contrôle de l'ouverture des fibres est nécessaire pour s'assurer qu'une masse suffisante de fibres passe à travers le dispositif d'alimentation afin de répartir uniformément la charge et obtenir la production souhaitée.

1.7.2.3 Cardage

Le cardage est parmi les procédés textiles les plus importants. Son objectif est d'entremêler les fibres et éliminer les impuretés et les fibres courtes, ainsi que de redresser et paralléliser les fibres (Danielczyk et Stadnicki, 2012). La carde est aussi responsable de la formation des voiles. En ce qui concerne la qualité du cardage, elle dépend principalement de la hauteur et

la distance de l'écart entre le cylindre principal et le cylindre travailleur ainsi qu'entre le cylindre principal et le cylindre peigneur (Figure 1.24).

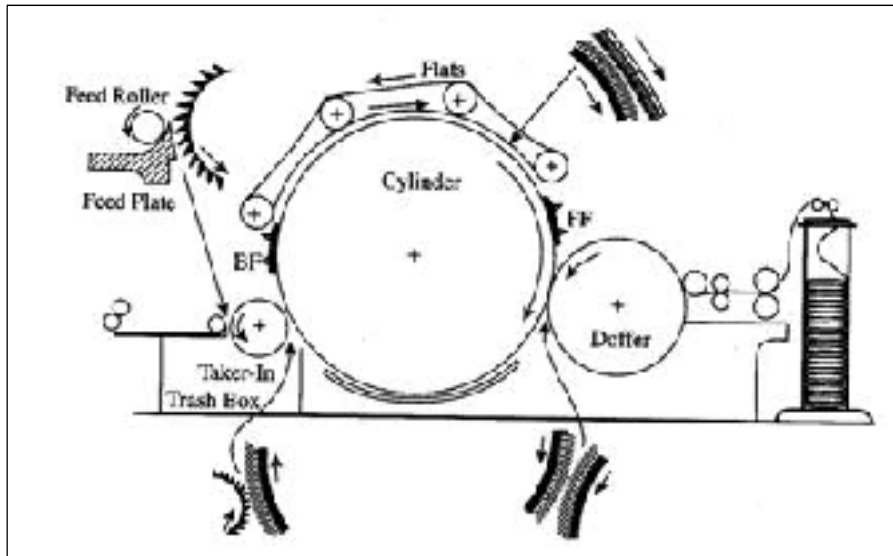


Figure 1.24 Organes de la carde et leurs garnitures (Fayala, 2013)

Le cardage reste un procédé qui offre une grande flexibilité et permet d'utiliser une vaste sélection de matériaux pour fabriquer des produits aux caractéristiques différentes en termes de performances mécaniques, de porosité, de densité, etc (Doguc, 2004). Les autres avantages du cardage sont l'uniformité du voile, l'excellent mélange des fibres, le contrôle du rapport de forces sens machine/sens travers, ainsi qu'une grande flexibilité au niveau des taux de production et des produits. Les aiguilles des garnitures jouent d'ailleurs un rôle très important au niveau de l'homogénéité et l'uniformité du voile sortant de la carde (Danielczyk et Stadnicki, 2012).

Le cardage d'une fibre dépend de nombreux paramètres interdépendants. La modification d'un de ces paramètres peut entraîner une différence significative par rapport à la possibilité du cardage de la fibre et au résultat obtenu (Doguc, 2004). Parmi ces paramètres, on trouve la longueur de la fibre, la finesse de la fibre, la rigidité, l'ouverture des fibres, la densité, la configuration de la machine, le type de carde choisi, le nombre de fibres traitées/unité de temps, la vitesse relative des rouleaux, etc.

1.7.2.4 Étaleur nappeur

L'étaleur-nappeur est une machine de transfert de voile continu, située normalement à la sortie de la carde. Le voile est posé sur un convoyeur inférieur, qui est perpendiculaire à la nappe alimentée pour former une nappe stratifiée en diagonale, qui se compose généralement de 4 à 15 couches en fonction du besoin (Figure 1.25).

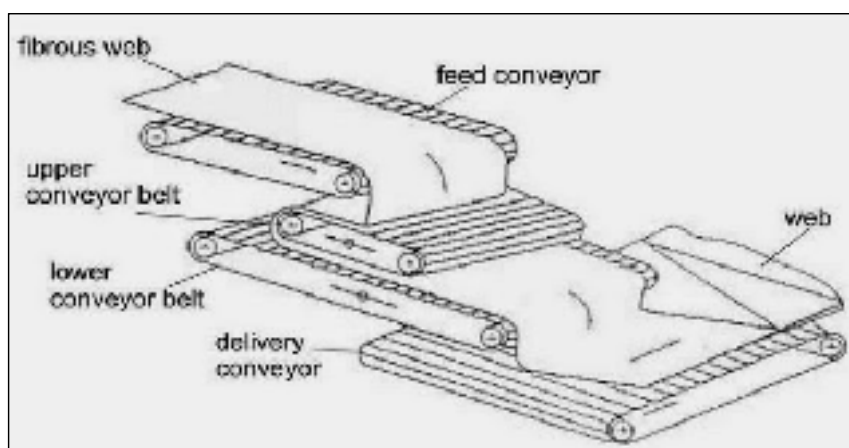


Figure 1.25 Principe de fonctionnement d'un étaleur-nappeur

Habituellement, le poids de la nappe déposée transversalement est compris entre 50 g/m^2 et 1500 g/m^2 . Il dépend des propriétés de la fibre et du poids du voile par unité de surface.

Le rapport de la vitesse d'entrée du voile par rapport à la vitesse de sortie de la nappe détermine l'angle d'étalement et la vitesse de production linéaire en fonction à la fois de la largeur d'étalement et le nombre de couches. La largeur d'étalement varie en fonction des besoins et d'applications visées pour chaque non-tissé produit. Pour cette raison, le nappage permet d'avoir des nappes beaucoup plus larges que les voiles sortis de la carde qui sont limités à une largeur de moins de 5m et plus habituellement sont de 2,5m.

1.7.2.5 Aiguilletage

L'aiguilletage reste une étape critique par rapport aux performances du non-tissé produit. Ramkumar et al. (Ramkumar et Roedel, 2003) ont montré que le taux de pénétration des aiguilles a une influence majeure par rapport aux propriétés physicomécaniques du non-tissé produit à base des fibres de polyester. L'étude a aussi montré que le nombre de coups/min a un effet positif sur l'épaisseur et la perméabilité à l'air des non-tissés. Les non-tissés aiguilletés à une vitesse élevée ont une meilleure homogénéité, ce qui peut augmenter leur force de rupture dans les deux sens (machine et travers). Ils observent aussi une légère augmentation du coefficient de friction.

Une autre étude a été menée par Debnath et al. (Debnath et Madhusoothanan, 2012) sur l'effet de l'aiguilletage sur plusieurs paramètres des non-tissés produits. Cette étude a été faite avec deux pourcentages de fibres polypropylène/jute (60/40 et 80/20 %). Il a été montré que l'épaisseur initiale du non-tissé augmente de manière proportionnelle avec l'augmentation de la masse surfacique. L'épaisseur du non-tissé diminue avec l'augmentation de la densité d'aiguilletage.

L'augmentation de la densité d'aiguilletage et de la masse surfacique peut réduire la compressibilité de non-tissé (Debnath et Madhusoothanan, 2012). Finalement sa résistance à la compression augmente en augmentant la quantité de polypropylène.

1.7.2.6 Consolidation thermique

Le concept de la consolidation thermique a été inventé par Reed en 1942 (Russell, 2006). C'est un procédé de consolidation qui peut être utilisé pour les trois voies de fabrication des non-tissés : sèche, humide et fondue. La nappe constituée de fibres thermoplastiques et non-thermoplastiques est soumise à une température de fusion ou de ramollissement des fibres thermoplastiques suivie par un refroidissement pour solidifier les zones de liaison.

Ce procédé de consolidation reste économiquement attractif grâce aux vitesses de production élevées et à l'économie d'énergie significative par rapport au procédé de consolidation chimique par exemple (évaporation d'eau importante lors du procédé).

Généralement, la consolidation thermique nécessite un composant thermoplastique, sous forme de fibres, de poudre, de film ou de voile thermo-fusible, ou comme gaine quand il s'agit d'une fibre bicomposante.

CHAPITRE 2

MÉTHODE ET MATÉRIAUX

2.1 Méthodes de caractérisation des fibres

2.1.1 Longueur des fibres naturelles

La caractérisation de la longueur des fibres s'effectue selon la norme ASTM D5103 (ASTM international, 2012). Il s'agit de réaliser 50 tests sur des fibres individuelles afin de déterminer la longueur moyenne du lot de fibres utilisées. Cinq séries de 10 fibres individuelles sont prises au hasard afin de déterminer la distribution des longueurs dans un même lot de fibres.

2.1.2 Diamètre des fibres

Le MEB ou microscopie électronique à balayage (Scanning Electron Microscopy en anglais) est une technique puissante pour observer les surfaces textiles de manière plus détaillée. Les échantillons peuvent être examinés à différents grossissements allant jusqu'à 10000 fois et plus pour des MEB plus modernes (Langenhove, 2015). C'est un outil polyvalent qui fournit non seulement des informations morphologiques sur les matériaux, mais aussi chimiques et cristallographique dans certain cas (Kohli et Mittal, 2016).

Dans le cas du projet, la mesure de diamètre des fibres s'effectue en insérant un lot de fibres dans un bouchon en caoutchouc. Des tranches relativement fines sont découpées afin d'observer la section des fibres à l'aide du MEB. Le diamètre est mesuré avec le logiciel associé. Étant donné le caractère non cylindrique des fibres naturelles, le diamètre a été déterminé en calculant le diamètre d'un disque de même surface que la fibre en suivant la relation suivante : $D = 2 * \sqrt{(S/\pi)}$.

Avec

- D : diamètre de la fibre (μm)
- S : surface de la fibre (μ^2)
- π : 3,1415

2.1.3 Résistance et allongement à la rupture

Des propriétés comme la tension, la relaxation, le fluage et la fatigue de fibres simples fines ont été étudiées par Bunsell et al en 1971 en utilisant une machine d'essai universelle (Bunsell, 2009). Pendant le test, la fibre est maintenue entre deux pinces. Une pince est reliée à un fléau mobile qui contient également la cellule de charge. En ce qui concerne les mesures de résistance et d'allongement des fibres effectuées au niveau de ce projet, la norme ASTM D3822 (ASTM international, 2007) a été suivie avec l'aide d'une cellule de 5N et de pinces à fibres. Cette méthode consiste à conditionner les fibres dans un laboratoire pendant 24h sous une température de $21 \pm 1^\circ\text{C}$ et une humidité relative de $65 \pm 2\%$ HR (24h).

2.1.4 Mouillabilité

En s'inspirant de la norme ASTM D5946 (ASTM international, 2009) destinée aux étoffes et aux échantillons textiles, une méthode a été développée au Groupe CTT afin de mesurer la mouillabilité des fibres naturelles en fabriquant de petites pastilles à l'aide d'une presse hydraulique (Figure 2.1). Une goutte d'eau est déposée sur la surface de la pastille et son angle de contact est déterminé à l'aide de photos prises à fort grossissement ou d'un goniomètre selon le cas. En ce qui concerne les angles de contact :

- Un matériau avec un angle $\theta = 0$ est un hydrophile parfait ;
- Un angle $0 < \theta < 90^\circ$ indique un matériau hydrophile ;
- Un angle $90^\circ < \theta < 150^\circ$ indique un matériau hydrophobe ;
- Un angle $150 < \theta < 180^\circ$ correspond à un matériau super hydrophobe.

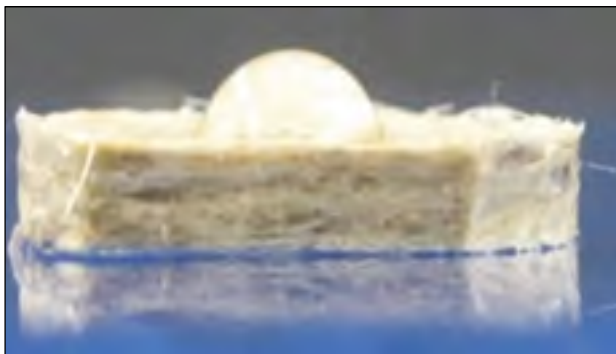


Figure 2.1 Dépôt d'une goutte d'eau sur une pastille préparée avec la fibre de kénaf vierge

2.1.5 Analyse de composition

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IFTR) est une technique sensible qui a été développée afin d'identifier les produits chimiques organiques pour toute une gamme d'applications. Elle permet aussi de caractériser certaines substances inorganiques. Parmi les utilisations typiques de l'analyse IFTR figurent l'identification des mélanges simples de composés organiques et inorganiques, la vérification indirecte des traces de contaminants organiques sur des surfaces, et l'analyse des adhésifs, des revêtements et des agents d'adhérence ou de couplage.

Dans le cadre de notre projet, l'analyse IFTR est utilisée afin d'identifier si les fibres utilisées, vierges ou recyclées, présentent des contaminants sur leur surface.

2.1.6 Analyse thermogravimétrique (TGA)

L'analyse thermogravimétrique consiste à mesurer la variation de la masse d'un échantillon soumis à un programme de température précis sous une atmosphère contrôlée. Cette analyse permet de déterminer la perte (émission de vapeurs) ou le gain (fixation de gaz, oxydation, etc...) de la masse en fonction du temps et/ou de la température.

À partir de l'analyse thermogravimétrique, on obtient un thermo-gramme qui présente la variation de la masse en fonction du temps et/ou de la température.

Pour effectuer cette analyse, la préparation de l'échantillon inclut de peser ce dernier, enregistrer les informations, établir une méthode qui consiste à monter la température de 30°C jusqu'à 950°C, de rester en isotherme pendant 2 à 3 minutes, puis de revenir à 30°C, le tout sous atmosphère d'azote. Ces différentes températures sont responsables de certaines réactions chimiques, ce qui libère des espèces gazeuses ou forment des oxydes, entraînant une variation de masse de l'échantillon étudié. Ce changement de masse est enregistré sous forme d'un graphe en fonction de la température. Ci-dessous (Figure 2.2) un exemple de ce type de graphe.

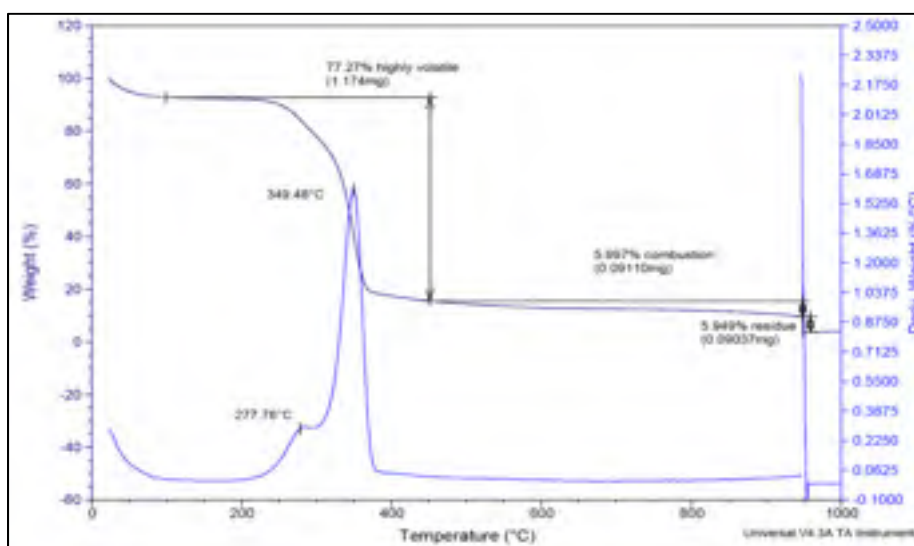


Figure 2.2 Courbe de TGA pour l'analyse de la fibre du kénaf

2.1.7 Détermination de la température de fusion pour les fibres bicomposante

L'analyse calorimétrique différentielle (DSC) est une technique de mesure pour identifier le flux de chaleur associé à des phénomènes sur le matériau étudié (Cammack, 2006; IFIS, 2009). Cette analyse se fait en se basant sur une comparaison avec une référence inerte sous une température précise. La DSC est utilisée pour mesurer plusieurs propriétés physiques à savoir la transition vitreuse d'un matériau, sa fusion, sa pureté, son évaporation, sa sublimation son changement de phase, sa cristallisation, etc.

Toujours sous atmosphère contrôlée, pendant une chauffe ou un refroidissement, toute transformation intervenant dans un matériau est accompagnée d'un échange de chaleur. La DSC permet de déterminer la température de cette transformation et de quantifier la chaleur associée.

Dans le cas de ce projet, la DSC a été utilisée pour mesurer la température de fusion des fibres bicomposante. Ci-dessous (Figure 2.3) un exemple de graphe DSC obtenu lors de nos analyses pour la fibre bicomposante PET/coPET.

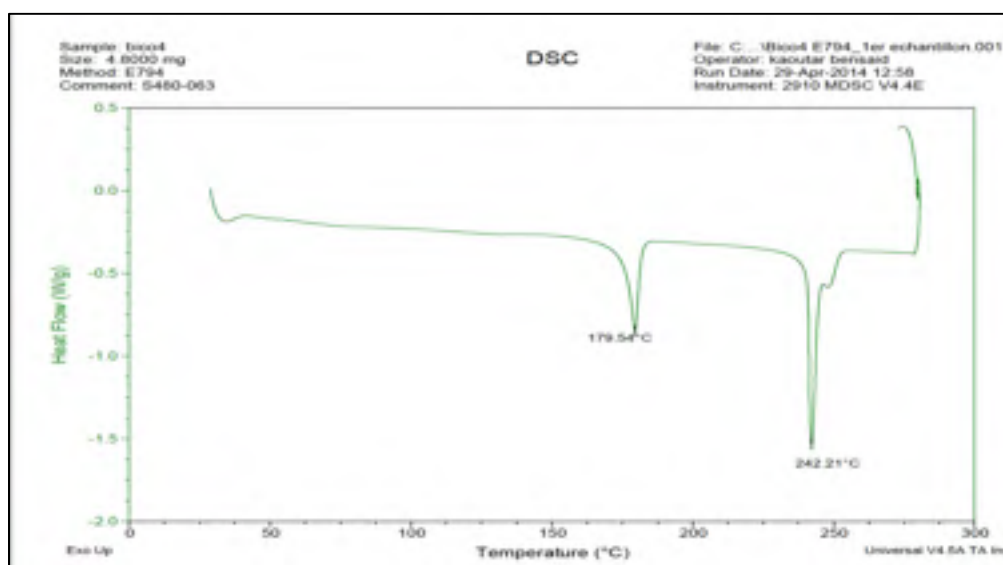


Figure 2.3 Graphe d'analyse DSC de la fibre bicomposante (Exo up) (Bico4)

2.2 Procédé de fabrication des non-tissés

Dans ce qui suit, une description du procédé de fabrication utilisé ainsi que des améliorations qui ont été mises en place afin de produire les non-tissés tout au long de ce projet est donnée.

2.2.1 Matériaux

Comme il est détaillé plus loin dans les sections 2.4, 2.5 et 2.6, un total de cinq fibres, deux fibres naturelles et trois fibres synthétiques, ont été utilisées pour ce projet. De manière

générale, la proportion de fibre naturelle était de 85%, avec 15% de fibre bicomposante. Dans le cas de l'étude du caractère hydrophobe, une proportion était de 80% de fibre naturelle et 20% de fibre bicomposante. Pour l'étude de l'effet du pourcentage de la fibre synthétique sur les performances des non-tissés (CHAPITRE 6), le pourcentage de fibre bicomposante a été varié entre 10 et 20%.

2.2.2 Ouvraison

L'ouvraison a été réalisée avec un cylindre à air comprimé (Figure 2.4) développé pour l'ouvraison des fibres naturelles au cours d'un projet précédent. Il est muni de deux buses au sommet et d'une grille au fond. Les trois paramètres ajustables sont : la pression d'air, le temps de traitement, et la masse de fibres introduites dans le cylindre.



Figure 2.4 Cylindre en plexiglas
pour ouvraison des fibres

2.2.3 Cardage

Le laboratoire de prototypage textile du Groupe CTT est équipé d'une carde de 70 cm de large. Un système de sécurité a été mis en place autour de la ligne de non-tissé, ce qui a créé un espace entre la sortie de la carde et l'entrée de l'étaleur-nappeur. Pour permettre le

passage de la fibre, une feuille de téflon (avec un coefficient de frottement très faible, de 0,04) a été installée en surélevant la carde par rapport à l'étaleur-nappeur afin de créer une pente positive. Par ailleurs, la présence du plexiglas qui constitue la majeure partie du système de sécurité de la ligne de non-tissé (Figure 2.5) créait un problème de statique qui influençait la continuité des voiles à la sortie de la carde. Pour résoudre ce problème, un système d'humidification a été positionné à la sortie de la carde.

Un seul paramètre a pu être ajusté au niveau du cardage : il s'agit de la vitesse de la carde.



Figure 2.5 La carde et l'étaleur nappeur de la ligne non-tissé du Groupe CTT

2.2.4 Aiguilletage

L'aiguilleteuse utilisée lors de la production des non-tissés dans ce projet est munie d'un plateau de 1000 aiguilles de jauge 36. Les paramètres ajustés au cours du projet sont la fréquence d'aiguilletage, la profondeur d'aiguilletage et les vitesses d'entrée et de sortie.

2.2.5 Thermoliage

Pour le thermoliage des non-tissés produits, des échantillons ont été découpés dans le non-tissé aiguilleté selon les dimensions de la norme pour les tests de traction ASTM D5035 (ASTM international, 2015) (5x15 cm) et selon les deux sens conventionnels (sens machine et sens travers). Ils ont été placés dans un cadre d'épaisseur de 0,52 mm.

Le thermoliage a été effectué avec une presse chauffante en suivant la norme ASTM 4703 (ASTM international, 2016) avec une pression de 50 kg pendant deux minutes et 0,5 tonnes pendant une minute et un refroidissement de 15°C/min. La température a été ajustée selon les besoins. La figure suivante (Figure 2.6) présente la presse chauffante utilisée dans le Groupe CTT.



Figure 2.6 Presse chauffante utilisée pour le thermoliage des échantillons des non-tissés produits

2.3 Méthodes de caractérisation des non-tissés

Les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des non-tissés qui jouent un rôle important sur leur aptitude à l'usage dépendent des propriétés, de la composition et de la structure du non-tissé produit. La composition dans ce contexte se rapporte aux propriétés des fibres ainsi qu'aux procédés de finition qui ont été utilisés, soit au niveau du non-tissé fini ou au niveau des matières premières.

Dans ce projet, trois propriétés sont importantes au niveau des non-tissés produits : il s'agit de la masse surfacique, de l'épaisseur ainsi que de la résistance mécanique.

2.3.1 Masse surfacique et épaisseur des non-tissés

Le poids d'un non-tissé est défini comme étant la masse par unité de surface du non-tissé, donné généralement en g/m^2 .

L'épaisseur d'un textile est définie comme étant la distance entre les deux surfaces du textile sous une pression bien déterminée, appliquée à l'aide d'un épaisseurimètre. Cette épaisseur peut varier si le tissu est compressible.

La masse surfacique et l'épaisseur du non-tissé déterminent la densité du textile, qui influence la liberté de mouvement des fibres et leur taux de compaction et leur compaction. La liberté de mouvement des fibres joue un rôle important au niveau des propriétés mécaniques du non-tissé, et détermine sa porosité ainsi que la taille des pores.

La densité d'un non-tissé, ou sa masse volumique, est le poids par unité de volume exprimé en kg/m^3 . Il est égal au poids mesuré par unité de surface (masse surfacique kg/m^2) divisée par l'épaisseur du non-tissé (m). La densité du non-tissé est un facteur important pour certaines applications car elle influence la facilité avec laquelle les fluides, la chaleur et le son traversent un non-tissé.

2.3.2 Force et allongement à la rupture des non-tissés

Les propriétés mécaniques d'un non-tissé restent parmi les paramètres les plus importants afin de déterminer les fonctionnalités d'un non-tissé. Généralement les propriétés mécaniques des non-tissés sont testées dans les deux sens, en sens machine (MD) et en sens travers (CD). Elles peuvent aussi être testées dans d'autres directions si nécessaire. Plusieurs méthodes de test sont disponibles pour les essais de traction et sont décrites dans différentes normes. Dans l'essai de la résistance à la rupture, les extrémités d'une éprouvette rectangulaire sont serrées par des mâchoires à une distance fixe.

Les non-tissés donnent habituellement une force maximale avant la rupture. Selon les standards, le non-tissé est étiré à une vitesse de 100mm/min (pour les normes ISO) ou 300 m/min (pour les normes ASTM) et la distance de séparation des deux mâchoires du dynamomètre est de 200 mm (norme ISO) ou 75 mm (norme ASTM) (Russell, 2006). En ce qui concerne le largueur du non-tissé, chaque spécimen est d'une largeur de 50 mm (norme ISO) ou soit de 25 mm ou de 50 mm (normes ASTM). Pour ce projet, on utilise la norme

ASTM D5035 (ASTM international, 2015), qui demande des spécimens de 50 mm de large et 150 mm de longueur, avec une distance fixe entre les deux mâchoires de 75mm. La vitesse de déformation est de 300m/min.

2.4 **Fibre de jute recyclé**

Cette section présente les caractéristiques de la fibre de juste recyclée utilisée dans le projet.

2.4.1 **Longueur de la fibre de jute recyclée**

La fibre de jute a une longueur moyenne de 44 ± 13 mm, ce qui reste admissible au niveau du cahier de charges du projet puisque les non-tissés seront fabriqués avec voie sèche en utilisant une carte. En effet, selon le graphe de distribution de la longueur des fibres (Figure 2.7), plus de 80% des fibres ont une longueur supérieure à 40 mm. Relativement à la revue littéraire élaborée dans le chapitre 1.2.4, la fibre de jute vierge a une longueur de 60 mm.

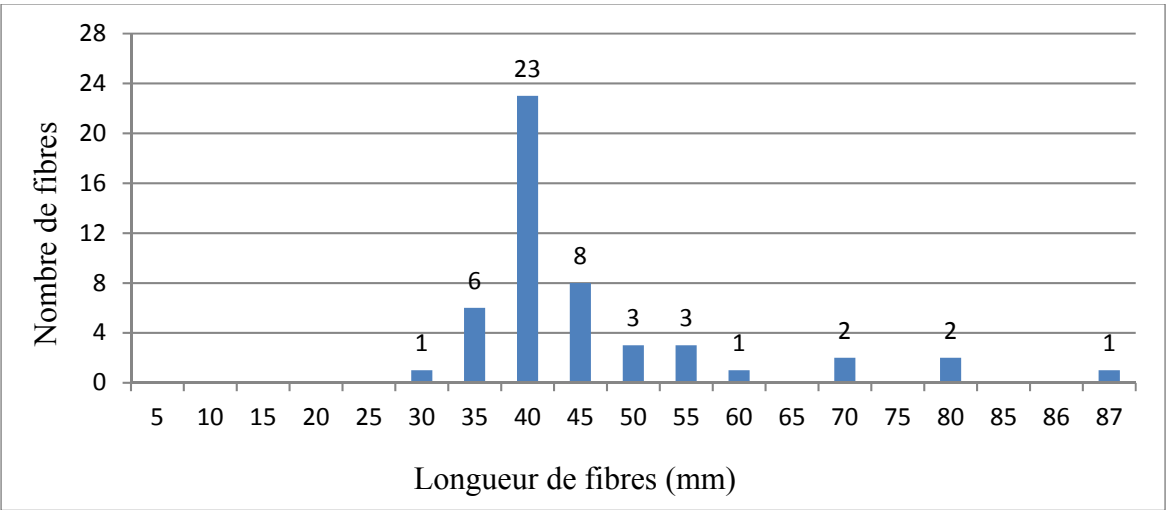
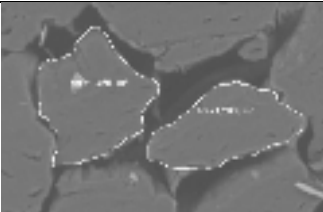
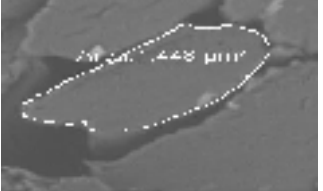


Figure 2.7 Distribution des fibres de jute selon leur longueur

2.4.2 Diamètre de la fibre de jute recyclée

Sept mesures ont été faites pour calculer le diamètre de la fibre de jute recyclée. La fibre de jute a un diamètre moyen de $45 \pm 6 \mu\text{m}$. C'est une fibre relativement grossière. Relativement à la revue littéraire élaborée dans le chapitre 1.2.4, il a été trouvé que la fibre de jute vierge peut avoir des diamètres allant de 40 jusqu'à $350 \mu\text{m}$.

Tableau 2.1 Résultats individuels par la détermination de diamètre de la fibre de jute recyclée

Tests	surface (μm^2)	Diamètre (μm)	
1	1466	43,2	
2	1209	39,2	
3	1312	40,9	
4	2220	53,2	
5	1306	40,8	
6	2211	53,1	
7	1448	42,9	
Moyenne	1596,0	45,1	
écart-type	400,2	5,8	

2.4.3 Force et allongement à la rupture de la fibre de jute recyclée

La Figure 2.8 montre la distribution des fibres selon la force de rupture. La fibre de jute recyclé a une force de rupture élevée, avec une moyenne de 88 ± 33 cN ce qui est équivalent à une contrainte de 551 MPa. Par contre, son allongement est relativement faible avec une moyenne de $1,5 \pm 0,7\%$. Ces valeurs sont en accord avec ce qui est rapporté dans la littérature avec une valeur variant de 187 à 773 MPa et un allongement de 1,4 à 3,1% (paragraphe 1.2.4)

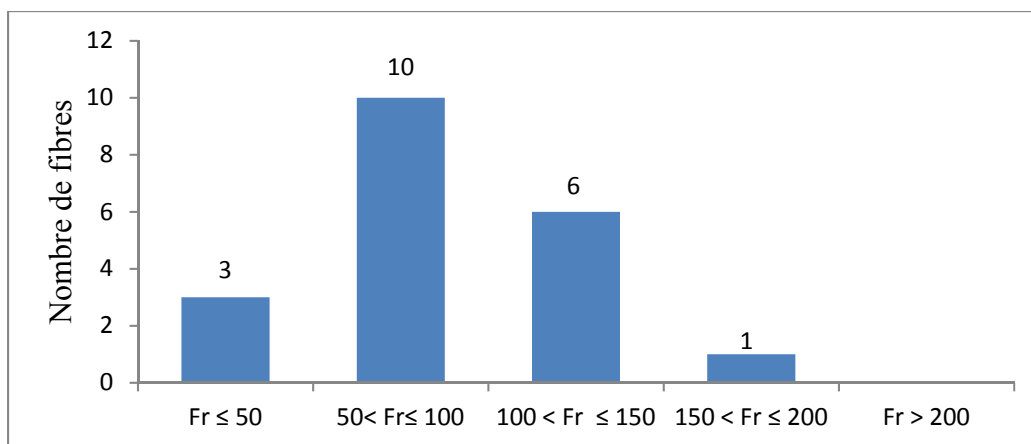


Figure 2.8 Distribution des fibres de jute selon la force de rupture (en cN)

2.4.4 Température de décomposition de la fibre de jute recyclée

La fibre de jute commence à perdre environ 10% de sa masse entre 50 et 100°C, ce qui correspond à l'évaporation de l'eau (Figure 2.9). La dégradation principale de la fibre se produit autour de 300 °C, ce qui correspond à la température de décomposition de la cellulose (Leal et al., 2015). Environ 50% de perte de masse se produit entre 150°C et 300°C.

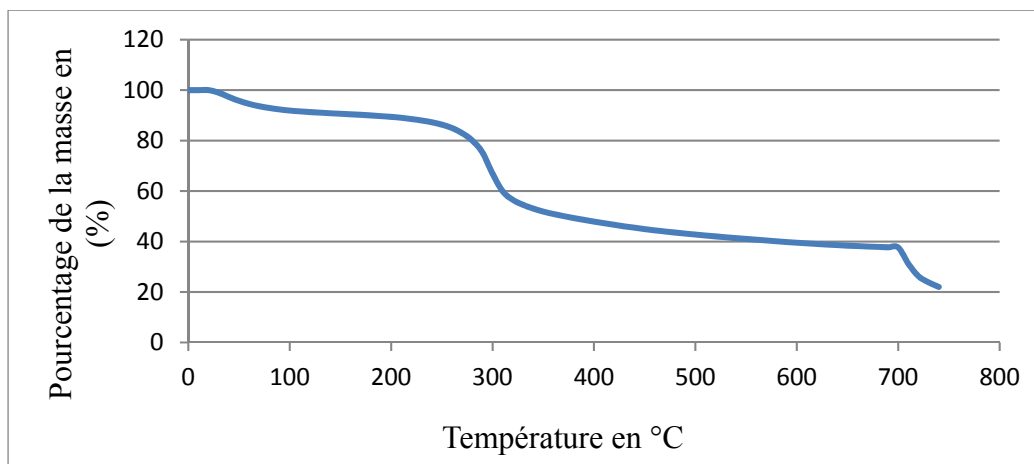


Figure 2.9 Perte de masse du jute recyclé en fonction de la température

2.4.5 Analyse de composition pour la fibre de jute recyclée

Au niveau de la fibre de jute, le but d'analyser la fibre avec l'IFTR est de s'assurer en comparant avec le spectre d'une fibre cellulosique vierge comme le coton qu'il n'y a pas de contaminants en trop grande quantité dans la fibre recyclée. La Figure 2.10 montre que ce n'est pas le cas.

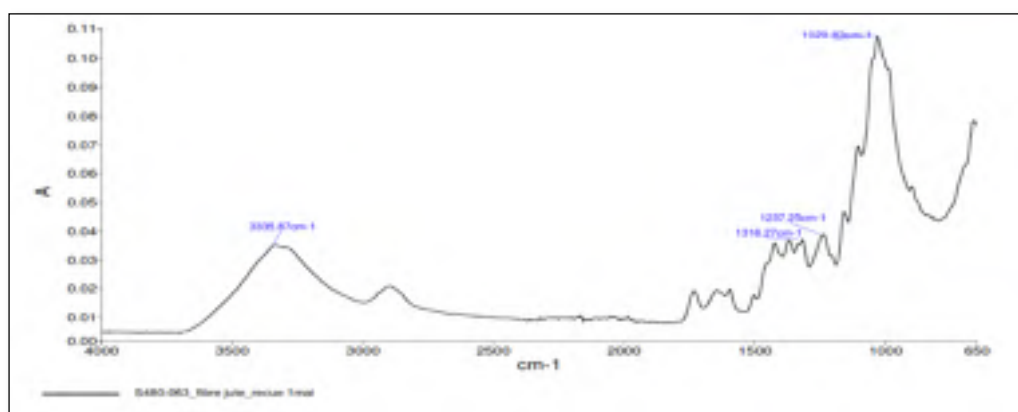


Figure 2.10 Analyse de la composition de la fibre du jute recyclé

2.4.6 Mouillabilité

La fibre de jute est une fibre hydrophile. Lors du dépôt des gouttes d'eau, l'absorption des gouttes s'effectue en 1 à 2 secondes.

2.5 Fibre de kénaf

Cette section présente les caractéristiques de la fibre de kénaf vierge utilisée dans le projet.

2.5.1 Longueur de la fibre de kénaf vierge

Le test de longueur a été réalisé sur 50 fibres individuelles. Le graphe de distribution (Figure 2.11) montre que la plupart des fibres de kénaf ont une longueur de 70 mm. En ce qui concerne la moyenne des mesures prises, elle est de 66 ± 12 mm ce qui est largement supérieur aux exigences pour la fabrication d'un non-tissé par aiguilletage. Cette fibre est également beaucoup plus longue que le jute recyclé.

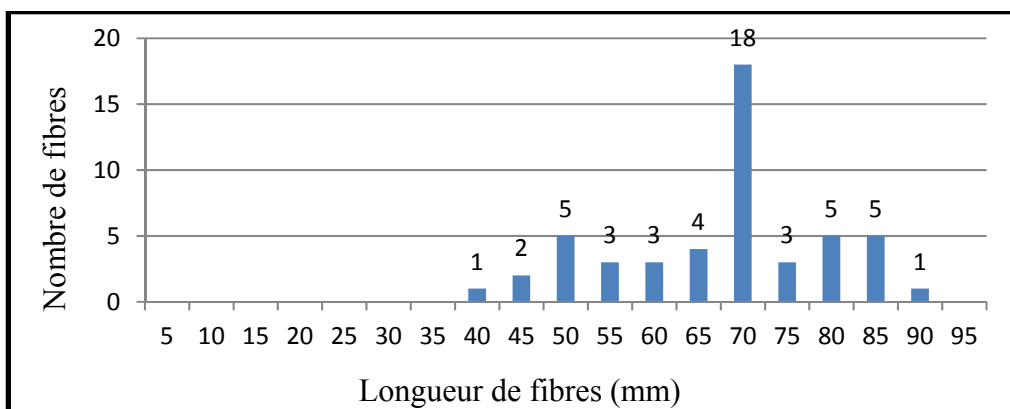


Figure 2.11 Graphe de distribution des mesures de longueur de la fibre de kénaf vierge

2.5.2 Diamètre équivalent de la fibre de kénaf vierge

Quatorze mesures ont été prises à l'aide du MEB (Figure 2.12). La fibre de kénaf est une fibre grossière, avec un diamètre moyen de 56 ± 8 μm . Relativement à la revue littéraire

élaborée dans le chapitre 1.2.4, Ces valeurs sont relativement plus faibles avec des moyennes entre 65 et 71 μm . La fibre de jute recyclé a un diamètre 20% plus faible.

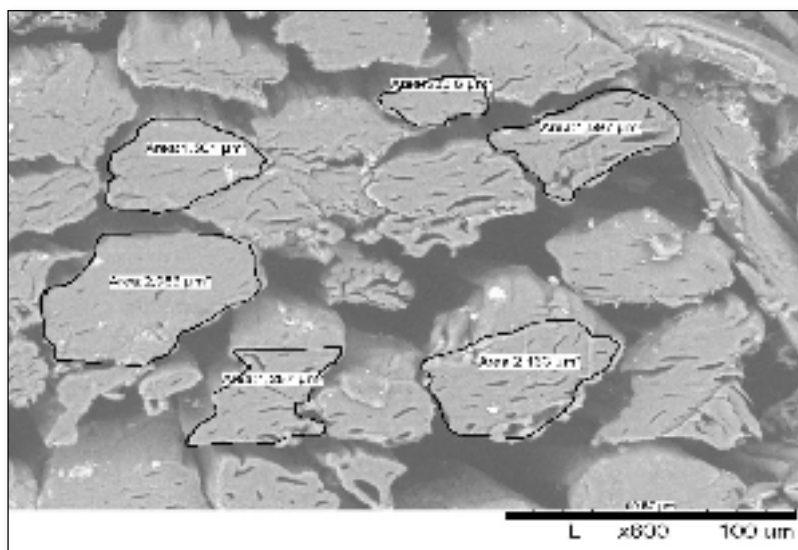


Figure 2.12 Mesure de diamètre de la fibre de kénaf vierge à l'aide du MEB

2.5.3 Force et allongement à la rupture de la fibre de kénaf vierge

En suivant la norme ASTM D3822, le test a été fait avec 32 fibres individuelles (20 ont cassé au centre et sont considérées pour la mesure, Figure 2.13). La moyenne des résultats pour le kénaf est de 141 ± 62 cN, ce qui est équivalent à une contrainte moyenne de 656 MPa avec un allongement moyen de $2 \pm 0,6$ %. Ces valeurs sont équivalentes à ce qui a été trouvé dans la littérature élaborée dans le chapitre 1.2.4.

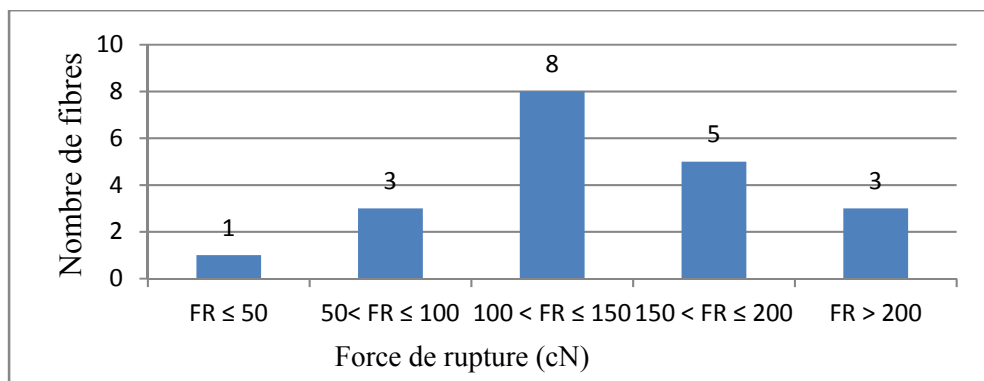


Figure 2.13 Graphe de distribution des allongements à la rupture de la fibre du kénaf

2.5.4 Analyse de composition des fibres de kénaf vierge

Une comparaison du spectre obtenu par le kénaf a été faite avec les données du Groupe CTT sur des fibres cellulosiques vierges (voir figure 2.14). La plupart des pics ont été confirmés, ce qui confirme qu'il y a peu ou pas d'additifs ou de contaminants sur la fibre du kénaf vierge reçue.

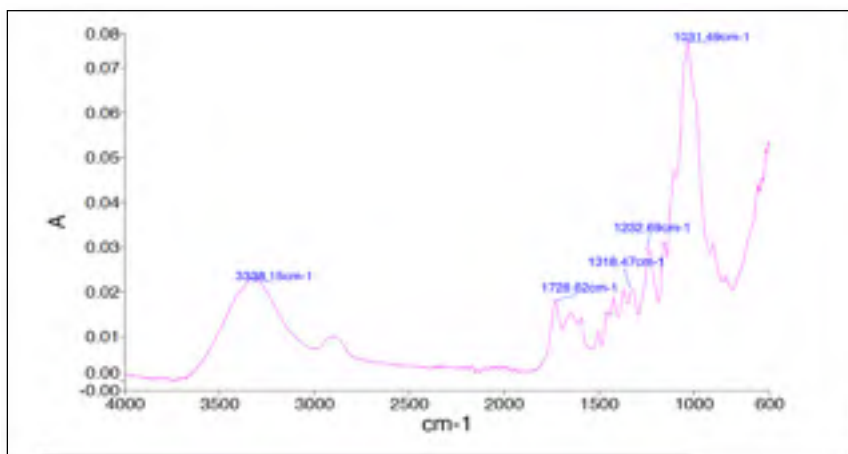


Figure 2.14 Analyse de composition de la fibre de kénaf

2.6 Fibre bicomposante

Plusieurs fibres bicomposantes de type cœur/gaine ont été utilisées dans le cadre du projet. Cette section présente la mesure de leurs caractéristiques et sont identifiées par des codes : Bico3, Bico10, et Bico11.

2.6.1 Fibre bicomposante PET/coPET (Bico3)

2.6.1.1 Longueur de la fibre

Les résultats obtenus au niveau de ce test montrent que la fibre bico3 a une longueur moyenne de 55 ± 9 mm. On peut remarquer sur la Figure 2.15 qu'il n'y a pas une grande variation au niveau des longueurs de fibres, ce qui est attendu puisqu'il s'agit d'une fibre synthétique.

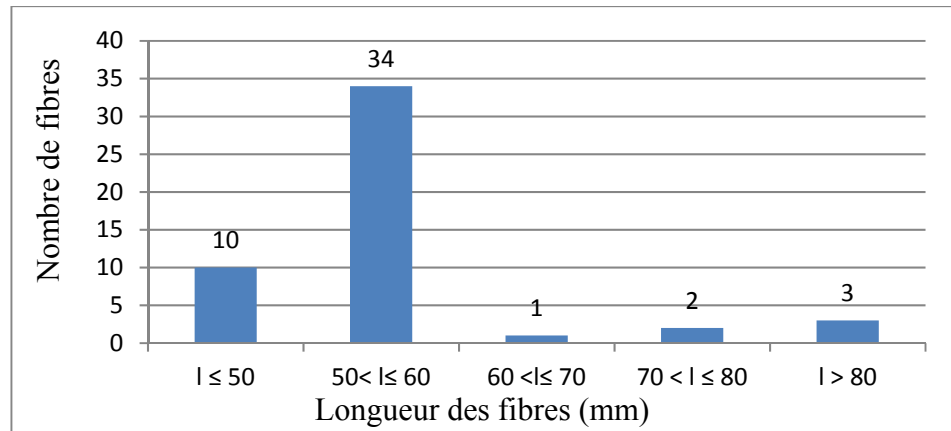
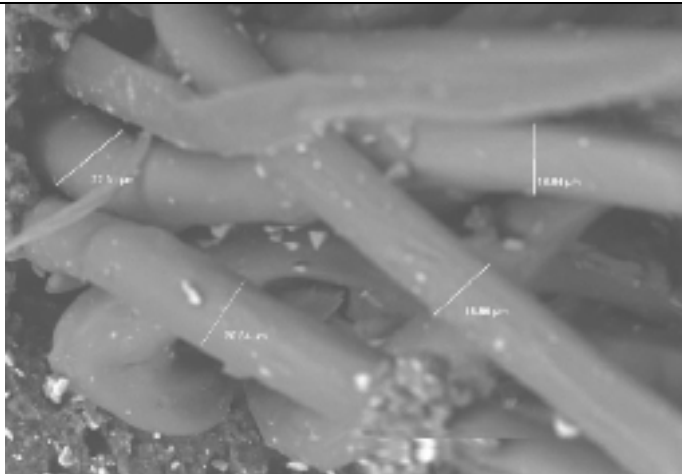
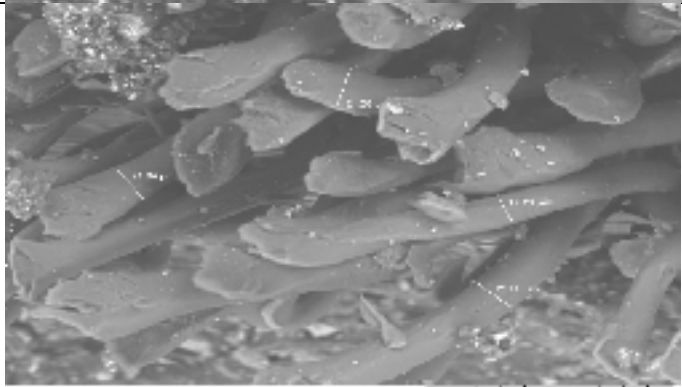


Figure 2.15 Distribution des fibres selon leurs longueurs en mm

2.6.1.2 Diamètre des fibres

Dix mesures ont été réalisées sur des sections longitudinales de la fibre afin d'avoir une moyenne et un écart type pour le diamètre de la fibre. Les résultats obtenus (Tableau 2.2) montrent que la fibre a un diamètre de 20 ± 2 μm .

Tableau 2.2 Détermination des diamètres des fibres Bico3 par MEB

Test	Diamètre (μm)	Capture photo
1	18,8	
2	18,9	
3	20,3	
4	22,3	
5	21,3	
6	21,3	
7	17,1	
8	21,7	
9	19,4	
10	21,1	

2.6.1.3 Force et allongement à la rupture

Les résultats obtenus montrent que la fibre Bico3 a une force de rupture très faible 13 ± 2 cN, mais un allongement qui dépasse 50%. Au cours des essais de traction, il a été observé que

quelques fibres (18%) avaient un allongement qui dépassait 200% (Figure 2.16). Cette valeur est beaucoup plus élevée que celle du PET (ne dépasse pas 20%) (Chailly, 2008; Schoors, 2014). Elle peut éventuellement être attribuée à des fibres qui ne contiennent pas de cœur en PET, mais uniquement le matériau de gaine en co-PET.

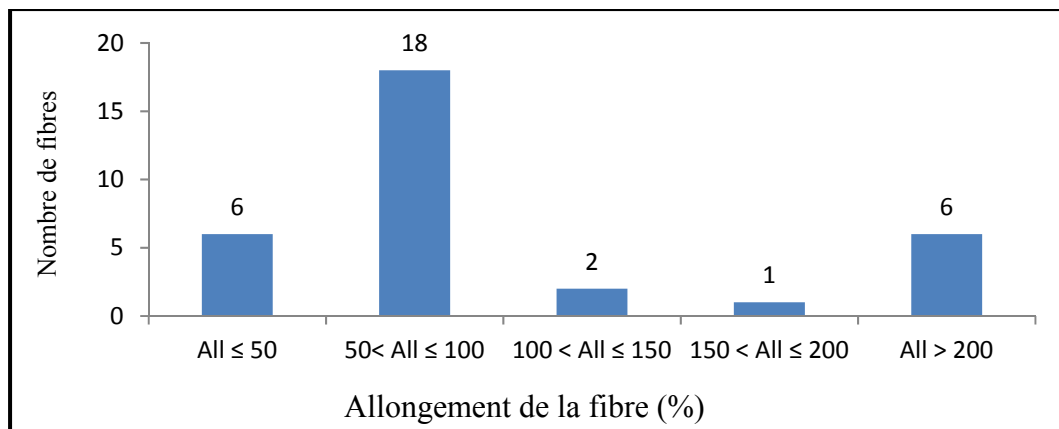


Figure 2.16 Distribution des fibres selon l'allongement

2.6.1.4 Température de fusion

Les résultats de ce test indiquent que la température de fusion du polymère de la gaine est de 185°C et celle du polymère du cœur de 245 °C (Figure 2.17). Ces températures sont plus élevées que celles que doit subir les renforts non-tissés pour des applications standard comme renfort de composite.

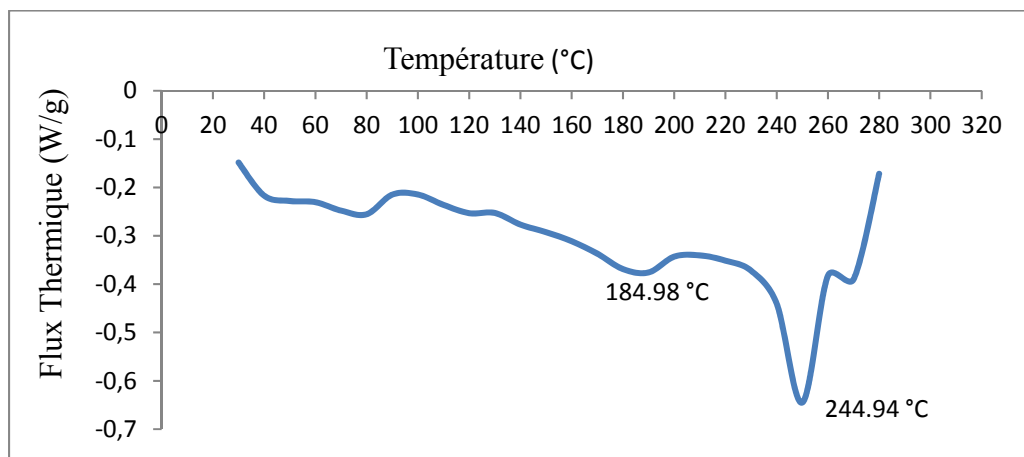


Figure 2.17 Température de fusion de la fibre Bico3 (Exo up)

2.6.1.5 Température de décomposition

La TGA permet de voir le comportement de la fibre vis-à-vis de l'augmentation de température. Les résultats obtenus montrent (Figure 2.18) que la dégradation de la fibre commence à partir de 300°C, ce qui est supérieur à ce qui est obtenu par les fibres cellulosiques.

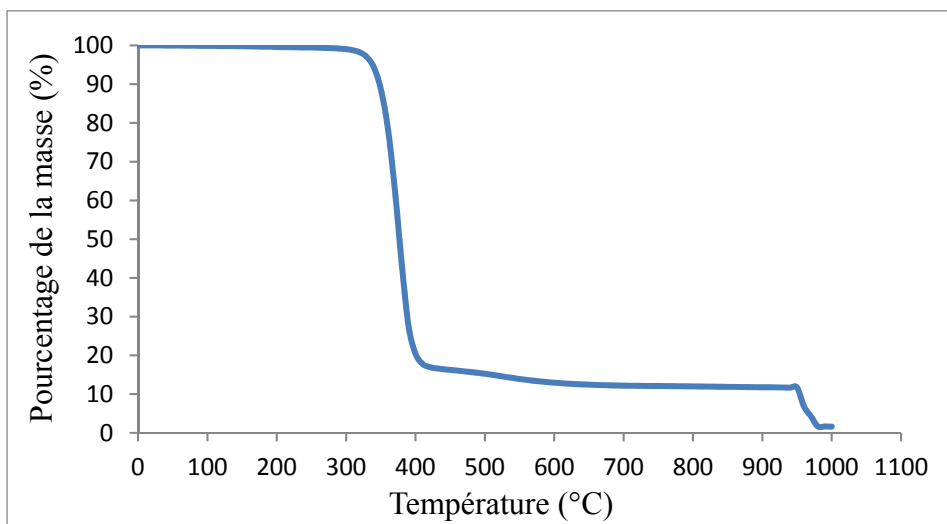


Figure 2.18 Perte de masse du bico3 en fonction de la température

2.6.1.6 Analyse de composition

Au niveau de l'IFTR, le but du test était de comparer les zones d'absorption de la fibre avec celles du PET. La plupart des pics correspondent à ce qui a été trouvé au niveau de la littérature (Chen, 2013; Farah et al., 2014), ce qui confirme que la gaine est bien un copolymère de PET. La figure suivante (Figure 2.19) présente les résultats des tests.

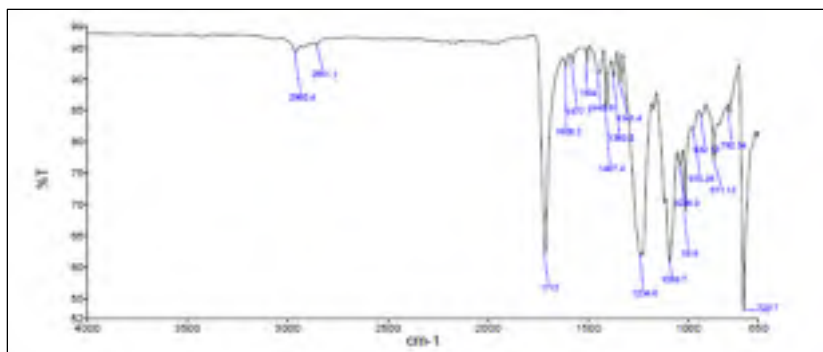


Figure 2.19 Analyse de composition de la fibre Bico3

2.6.1.7 Mouillabilité

Pour la mouillabilité, il s'avère que la mesure de l'angle de contact de la goutte d'eau avec la pastille de fibre préparée est impossible étant donnée la grande vitesse d'absorption de l'eau dans la pastille de fibres. Cette fibre est fortement hydrophile.

2.6.2 Fibre Bicomposante HDPE/PP (Bico10)

2.6.2.1 Longueur de la fibre

Le test a été réalisé sur 50 fibres individuelles. Le graphe de distribution (Figure 2.20) montre que la plupart des fibres ont une longueur de 45 mm avec une moyenne de 46 ± 6 mm.

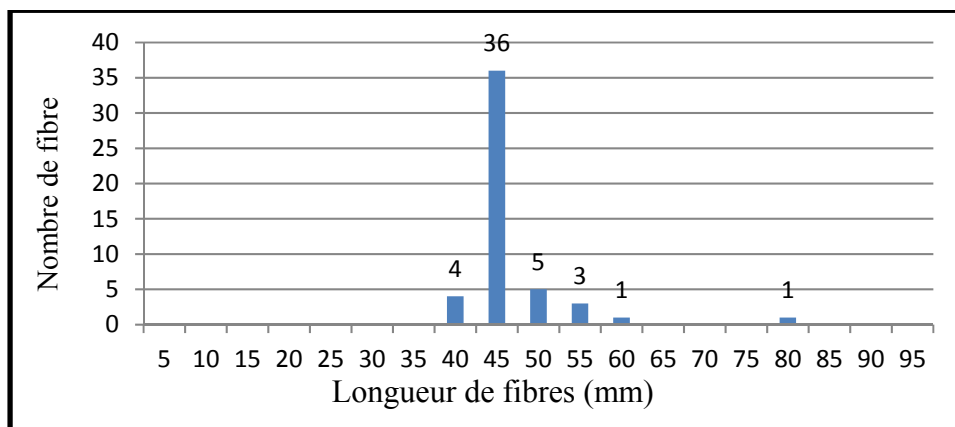


Figure 2.20 Distribution de la fibre Bico10 selon la longueur

2.6.2.2 Diamètre des fibres

Douze mesures ont été réalisées au MEB pour la fibre Bico10. La fibre est très fine comme il est montré dans la figure suivante (Figure 2.21) avec un diamètre moyen de $16 \pm 1 \mu\text{m}$.

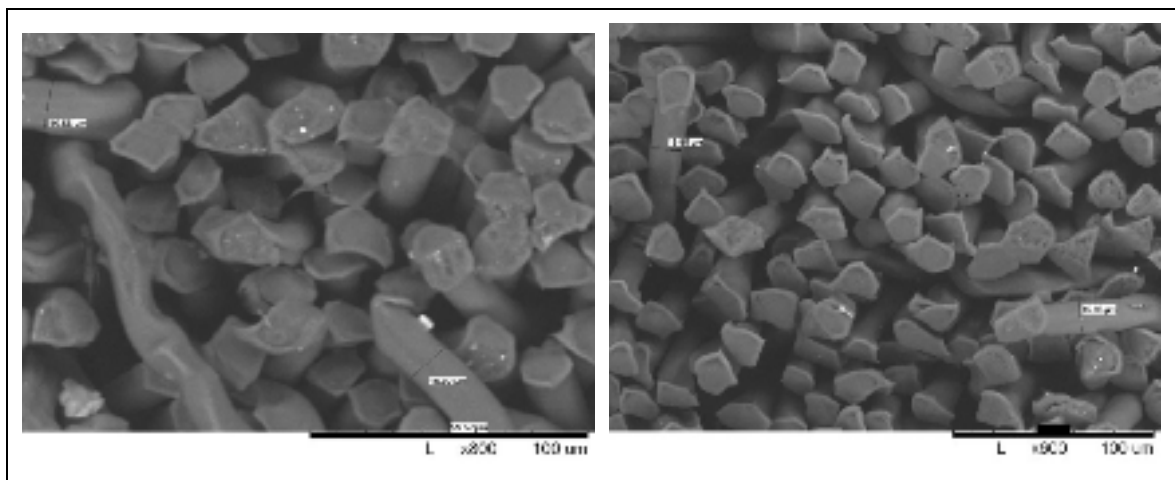


Figure 2.21 Mesure de diamètre pour la fibre Bico10

2.6.2.3 Force et allongement à la rupture

Le test a été fait sur 35 fibres individuelles (20 ont cassé au centre et sont considérées pour la mesure). La résistance moyenne de la fibre Bico10 est de $8 \pm 2 \text{ cN}$ avec un allongement moyen de $45 \pm 25 \%$.

Plusieurs fibres présentaient des allongements qui dépassent 100%, ce qui peut être dû à des fibres qui ne contiennent pas de cœur en PET. La figure suivante montre les résultats de tests (Figure 2.22).

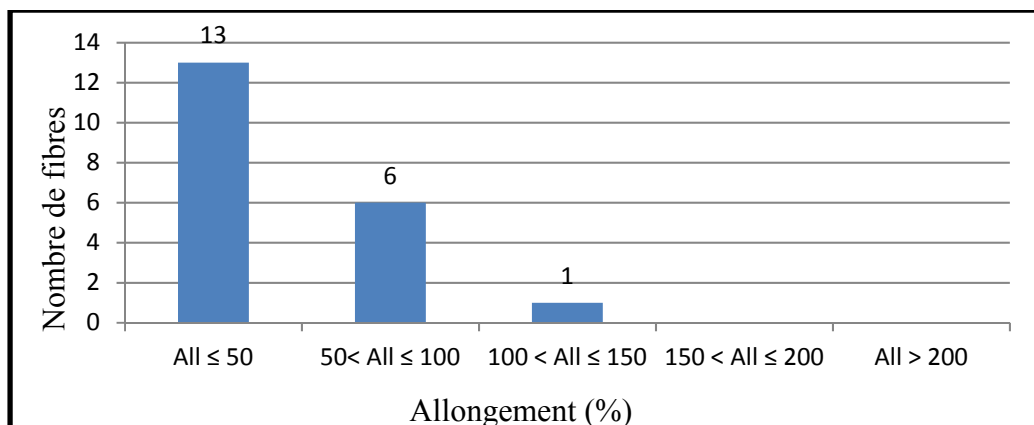


Figure 2.22 Graphe de distribution de l'allongement à la rupture de la fibre Bico10

2.6.2.4 Température de fusion

L'analyse DSC de la fibre bico10 (Figure 2.23) montre que la gaine fond à 130 °C et le cœur fond à 168°C. Un thermoliage sera réalisé à 150°C pour faire fondre la gaine sans affecter le cœur.

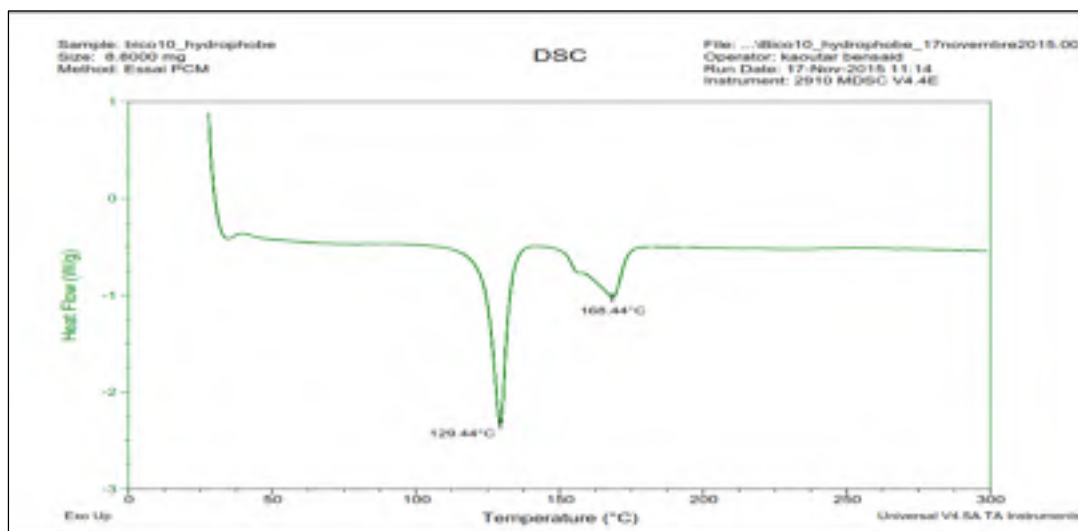


Figure 2.23 Température de fusion de la gaine et du cœur de la fibre Bico10 (Exo up)

2.6.2.5 Température de décomposition

La TGA montre que la dégradation de la fibre survient entre 350 et 500°C (Figure 2.24) avec une température de dégradation principale de 469°C.

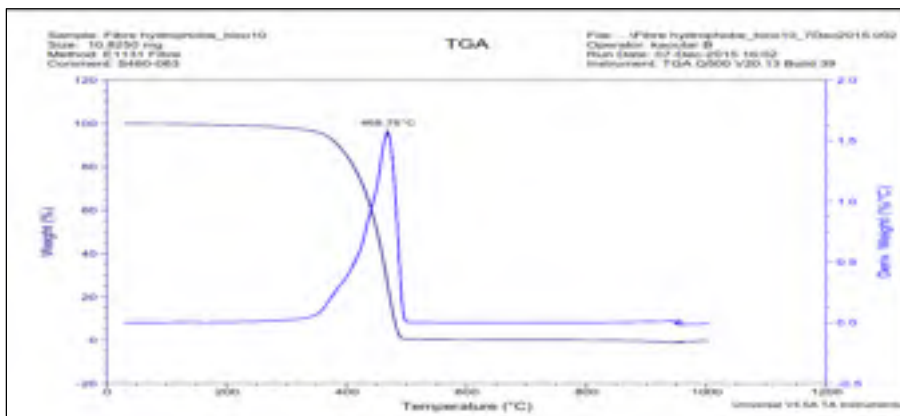


Figure 2.24 Température de décomposition de la fibre Bico10

2.6.2.6 Analyse de composition

Une comparaison avec la base de données du Groupe CTT (Figure 2.25) a montré que la fibre hydrophobe Bico10 a effectivement une gaine en polyéthylène haute densité.

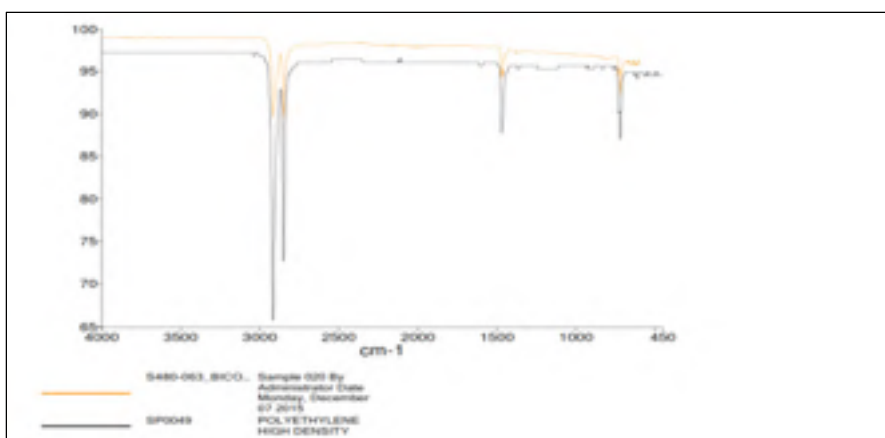
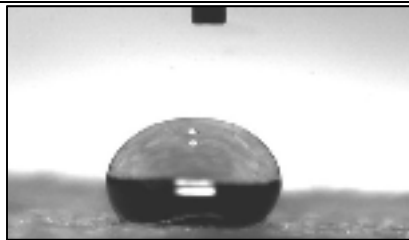
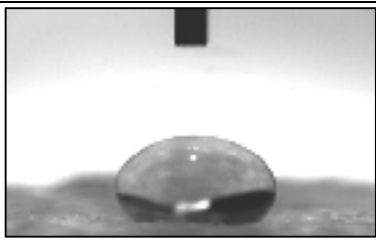


Figure 2.25 Graphe IFTR de la fibre Bico10

2.6.2.7 Mouillabilité

Des tests de mouillabilité ont été effectués avec un goniomètre sur des pastilles de fibre préparées à l'aide d'un compresseur. Deux mesures d'angle de contact ont été prises sur chaque goutte. Les résultats sont détaillés dans le tableau suivant (Tableau 2.3). La fibre Bico 10 est une fibre hydrophobe avec un angle de contact de moyen de $129,4^\circ$.

Tableau 2.3 Mesure d'angle de contact de la fibre Bico10

	
Angle de contact mesuré : $128,1^\circ / 130,8^\circ - 131,5^\circ / 128,5^\circ$	Angle de contact mesuré : $137,8^\circ / 137,2^\circ - 120,9^\circ / 120,4^\circ$

2.6.3 Fibre Bicomposante PET/coPET (Bico11)

2.6.3.1 Longueur de la fibre

Le test a été réalisé sur 50 fibres individuelles. Le graphe de distribution (Figure 2.26) montre que la plupart des fibres ont une longueur de 70 et 75 mm avec une moyenne des mesures de 73 ± 6 mm.

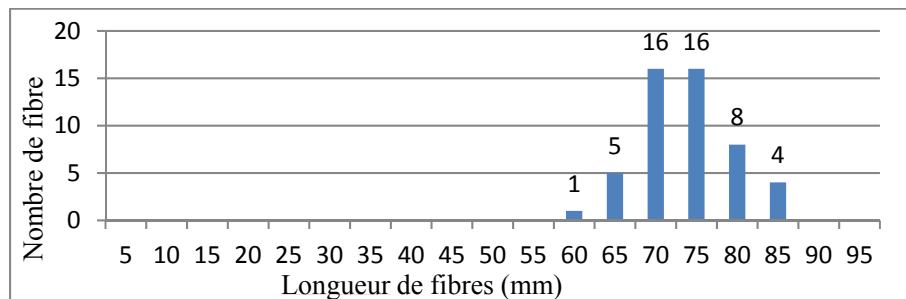


Figure 2.26 Graphe de distribution de la longueur de la fibre Bico11

2.6.3.2 Diamètre de la fibre

Pour la fibre Bico11, une trentaine de mesure ont été réalisées au MEB. La fibre est très fine avec un diamètre de moyenne de $13.5 \pm 1 \mu\text{m}$. La figure suivante (Figure 2.27) montre un exemple de mesure.

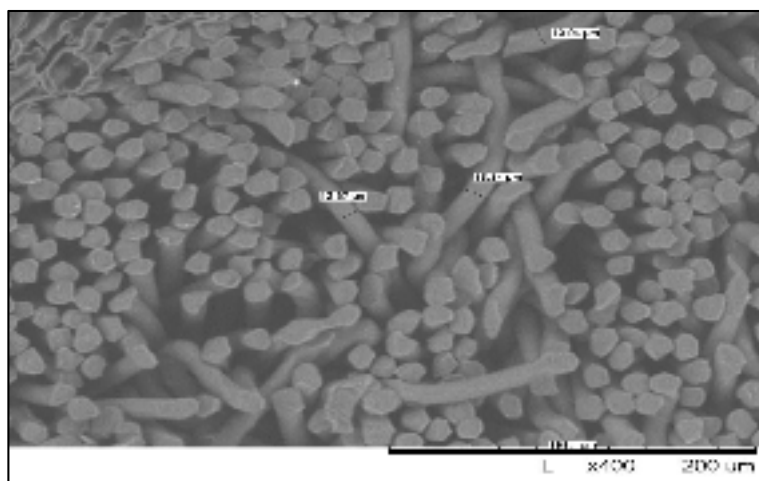


Figure 2.27 Mesure de diamètre de la fibre Bico11

2.6.3.3 Force et allongement à la rupture

Le test a été fait sur 39 fibres individuelles (23 ont cassé au centre et sont considérées pour la mesure) comme il est présenté dans la figure ci-dessous (Figure 2.28). La résistance moyenne de la fibre Bico11 est de $6 \pm 0.5 \text{ cN}$ avec un allongement moyen : $48 \pm 13\%$.

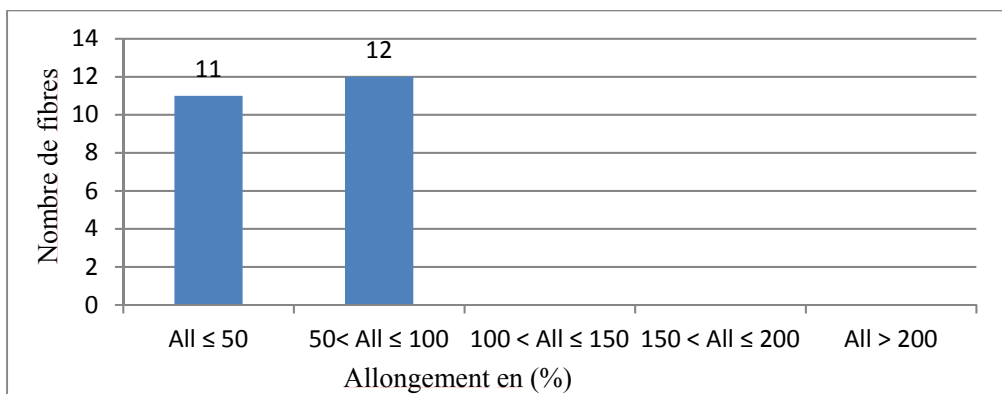


Figure 2.28 Allongement à la rupture de la fibre Bico11

2.6.3.4 Température de fusion de la fibre

L'analyse DSC de la fibre Bico11 (Figure 2.29) montre que la gaine fond à 157°C et le cœur fond à 251°C. Le thermoliage sera réalisé à 205° pour faire fondre la gaine sans dégrader le cœur.

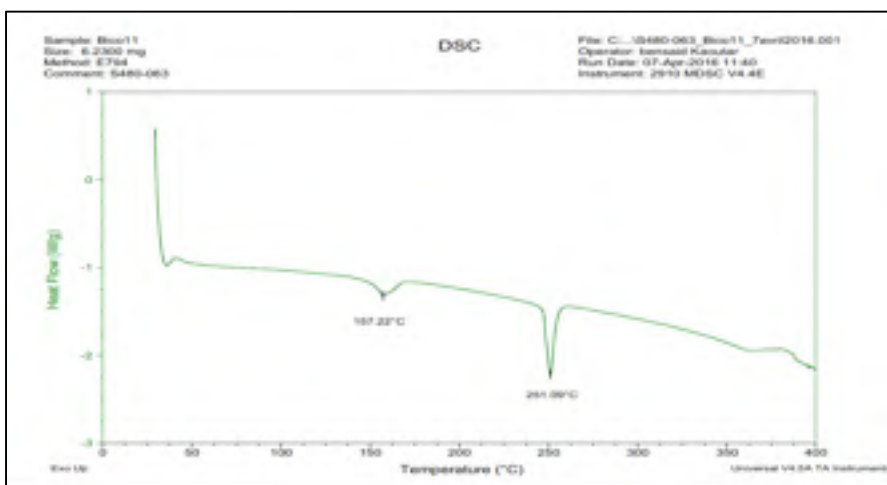


Figure 2.29 Température de fusion de la fibre Bico11 (Exo up)

2.6.3.5 Température de décomposition

La TGA montre que la dégradation de la fibre survient entre 350 et 500 °C (Figure 2.30) avec une température de dégradation principale de 425 °C.

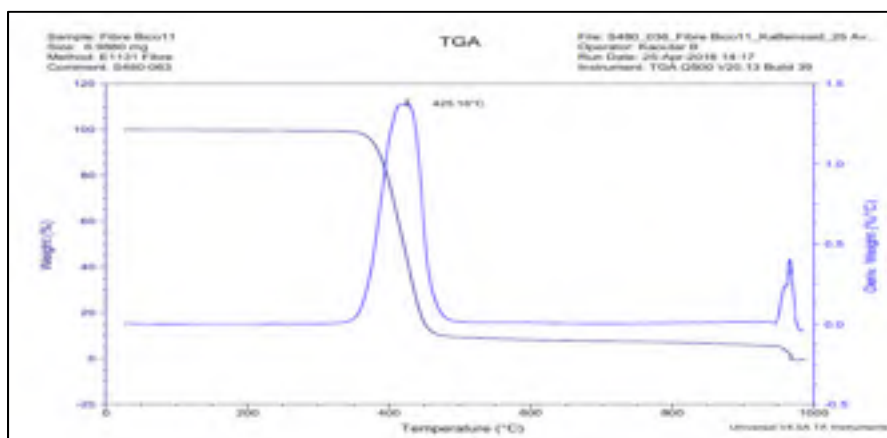


Figure 2.30 Graphe de TGA de la fibre Bico11

2.6.3.6 Analyse de composition

Une comparaison avec la base de données du Groupe CTT (Figure 2.31) a montré que la fibre hydrophobe Bico11 a effectivement une gaine en poly (1,4 butylène téréphtalate).

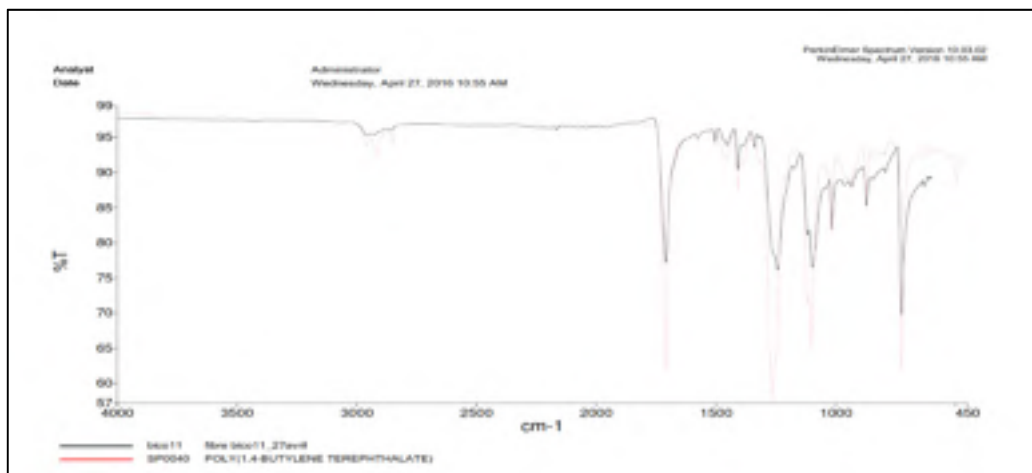


Figure 2.31 Analyse de composition de la fibre Bico11 à l'aide d'un IFTR

2.6.3.7 Mouillabilité

Deux pastilles ont été préparées avec la fibre Bico11. La goutte d'eau déposée sur la surface des pastilles disparaît en environ 30 s. La fibre Bico11 est très hydrophile. La figure suivante montre un exemple des tests faits (Figure 2.32).



Figure 2.32 Dépôt d'une goutte d'eau sur une pastille préparée avec la fibre Bico11

CHAPITRE 3

OPTIMISATION DES PARAMÈTRES TEXTILES POUR LA PRODUCTION DE NON-TISSÉS À BASE DE FIBRE DE JUTE RECYCLÉ

Comme mentionné dans le chapitre 2, la fibre de jute présente de bonnes performances mécaniques sous forme recyclée : une légère diminution est observée mais sans que ça soit critique. Il est néanmoins indispensable de déterminer les valeurs optimales des différents paramètres de fabrication des non-tissés, de l'ouvraison au thermoliage, pour obtenir de bonnes performances mécaniques des non-tissés.

3.1 Optimisation des paramètres de l'ouvraison

3.1.1 Introduction

L'étape d'ouvraison est utile ici pour ouvrir la fibre de jute recyclée, qui contient encore des fibres en paquets, ainsi que pour obtenir un bon mélange avec la fibre bicomposante.

Les paramètres à optimiser au niveau du cylindre d'air comprimé utilisé pour ouvrir les fibres sont la quantité de fibres, le temps de traitement et la pression convenable dans le but d'avoir une bonne ouvraison sans abimer la fibre naturelle.

3.1.2 Essais préliminaires

Au début, quelques essais préliminaires ont été effectués pour tester le comportement de la fibre de jute avec le cylindre. Ces essais ont été un point de départ pour être en mesure de déterminer l'influence du temps, de la pression et de la masse de fibres sur la longueur résiduelle de la fibre naturelle ainsi que sa résistance mécanique. L'objectif principal est de pouvoir obtenir un bon mélange, une bonne ouvraison tout en préservant les propriétés physiques et mécaniques de la fibre de jute.

Tableau 3.1 Essais préliminaires pour l'optimisation de l'ouvrison

Conditions	30 g de fibres, 45 psi (310 kPa), 5 min	30 g de fibres, 50 psi (345 kPa), 2 min	20 g de fibres, 60 psi (414 kPa), 5 min
Longueur de fibres résiduelle (mm)	44 ± 10	50 ± 14	40 ± 9
Résistance mécanique résiduelle (cN)	129 ± 51	140 ± 72	Non-mesurée
Remarques	Un bon mélange par rapport à celui fait à la main. Une perte de 10% au niveau de la longueur	Mélange pas très ouvert. La longueur de la fibre a été conservée	Très bonne ouverture et un mélange homogène, mais une perte de 20% au niveau de la longueur

3.1.3 Plan d'expérience

Les essais préliminaires ont permis de choisir le niveau 0, qui permettra par la suite de déterminer les niveaux -1 et +1. Le choix d'une matrice factorielle complète vient du fait que le nombre des paramètres étudiés (3) n'est pas très élevé. Le nombre de tests à faire est de 2^k avec k : nombre de paramètres, ce qui donne un total de huit tests à faire.

Les niveaux -1 et +1 sont très proches des valeurs des paramètres du niveau 0 puisque les résultats obtenus à ce niveau étaient proches des conditions désirées. Le tableau ci-dessous montre les variables codées et réelles utilisées dans le plan d'expérience.

Tableau 3.2 Variables codées et réelles pour le plan d'expérience

	Variables codées			Variables réelles		
	X ₁	X ₂	X ₃	Pression (psi)	Masse (g)	Temps (min)
1	1	1	1	55	40	7
2	-1	1	1	45	40	7
3	1	-1	1	55	20	7
4	-1	-1	1	45	20	7
5	1	1	-1	55	40	3
6	-1	1	-1	45	40	3
7	1	-1	-1	55	20	3
8	-1	-1	-1	45	20	3
9*	0	0	0	50	30	5

3.1.4 Résultats

Le tableau suivant montre les résultats obtenus au niveau des tests réalisés suivant le plan d'expérience établi. Comme il a été déjà mentionné, l'objectif principal de cette optimisation est d'avoir un bon mélange de fibre ainsi qu'une homogénéité au niveau de l'ouvrison tout en préservant les propriétés physiques et mécaniques de la fibre naturelle à savoir sa longueur et sa force de rupture. Pour cette raison, le tableau suivant montre les résultats obtenus pour ces propriétés. L'évolution de la qualité d'ouvrison a varié de 0%, pour un mélange de fibre qui est resté le même avant et après passage au cylindre, à 100%, ce qui représente un mélange très bien ouvert et homogène.

Tableau 3.3 Résultats des tests pour l'optimisation des paramètres de l'ouvraison

	Variables codées			Variables réelles			Résultats				
	X ₁	X ₂	X ₃	Pression (psi)	Masse (g)	Temps (min)	Force de rupture (cN)		Longueur (mm)		Qualité d'ouvraison
							Moyenne	CV	Moyenne	CV	
1	1	1	1	55	40	7	110	32%	47	34%	70%
2	-1	1	1	45	40	7	79	40%	46	27%	0%
3	1	-1	1	55	20	7	102	39%	39	33%	100%
4	-1	-1	1	45	20	7	96	46%	40	23%	70%
5	1	1	-1	55	40	3	74	26%	42	21%	40%
6	-1	1	-1	45	40	3	110	43%	46	20%	0%
7	1	-1	-1	55	20	3	101	26%	41	27%	90%
8	-1	-1	-1	45	20	3	104	34%	47	34%	60%
9*	0	0	0	50	30	5	128	39%	44	16%	100%

3.1.5 Discussion

Les résultats des essais préliminaires ont été utiles pour déterminer le niveau 0 du plan d'expérience. Le choix de 30 g de fibres, 50 psi (345 kPa) de pression pendant 5 min a été fait après avoir calculé les longueurs de fibres des 3 essais et jugé de leur qualité d'ouvraison. Les valeurs de paramètres de 20 g de fibres et 60 psi (414 kPa) de pression pendant 5 min ont donné une très bonne ouverture au niveau du mélange mais il s'est avéré que la fibre de jute avait perdu 20% de sa longueur initiale.

Le choix de 30 g de fibres et 45 psi (310 kPa) pendant 5 min a donné un mélange favorable par rapport à celui fait à la main mais la fibre a perdu 10% de sa longueur initiale.

Enfin le test fait avec 30g de fibre à 50 psi (345 kPa) pendant 2 min, avait donné un mélange peu ouvert mais la fibre de jute a conservé sa longueur initiale.

Le choix des paramètres suivants : 30g de fibre, sous 50 psi (345 kPa) de pression pendant 5 min pour le niveau 0, est basé sur les résultats des tests préliminaires, en augmentant légèrement le temps pour améliorer l'ouverture et le mélange des fibres. Les tests du plan d'expérience ont montré que les deux paramètres les plus influents sont la masse et la pression. Un mélange et un maintien de la résistance optimaux correspondent à des niveaux +1 pour la pression et -1 pour la masse. L'effet inverse a été observé pour la longueur des fibres.

Les conclusions faites d'après ce plan d'expérience ont donné deux résultats très favorables au niveau de la qualité d'ouvrison, soit 30g de fibres sous pression de 50 psi (345 kPa) pendant 5 min et 20g de fibres sous pression de 55 psi (379 kPa) pendant 7 min. Entre ces deux résultats, le premier, qui correspond au niveau zéro, donne les meilleures performances en termes de préservation de propriétés mécaniques et de longueur, et a donc été sélectionné pour le reste du projet : 30g de fibres, 50 psi (345 kPa) et 5 min.

3.2 Optimisation de la vitesse de la carde

3.2.1 Introduction

Dans un procédé de fabrication des non-tissés par voie sèche, la carde reste un élément très important : elle joue un rôle primordial pour la parallélisation des fibres, l'élimination des impuretés et l'obtention d'un voile à la fois homogène et uniforme. Chaque fibre a besoin de certaines configurations dépendamment de ses propriétés physiques et mécaniques. Comme il a été mentionné dans le Chapitre 1, il y a deux types de cardes, de type coton pour les fibres courtes, et de type laine pour les fibres longues, celle disponible au CTT est de type coton. Dans notre projet, il s'agit de la fabrication d'un non-tissé à base de fibre de jute recyclé, moyennement longue (44 ± 13 mm), et de fibre synthétique bicomposante Bico3 qui a une longueur de 55 ± 9 mm. L'étude d'optimisation de la vitesse de la carde nous permettra de savoir si la vitesse de la carde a un effet majeur sur les propriétés physiques et mécaniques des non-tissés. De plus, elle permettra de trouver une vitesse optimale qui donnant un voile homogène et uniforme à la sortie de la carde.

En ce qui concerne le choix des vitesses par cette étude, trois vitesses ont été choisies : il s'agit de 5,5 m/min, 7,8 m/min et 10,1 m/min. Le reste des conditions utilisées pour la fabrication des non-tissés dans cette série de tests est : 30g de fibres sous 50 psi (345 kPa) de pression pendant 5 minutes pour l'ouverture, un pré-aiguilletage à 5 mm et enfin un aiguilletage à 15mm avec une vitesse d'entrée/sortie du tapis de l'aiguilleteuse de 0,62/0,67 m/min. La consolidation thermique a été effectuée à l'aide d'une presse chauffante à 205°C avec un cadre de 0,52 mm sous une pression de 50kg pendant deux minutes et une pression de 0,5 tonnes pendant une minute. Les non-tissés ont été produits le même jour pour limiter l'influence des conditions climatiques et environnementales.

3.2.2 Masse surfacique des non-tissés

En ce qui concerne la masse surfacique des non-tissés fabriqués, cinq (5) spécimens ont été mesurés. Les moyennes obtenues sont de 142 g/m² pour les non-tissés fabriqués avec une vitesse de carde de 5,5 m/min, 130 g/m² pour une vitesse de carde de 7,8 m/min et 134 g/m² pour une vitesse de carde de 10,1 m/min (Figure 3.1).

Les indications sens machine et sens travers correspondent au prélèvement des échantillons dans les non-tissés. Les différences mineures remarquées entre les deux sens sont attribuables au fait que les voiles sortant de la carde sont parfois non-continus et que le nappage est semi-manuel, ce qui peut créer des variabilités dans la masse surfacique.

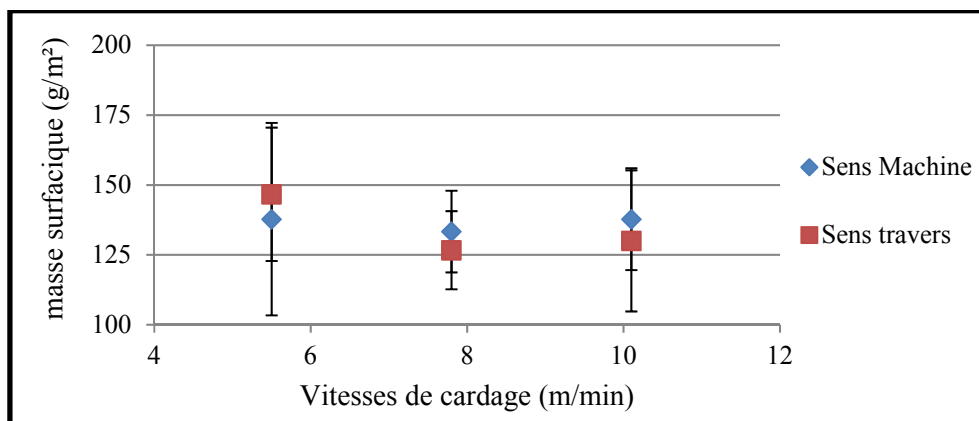


Figure 3.1 Masse surfacique des non-tissés fabriqués en jute recyclée en fonction de la vitesse de cardage

3.2.3 Épaisseur des non-tissés

Cinq (5) spécimens ont été prélevés pour mesurer l'épaisseur des non-tissés réalisés après thermoliage. Les moyennes obtenues sont de 0,46 mm pour une vitesse de cardage de 5,5 m/min, 0,47 mm pour les non-tissés fabriqués avec une vitesse de cardage de 7,8 m/min et enfin 0,46 mm pour les non-tissés fabriqués avec une vitesse de cardage de 10,1 m/min (Figure 3.2).

Les différences entre les sens machine et travers sont à l'intérieur de la variabilité et peuvent être attribués à la non-homogénéité des voiles sortant de la cardage, ce qui affecte le non-tissé produit.

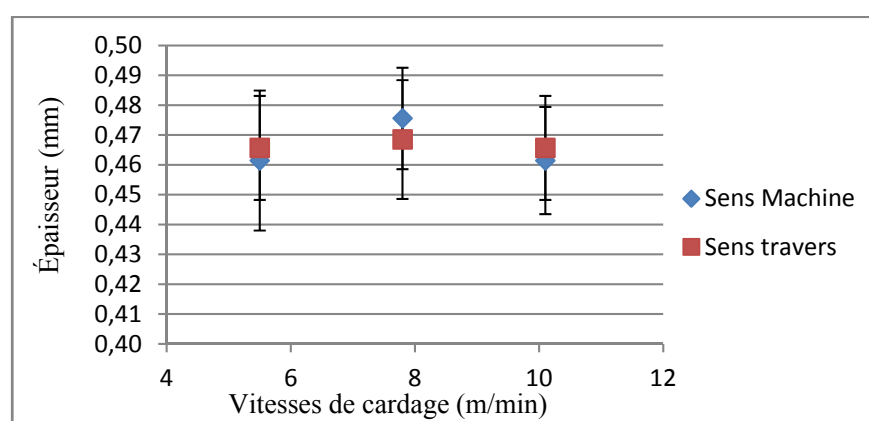


Figure 3.2 Épaisseur des non-tissés fabriqués en jute recyclée en fonction de la vitesse de cardage

3.2.4 Force de rupture des non-tissés

Les non-tissés fabriqués ont pu atteindre une force de rupture de 80 ± 37 N en sens machine et 63 ± 21 N en sens travers pour une vitesse de cardage de 5,5 m/min. Une moyenne de 95 ± 23 N en sens machine et 58 ± 14 N en sens travers a été obtenue pour les non-tissés réalisés avec une vitesse de cardage de 7,8 m/min. Les non-tissés fabriqués avec une vitesse de cardage de 10,1 m/min ont pu atteindre une force de rupture moyenne de 87 ± 29 N en sens machine et 48 ± 14 N en sens travers. La figure ci-dessous (Figure 3.3) présente les

moyennes obtenues ainsi que les écart-types pour chaque non-tissé réalisé. La variabilité relativement élevée est attribuée en partie au fait qu'il s'agit de fibres naturelles dont les propriétés sont intrinsèquement variables et que le nappage est réalisé de manière semi-manuelle.

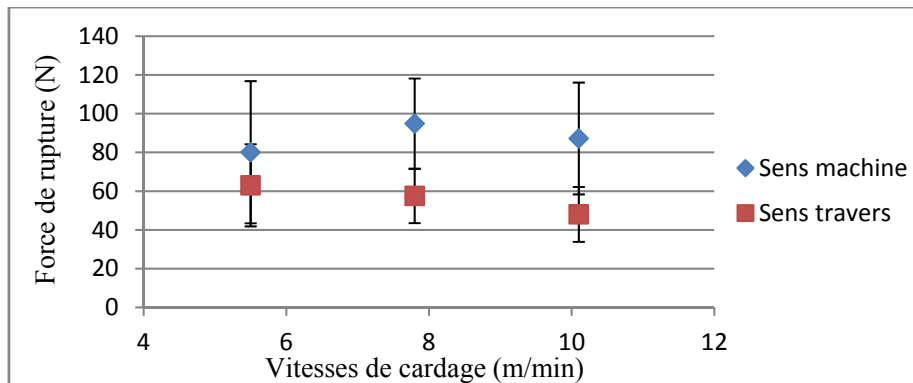


Figure 3.3 Force de rupture de différents non-tissés en fonction de la vitesse de cardage

Les valeurs individuelles de la force de rupture ont été exprimées en fonction de la masse volumique des spécimens prélevés. Les résultats présentés dans les deux figures (Figure 3.4 et Figure 3.5) montrent que les valeurs obtenus pour les trois vitesses sont très proches, par contre, les échantillons préparés avec une vitesse de cardage de 7,8 m/min ont la variabilité la plus faible avec un coefficient de variation de 24% par rapport aux deux autres vitesses, 46% pour 5,5 m/min et 33% pour 10,1 m/min.

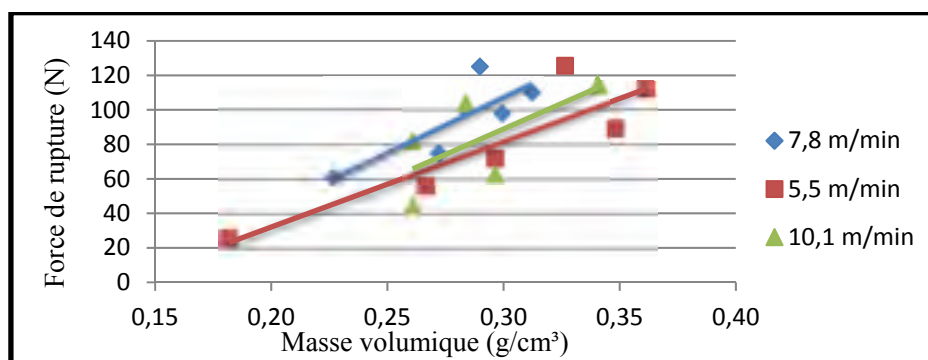


Figure 3.4 Valeur de la force de rupture des différents non-tissés en fonction de la masse volumique en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)

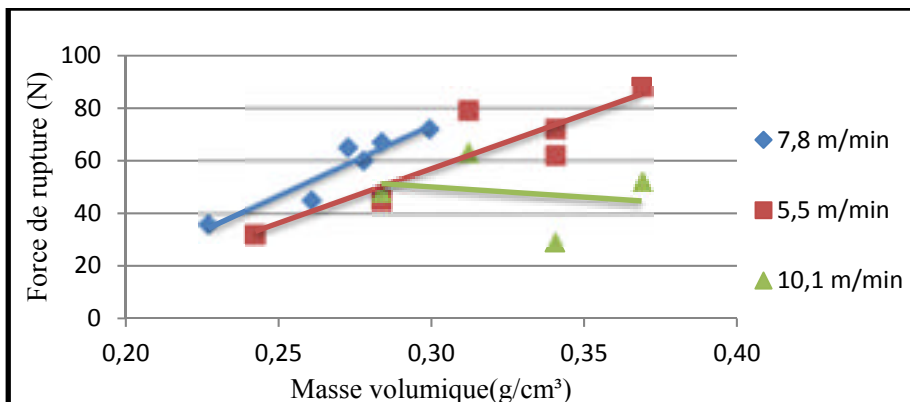


Figure 3.5 Valeur de la force de rupture des différents non-tissés en fonction de la masse volumique en sens travers (la ligne est un guide pour les yeux)

3.2.5 Discussion

La vitesse de la carde a été le premier paramètre textile optimisé après ouvraison. Plusieurs échantillons ont été produits dans les mêmes conditions de fabrication mis à part la vitesse de cardage. Trois vitesses entre 5,5 et 10,1 m/min ont été choisies pour cette étude. Les résultats obtenus ont été relativement proches, tant au niveau de l'épaisseur que de la masse surfacique et la force à la rupture. La figure suivante (Figure 3.6) montre la variation de la force de rupture en sens machine en fonction de la vitesse de la carde. Il semble qu'il n'y ait aucun effet majeur de la vitesse de la carde sur la force de rupture n'est observable. Les résultats obtenus en sens travers sont identiques.

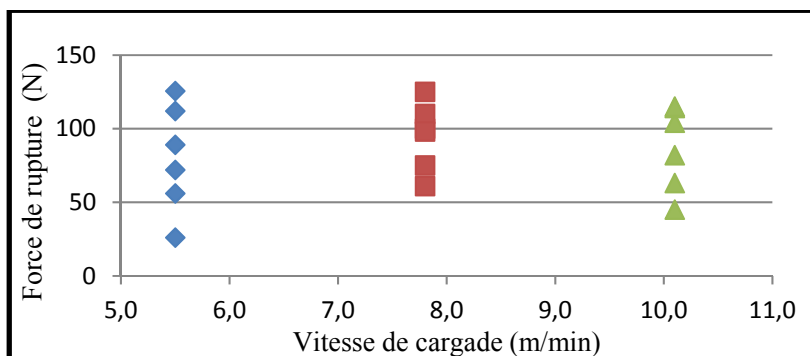


Figure 3.6 Effet de la vitesse de la carde sur la force de rupture des non-tissés en sens machine

La vitesse de la carte n'a donc pas d'effet majeur sur les caractéristiques physiques et la force de rupture des non-tissés produits à base de la fibre de jute recyclé. La vitesse de 7,8 m/min a été choisie pour la suite de la fabrication étant donné qu'elle est associée à la variabilité la plus faible dans les valeurs de force de rupture.

3.3 Optimisation de la profondeur des aiguilles de l'aiguilleteuse

3.3.1 Introduction

La profondeur des aiguilles de l'aiguilleteuse, comme illustré dans la Figure 3.7, a été le deuxième paramètre choisi pour l'étude d'optimisation des paramètres textiles pour la fabrication des non-tissés à base de la fibre de jute recyclé. Cette étude nous montrera l'influence de l'aiguilletage sur la qualité des non-tissés produits. À cet effet, certaines propriétés comme l'étirage, l'uniformité, la masse surfacique et enfin la résistance des non-tissés, seront évaluées. Quatre profondeurs d'aiguilles, 5, 10, 12 et 15 mm, ont été choisies. Le reste des conditions utilisées pour la fabrication des non-tissés sont 50 g de fibres sous une pression de 50 psi (345 kPa) pendant 5 minutes pour l'ouvraison des fibres, un cardage à 7,8 m/min, un nappage à 8,3 m/min, un pré-aiguilletage à 5 mm et enfin un aiguilletage à 15 mm et une vitesse d'entrée/sortie du tapis de l'aiguilleteuse de 0,62/0,67 m/min. La consolidation thermique a été effectuée à l'aide d'une presse chauffante à 205°C avec un cadre de 0,52 mm sous une pression de 50 kg pendant deux minutes et une pression de 0,5 tonnes pendant une minute. Les non-tissés ont été produits le même jour pour limiter l'influence des conditions environnementales.

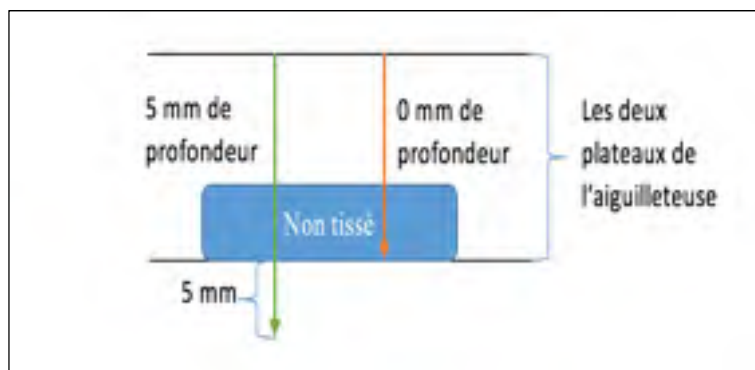


Figure 3.7 Dessin illustrant la profondeur des aiguilles lors de l'aiguilletage des non-tissés

3.3.2 Masse surfacique des non-tissés

En ce qui concerne la masse surfacique des non-tissés fabriqués, cinq spécimens ont été mesurés pour chaque non-tissé. Les moyennes obtenues sont de $191 \pm 31 \text{ g/m}^2$ pour une profondeur de 5 mm, de $178 \pm 9 \text{ g/m}^2$ pour une profondeur de 10 mm, de $142 \pm 6 \text{ g/m}^2$ pour une profondeur de 12 mm et enfin de $120 \pm 0 \text{ g/m}^2$ pour une profondeur de 15 mm.

Les indications sens machine et sens travers correspondent au prélèvement des échantillons dans les non-tissés. Les différences mineures remarquées (Figure 3.8) entre les deux sens peuvent être attribués à une homogénéité imparfaite des voiles sortant de la carde et aussi au nappage semi-automatique.

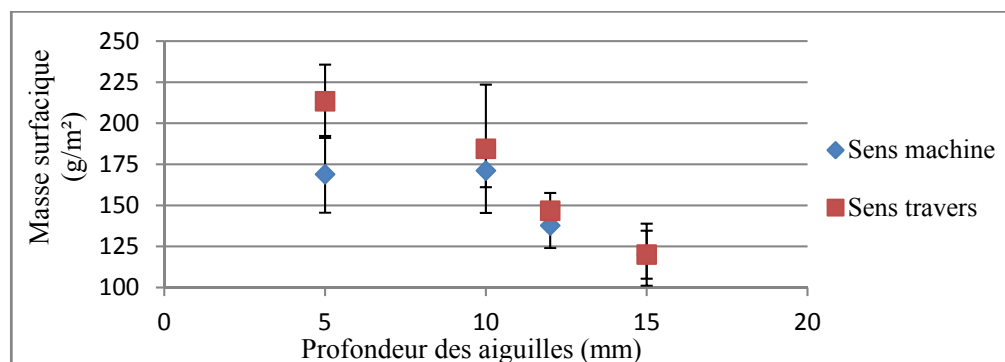


Figure 3.8 Masse surfacique des non-tissés fabriqués en jute recyclé en fonction de la profondeur des aiguilles

Les valeurs de la masse surfacique obtenues diminuent avec l'augmentation de la profondeur des aiguilles. Ceci est attribué au fait qu'en augmentant la profondeur des aiguilles, les non-tissés sont de plus en plus aiguilletés et donc forcément étirés.

3.3.3 Épaisseur des non-tissés

Au niveau de mesures réalisées pour chaque non-tissé, la moyenne des valeurs pour les cinq spécimens a été de 0,65 mm pour une profondeur d'aiguilles de 5 mm, de 0,57 mm pour une profondeur d'aiguilles de 10 mm, de 0,48 mm pour 12 mm de profondeur d'aiguilles et enfin de 0,46 mm pour 15 mm de profondeur d'aiguilles (Figure 3.9). La différence remarquée au niveau des deux sens machine et travers pour la profondeur d'aiguilles de 10 mm peut être attribuée à la non-uniformité du nappage.

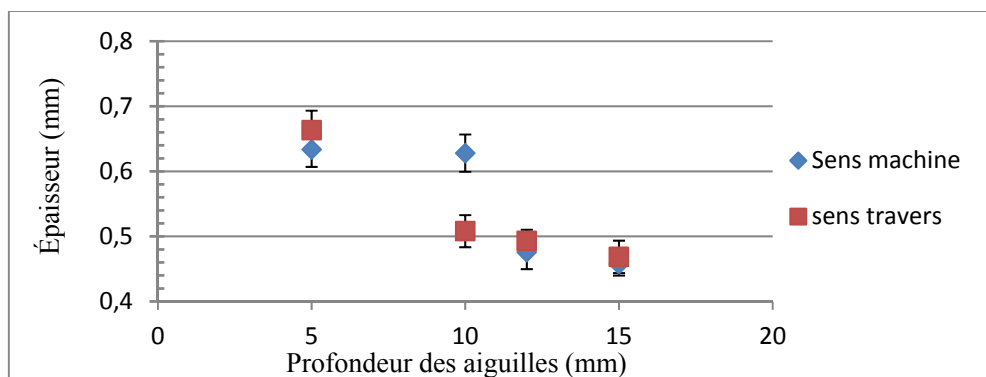


Figure 3.9 Épaisseur des non-tissés réalisés avec le jute recyclé en fonction de la profondeur des aiguilles

La variation de l'épaisseur suit la même tendance que la variation de la masse surfacique illustrée dans la Figure 3.8.

3.3.4 Force de rupture des non-tissés

Les prochains graphes (Figure 3.10) illustrent l'effet de la profondeur des aiguilles sur la force de rupture du non-tissé produit. Un aiguilletage à 5 mm de profondeur a donné une moyenne de 119 ± 20 N SM / 142 ± 26 N ST ; les non-tissés ont pu atteindre une moyenne de

106 ± 20 N SM / 104 ± 40 N ST pour 10 mm de profondeur, une moyenne de 75 ± 14 N SM et 45 ± 6 N ST pour une profondeur de 12 mm et enfin une moyenne de 58 ± 22 N SM / 35 ± 10 N ST pour une profondeur d'aiguilletage de 15 mm. Une variabilité relativement élevée est observée et est attribuée à la nature variable des fibres naturelles et à la nature semi-manuelle du procédé de nappage.

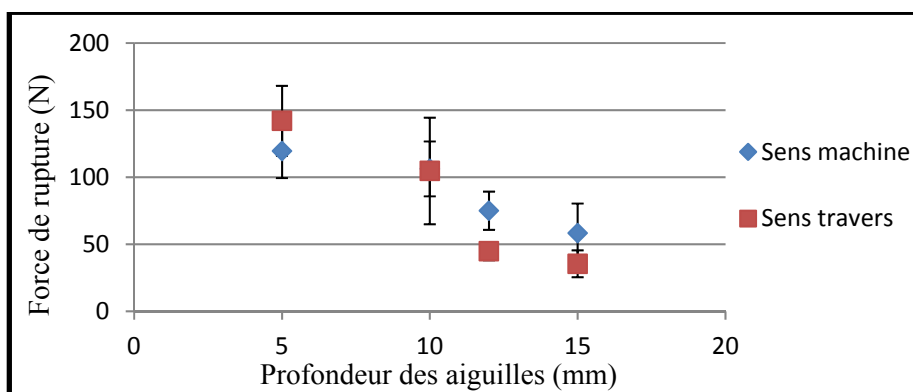


Figure 3.10 Variation de la force de rupture des non-tissés en jute recyclé en fonction de la profondeur des aiguilles

Les deux graphes ci-dessous (Figure 3.11 et Figure 3.12) illustrent la variation de la force de rupture respectivement dans le sens machine et dans le sens travers en fonction de la masse volumique des spécimens prélevés de chaque non-tissés produit. Les points correspondants aux différentes profondeurs d'aiguilletage s'inscrivent clairement dans des courbes directrices lorsque la force est exprimée en fonction de la masse volumique et peuvent être décrits par des droites de pentes relativement proches mais d'ordonnées à l'origine différentes.

Autant dans le sens machine que dans le sens travers, les courbes directrices décrivant les pentes correspondant à des profondeurs d'aiguille de 12 et 15 mm sont confondues. Par contre les valeurs obtenues avec un aiguilletage de 10 mm sont généralement situées au-dessous et celles avec un aiguilletage à 5 mm sont les plus élevées.

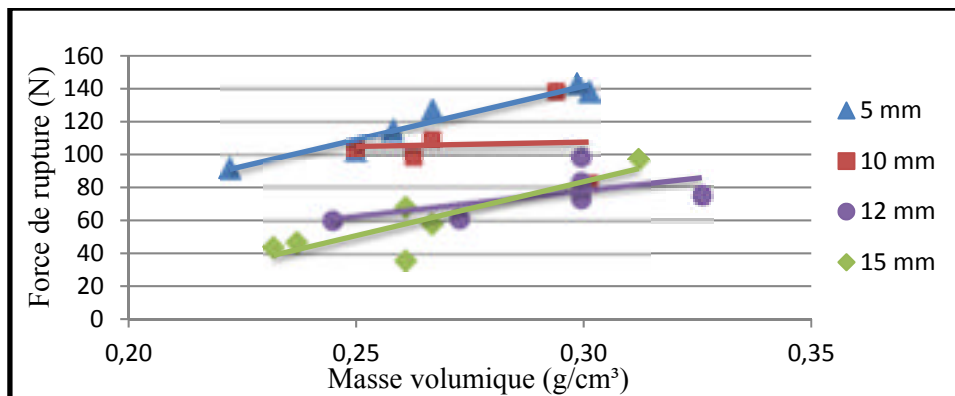


Figure 3.11 Force de rupture des différents non-tissés de jute recyclé en sens machine en fonction de la masse volumique (la ligne est un guide pour les yeux)

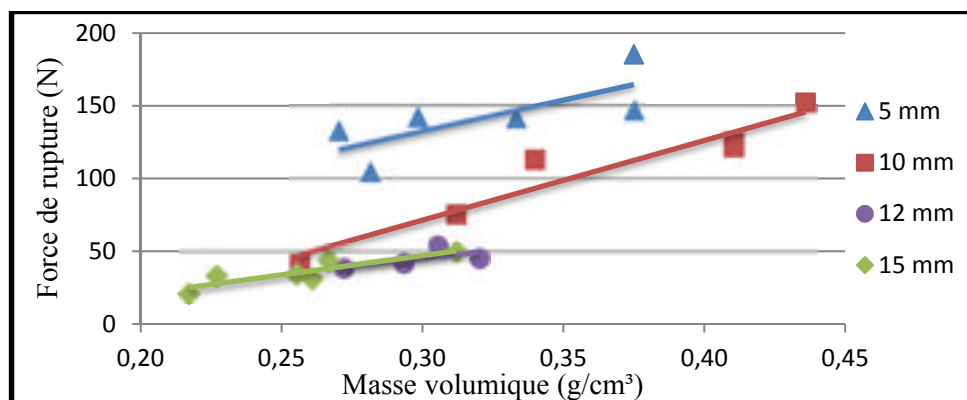


Figure 3.12 Force de rupture des différents non-tissés de jute recyclé en sens travers en fonction de la masse volumique (la ligne est un guide pour les yeux)

3.3.5 Discussion

Quatre profondeurs d'aiguillete ont été sélectionnées afin d'étudier l'influence de ce paramètre sur les propriétés physiques et les performances mécaniques des non-tissés réalisés avec la fibre de jute recyclé. L'uniformité et la continuité du non-tissé sortant de l'aiguilleteuse ont aussi été observées. Pour mieux analyser l'effet de la relation entre la profondeur des aiguilles et la force de rupture des non-tissés produits, ces deux paramètres

ont été exprimés l'un en fonction de l'autre dans les deux graphes ci-dessous (Figure 3.13 et Figure 3.14) pour les sens machine et travers. Il semble que la force de rupture diminue en augmentant la profondeur d'aiguilletage. Ceci peut être attribué au fait que trop d'aiguilletage endommage la fibre naturelle déjà d'origine recyclée. La valeur de 5 mm a donc été sélectionnée comme profondeur d'aiguilletage pour la suite des travaux.

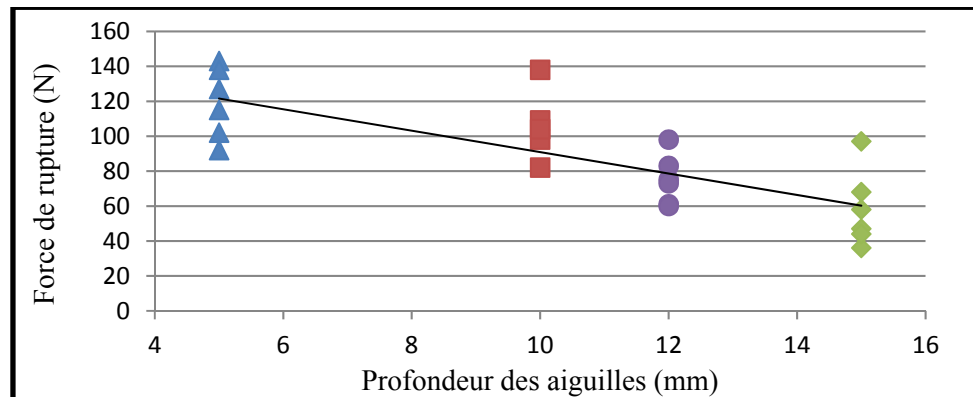


Figure 3.13 Force de rupture des non-tissés de jute recyclé en fonction de la profondeur d'aiguilletage en sens machine

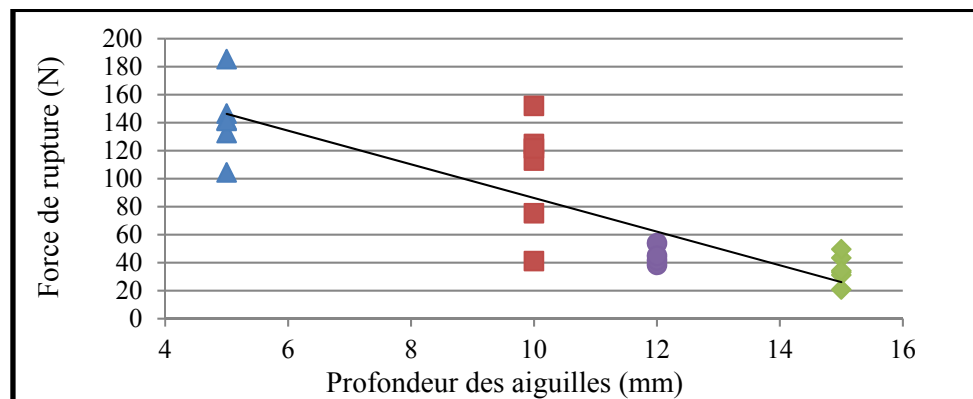


Figure 3.14 Force de rupture des non-tissés de jute recyclée en fonction de la profondeur d'aiguilletage en sens travers

3.4 Optimisation de la fréquence d'aiguilletage

3.4.1 Introduction

La fréquence d'aiguilletage est liée à la fois à la profondeur d'aiguilletage et à la vitesse d'entrée/sortie du tapis de l'aiguilleteuse pour donner la densité d'aiguilletage. Ce paramètre a été étudié après avoir choisi une profondeur d'aiguilletage de 5 mm. En plus des performances mécaniques des non-tissés, l'uniformité, l'étirage et l'homogénéité des non-tissés produits à la sortie d'aiguilleteuse seront aussi évaluées. Les trois valeurs choisies pour la fréquence d'aiguilletage sont 97 coups/min, 197 coups/min et 250 coups/min. Les autres paramètres sont l'ouvraison avec 30 g de fibres sous une pression de 50 psi (345 kPa) pendant 5 minute, le cardage avec une vitesse de 7,8 m/min, une vitesse de nappage de 8,3 m/min, un pré-aiguilletage suivi par un aiguilletage à 5 mm avec une vitesse d'entrée/sortie du tapis de l'aiguilleteuse de 0,62/0,67 m/min. La consolidation thermique a été effectuée à l'aide d'une presse chauffante à 205°C avec un cadre de 0,52 mm sous une pression de 50 kg pendant deux minutes et une pression de 0,5 tonnes pendant une minute. Les non-tissés ont été produits le même jour pour limiter l'influence des conditions climatiques et environnementales.

3.4.2 Masse surfacique des non-tissés

En ce qui concerne la masse surfacique des non-tissés fabriqués, cinq spécimens ont été mesurés (Figure 3.15) pour chaque non-tissé. Les moyennes obtenues sont de $263 \pm 27 \text{ g/m}^2$ pour 97 coups/min, de $241 \pm 5 \text{ g/m}^2$ pour 197 coups/min, et enfin de $253 \pm 0 \text{ g/m}^2$ pour 250 coups/min.

Les indications sens machine et sens travers correspondent au prélèvement des échantillons dans les non-tissés. Les valeurs sont très proches, ce qui peut être attribué à l'amélioration de notre technique de fabrication des non-tissés. Entre autres, un conditionnement des fibres a été réalisé avant le cardage et des mesures ont été prises pour diminuer la statique créée par le système de protection en plexiglas autour de la carde.

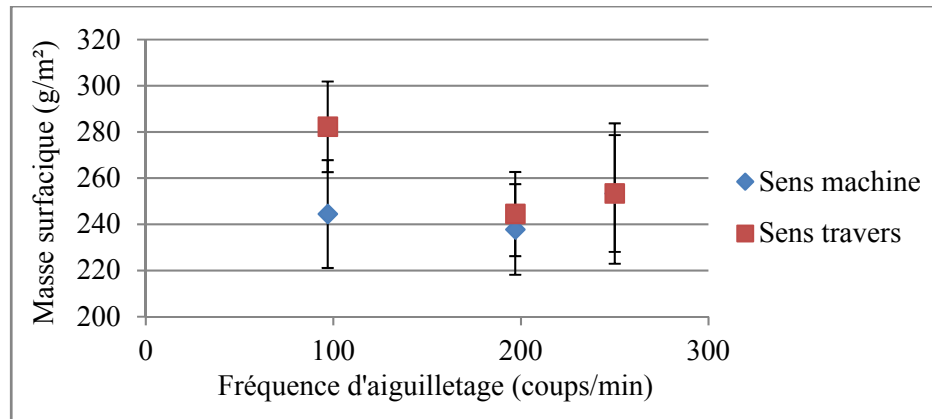


Figure 3.15 Masse surfacique des non-tissés fabriqués en jute recyclé en fonction de la fréquence d'aiguilletage

Il n'y a pas une grande différence entre les masses surfaciques obtenues par les non-tissés produits avec les différentes fréquences d'aiguilletage. Ceci indique que la variation de la fréquence d'aiguilletage avec un aiguilletage de 5 mm n'a pas une grande influence sur l'étirage des non-tissés produits.

3.4.3 Épaisseur des non-tissés

Pour les cinq prélèvements mesurés pour chaque non-tissé, les moyennes obtenues sont de 0,79 mm pour 97 coups/min, de 0,74 mm pour 197 coups/min et enfin de 0,79 pour 250 coups/min. Comme il a été précisé avant, les indications sens machine et sens travers (Figure 3.16) correspondent au prélèvement des spécimens dans le non-tissé produit.

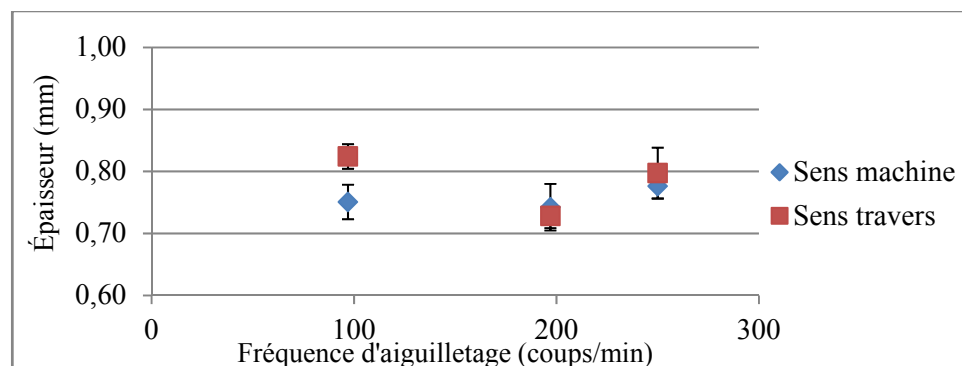


Figure 3.16 Épaisseur des non-tissés fabriqués en jute recyclé en fonction de la fréquence d'aiguilletage

Les résultats présentés dans la figure ci-dessus montrent qu'il n'y a pas une grande différence entre les deux sens machine/travers de chaque non-tissé. De même, il semble qu'il n'y a pas une grande variation d'épaisseur entre les trois non-tissés fabriqués avec différentes fréquences d'aiguilletage, ceci indique qu'à 5 mm d'aiguilletage et 62/67 m/min comme vitesse d'entrée/sortie de l'aiguilleteuse, la fréquence d'aiguilletage n'influence pas l'étirage et l'uniformité des non-tissés.

3.4.4 Force de rupture des non-tissés

En ce qui concerne l'influence de la fréquence d'aiguilletage sur la force de rupture du non-tissé, la figure suivante (Figure 3.17) illustre les moyennes obtenues à ce niveau. Les non-tissés réalisés avec 97 coups/min ont pu atteindre 195 ± 37 N SM / 178 ± 16 N ST ; une moyenne de 199 ± 22 N SM / 188 ± 11 N ST a été obtenue pour 197 coups/min, et enfin une moyenne de 216 ± 42 N SM et 151 ± 12 N ST a été atteinte pour 250 coups/min.

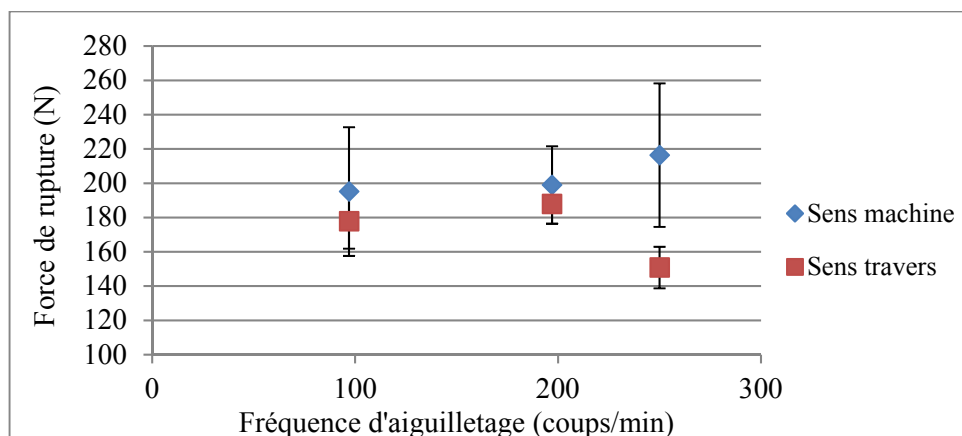


Figure 3.17 Force de rupture des non-tissés de jute recyclé fabriqués en fonction de la fréquence d'aiguilletage

D'après les valeurs obtenues (Figure 3.18 et Figure 3.19), la fréquence d'aiguilletage ne semble pas avoir une grande influence sur les performances mécaniques des non-tissés réalisés. Une confirmation de cette hypothèse a été obtenue en exprimant la force de rupture en fonction de la masse volumique des différents spécimens testés. Les courbes directrices correspondent à chaque fréquence d'aiguilletage sont pratiquement superposées.

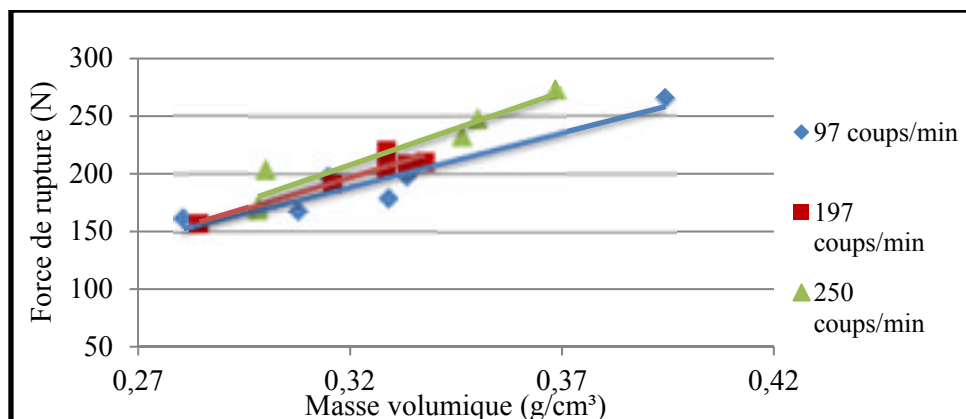


Figure 3.18 Force de rupture des non-tissés de jute recyclé réalisés en sens machine en fonction de la masse volumique (la ligne est un guide pour les yeux)

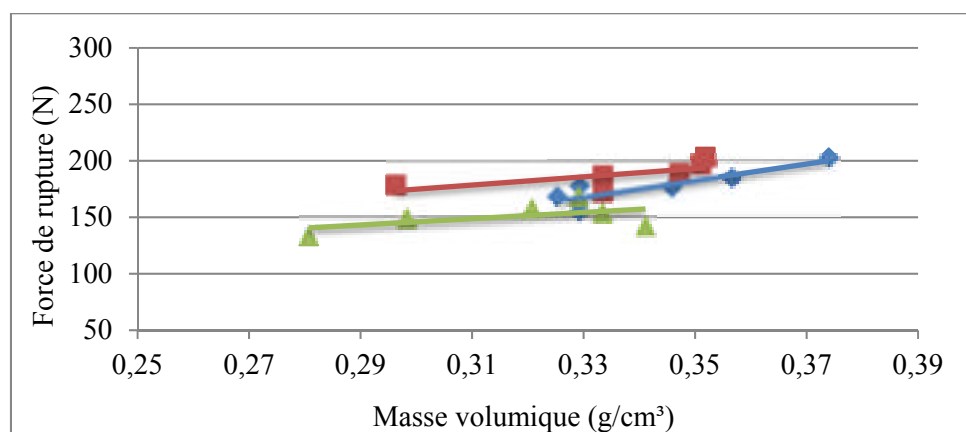


Figure 3.19 Force de rupture des non-tissés de jute recyclé réalisés en sens travers en fonction de la masse volumique (la ligne est un guide pour les yeux)

Au niveau du coefficient de variation, la fréquence d'aiguilletage de 197 coups par min donne le coefficient de variation le moins élevé avec 11% par rapport à 19% pour les deux autres paramètres.

3.4.5 Discussion

Pour étudier l'effet de la fréquence d'aiguilletage sur les performances des non-tissés, trois valeurs de 97 coups/min, 197 coups/min et 250 coups/min ont été choisies. Ces trois non-tissés par ailleurs ont été tous produits avec les autres valeurs des paramètres correspondant au résultat de l'optimisation présentée dans ce qui précède. Les figures suivantes (Figure 3.20 et Figure 3.21) montrent la relation entre la force de rupture et la fréquence d'aiguilletage pour chaque non-tissé.

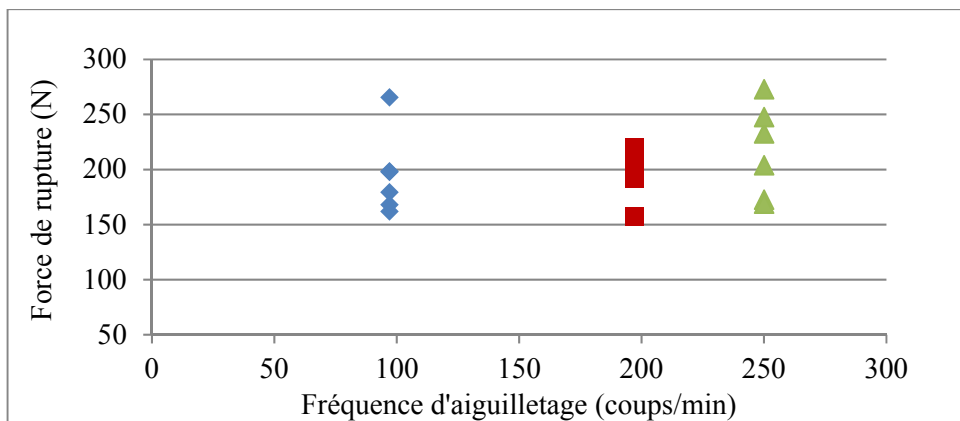


Figure 3.20 Force de rupture des non-tissés en jute recyclé en fonction de la fréquence d'aiguilletage en sens machine

Une faible variabilité des valeurs de force de rupture est observée, qui peut être attribué à une bonne uniformité et homogénéité des non-tissés. Dans les deux sens, machine et travers, aucun effet significatif de la fréquence d'aiguilletage sur la force de rupture ne semble observé.

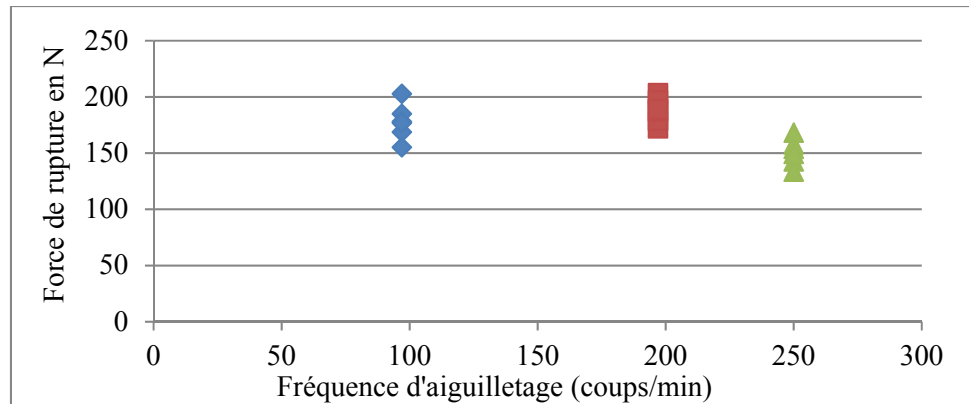


Figure 3.21 Force de rupture des non-tissés en jute recyclé en fonction de la fréquence d'aiguilletage en sens travers

La valeur de fréquence d'aiguilletage de 197 coups/min a été sélectionnée pour la suite des travaux. Étant donnée la relation entre les paramètres de l'aiguilleteuse, l'analyse sera éventuellement à renouveler une fois que la vitesse d'entrée/sortie du tapis aura été optimisée. Il est à mentionner que, dans cette série de mesures, 67% des échantillons testés en sens machine dépassaient 200N pour 197 et 250 coups/min.

3.5 Optimisation de la vitesse d'entrée/ sortie du tapis de l'aiguilleteuse

3.5.1 Introduction

La vitesse d'entrée/sortie du tapis de l'aiguilleteuse est liée aux deux paramètres de l'aiguilletage optimisés précédemment, soit la profondeur des aiguilles et la fréquence d'aiguilletage. Une différence de 5 m/min entre les vitesses d'entrée et de sortie doit également être appliquée pour garder une bonne tension dans le non-tissé sans trop l'étirer. Les paramètres évalués sont l'étirage, l'uniformité des non-tissés ainsi que la résistance mécanique de ces derniers. Trois vitesses ont été choisies, 43/48, 62/67 et 83/88 m/min. Les non-tissés ont été produits avec une ouvraison à 50 psi (345 kPa), 30 grammes de fibres et pendant 5 minutes, un cardage à 7,8 m/min, un nappage à 8,3 m/min avec pré-aiguilletage et aiguilletage de 5 mm, et une fréquence d'aiguilletage de 197 coups par minute. La consolidation thermique a été effectuée à l'aide d'une presse chauffante à 205°C avec un cadre de 0,52 mm sous une pression de 50kg pendant deux minutes et une pression de 0,5

tonnes pendant une minute. Les non-tissés ont été produits le même jour pour limiter l'influence des conditions environnementales.

3.5.2 Masse surfacique des non-tissés

Les moyennes obtenues (Figure 3.22) au niveau des non-tissés fabriqués sont de 246 ± 5 g/m² pour une vitesse d'entrée/sortie de 0,43/0,48 m/min, de 243 ± 0 g/m² pour une vitesse d'entrée/sortie de 0,62/0,67 m/min et enfin de 273 ± 9 g/m² pour une vitesse d'entrée/sortie de 0,83/0,88 m/min. On remarque encore une amélioration de la qualité des non-tissés produits par rapport à l'étape d'optimisation précédente, associée à une réduction de la variabilité entre les sens machine et travers du même non-tissé.

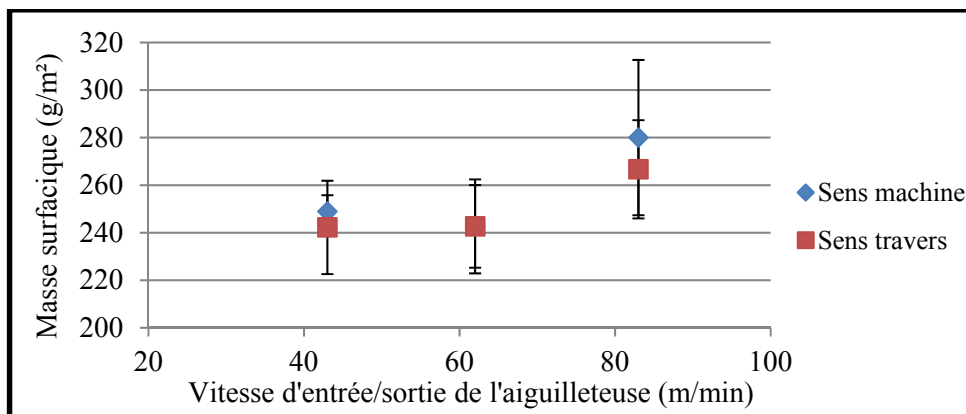


Figure 3.22 Masse surfacique des non-tissés de jute recyclé réalisés en fonction de la vitesse du tapis d'aiguilleuse

3.5.3 Épaisseur des non-tissés

En ce qui concerne l'épaisseur des non-tissés fabriqués, les moyennes obtenues (Figure 3.23) sont de $0,75 \pm 0,02$ mm pour 0,43/0,48 m/min, de $0,74 \pm 0,01$ pour 0,62/0,67 m/min et de $0,76 \pm 0,04$ pour une vitesse de 0,83/0,88 m/min. Aucun effet majeur de la vitesse du tapis de l'aiguilleuse après thermoliage sur l'épaisseur n'est donc observé.

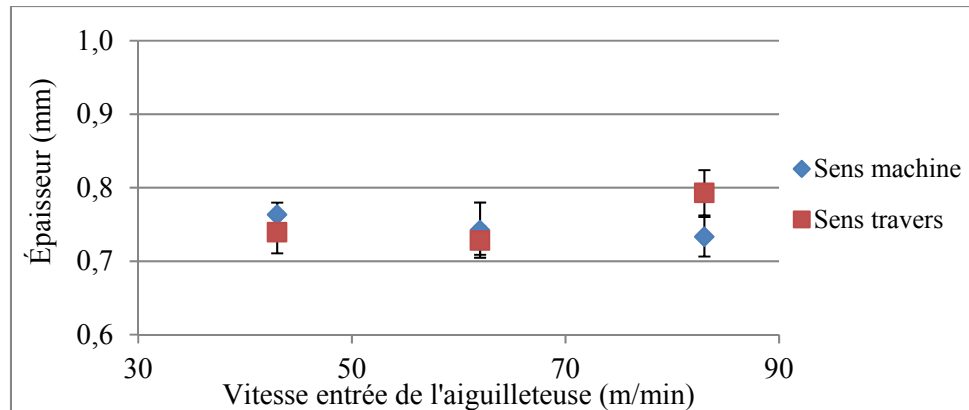


Figure 3.23 Épaisseur des différents non-tissés de jute recyclé réalisés en fonction de la vitesse du tapis de l'aiguilleteuse

3.5.4 Force de rupture des non-tissés

Au niveau de l'effet de la vitesse d'entrée/sortie du tapis de l'aiguilleteuse, les moyennes obtenues pour les forces de rupture des spécimens prélevés ont pu atteindre, comme il est illustré dans la figure ci-dessous (Figure 3.24), 206 ± 21 N SM / 140 ± 42 N ST pour 0,43/0,48 m/min, 199 ± 23 N SM / 188 ± 11 N ST pour 0,62/0,67 m/min et enfin 268 ± 33 N SM / 190 ± 11 N ST pour une vitesse du tapis de 0,83/0,88 m/min.

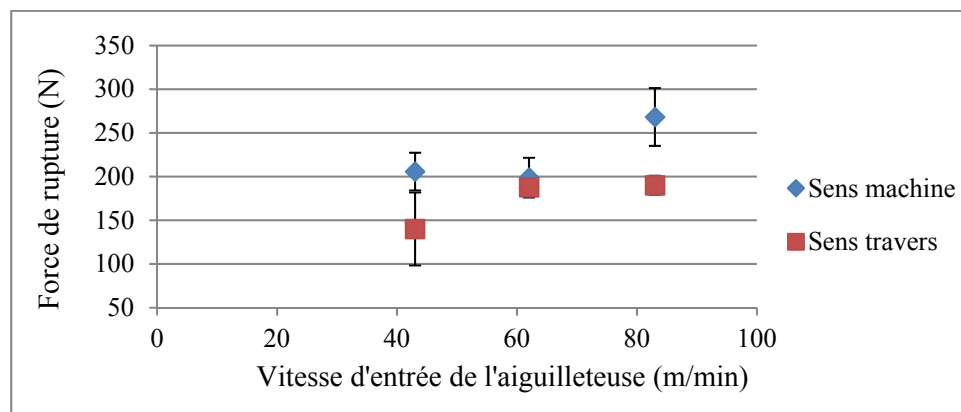


Figure 3.24 Force de rupture des non-tissés de jute recyclé réalisés en fonction de la vitesse du tapis de l'aiguilleteuse

À partir des moyennes obtenues pour chaque non-tissé produit, il a été observé que la vitesse du tapis de l'aiguilleteuse semble influencer les performances mécaniques des non-tissés.

Cependant lorsqu'on exprime la force de rupture en fonction de la masse volumique, aucun effet de la vitesse d'entrée/sortie n'est observé en sens machine, avec tous les points décrits par une même courbe directrice (Figure 3.25 et Figure 3.26). En sens machine, les non-tissés fabriqués avec une vitesse de 0,83/0,88 m/min ont pu atteindre les performances mécaniques les plus élevées mais c'est parce qu'ils ont aussi les masses volumiques les plus importantes. En ce qui concerne le sens travers, les valeurs à 0,43/0,48 m/min sont plus basses alors que celles à 0,62/0,67 et 0,83/0,88 m/min sont superposées.

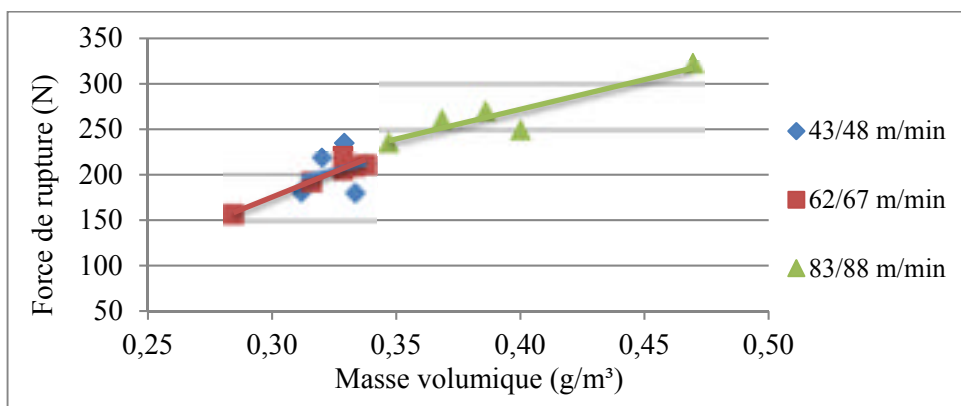


Figure 3.25 Force de rupture des non-tissés réalisés en fonction de la masse volumique en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)

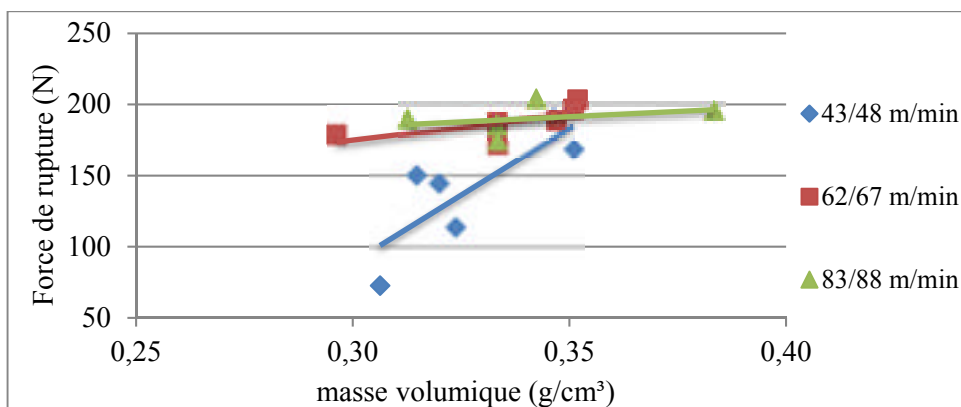


Figure 3.26 Force de rupture des non-tissés réalisés en fonction de la masse volumique en sens travers (la ligne est un guide pour les yeux)

3.5.5 Discussion

La valeur de la force de rupture en fonction de la vitesse du tapis de l'aiguilleteuse est illustrée dans les figures suivantes (Figure 3.27 et Figure 3.28). En sens machine, les résultats montrent qu'une vitesse de 0,83/0,88 m/min du tapis de l'aiguilleteuse semble donner les meilleurs résultats au niveau des performances mécaniques des non-tissés. Aussi, il est remarqué que les deux vitesses 0,43/0,48 et 0,62/0,67 m/min donnent des performances presque semblables pour des non-tissés réalisés avec un pré-aiguilletage et aiguilletage à 5 mm, et 197 coups/min pour le nombre de coups par minute.

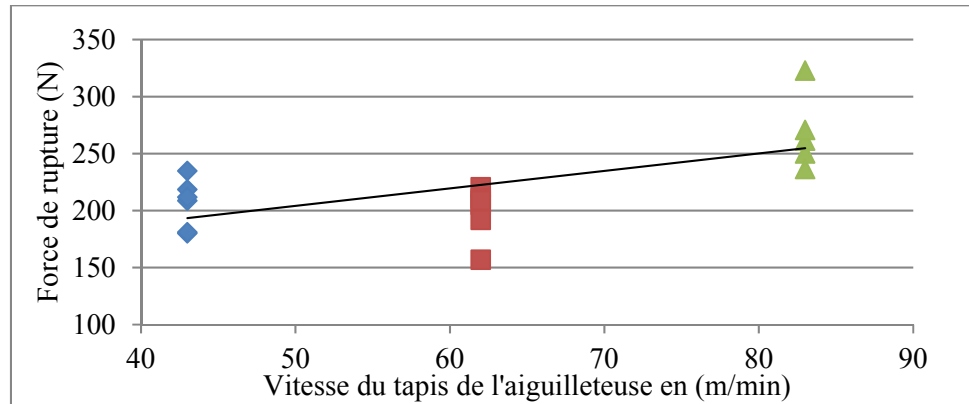


Figure 3.27 Force de rupture des non-tissés en fonction de la vitesse du tapis de l'aiguilleteuse en sens machine

Les résultats obtenus en sens travers montrent des performances très proche au niveau des vitesses 0,62/0,67 et 0,83/0,88 m/min avec des coefficients de variation de 5%. Par comparaison, les résultats obtenus avec une vitesse plus faible (0,43/0,48 m/min) semble être plus faibles et le coefficient de variation est plus élevé (30%).

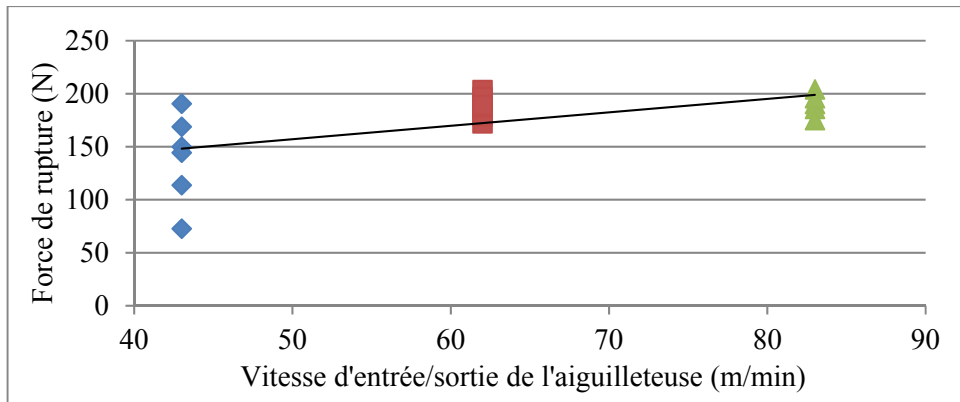


Figure 3.28 Force de rupture des non-tissés de jute recyclé en fonction de la vitesse du tapis de l'aiguilleuse en sens travers

Généralement, l'ensemble des résultats montrent qu'en augmentant la vitesse du tapis de l'aiguilleuse tout en gardant l'aiguilletage et le nombre de coups constants, les performances des non-tissés augmentent, ce qui peut être dû à une absence d'endommagement mécanique de la fibre naturelle pendant l'étape de consolidation. Les meilleures performances semblent être obtenues avec une fréquence d'aiguilletage de 250 coups/min pour une vitesse de 0,62/0,67 m/min et avec une fréquence d'aiguilletage de 197 coups/min et une vitesse de 0,83/0,88 m/min.

3.6 Optimisation de la température de thermoliage à l'aide d'une presse chauffante

3.6.1 Introduction

La dernière étape de l'optimisation des paramètres de fabrication des non-tissés à base de la fibre de jute recyclée et de la fibre bicomposante Bico3, concerne la température de thermoliage. En effet, 85% de la composition du non-tissé est constituée de fibre naturelle qui a une faible résistance à la température : une température trop élevée pourrait la dégrader et diminuer les performances mécaniques des non-tissés réalisés. Par ailleurs, la fibre bicomposante Bico3 représente 15% de la composition de ces non-tissés : c'est une fibre dont la gaine, qui assure la liaison entre les fibres naturelles et synthétiques, fond à 185°C. Il s'agit

donc de trouver un bon compromis entre la dégradation de la fibre naturelle et la fusion de la fibre synthétique.

Cette optimisation de la température de thermoliage a été réalisée avec des échantillons qui n'avaient pas été produits avec les conditions optimales pour les paramètres textiles, ce qui explique les valeurs absolues moins bonnes de la force à la rupture des spécimens testés.

3.6.2 Choix de conditions

Un test préliminaire à 210°C a été un point de départ pour observer l'effet de la température de thermoliage sur les spécimens thermoliés. Celui-ci a été réalisé avec une presse chauffante selon la norme ASTM 4703 (ASTM international, 2016), c'est à dire une pression de 50 kg pendant 2 minutes et de 0,5 tonne pendant une minute et un refroidissement de 15°C/min. Les fibres de jutes ont été légèrement grillées (Figure 3.29) suite au thermoliage.



Figure 3.29 Non-tissé thermoliés à 210°C

Le choix a été donc fait avec deux autres températures, 190°C et 200°C. Les non-tissés obtenus ont observés à l'aide du MEB, et comparés avec ceux produits à 210°C. Les photos ci-dessous (Figure 3.30) montrent les résultats obtenus pour les trois températures de thermoliage. Il a été observé que la fibre bicomposante Bico3 ne commence à fondre qu'au-dessus d'une température de 200°C.

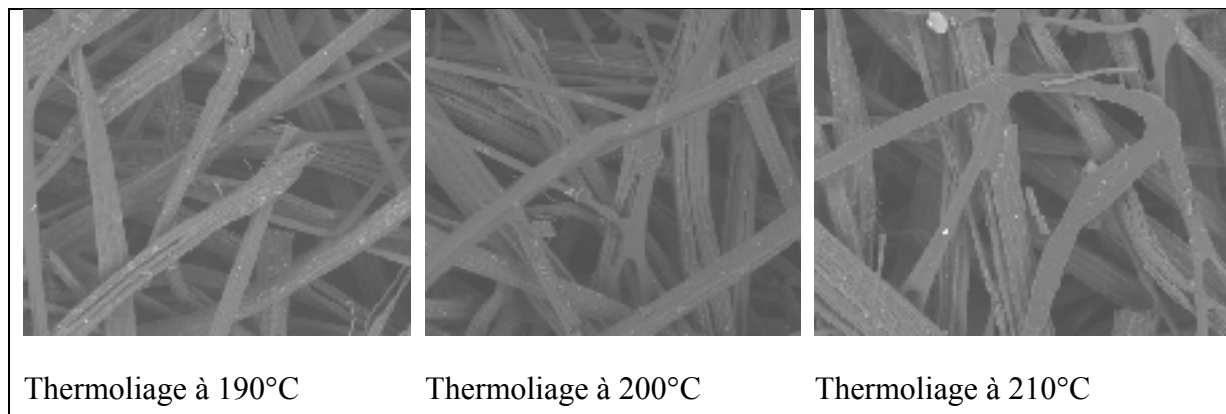


Figure 3.30 Photos au MEB des non-tissés thermoliés à différentes températures

3.6.3 Performances mécaniques des non-tissés thermoliés

Des essais de traction en sens travers ont été faits sur les spécimens thermoliés à 205°C et 210°C afin d'analyser l'influence de la température de thermoliage sur la résistance mécanique des non-tissés. Les résultats ont donné une moyenne de 66 ± 45 N pour un thermoliage à 210°C et une moyenne de 79 ± 8 N pour un thermoliage à 205°C. Le thermoliage à 210°C a donné des résultats légèrement plus faibles que celui à 205°C. Par contre l'écart type est beaucoup plus élevé. Ceci a poussé le choix vers une température de thermoliage de 205°C puisqu'elle assure une fusion de la fibre synthétique et elle est moins sévère sur la fibre naturelle.

3.6.4 Discussion

Une analyse a été réalisée pour déterminer la température optimale de thermoliage. L'idéal est que cette température soit suffisamment élevée pour fondre la gaine de la fibre bicomposante mais pas trop pour ne pas dégrader la fibre de jute. Les résultats des tests de traction et les observations au MEB ont montré que la température de 205°C permet d'obtenir des résultats satisfaisants. Il est à noter que, même si la valeur du point de fusion de gaine de la fibre bicomposante a été mesurée à 185°C par la DSC, il n'a pas été possible d'obtenir une fusion à cette température dans la presse chauffante à cause de la conductivité non parfaite entre les plaques de la presse chauffante et les fibres du non-tissé.

Au niveau de la fibre naturelle, même si les analyses thermogravimétriques ont montré une dégradation principale de la fibre de jute aux alentours de 300°C, un jaunissement des échantillons à une température plus faible a été observé. Il a été attribué à la dégradation de la lignine.

3.6.5 Conclusion

Suite à l'optimisation de la température de thermoliage pour les non-tissés fabriqués à partir de jute recyclé, il a été décidé de garder 205°C comme une température de thermoliage pour le reste des travaux. Cette température permet d'avoir les meilleures performances mécaniques pour les non-tissés, elle assure une bonne fusion de la fibre bicomposante Bico3 et ne dégrade pas la fibre de jute recyclé.

3.7 Conclusion de l'optimisation des non-tissés à base de fibre de jute recyclée

À l'issue de l'optimisation des paramètres textiles, les meilleures performances, soit 268 ± 33 N SM / 190 ± 11 N ST, ont été obtenues pour un mélange de 85% de fibre de jute recyclée et 15% de fibre Bico3 en utilisant les paramètres suivants :

- Ouvraison avec 30 grammes de fibre sous une pression de 50 psi (345 kPa) pendant 5 minutes ;
- Cardage à une vitesse de 7,8 m/min ;
- Nappage à une vitesse de 8,3 m/min ;
- Pré-aiguilletage et aiguilletage à 5 mm avec une fréquence d'aiguilletage de 197 coups/min et une vitesse de 0,83/0,88 m/min ;
- Thermoliage à l'aide d'une presse chauffante à 205°C avec un cadre de 0,52 mm d'épaisseur, une pression de 50 kg appliquée pendant deux minutes suivie par une pression de 0,5 tonnes pendant une minute.

Le voile de verre de référence peut atteindre 307,5 N en sens machine et 85,3 N en sens travers pour performances mécaniques. Ceci veut dire que le renfort réalisé en jute

recyclé est 12% plus faible en sens machine et 120% plus résistant en sens travers que le voile de verre.

CHAPITRE 4

OPTIMISATION DES PARAMÈTRES TEXTILES POUR LA PRODUCTION DE NON-TISSÉS À BASE DE FIBRE DE KÉNAF VIERGE

De bons résultats ont été obtenus avec la fibre de jute recyclée à l'issue du processus d'optimisation. La fibre du kénaf représente une alternative intéressante car ses propriétés mécaniques sont plus élevées que celle du jute. Par contre, étant données ses caractéristiques physiques et mécaniques différentes, les valeurs optimales pour les paramètres de mise en forme de non-tissés peuvent potentiellement être différentes par rapport au jute recyclé.

4.1 Performances de non-tissés de kénaf réalisés avec les paramètres optimaux pour la fibre de jute recyclé

Avant de commencer l'optimisation des paramètres textiles pour les non-tissés réalisés à partir de la fibre de kénaf vierge, une première production des non-tissés a été réalisée en utilisant les paramètres optimaux déterminés pour la fibre de jute. Ces non-tissés serviront de référence pour pouvoir évaluer si l'optimisation des paramètres textiles de la ligne de non-tissé va augmenter ou diminuer les performances mécaniques des non-tissés produits. Les paramètres utilisés sont : 85% de fibre naturelle (jute recyclé ou kénaf vierge) mélangé avec 15% de la fibre bico3. L'ouvraison a été faite avec 30 grammes de fibre sous une pression de 50 psi (345 kPa) pendant 5 minutes. Les fibres ont été cardées avec une vitesse de 7,8 m/min et un nappage à 8,3 m/min. Un pré-aiguilletage suivi par un aiguilletage à 5 mm avec une fréquence d'aiguilletage de 197 coups/min et une vitesse de 0,62/0,68 m/min (une petite erreur a été commise puisqu'il aurait fallu utiliser une vitesse de 0,83/0,88 m/min). La consolidation thermique a été faite à l'aide d'une presse chauffante à 205°C avec un cadre de 0,52 mm d'épaisseur, une pression de 50 kg pendant deux minutes suivi par une pression à 0,5 tonnes pendant une minute. Les non-tissés ont été produits le même jour pour limiter l'influence des conditions environnementales.

4.1.1 Masse surfacique des non-tissés

En ce qui concerne la masse surfacique des non-tissés fabriqués, cinq spécimens ont été mesurés. Les moyennes obtenues (Figure 4.1) sont de $271 \pm 0 \text{ g/m}^2$ pour les non-tissés réalisés avec la fibre de jute recyclé et de $300 \pm 7 \text{ g/m}^2$ pour ceux réalisés avec la fibre de kénaf vierge.

La masse surfacique obtenue au niveau de la fibre de kénaf est un peu plus élevée que celle obtenue au niveau de la fibre de jute recyclé malgré le fait que les deux non-tissés ont été réalisés avec le même nombre de nappes (30). Cette différence peut être attribuée au fait que la fibre de kénaf est une fibre grossière, ce qui augmente le poids des fibres par rapport au jute.

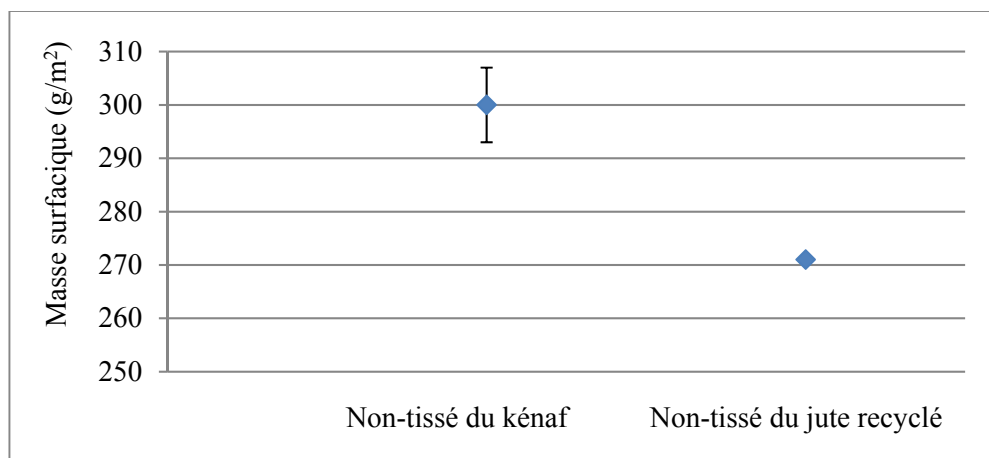


Figure 4.1 Comparaison de la masse surfacique des non-tissés en kénaf vierge par rapport aux non-tissés en jute recyclé

4.1.2 Épaisseur des non-tissés

En ce qui concerne l'épaisseur des non-tissés produits, les valeurs (Figure 4.2) sont similaires avec une moyenne de 0,74 mm pour les non-tissés réalisés avec la fibre de jute recyclé et de 0,76 mm pour les non-tissés réalisés avec la fibre de kénaf vierge.

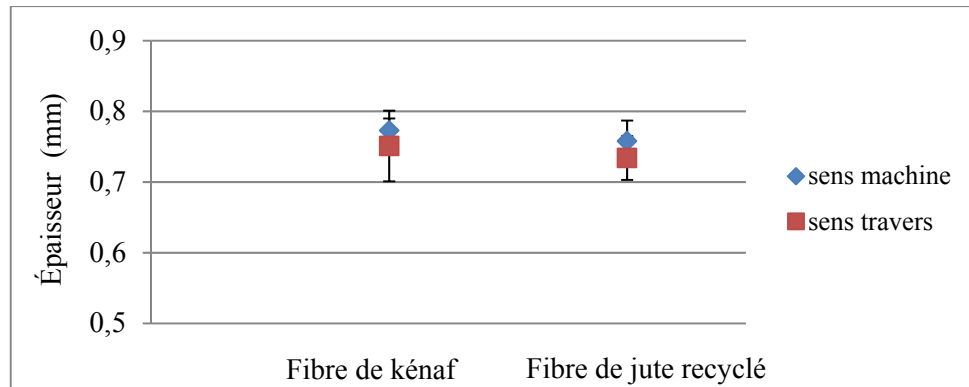


Figure 4.2 Comparaison de l'épaisseur des non-tissés en kénaf vierge par rapport aux non-tissés en jute recyclé

4.1.3 Force de rupture

Pour les performances mécaniques des non-tissés, les moyennes obtenues sont de 191 ± 27 N SM / 179 ± 19 N ST pour les non-tissés de fibre de jute recyclé et de 265 ± 55 N SM / 249 ± 45 N ST pour les non-tissés de fibre de kénaf vierge (Figure 4.3). Les performances mécaniques des non-tissés de fibres de kénaf semblent dépasser celles des non-tissés de fibres de jute, même si les paramètres de fabrication utilisés avaient été optimisés pour la fibre de jute recyclé. La fibre de kénaf semble donc offrir de très bonnes perspectives pour créer des non-tissés structuraux biosourcés.

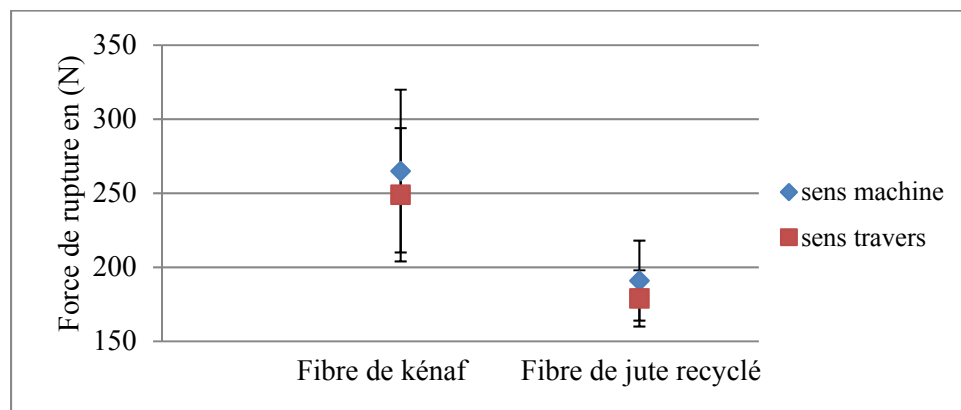


Figure 4.3 Comparaison de la force de rupture des non-tissés de kénaf vierge par rapport aux non-tissés de jute recyclé

Une analyse détaillée impliquant chaque spécimen testé a été réalisée en normalisant la force de rupture par la masse volumique. Comme il est montré dans les deux figures suivantes (Figure 4.4 et Figure 4.5), les performances mécaniques des spécimens à base de fibre de kénaf semblent dépasser celles des non-tissés à base de la fibre de jute.

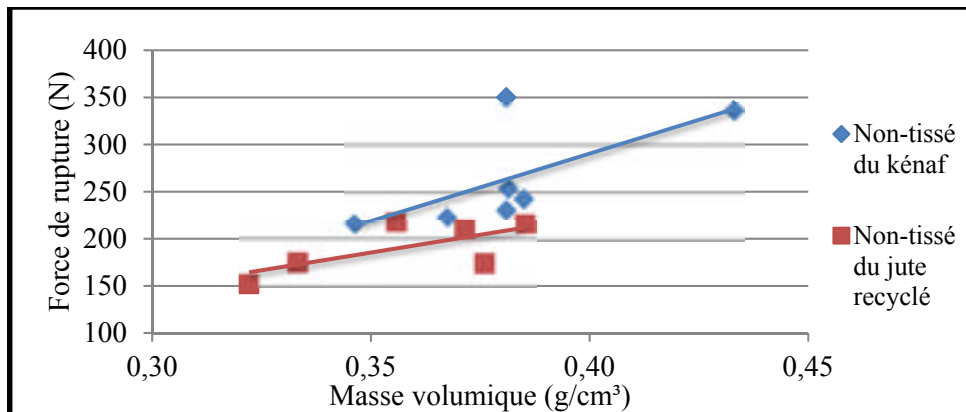


Figure 4.4 Force de rupture des non-tissés en fonction de la masse volumique en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)

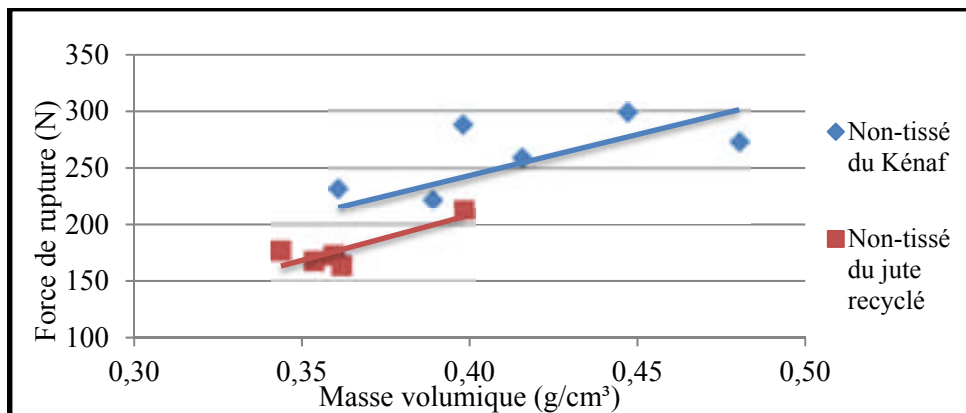


Figure 4.5 Force de rupture des non-tissés en fonction de la masse volumique en sens travers (la ligne est un guide pour les yeux)

4.1.4 Discussion

Une production des non-tissés à base de fibre de kénaï vierge avec les paramètres optimaux de la production des non-tissés à base de fibre de jute recyclé a permis de réaliser le potentiel de la fibre de kénaï pour application structurelle. Ces meilleures performances observées peuvent être liées d'une part au fait qu'il s'agit d'une fibre vierge, donc qui n'a pas subi d'endommagement lié à l'utilisation et au recyclage. Il est possible d'espérer des performances encore meilleures une fois les paramètres de fabrication optimisés.

4.2 Optimisation des paramètres de l'ouvrison

4.2.1 Introduction

Les paramètres à optimiser pour le cylindre d'ouvrison à air comprimé sont la masse, la pression et le temps. Comme pour l'optimisation de la fibre de jute, un plan d'expérience est employé pour déterminer les paramètres optimaux pour 85% de fibre de kénaï et 15% de fibre bicomposante.

4.2.2 Plan d'expérience

L'optimisation de l'ouvrison pour le jute recyclé a servi de référence pour optimiser les paramètres d'ouvrison de la fibre du kénaï. Le nombre de paramètres variables est le même que pour la fibre de jute recyclé ; le plan d'expérience est donc une matrice factorielle complète de type 2^k avec k , le nombre de paramètres. Les paramètres sont la pression en (psi), la masse en (g) et enfin le temps en (min). Quelques tests préliminaires ont aidé à déterminer le plan 0. Ce plan correspond à 55 psi (379 kPa) pendant 6 minutes pour 40 grammes de fibre de kénaï. Le tableau suivant (Tableau 4.1) présente les différents niveaux ainsi que le choix des paramètres pour chaque niveau.

Tableau 4.1 Plan d'expérience pour l'optimisation de l'ouverture de la fibre de kénaf

	Variables codées			Variables réelles		
	X ₁	X ₂	X ₃	Pression (psi)	Masse (g)	Temps (min)
1	1	1	1	60	50	7
2	-1	1	1	50	50	7
3	1	-1	1	60	30	7
4	-1	-1	1	50	30	7
5	1	1	-1	60	50	5
6	-1	1	-1	50	50	5
7	1	-1	-1	60	30	5
8	-1	-1	-1	50	30	5
9*	0	0	0	55	40	6

4.2.3 Résultats

Après avoir réalisé le plan d'expérience, trois paramètres ont été analysés afin d'observer les effets des variations des variables de l'ouvraison en passant d'un niveau à un autre. Ces trois paramètres sont la qualité d'ouvraison du mélange, la longueur résiduelle des fibres naturelles, et enfin la résistance mécanique des fibres naturelles, par comparaison avec la longueur et la résistance mécanique de la fibre avant passage à l'ouvraison.

En ce qui concerne la qualité d'ouvraison, deux personnes externes ont jugé si les mélanges ont été bien ouverts et étaient homogènes ou non. Pour les mesures de longueur et de résistance mécanique, les normes ASTM D5103 et ASTM D3822 ont été respectivement suivies. Le tableau suivant présente les résultats obtenus pour le plan d'expérience avec une comparaison avec les résultats des tests de longueur et de résistance mécanique de la fibre de kénaf vierge avant l'ouvraison.

Tableau 4.2 Résultats des tests d'optimisation d'ouvrison pour la fibre de kénaf vierge

	Variables codées			Variables réelles			Résultats				
	X ₁	X ₂	X ₃	Pression (psi)	Masse (g)	Temps (min)	Fr (cN)		Longueur (mm)		Qualité d'ouvrison
							Moyenne	CV	Moyenne	CV	
1	1	1	1	60	50	7	146 ± 76	52%	65 ± 19	29%	40%
2	-1	1	1	50	50	7	110 ± 51	46%	67 ± 14	21%	40%
3	1	-1	1	60	30	7	141 ± 64	57%	64 ± 12	19%	60%
4	-1	-1	1	50	30	7	112 ± 69	62%	58 ± 17	29%	80%
5	1	1	-1	60	50	5	102 ± 67	66%	57 ± 15	26%	60%
6	-1	1	-1	50	50	5	104 ± 91	87%	55 ± 16	29%	80%
7	1	-1	-1	60	30	5	108 ± 63	58%	62 ± 15	24%	100%
8	-1	-1	-1	50	30	5	152 ± 64	42%	56 ± 14	25%	100%
9*	0	0	0	55	40	6	128 ± 84	66%	54 ± 13	24%	40%
Kénaf vierge							141 ± 62	44%	66 ± 12	18%	

4.2.4 Discussion

En ce qui concerne l'optimisation des paramètres d'ouvrison, le but principal est de trouver la meilleure combinaison pour une bonne qualité et homogénéité du mélange des fibres naturelle et synthétique tout en présentant les caractéristiques physiques et mécaniques de la

fibre naturelle. Les résultats obtenus montrent que deux niveaux ont permis d'avoir une très bonne qualité d'ouvrison (estimée à 100%).

- Un premier niveau avec 60 psi (414 kPa), 30 grammes de fibres et de 5 minutes de traitement a permis d'avoir une qualité d'ouvrison de 100%. La perte de résistance mécanique de la fibre de kénafe est de 30% et la longueur de la fibre n'a pas changé.
- Un deuxième niveau avec 50 psi (345 kPa), 30 grammes de fibres et pendant 5 minutes, a permis aussi d'avoir une très bonne qualité d'ouvrison (100%), tout en préservant les propriétés mécaniques de la fibre de kénafe (le fait d'avoir une moyenne plus élevée à ce niveau par rapport à la fibre vierge est tout à fait normal, puisqu'il s'agit d'une fibre naturelle, les variations dans le même lot de fibres sont très larges). Une perte de 15% a été mesurée au niveau de la longueur de la fibre de kénafe.

Il a été décidé de sélectionner le niveau avec 30 grammes de fibres sous une pression de 50 psi (345 kPa) pendant 5 minutes puisqu'il préserve au mieux les caractéristiques physiques et mécaniques de la fibre naturelle. Ceci est attribué au fait que la valeur de la pression (50 psi) est moins élevée par rapport à l'autre niveau (60 psi).

4.3 Optimisation de la vitesse de la carde

4.3.1 Introduction

La carde reste un passage obligatoire au niveau de la préparation des non-tissés par voie sèche. Elle est responsable de la parallélisation des fibres, de l'élimination des déchets et de l'obtention de voiles continus à la sortie. Il est important d'optimiser les paramètres associés à la carde afin d'obtenir une meilleure homogénéité et continuité des voiles sortants. En ce qui concerne la carde utilisée dans ce projet, l'évaluation se concentrera sur la vitesse de la carde seulement. Afin de permettre une comparaison de comportement entre la fibre de kénafe vierge et la fibre de jute recyclée, les mêmes vitesses de carde ont été utilisées, 5,5 m/min, 7,8 m/min et 10,1 m/min, pour l'optimisation de la vitesse de carde. Les autres paramètres sont : l'ouvrison avec 30 grammes de fibres pendant 5 minutes sous une pression de 50 psi (345 kPa), un pré-aiguilletage suivi par un aiguilletage de 5 mm, une fréquence d'aiguilletage

de 197 coups/min avec une vitesse du tapis de l'aiguilleteuse de 0,62/0,67 m/min. La consolidation thermique se fait avec une presse chauffante avec un cadre de 0,52 mm, une pression de 50 kg pendant deux minutes et de 0,5 tonnes pendant une minute. Les non-tissés ont tous été produits le même jour afin de limiter l'influence des conditions environnementales.

4.3.2 Masse surfacique des non-tissés

En ce qui concerne la masse surfacique des non-tissés fabriqués, cinq spécimens ont été mesurés. Les moyennes obtenues (Figure 4.6) sont de $355 \pm 34 \text{ g/m}^2$ pour les non-tissés fabriqués avec une vitesse de carde de 5,5 m/min, $245 \pm 0 \text{ g/m}^2$ pour une vitesse de carde de 7,8 m/min et $288 \pm 15 \text{ g/m}^2$ pour une vitesse de carde de 10,1 m/min.

Les indications sens machine et sens travers correspondent au prélèvement des échantillons dans les non-tissés. Les différences remarquées entre les deux sens reviennent au fait que les voiles sortant de la carde sont parfois non-continus, ce qui peut affecter la masse surfacique.

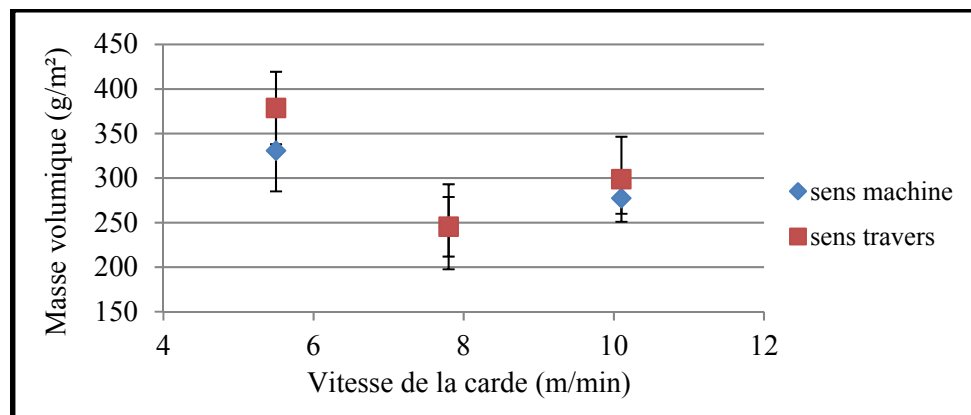


Figure 4.6 Masse surfaciques des non-tissés réalisés en kénaf en fonction de la vitesse de carde

4.3.3 Épaisseur des non-tissés

Pour les résultats de mesure de l'épaisseur des spécimens évalués, les moyennes (Figure 4.7) obtenues sont de 0,96 mm pour une vitesse de la carte de 5,5 m/min, 0,78 mm pour 7,8 m/min et 0,87 mm pour 10,1 m/min.

La variation entre les deux sens machine et travers est attribuée au nappage semi-automatique, qui peut influencer la continuité et l'uniformité des nappes sortant de l'étaleur-nappeur.

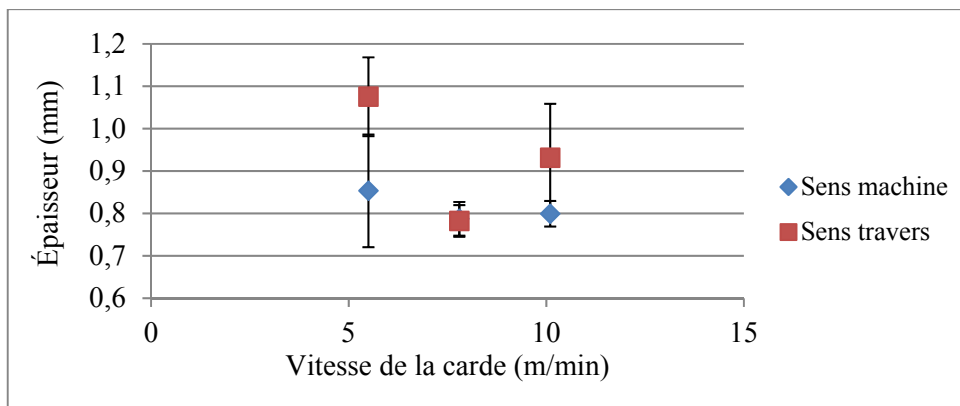


Figure 4.7 Épaisseur des non-tissés réalisés en kénaf en fonction de la vitesse de la carte

4.3.4 Force de rupture des non-tissés

Les moyennes obtenues au niveau des trois vitesses choisies (Figure 4.8) pour l'optimisation de la vitesse de la carte sont 378 ± 37 N SM / 337 ± 65 N ST pour une vitesse de 5,5 m/min, de 237 ± 57 N SM / 189 ± 46 N ST pour une vitesse de 7,8 m/min et de 280 ± 42 N SM / 245 ± 71 N ST pour une vitesse de 10,1 m/min.

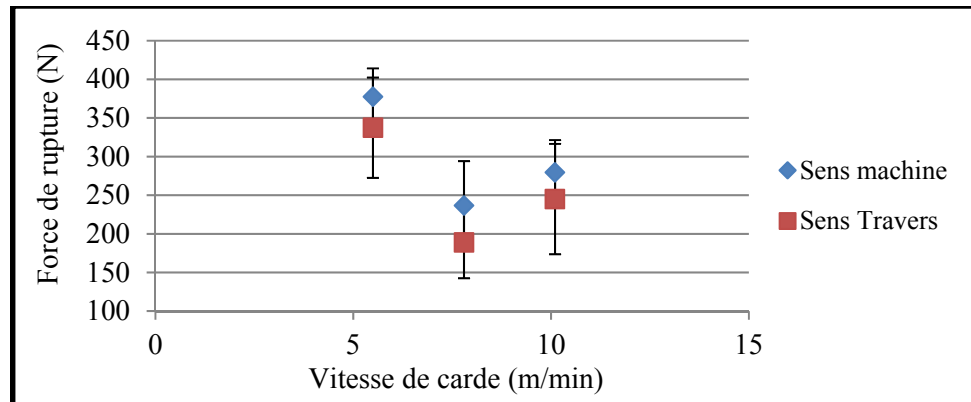


Figure 4.8 Force de rupture des non-tissés réalisés en kénaf en fonction de la vitesse de la carde

Une analyse des différents spécimens dans les deux sens machine et travers en fonction de la masse volumique est présentée dans les deux figures suivantes (Figure 4.9 et Figure 4.10). Les résultats obtenus semblent montrer que la vitesse de cardage de 5,5 m/min est la vitesse donnant les meilleures performances pour la fabrication des non-tissés de kénaf vierge.

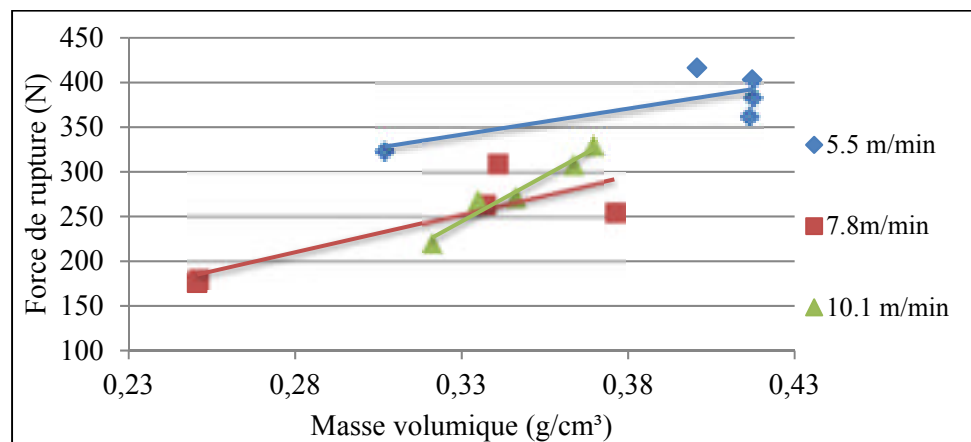


Figure 4.9 Force de rupture en fonction de la masse volumique des non-tissés en kénaf réalisés en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)

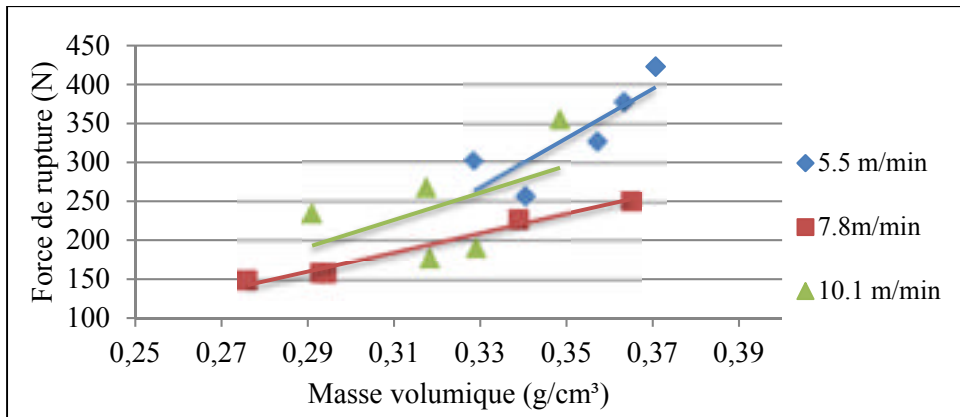


Figure 4.10 Force de rupture en fonction de la masse volumique des non-tissés en kénaf réalisés en sens travers (la ligne est un guide pour les yeux)

4.3.5 Discussion

Contrairement à la fibre de jute recyclé où la vitesse de cardage n'a pas d'effet majeur sur les performances mécaniques des non-tissés, l'optimisation de cette vitesse pour la fibre de kénaf a permis une amélioration significative des performances mécaniques des non-tissés. La réduction de la force de rupture quand la vitesse de la carde augmente peut être due aux caractéristiques physiques de la fibre de kénaf. C'est une fibre vierge, grossière et épaisse, qui demande une vitesse de cardage moins rapide afin de pouvoir paralléliser et redresser les fibres.

4.4 Optimisation de la profondeur des aiguilles de l'aiguilleteuse

4.4.1 Introduction

La profondeur des aiguilles est le deuxième paramètre à optimiser pour la fibre de kénaf. Les profondeurs sélectionnées pour les aiguilles de l'aiguilleteuse sont 0, 5, 10 et 12 mm. Les autres paramètres sont : l'ouvraison avec 30 grammes de fibres pendant cinq minutes sous une pression de 50 psi (345 kPa), le cardage avec une vitesse de 5,5m/min, une vitesse de 5,1 m/min pour le nappage, un pré-aiguilletage à 5mm avec une densité d'aiguilletage de 197 coups/min, la vitesse du tapis de l'aiguilleteuse est de 0,62/0,67 m/min. La consolidation

thermique est réalisée à l'aide d'une presse chauffante avec un cadre de 0,52 mm, sous une pression de 50 kg pendant deux minutes et de 0,5 tonnes pendant une minute. Tous les non-tissés sont fabriqués le même jour afin de limiter l'influence des conditions environnementales. La masse surfacique, l'épaisseur et les performances mécaniques des non-tissés seront analysées afin de voir l'influence de ce paramètre.

4.4.2 Masse surfacique des non-tissés

Au niveau de la masse surfacique, les moyennes obtenues sont de 400 g/m² pour une profondeur d'aiguilles de 0 mm, de 300 g/m² pour une profondeur d'aiguilles de 5 mm, de 268 g/m² pour une profondeur d'aiguilles de 10 mm, et enfin de 276 g/m² pour une profondeur d'aiguilles de 12 mm. Comme il est illustré dans la figure ci-dessous (Figure 4.11), il semble que la masse surfacique diminue quand la profondeur des aiguilles augmente. Ce résultat est dû à l'étirage des non-tissés pendant l'aiguilletage.

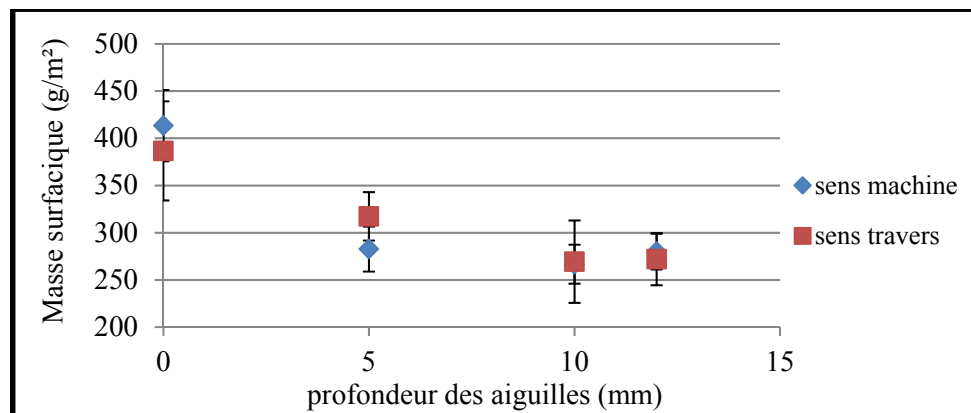


Figure 4.11 Masse surfacique des non-tissés réalisés en kéraf en fonction de la profondeur des aiguilles de l'aiguilleteuse

4.4.3 Épaisseur des non-tissés

Les moyennes obtenues (Figure 4.12) sont de 1,02 pour une profondeur d'aiguilles de 0 mm, 0,84 pour une profondeur d'aiguilles de 5 mm, de 0,82 mm pour 10 mm comme profondeur d'aiguilles et enfin 0,85 mm pour une profondeur d'aiguilles de 12mm.

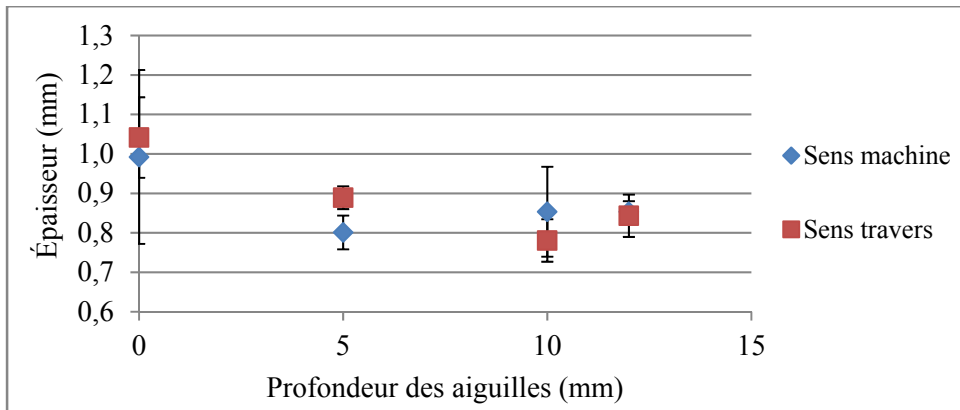


Figure 4.12 Épaisseur des non-tissés réalisés en kénaf en fonction de la profondeur des aiguilles

4.4.4 Force de rupture des non-tissés

La figure suivante (Figure 4.13) montre les moyennes obtenues pour la force de rupture en testant dix spécimens en sens machine et en sens travers. Pour une profondeur d'aiguilletage de 0 mm, les forces de rupture ont pu atteindre 510 ± 63 N SM / 421 ± 82 N ST, une moyenne de 401 ± 15 N SM / 315 ± 64 N ST pour une profondeur d'aiguilles de 5 mm, de 334 ± 76 N SM / 242 ± 61 N ST pour une profondeur d'aiguilletage de 10 mm et enfin de 330 ± 51 N SM / 224 ± 56 N ST pour une profondeur d'aiguilletage de 12 mm.

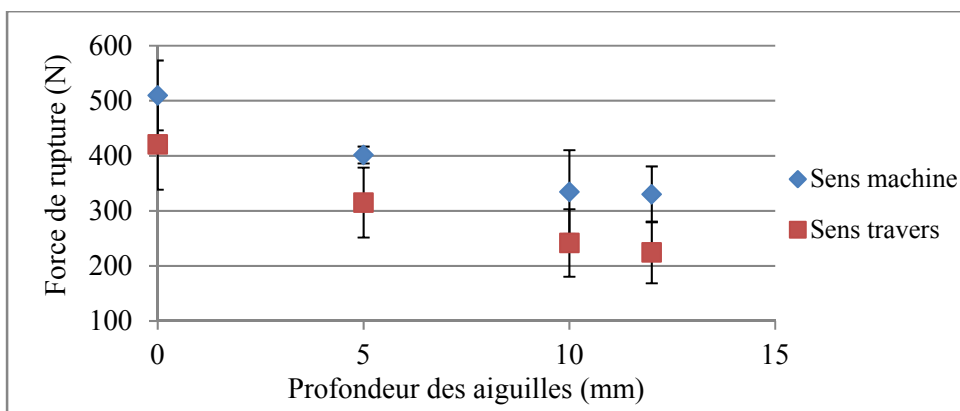


Figure 4.13 Force de rupture des non-tissés réalisés en kénaf en fonction de la profondeur des aiguilles

Les valeurs individuelles de force de rupture de chaque spécimen testé, ont été exprimées en fonction de la masse volumique (figures ci-dessous : Figure 4.14 et Figure 4.15). Les forces de rupture maximales des non-tissés aiguilletés semblent être obtenues avec une profondeur d'aiguille équivalente 0 mm. Les non-tissés semblent perdre en performances quand la valeur de la profondeur d'aiguilletage augmente. Ceci peut être attribué à l'étirage du non-tissé, qui crée des non-uniformités dans le non-tissé, ce qui provoque des performances moins bonnes. La fibre naturelle peut aussi être la cause elle-même, puisque en augmentant la profondeur des aiguilles, les aiguilles percent de plus en plus les fibres, ce qui peut causer des cassures dans les fibres.

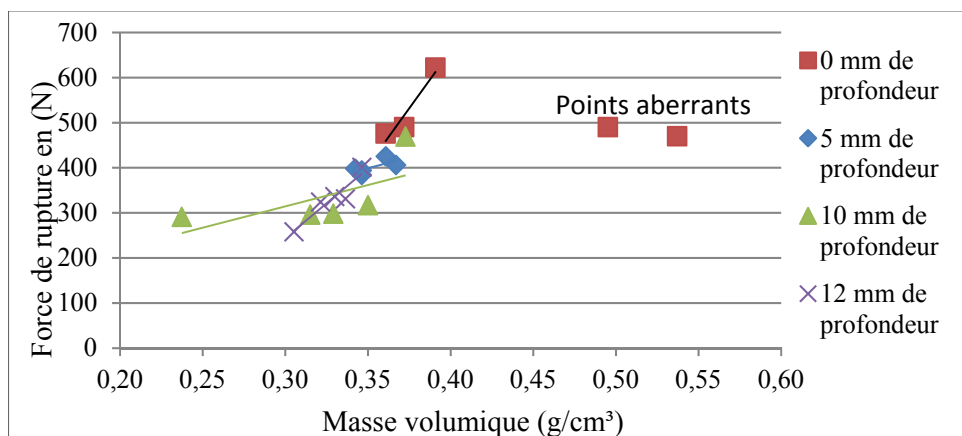


Figure 4.14 Force de rupture en fonction de la masse volumique des non-tissés en kéanf en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)

La même chose se reproduit en sens travers, avec des résultats plus distincts en suivant la même tendance pour chaque non-tissé.

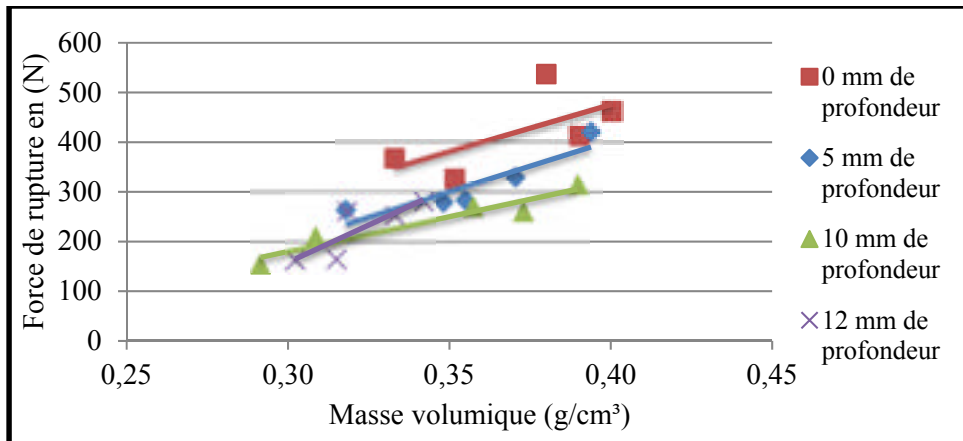


Figure 4.15 Force de rupture en fonction de la masse volumique des non-tissés en kénaf en sens travers (la ligne est un guide pour les yeux)

4.4.5 Discussion

Quatre profondeurs d'aiguilletage ont été choisies afin d'étudier l'effet de l'aiguilletage sur les performances mécaniques des non-tissés réalisés à base de la fibre de kénaf vierge. Les non-tissés analysés ont été préparés sous les mêmes conditions de fabrication sauf au niveau de la profondeur d'aiguilletage à savoir un cardage avec une vitesse de 5,5m/min, une densité d'aiguilletage de 197 coups/min et une vitesse du tapis d'aiguilleteuse de 0,62/0,68 m/min. Les paramètres étudiés sont l'étirage, l'uniformité et les performances mécaniques des non-tissés tout en passant d'un aiguilletage à un autre. La masse surfacique et l'épaisseur des non-tissés semblent diminuer quand la profondeur d'aiguilletage augmente. Ceci est attribué au fait que les non-tissés sont de plus en plus étirés, ce qui provoque des non-uniformités. Ceci influence aussi les performances mécaniques des non-tissés fabriqués, et comme il est illustré dans les figures suivantes (Figure 4.16 et Figure 4.17), ces derniers diminuent tout en augmentant la valeur d'aiguilletage.

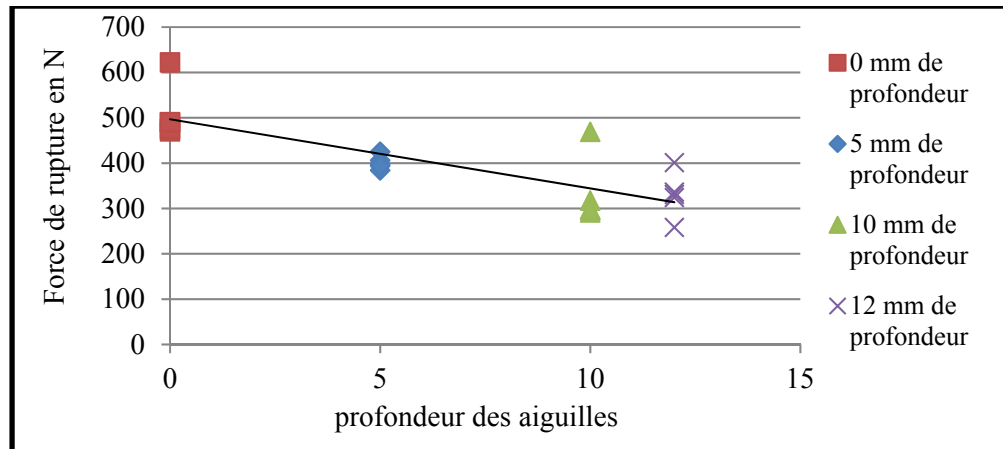


Figure 4.16 Force de rupture en fonction de la profondeur des aiguilles pour des échantillons de kénaf en sens machine

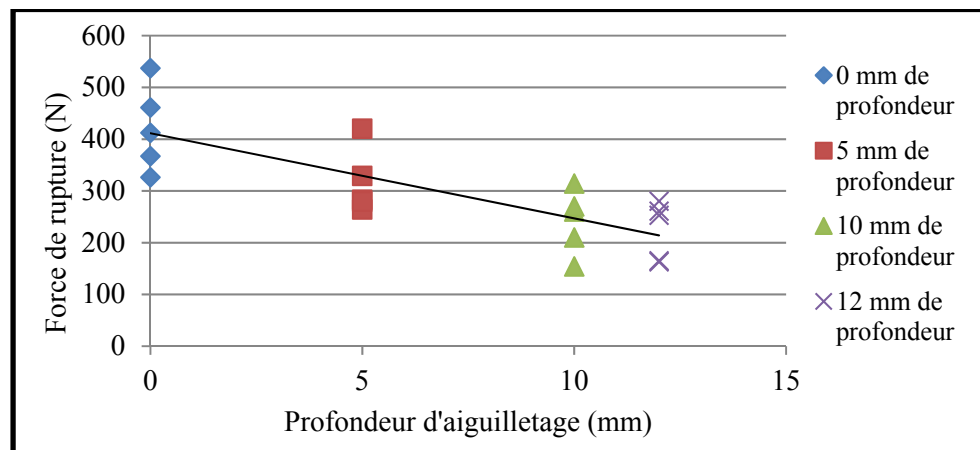


Figure 4.17 Force de rupture en fonction de la profondeur des aiguilles pour des échantillons de kénaf en sens travers

4.5 Optimisation de la fréquence d'aiguilletage

4.5.1 Introduction

Après l'optimisation de la vitesse de cardage et la profondeur d'aiguilletage des non-tissés, la fréquence d'aiguilletage a été le troisième paramètre à optimiser. Même si au niveau de l'aiguilleteuse, les trois paramètres, profondeur d'aiguilletage, fréquence d'aiguilletage et vitesse d'entrée/sortie du tapis de l'aiguilleteuse sont liés l'un l'autre, il a été nécessaire de

commencer par l'optimisation de chaque paramètre individuellement pour voir le comportement des non-tissés avant d'aller vers un plan d'expérience qui va permettre de regrouper tous ces paramètres et voir les effets combinés de ceux-ci. Les valeurs de fréquence d'aiguilletage choisies sont les mêmes que pour le jute : 97, 197 et 250 coups/min. Les autres paramètres sont : l'ouvraison avec 30 grammes de fibres pendant cinq minutes sous une pression de 50 psi (345 kPa), le cardage avec une vitesse de 5,5m/min, une vitesse de 5,1 m/min pour le nappage, un pré-aiguilletage à 5mm suivi par un aiguilletage à 0 mm, la vitesse du tapis de l'aiguilleteuse est de 0,62/0,67 m/min. La consolidation thermique est réalisée à l'aide d'une presse chauffante avec un cadre de 0,52 mm, sous une pression de 50 kg pendant deux minutes et de 0,5 tonnes pendant une minute. Tous les non-tissés sont fabriqués le même jour afin de limiter l'influence des conditions environnementales. La masse surfacique, l'épaisseur et les performances mécaniques des non-tissés seront analysés afin de voir l'influence de ce paramètre.

4.5.2 Masse surfacique des non-tissés

Les résultats obtenus en mesurant la masse surfacique des non-tissés produits sont présentés dans la figure suivante (Figure 4.18). Les moyennes obtenues sont de 324 g/m² pour 97 coups/min, et de 284 g/m² pour 197 coups/min ainsi que 250 coups/min. Il est à noter que le passage de 197 coups/min à 250 coups/min n'a pas influencé la masse surfacique des non-tissés fabriqués. Il sera à confirmer si cette tendance se maintient pour les mesures de l'épaisseur et des forces de rupture des non-tissés.

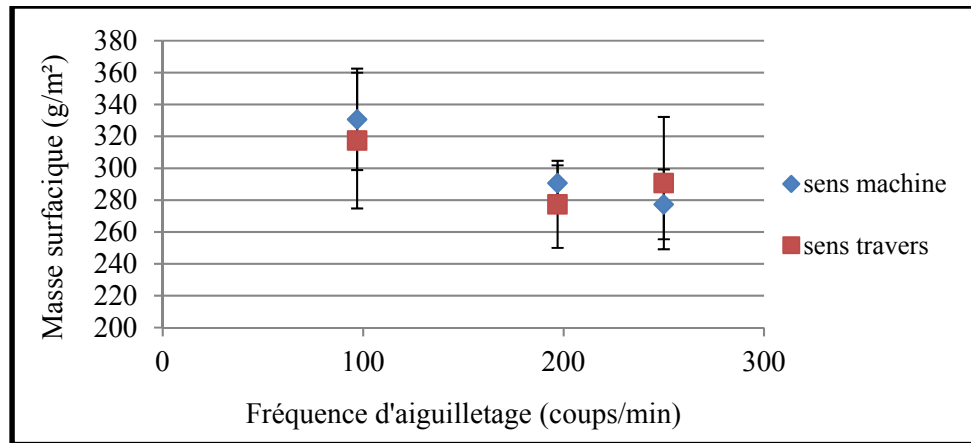


Figure 4.18 Masse surfacique des non-tissés réalisés en kénaf en fonction de la fréquence d'aiguilletage

4.5.3 Épaisseur des non-tissés

Pour les cinq spécimens prélevés dans chaque sens au niveau des non-tissés fabriqués, la moyenne (Figure 4.19) des épaisseurs au niveau des non-tissés fabriqués avec 97 coups/min est égale à 0,85 mm. En ce qui concerne les autres non-tissés préparés avec 197 et 250 coups/min, la moyenne des épaisseurs est égale à 0,75 mm.

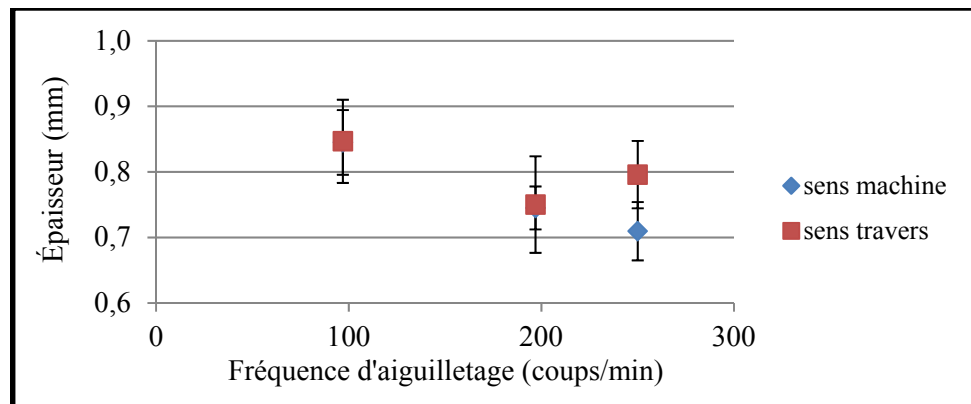


Figure 4.19 Épaisseur des non-tissés réalisés en kénaf en fonction de la fréquence d'aiguilletage

4.5.4 Force de rupture des non-tissés

Les essais en traction restent parmi les tests les plus importants au niveau de ce projet puisqu'il vise à développer un non-tissé structural à base de fibres naturelles. La force de traction est également très sensible aux paramètres de consolidation, à savoir la profondeur d'aiguilletage, la fréquence d'aiguilletage et la vitesse du tapis de l'aiguilleteuse (Anandjiwala, 2008). La variation de chaque paramètre peut influencer soit positivement ou négativement sur les performances mécaniques des non-tissés. Les moyennes obtenues pour la force de traction sont de 446 ± 77 N SM / 330 ± 85 N ST pour 97 coups/min, de 356 ± 78 N SM / 302 ± 36 N ST pour 197 coups/min et enfin de 325 ± 44 N SM / 288 ± 59 N ST pour 250 coups/min.

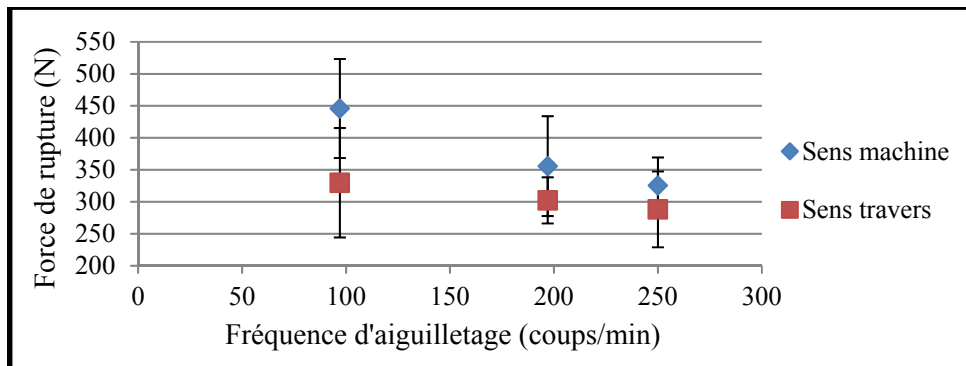


Figure 4.20 Force de rupture des non-tissés réalisés en kénaf en fonction de la fréquence d'aiguilletage

Comme il est illustré dans la Figure 4.20 et plus détaillé dans les deux figures suivantes (Figure 4.21 et Figure 4.22), il semble que les non-tissés produits avec une fréquence d'aiguilletage de 97 coups/min sont les plus performants. Des valeurs de force jusqu'à 579 N en sens machine et jusqu'à 426 N en sens travers ont été mesurées sur des spécimens individuels.

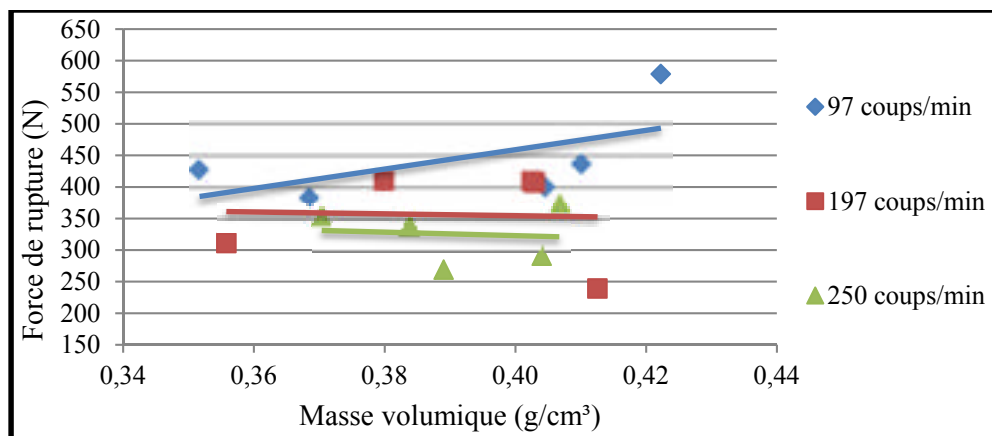


Figure 4.21 Force de rupture des non-tissés en kénaf en fonction de la masse volumique en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)

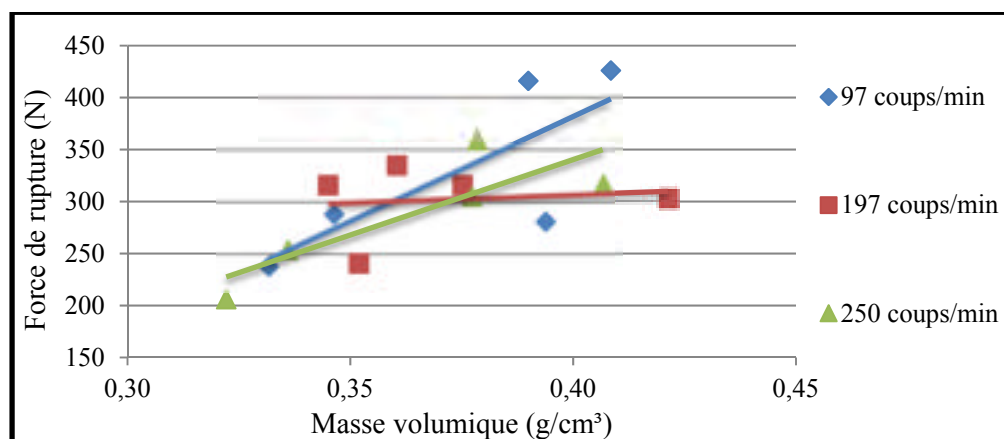


Figure 4.22 Force de rupture des non-tissés en kénaf en fonction de la masse volumique en sens travers (la ligne est un guide pour les yeux)

4.5.5 Discussion

L'aiguilletage joue un rôle très important au niveau des non-tissés produits avec voie sèche et consolidées par voie mécanique. Comme la carte joue le rôle de bien paralléliser les fibres, éliminer les impuretés et produire des voiles uniformes en continue, l'aiguilletage prend le relais pour consolider ces voiles transformés en nappes à l'aide de l'étaleur-nappeur. C'est

pour cette raison que l'optimisation des paramètres de l'aiguilleteuse est primordial afin de voir l'influence de chaque paramètre sur les non-tissés produits et pouvoir trouver un juste milieu qui peut à la fois bien consolider les non-tissés et ne pas dégrader la fibre naturelle. Les meilleures performances semblent être obtenues avec une fréquence d'aiguilletage de 97 coups/min. Cependant, la fréquence d'aiguilletage est intimement liée à la profondeur des aiguilles et la vitesse du tapis pour donner la densité d'aiguilletage.

4.6 Optimisation des paramètres de l'aiguilleteuse

4.6.1 Introduction

L'avancement de ce projet a permis d'optimiser plusieurs paramètres textiles selon le même principe : varier un seul paramètre en gardant les autres constants. C'est la méthode qui a été suivie pendant l'optimisation des paramètres textiles pour les non-tissés à base de la fibre de jute recyclé. Cependant, certains paramètres textiles responsables de la consolidation des non-tissés sont liés les uns aux autres. Ceci a poussé à explorer d'autres chemins afin de combiner tous ces paramètres et pouvoir analyser leur dépendance ou indépendance les uns aux autres. Il a donc été décidé de mettre en place un plan d'expérience afin de combiner les trois paramètres textiles responsables de la consolidation des non-tissés, à savoir la profondeur d'aiguilletage, la fréquence d'aiguilletage et la vitesse d'entrée/sortie du tapis de l'aiguilleteuse.

4.6.2 Plan d'expérience

Un plan d'expérience a été élaboré en choisissant les paramètres suivant : un pré-aiguilletage et aiguilletage à 5 mm pour la profondeur des aiguilles, avec une fréquence d'aiguilletage de 197 coups/min et une vitesse d'entrée et sortie du tapis de 0,62/0,68 m/min. Ceci a permis de choisir un plan 0 pour le plan d'expérience. Le plan d'expérience est une matrice factorielle complète de type 2^k avec k nombre de paramètres choisis. Il a été donc décidé de choisir. Le tableau suivant présente les différents niveaux -1 et +1.

Tableau 4.3 Plan d'expérience pour l'optimisation des paramètres de consolidation des non-tissés de kénaf

	Variables codées			Variables réelles		
	X ₁	X ₂	X ₃	Profondeur (mm)	Vitesse entrée/sortie (m/min)	Fréquence d'aiguilletage (coups/min)
1	1	1	1	10	0,83/0,88	250
2	-1	1	1	0	0,83/0,88	250
3	1	-1	1	10	0,43/0,48	250
4	-1	-1	1	0	0,43/0,48	250
5	1	1	-1	10	0,83/0,88	97
6	-1	1	-1	0	0,83/0,88	97
7	1	-1	-1	10	0,43/0,48	97
8	-1	-1	-1	0	0,43/0,48	97
9*	0	0	0	5	0,62/0,68	197

Les non-tissés produits selon ce plan d'expérience ont été fabriqués le même jour dans les mêmes conditions environnementales dans le but de réduire tous les paramètres influençant la qualité de fabrication des non-tissés à savoir l'humidité, la statique, le nappage, etc. Les autres paramètres sont : l'ouvraison avec 30 grammes de fibres pendant cinq minutes sous une pression de 50 psi (345 kPa), le cardage avec une vitesse de 5,5m/min, une vitesse de 5,1 m/min pour le nappage, un pré-aiguilletage à 5mm. La consolidation thermique est réalisée à l'aide d'une presse chauffante avec un cadre de 0,52 mm, sous une pression de 50 kg pendant deux minutes et de 0,5 tonnes pendant une minute. La masse surfacique, l'épaisseur et les performances mécaniques des non-tissés seront analysés afin d'établir l'influence de ce paramètre.

4.6.3 Résultats

Suite à la réalisation du plan d'expérience détaillé dans le tableau (Tableau 4.3) pour la fabrication des non-tissés à base de fibre de kénaf vierge, des tests de mesure de masse surfacique, d'épaisseur et de force de rupture ont été réalisés afin d'analyser l'effet des variables du plan sur les caractéristiques et performances des non-tissés.

Tableau 4.4 Résultat du plan d'expérience pour l'optimisation des paramètres textiles des non-tissés

	Variables codées			Variables réelles			Résultats					
	X ₁	X ₂	X ₃	Profondeur (mm)	Vitesse entrée/ssortie (m/min)	Fréquence d'aiguilletage (coups/min)	Épaisseur (mm)		Masse surfacique (g/m ²)		Force de rupture (N)	
							SM	ST	SM	ST	SM	ST
1	1	1	1	10	0,83/0,88	250	0,7	0,7	200	245	237	220
2	-1	1	1	0	0,83/0,88	250	1	1	368	373	442	382
3	1	-1	1	10	0,43/0,48	250	0,7	0,7	256	251	299	170
4	-1	-1	1	0	0,43/0,48	250	0,7	0,8	251	256	268	241
5	1	1	-1	10	0,83/0,88	97	0,9	0,8	312	272	391	230
6	-1	1	-1	0	0,83/0,88	97	0,7	0,7	250	237	323	202
7	1	-1	-1	10	0,43/0,48	97	0,8	0,8	272	256	352	200
8	-1	-1	-1	0	0,43/0,48	97	1	0,9	376	363	467	428
9*	0	0	0	5	0,62/0,68	197	0,7	0,7	264	253	338	224

D'autres variations des paramètres d'aiguilletage ont été ajoutées pour obtenir le maximum d'information sur le comportement des non-tissés. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 4.5 Complément au plan d'expérience pour l'optimisation des paramètres de consolidation pour les non-tissés fabriqués en kénaï

Variables réelles			Résultats					
Profondeur (mm)	Vitesse entrée/sortie (m/min)	Fréquence d'aiguilletage (coups/min)	Épaisseur (mm)		Masse surfactive (g/m ²)		Force de rupture (N)	
			SM	ST	SM	ST	SM	ST
0	0,83/0,88	197	0,9	0,8	323	299	413	321
10	0,83/0,88	197	0,8	0,7	307	283	391	237
0	0,43/0,48	197	0,8	0,8	312	312	409	326
10	0,43/0,48	197	0,7	0,8	301	299	400	229

4.6.4 Discussion

Les résultats trouvés au niveau de l'optimisation des paramètres d'aiguilletage pour la fabrication des non-tissés à base de la fibre de kénaï vierge montrent des tendances intéressantes. Les moyennes de la masse surfactive, de l'épaisseur et de la force de rupture sont présentées dans les tableaux précédents. Une analyse des effets des trois paramètres de consolidation est faite en exprimant la force de rupture normalisée par la masse volumique des deux autres paramètres.

En ce qui concerne la masse surfactive et l'épaisseur des non-tissés testés pour ce plan d'expérience, il semble qu'il y a peu de différences entre les différentes conditions.

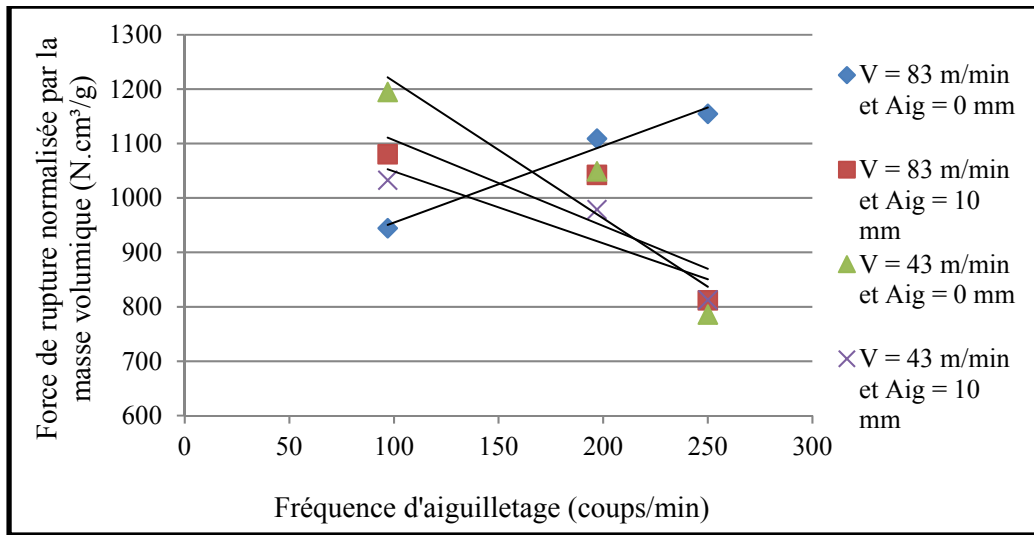


Figure 4.23 Force de rupture normalisée par masse volumique en fonction de la fréquence d'aiguilletage des échantillons de kénaf en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)

Lorsque la force de rupture normalisée par la masse volumique est exprimée en fonction de la fréquence d'aiguilletage (Figure 4.23), une diminution des performances mécaniques de la plupart des non-tissés est observée quand le nombre de coups par minute augmente. La seule exception est avec une vitesse du tapis de l'aiguilleteuse de 0,83/0,88 m/min et un aiguilletage à 0 mm. Dans ce cas, une augmentation est observée. Ceci peut être attribué au fait qu'une augmentation de la fréquence d'aiguilletage permet de mieux consolider les non-tissés qui sont produits avec une vitesse rapide et un aiguilletage non-profond. Dans les autres cas, la fréquence d'aiguilletage plus élevée peut mener à un étirage plus important et à l'apparition d'inhomogénéités qui sont des points de faiblesse mécanique.

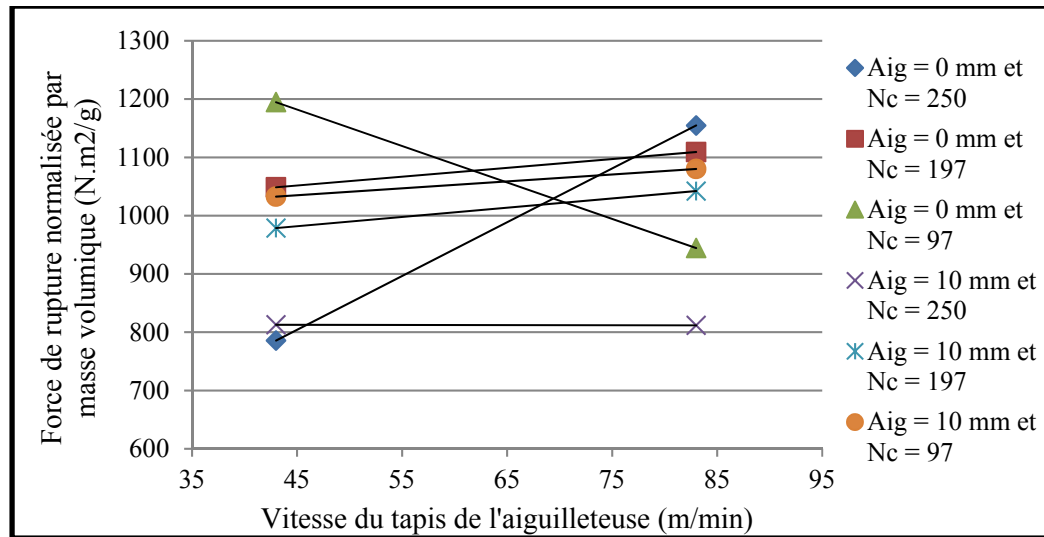


Figure 4.24 Force de rupture normalisée par masse volumique en fonction de la vitesse du tapis de l'aiguilleteuse des échantillons de kénaf en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)

La plupart des échantillons gagnent en performances mécaniques en passant d'une vitesse lente à une vitesse plus rapide, sauf pour un échantillon (Figure 4.24). Il s'agit du non-tissé aiguilleté avec une profondeur d'aiguilletage égal à 0 mm et une fréquence d'aiguilletage de 97 coups/min. Ceci peut être attribué au fait qu'avec une faible fréquence d'aiguilletage, une vitesse moins rapide permet un passage plus lent par l'aiguilleteuse et donc une bonne consolidation mécanique. Cette hypothèse semble être confirmée par les résultats obtenus avec le non-tissé aiguilleté avec une profondeur d'aiguilletage de 0 mm et une fréquence d'aiguilletage de 250 coups/min : ce non-tissé gagne beaucoup en performance en passant d'une vitesse lente à une vitesse plus rapide, puisqu'avec une vitesse très lente, le non-tissé est endommagé au lieu d'être consolidé.

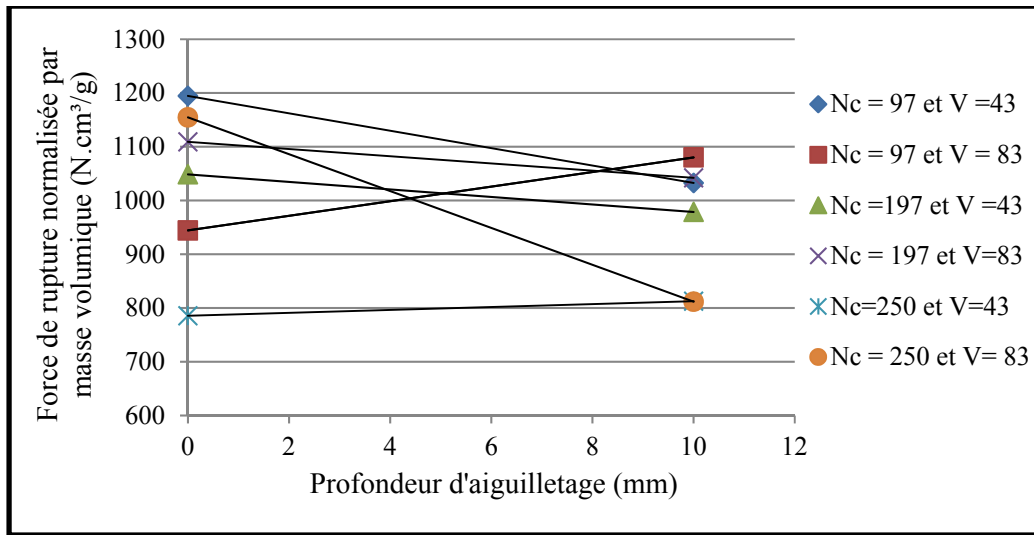


Figure 4.25 Force de rupture normalisée par la masse volumique en fonction de la profondeur d'aiguilletage des échantillons de kénaf en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)

Au niveau de l'effet de la profondeur d'aiguilletage, la plupart des non-tissés semblent perdre en performances en passant d'un aiguilletage à 0 mm à un aiguilletage à 10 mm (Figure 4.25). Dans deux cas, une tendance opposée est observée, c'est à dire que la force de rupture augmente plus moins fort avec la profondeur d'aiguilletage. Ces cas correspondent à une fréquence d'aiguilletage très rapide et une vitesse de tapis très faible ou l'inverse. Dans ces conditions, la plus grande profondeur des aiguilles permet de mieux consolider les non-tissés

La fréquence d'aiguilletage et la vitesse de sortie du tapis de l'aiguilleteuse sont liées à la densité d'aiguilletage par la relation suivante :

$$\text{Densité d'aiguilletage} = \frac{\text{Nombre d'aiguilles par largeur} \times \text{Fréquence d'aiguilletage}}{\text{Vitesse de sortie}}$$

Avec :

- Densité d'aiguilletage en coups/surface ;
- Fréquence d'aiguilletage en nombre de coups/minute ;
- Vitesse de sortie en m/min.

Dans le cas de l'aiguilleteuse utilisée, le nombre d'aiguilles par largeur est égal à 42 aiguilles par 695 cm. Les Figure 4.26 et Figure 4.27 présentent les résultats de la force de rupture exprimée en fonction de la densité d'aiguilletage dans les sens machine et travers.

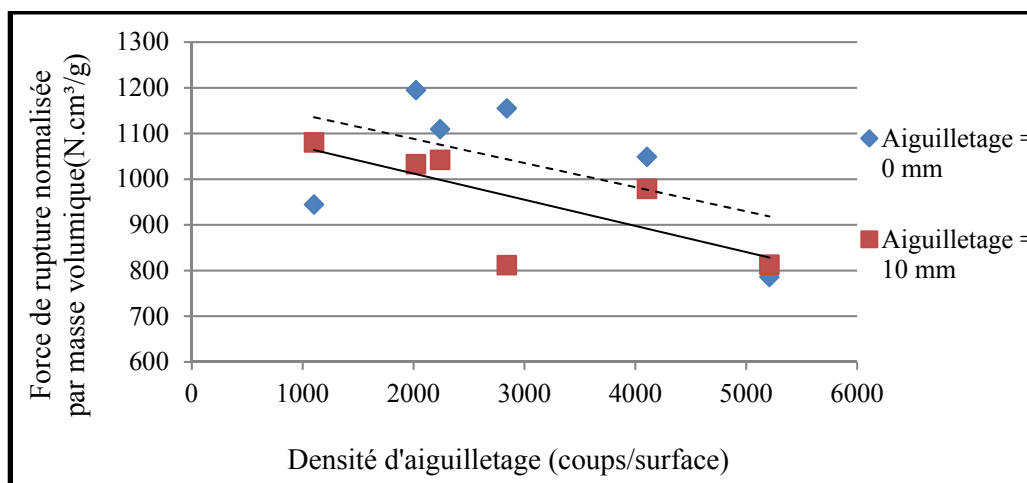


Figure 4.26 Force de rupture normalisée par la masse volumique en fonction de la densité d'aiguilletage en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)

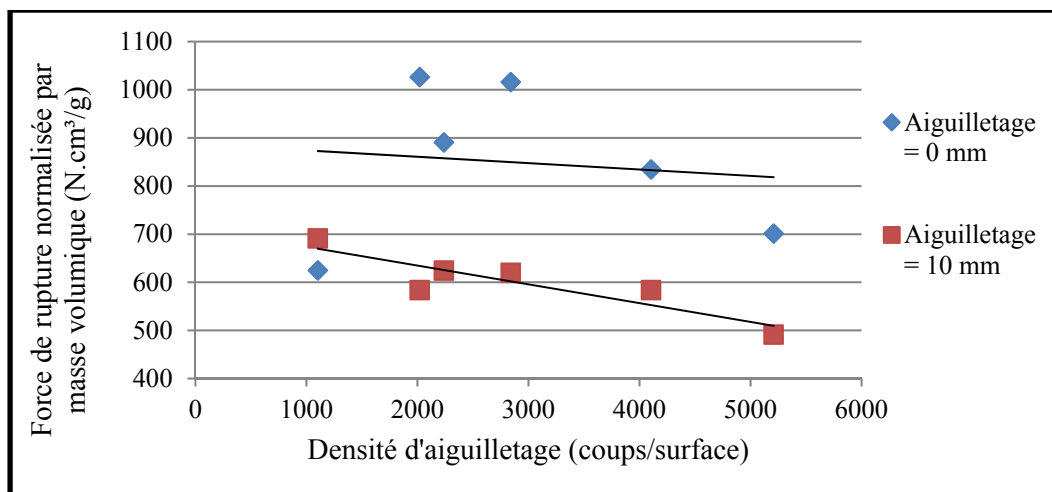


Figure 4.27 Force de rupture normalisée par la masse volumique en fonction de la densité d'aiguilletage en sens travers (la ligne est un guide pour les yeux)

Les résultats présentés montrent que les performances mécaniques des non-tissés semblent diminuer en augmentant la densité d'aiguilletage. De plus, l'aiguilletage à 0 mm donne de meilleures performances mécaniques qu'un aiguilletage à 10.

4.7 Optimisation de la température de thermoliage à l'aide d'une presse chauffante

4.7.1 Introduction

Les non-tissés produits dans le cadre de ce projet ont été fabriqués à l'aide d'une ligne de non-tissés qui contient une carder, un étaleur-nappeur et une aiguilleteuse pour la consolidation. Sachant que 15% de la composition des non-tissés est une fibre bicomposante avec une forme cœur/gaine, il a été nécessaire de passer par un thermoliage pour la finition des non-tissés. Ce thermoliage permettra la fusion de la fibre bicomposante, ce qui renforcera les performances mécaniques des non-tissés. Dans ce sens, trois températures de 200, 210°C et 220°C ont été choisies. Les autres paramètres sont : une ouvrison avec 30 grammes de fibres pendant cinq minutes sous une pression de 50 psi (345 kPa), le cardage à 7,8 m/min, la vitesse de nappage est de 8,3 m/min, un pré-aiguilletage suivi par un aiguilletage à 5 mm avec une fréquence d'aiguilletage de 250 coups par minute et une vitesse de 0,62/0,68 m/min.

4.7.2 Résultats

Les résultats des tests de l'optimisation du thermoliage pour les non-tissés produits ont pu permettre d'atteindre les meilleures performances avec une température de thermoliage plus élevée. Dans les sens machine et travers, il a été observé (Figure 4.28) que les non-tissés thermoliés à 220°C ont donné une moyenne de 208 ± 75 N SM / 183 ± 13 N ST par rapport à une moyenne de 198 ± 40 N SM / 170 ± 70 N ST pour des non-tissés thermoliés à 210°C et enfin une moyenne de 187 ± 29 N SM / 108 ± 12 N ST pour une température de thermoliage de 200°C.

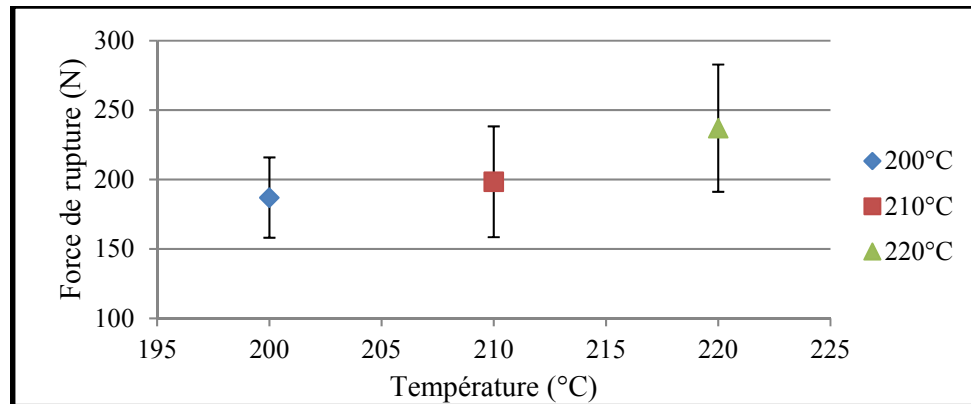


Figure 4.28 Force de rupture en fonction de la température de thermoliage pour les non-tissés en kénaf en sens machine

Une expression de la force de rupture en fonction de la masse volumique pour les spécimens individuels (Figure 4.29 et Figure 4.30) peuvent confirmer la légère supériorité observée pour les spécimens thermoliés à 220°C.

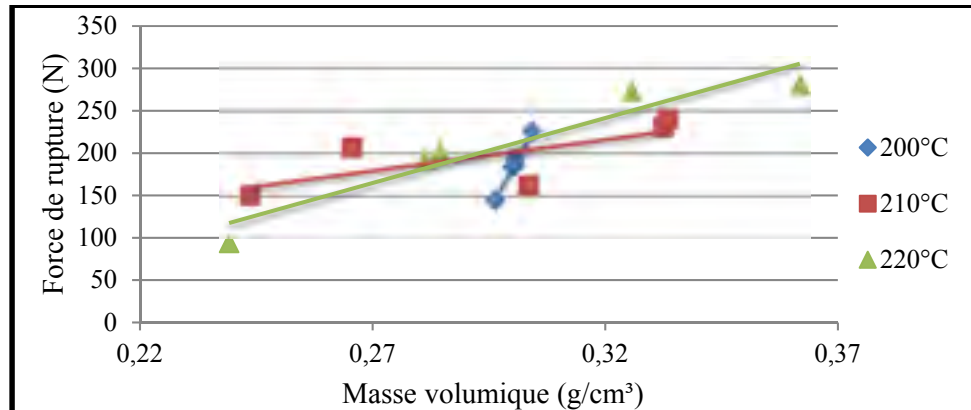


Figure 4.29 Force de rupture en fonction de la masse volumique pour trois températures de thermoliage des échantillons de kénaf en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)

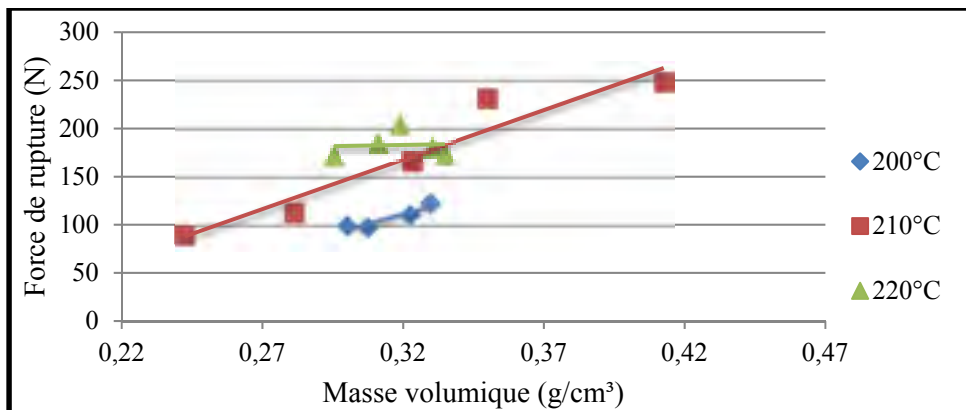


Figure 4.30 Force de rupture en fonction de la masse volumique pour trois températures de thermoliage des échantillons de kénaf en sens travers (la ligne est un guide pour les yeux)

Étant donné que la température de thermoliage ayant donné le meilleur résultat est celle la plus élevée, il a été nécessaire de refaire les tests avec des températures encore plus hautes. Trois températures, 205, 215 et 225°C, ont été utilisées à cet effet. Les figures ci-dessous (Figure 4.31 et Figure 4.32) montrent les résultats obtenus en sens machine et sens travers.

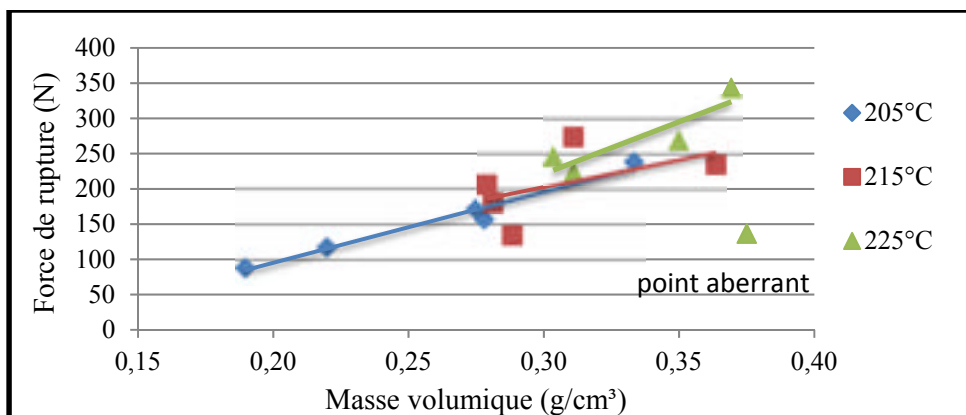


Figure 4.31 Force de rupture en fonction de la masse volumique pour trois températures de thermoliage pour les non-tissés en kénaf en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)

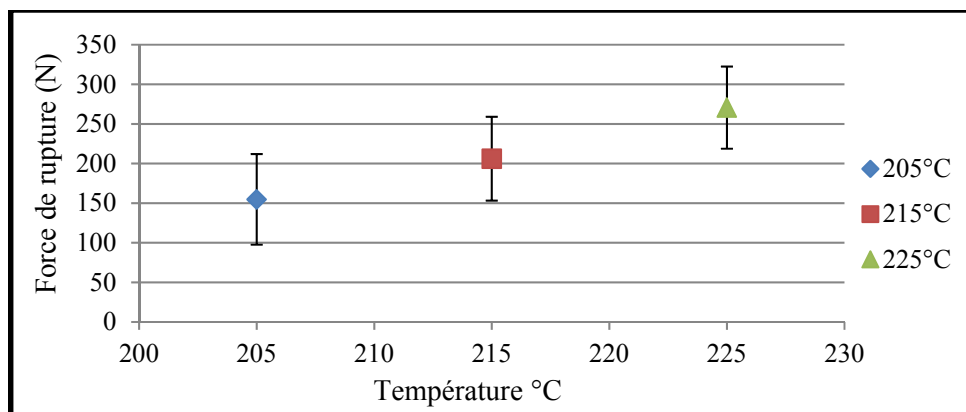


Figure 4.32 Force de rupture en fonction de la température de thermoliage de thermoliage des échantillons en kénaf en sens machine

La température de thermoliage de 225°C semble donner accès aux meilleures performances mécaniques avec une moyenne de 271 ± 52 N en éliminant un point aberrant du calcul, par rapport à une moyenne de 206 ± 53 N pour une température de thermoliage de 215°C et une moyenne de 155 ± 57 N pour un thermoliage à 205°C. Lorsque la force de rupture est normalisée par la masse volumique (Figure 4.31) il est possible de voir que la courbe directrice correspondant à la température de 225°C est au-dessus des deux autres.

4.7.3 Discussion

Le but de l'optimisation de la température de thermoliage est de trouver une température capable de faire fondre les fibres bicomposantes sans toutefois abimer ou dégrader la fibre naturelle. Les résultats des essais de traction pour les non-tissés de kénaf ont montré qu'à chaque fois que la température de thermoliage est augmentée, les performances mécaniques semblent devenir meilleures. Étant donné que certaines composantes des fibres naturelles comme la lignine commencent à se dégrader à partir de 200°C et même si la température de thermoliage de 225°C a donné les meilleurs résultats au niveau des performances mécaniques, il a été décidé de choisir une température de thermoliage de 220°C afin de mieux préserver la fibre naturelle.

4.8 Conclusion sur l'optimisation des non-tissés à base de fibre de kénaf vierge

À l'issue de l'optimisation des paramètres textiles, les meilleures performances, soit 467 ± 6 N SM / 428 ± 9 N ST, ont été obtenues pour un mélange de 85% de fibre de kénaf vierge et 15% de fibre Bico3 en utilisant les paramètres suivants :

- Ouvraison avec 30 grammes de fibre sous une pression de 50 psi (345 kPa) pendant 5 minutes ;
- Cardage à une vitesse de 5,5 m/min ;
- Nappage à une vitesse de 5,1 m/min ;
- Pré-aiguilletage à 5 mm suivi par un aiguilletage à 0 mm avec une fréquence d'aiguilletage de 97 coups/min et une vitesse de 0,43/0,48 m/min ;
- Thermoliage à l'aide d'une presse chauffante à 220°C avec un cadre de 0,52 mm d'épaisseur, une pression de 50 kg appliquée pendant deux minutes suivie par une pression de 0,5 tonnes pendant une minute.

Le voile de verre de référence peut atteindre 307,5 N en sens machine et 85,3 N en sens travers pour performances mécaniques. Ceci veut dire que le renfort réalisé en kénaf est 50% plus résistant en sens machine et 400% plus fort en sens travers que le voile de verre.

CHAPITRE 5

ETUDE DE L'EFFET DU CARACTÈRE HYDROPHOBE/HYDROPHILE DE LA FIBRE BICOMPOSANTE

5.1 Introduction

De très bons résultats ont été obtenus au niveau des performances mécaniques des non-tissés réalisés à partir de la fibre de jute recyclé et la fibre bicomposante PET/coPET (Bico3). Une analyse a été réalisée pour tenter d'identifier la source de ces bonnes performances rarement rapportées avant dans la littérature. Ces hypothèses examinées incluent l'effet du caractère hydrophile de la fibre de PET/coPET et ses caractéristiques physiques.

La réalisation de plusieurs non-tissés à base de différentes fibres bicomposantes a permis de comparer le comportement de la fibre aux différentes étapes de réalisation des non tissés ainsi que les performances mécaniques obtenues.

Trois fibres bicomposantes d'énergie de surface, de diamètre et de longueurs différents, Bico3, Bico10 et Bico11, ayant également des caractéristiques mécaniques et thermiques différentes, ont été comparées afin de réaliser cette étude. La caractérisation physique, thermique, mécanique et morphologique de ces fibres est présentée dans le CHAPITRE 2. Le processus de la réalisation des non-tissés consiste à passer par une ouvraison des fibres naturelles, un cardage, un aiguilletage et enfin un thermoliage. Pour les trois fibres reçues, les non-tissés réalisés ont été réalisés avec 20% de fibre synthétique bicomposante et 80% de fibre de jute recyclée.

Les conditions d'ouvraison et de fabrication des non-tissés utilisent les paramètres optimaux déterminés pour la fibre de jute et la fibre bicomposante Bico3 (CHAPITRE 3).

L'ouvraison est effectuée avec 30 g de fibres à 50 psi (345 kPa) pendant 5 min. Les vitesses optimales sont de 7,8 m/min pour la carde, 11,1 m/min pour le convoyeur et 8,5m/min pour l'étaleur nappeur. En ce qui concerne l'aiguilleteuse, les conditions optimales pour la

fabrication des non-tissés de jute sont 0,62/0,68 m/min au niveau des vitesses d'entrée/sortie de l'aiguilleteuse, 250 coups par minute au niveau des aiguilles, et une profondeur de 5mm pour le pré-aiguilletage et l'aiguilletage. Les trois non-tissés ont été réalisés le même jour dans les mêmes conditions afin de contrôler tous les paramètres environnementaux.

Pour la consolidation thermique, un thermoliage dans une presse chauffante avec un cadre de 0,52 mm a été réalisé avec une pression de 50 kg pendant deux minutes et 0,5 tonnes pendant une minute. Des températures de thermoliage de 150 et 205°C ont été utilisés selon la fibre bicomposante employée.

5.2 Résultats

5.2.1 Non-tissés réalisés avec la fibre bicomposante Bico3

5.2.1.1 Masse surfacique des non-tissés

Deux non-tissés ont été réalisés à partir de la fibre de jute recyclé et de la fibre bicomposante Bico3. Cinq spécimens ont été mesurés pour le calcul de la masse surfacique du non-tissé réalisé (Figure 5.1). Les moyennes obtenues sont 237 g/m² pour le premier non-tissé et 257 g/m² pour le deuxième non-tissé. Les indications sens machine / sens travers correspondent au prélèvement des spécimens dans les non-tissés. Les valeurs obtenues sont très similaires, ce qui est attendu.

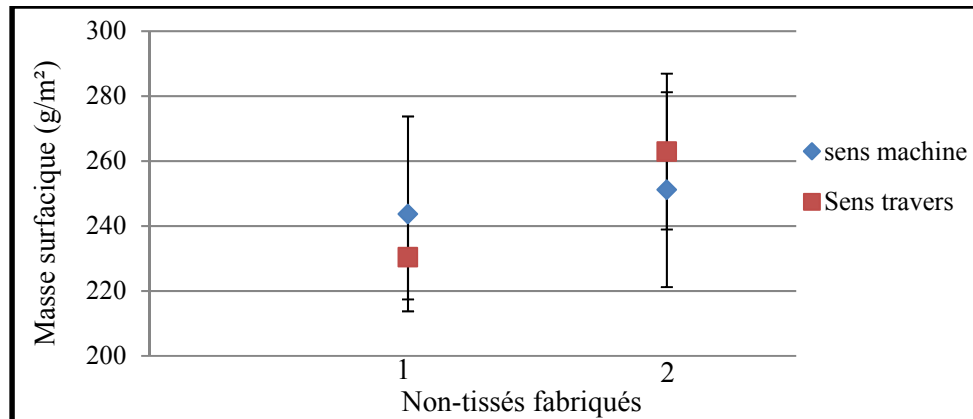


Figure 5.1 Masse surfacique des non-tissés fabriqués avec Bico3

5.2.1.2 Épaisseur des non-tissés

En ce qui concerne l'épaisseur des non-tissés, cinq spécimens ont été mesurés pour chacun des deux non-tissés produits : les différents spécimens ont été prélevés dans des parties différentes du non-tissé. Les non-tissés ont par la suite été thermoliés à l'aide de la presse chauffante avec un cadre de 0,52 mm. Les mesures d'épaisseur ont été effectuées dans les deux extrémités ainsi qu'au centre de chaque spécimen. Les moyennes mesurées sont de 0,69 mm SM / 0,56 mm ST pour le premier non-tissé et de 0,67 mm SM / 0,59 mm ST pour le deuxième non-tissé (Figure 5.2). Les différences observées entre les spécimens découpés dans les sens machine et travers peuvent être attribuées à une homogénéité imparfaite des nappes en raison du nappage semi-manuel.

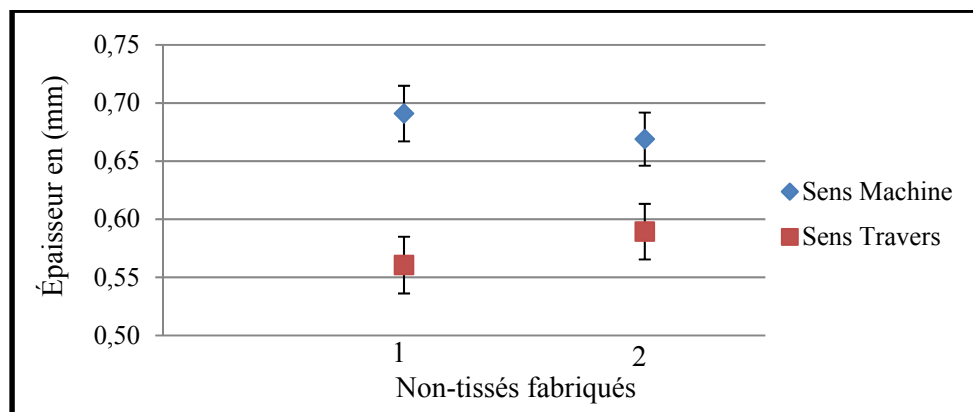


Figure 5.2 Épaisseur des non-tissés fabriqués avec Bico3

5.2.1.3 Force de rupture et allongement à la rupture des non-tissés

La force de rupture a été mesurée sur cinq spécimens de chaque non-tissé. Les résultats sont présentés dans la figure (Figure 5.3). La variabilité élevée observée au niveau des non-tissés est attribuée au nappage semi-manuel. En ce qui concerne la différence entre les deux directions, il est attendu d'avoir des performances plus élevées dans le sens machine que le sens travers, étant donné l'alignement des fibres produites par la carte et la superposition des nappes lors du nappage.

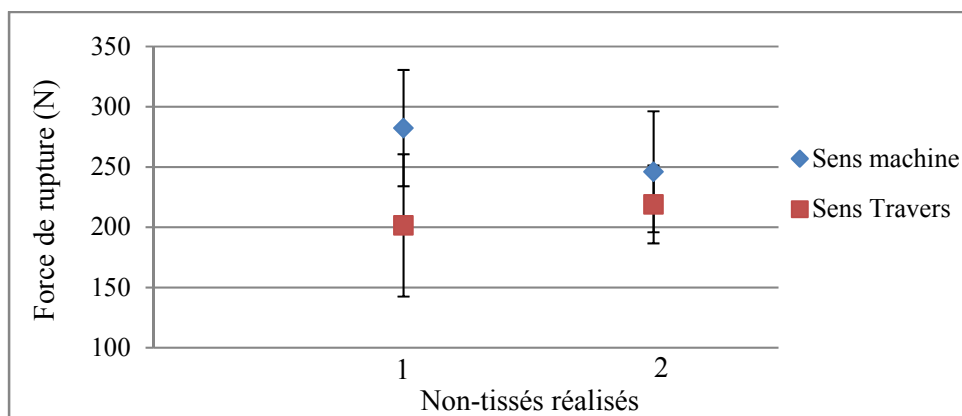


Figure 5.3 Force de rupture des non-tissés réalisés avec Bico3

En ce qui concerne l'allongement à la rupture, les moyennes des non-tissés ne dépassent pas de 2%.

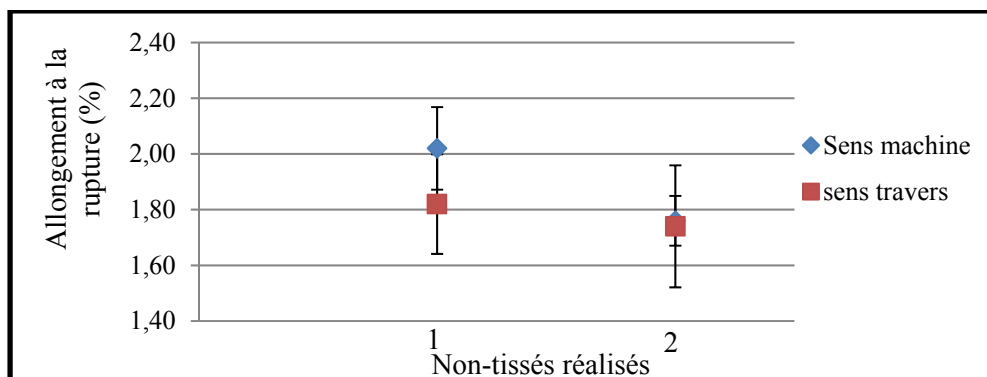


Figure 5.4 Allongement à la rupture (%) des non-tissés réalisés avec Bico3

5.2.2 Non-tissés réalisés avec la fibre bicomposante Bico10

5.2.2.1 Masse surfacique des non-tissés

Deux non-tissés ont été réalisés à base de la fibre de jute recyclé et la fibre bicomposante Bico10. Cinq spécimens ont été mesurés pour le calcul de la masse surfacique du non-tissé réalisé. Les moyennes obtenues sont 283g/m^2 pour le premier non-tissé et 327g/m^2 pour le deuxième non-tissé (Figure 5.5). Les indications sens machine et sens travers correspondent au prélèvement des spécimens dans les non-tissés. Les valeurs obtenues sont très similaires, les écart-types présentent entre 5 et 13% ce qui est normal.

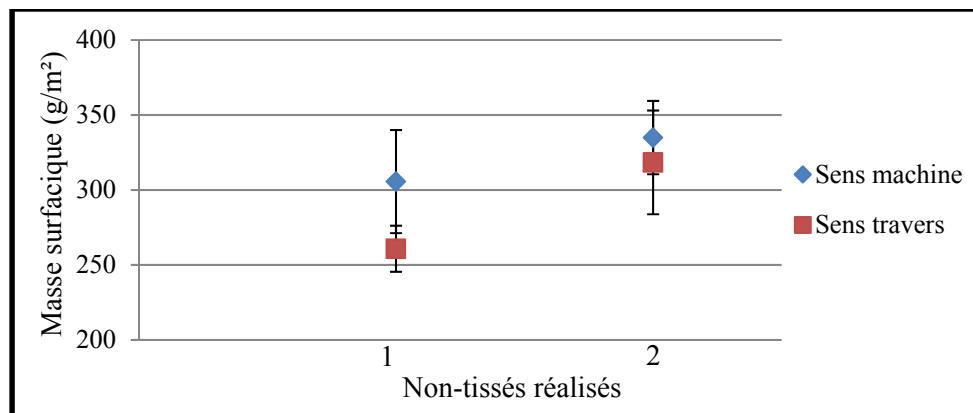


Figure 5.5 Masse surfacique des non-tissés réalisés avec Bico10

5.2.2.2 Épaisseur des non-tissés

En ce qui concerne l'épaisseur des non-tissés, cinq spécimens ont été mesurés. Les moyennes obtenues sont de 0,8 mm SM / 0,75 mm ST pour le premier non-tissé et de 0,86 mm SM / 0,85 mm ST pour le deuxième non-tissé (Figure 5.6). Il n'y a pas une grande différence observée entre les spécimens découpés dans les sens machine et travers.

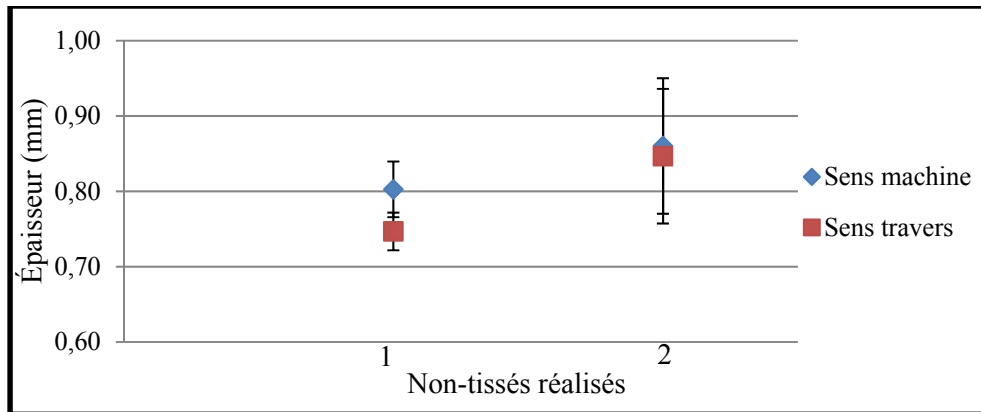


Figure 5.6 Épaisseur des non-tissés réalisés avec Bico10

5.2.2.3 Force de rupture et allongement à la rupture des non-tissés

Les non-tissés réalisés ont pu atteindre une moyenne de 229 ± 40 N en sens machine et 123 ± 23 N en sens travers pour le premier non-tissé et une moyenne de 229 ± 21 N en sens machine et de 161 ± 28 N en sens travers pour le deuxième non-tissé (Figure 5.7). En ce qui concerne la différence entre les deux directions, il est attendu d'avoir des performances plus élevées dans le sens machine que le sens travers, étant donné l'alignement des fibres produites par la carte et la superposition des nappes lors du nappage. Les écart-types varient entre 9 et 18% ce qui est normal pour des fibres naturelles.

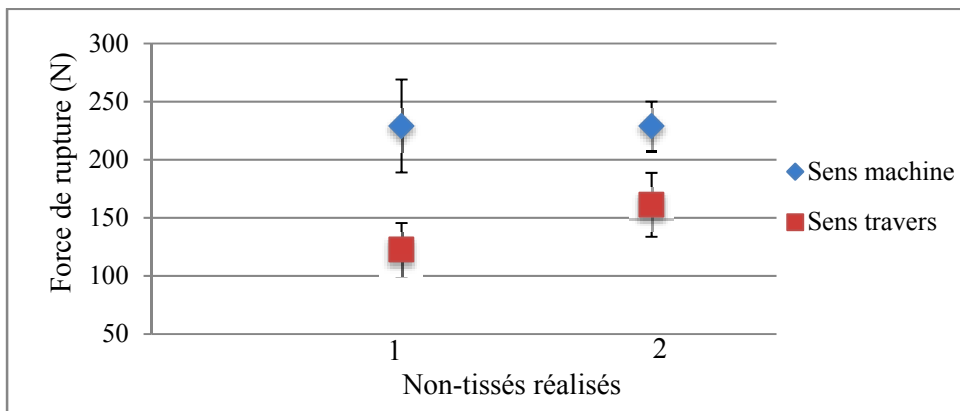


Figure 5.7 Force de rupture des non-tissés réalisés avec Bico10

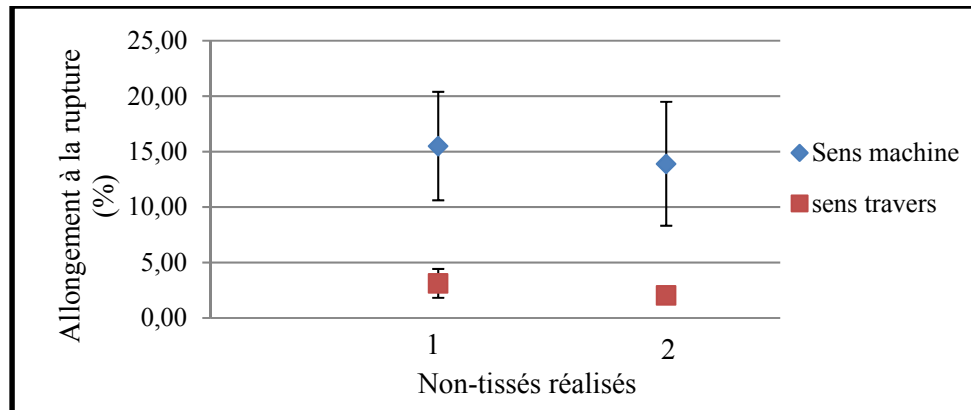


Figure 5.8 Allongement à la rupture des non-tissés réalisés avec Bico10

5.2.3 Non-tissés réalisés à base de la fibre bicomposante Bico11

5.2.3.1 Masse surfacique des non-tissés

Cinq spécimens ont été mesurés pour le calcul de la masse surfacique du non-tissé réalisé. Les moyennes obtenues sont 334 g/m² pour le premier non-tissé et 263 g/m³ pour le deuxième non-tissé (Figure 5.9).

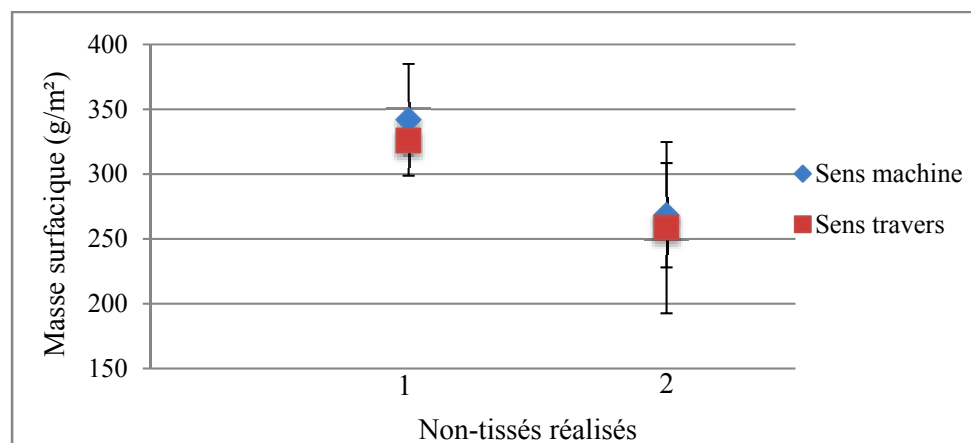


Figure 5.9 Masse surfacique des non-tissés réalisés avec Bico11

5.2.3.2 Épaisseur des non-tissés

En ce qui concerne l'épaisseur des non-tissés, cinq spécimens ont été mesurés. Les moyennes mesurées sont de 0,75 mm SM / 0,77 mm ST pour le premier non-tissé et de 0,67 mm SM / 0,6 mm ST pour le deuxième non-tissé (Figure 5.10).

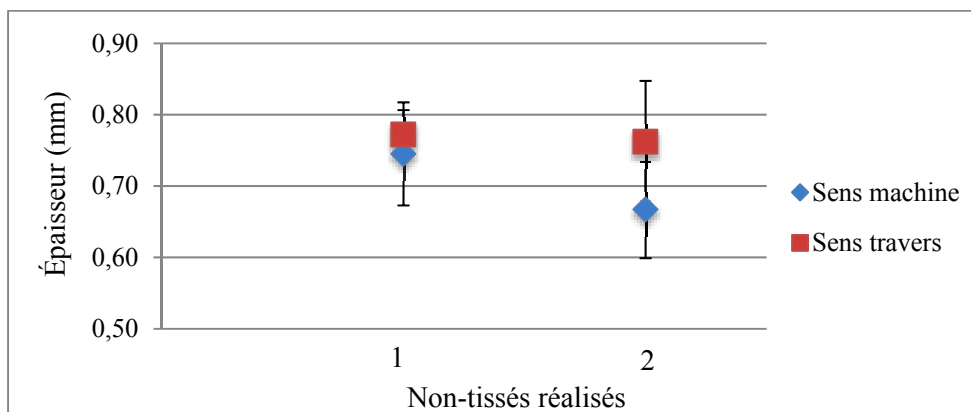


Figure 5.10 Épaisseur des non-tissés réalisés avec Bico11

5.2.3.3 Force de rupture et allongement à la rupture des non-tissés réalisés

Les non-tissés réalisés ont pu atteindre une moyenne de 259 ± 39 N en sens machine et 191 ± 26 N en sens travers pour le premier non-tissé et une moyenne de 191 ± 52 N en sens machine et de 112 ± 39 N en sens travers pour le deuxième non-tissé (Figure 5.11).

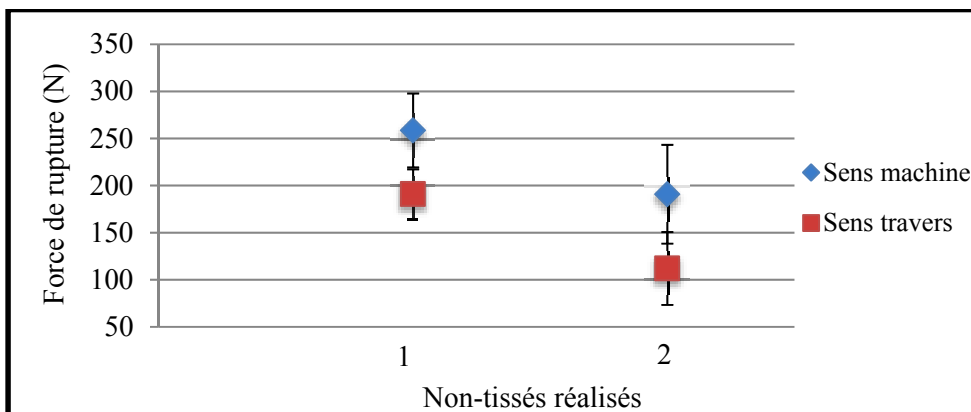


Figure 5.11 Force de rupture des non-tissés réalisés avec Bico11

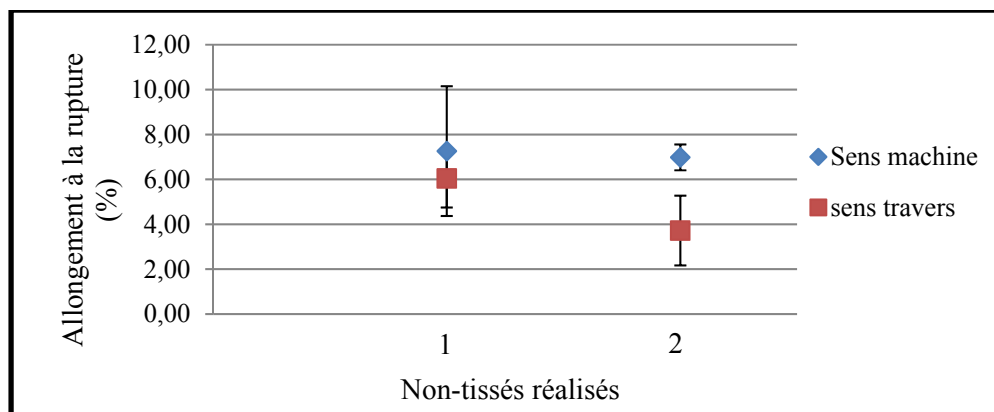


Figure 5.12 Allongement à la rupture des non-tissés réalisés avec Bico11

5.3 Analyses des résultats

5.3.1 Thermoliage

Au niveau du thermoliage, les trois fibres bicomposantes choisies ont des températures de fusion différentes. Pour cette raison, deux températures de thermoliages ont été sélectionnées. Pour les non-tissés réalisés avec la fibre Bico3 et la fibre Bico11, le thermoliage a été effectué à 205°C. En ce qui concerne la fibre hydrophobe Bico10, le thermoliage a été effectué à une température de 150°C.

Un jaunissement a été remarqué au niveau des non-tissés thermoliés aux températures les plus élevées (Figure 5.13). Il est attribué à la décomposition de la structure de la lignine qui commence à 200°C. Il est à noter que la dégradation principale se déroule beaucoup plus haut, autour de 400°C (Brebou et Vasile, 2010).

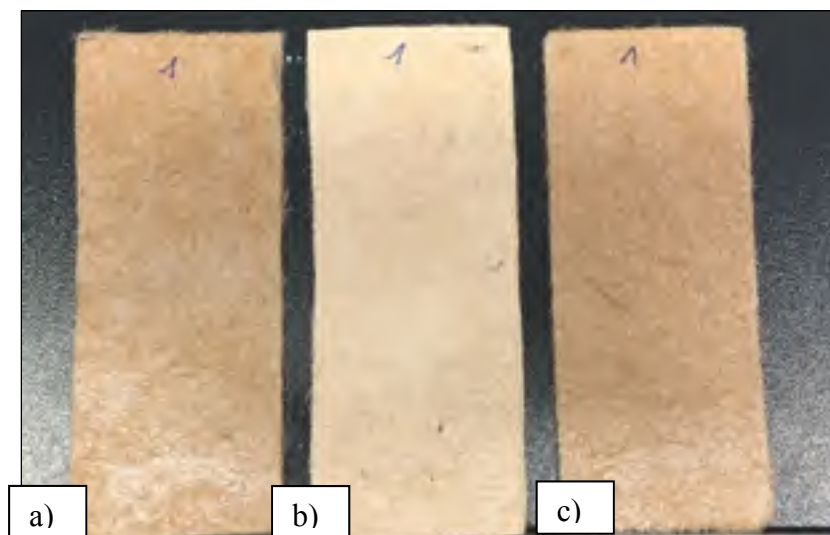


Figure 5.13 Aspect des non-tissés thermoliés a) Bico3 b) Bico10 c) Bico11

5.3.2 Masse surfacique des non-tissés

En ce qui concerne la masse surfacique (Figure 5.14), un même nombre de couches (30) a été utilisé pour tous les non-tissés. Par contre, des différences importantes ont été observées au niveau de la qualité des voiles sortant de la cardé. Par exemple, pour les non-tissés réalisés avec la fibre Bico11, les voiles sortaient sous forme de ruban et non pas de voile continu homogène. Ceci peut être dû à la longueur plus élevée de la fibre Bico11. Cette fibre était également plus sensible à la statique que les deux autres fibres bicomposantes. Ces deux facteurs peuvent expliquer la variabilité plus élevée au niveau de la masse surfacique pour la fibre Bico11.

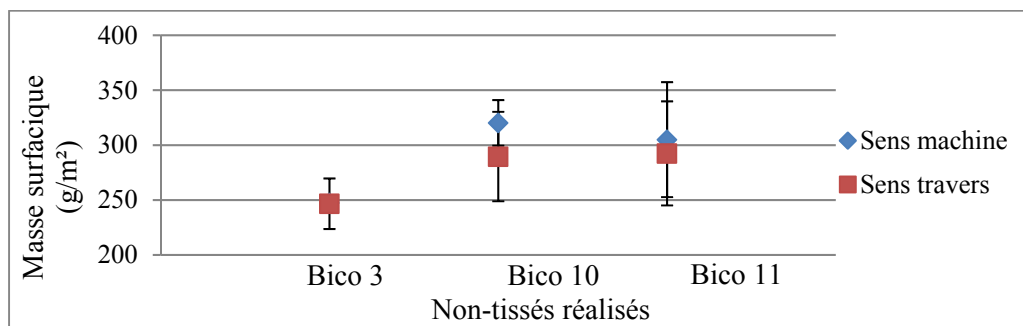


Figure 5.14 Comparaison des masses surfaciques des différents non-tissés réalisés

5.3.3 Épaisseur des non-tissés

L'épaisseur des non tissés réalisés a été mesurée après le thermoliage des spécimens coupés. Même si les trois non-tissés ont été thermoliés avec le même cadre (0,52 mm), et sous la même pression (50 kg pendant 2 minute et 0.5 tonnes pendant 1 minute), des différences sont observées entre les non-tissés (Figure 5.15). Celles-ci peut être attribuées à la différence entre les masses surfaciques : Une corrélation est mise en évidence entre les deux propriétés.

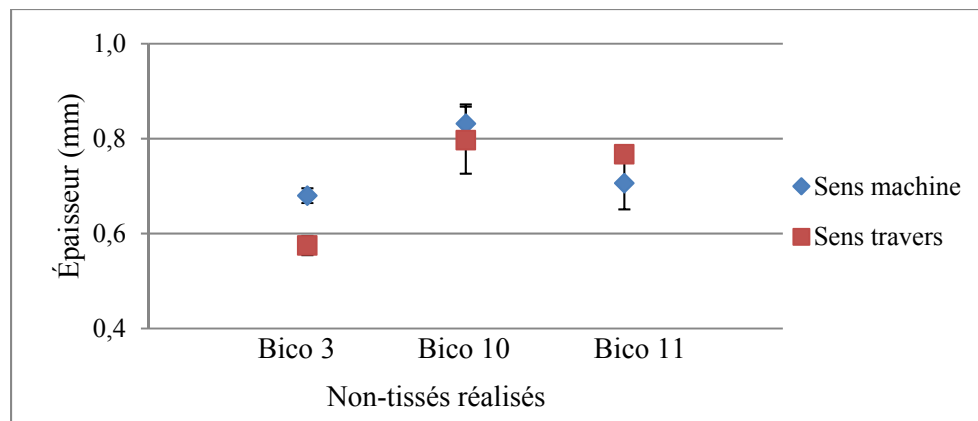


Figure 5.15 Épaisseur des différents non-tissés réalisés

5.3.4 Force de rupture des non-tissés

La Figure 5.16 compare les moyennes atteintes au niveau des différents non-tissés réalisés avec les trois fibres bicomposante Bico3, Bico10 et Bico11. La fibre Bico3 semble mener à l'obtention de performances plus élevées pour les deux autres fibres bicomposante Bico10 et Bico11.

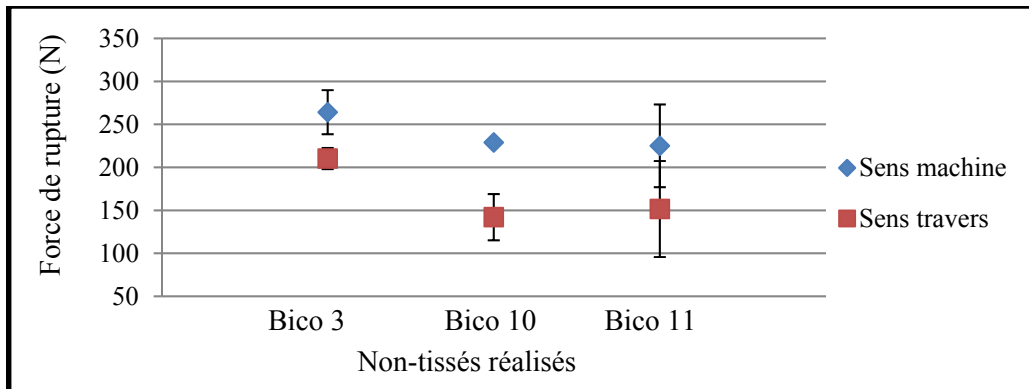


Figure 5.16 Comparaison des forces de rupture des différents non-tissés réalisés

Les valeurs individuelles de la force de rupture ont été exprimées en fonction de la masse volumique (Figure 5.17 et Figure 5.18). Les valeurs individuelles pour la fibre Bico3 sont situées au-dessus de celles obtenues avec les deux autres fibres bicomposantes Bico10 et Bico11, en particulier dans le sens machine. Ceci confirme la supériorité de la fibre Bico3 pour la force à la rupture des non-tissés. Cette fibre est celle qui présente la force de rupture la plus élevée par rapport aux deux autres fibres bicomposantes mais ce paramètre n'est habituellement pas le plus important.

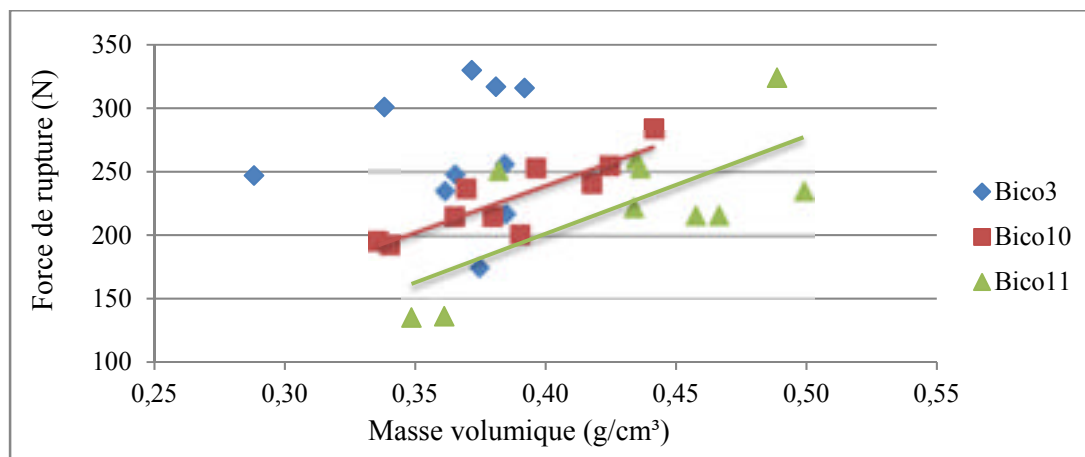


Figure 5.17 Force de rupture en fonction de la masse volumique en sens machine (la ligne est un guide pour les yeux)

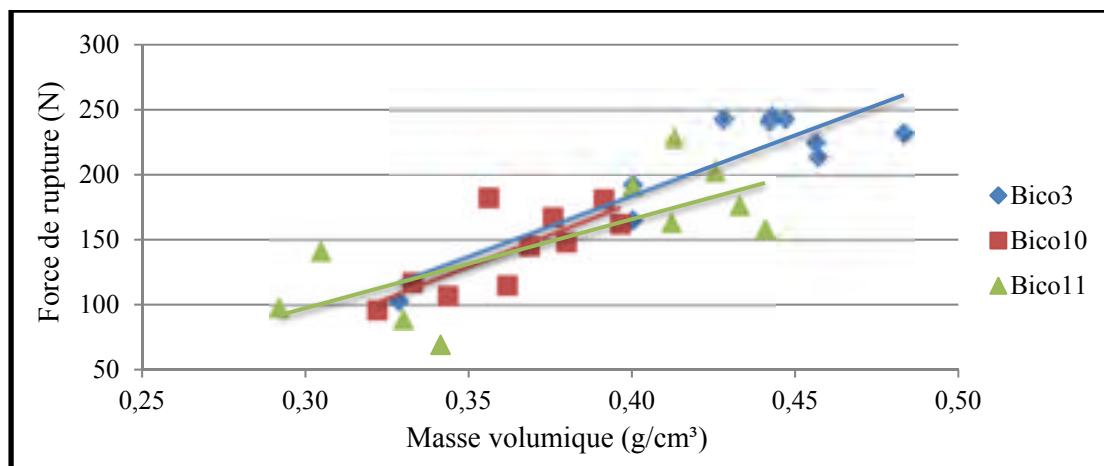


Figure 5.18 Force de rupture en fonction de la masse volumique en sens travers (la ligne est un guide pour les yeux)

La normalisation de la force de rupture par rapport à la masse volumique a donné les moyennes suivantes :

- 491 N.cm³/g pour les non-tissés réalisés avec la fibre Bico3 ;
- 391 N.cm³/g pour les non-tissés réalisés avec la fibre Bico10 ;
- 399 N.cm³/g pour les non-tissés réalisés avec la fibre Bico11.

5.3.5 Allongement à la rupture des non-tissés

En ce qui concerne l'allongement à la rupture (Figure 5.19), les moyennes obtenues sont 1,9% SM / 1,8% ST pour les non-tissés réalisés avec la fibre Bico3, de 14,7% SM / 2,2% ST pour les non-tissés fabriqués à base de Bico10 et enfin de 7,1% SM / 4,9% ST pour les non-tissés fabriqués avec la fibre Bico11. Un très grand allongement à la rupture a été obtenu en sens machine dans le cas de la fibre bico10. Ceci est étonnant sachant que la fibre elle-même a l'allongement à la rupture le plus faible parmi les trois fibres bicomposantes utilisées. Il peut éventuellement être associé à la formation d'un nombre moins élevé de points de contact entre la fibre bicomposante Bico10 et la fibre de jute.

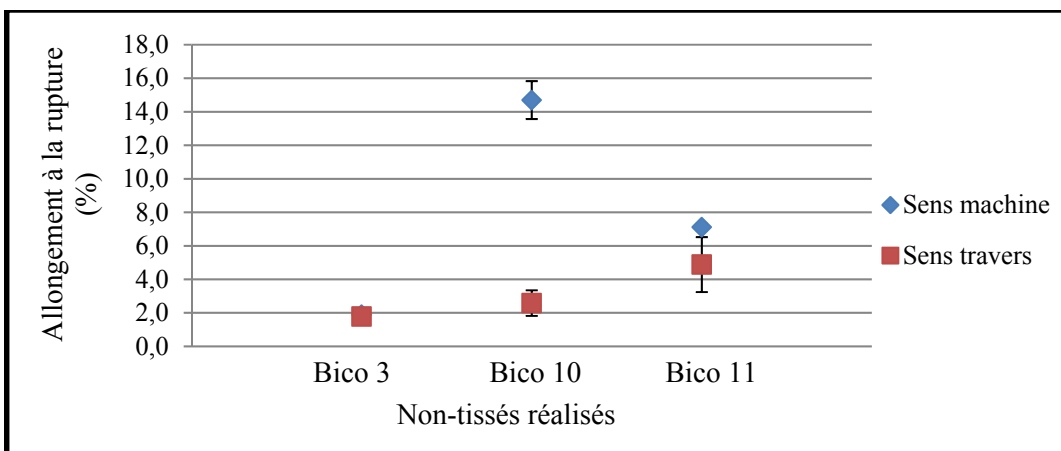


Figure 5.19 Comparaison de l'allongement à la rupture des non-tissés réalisés

Tableau 5.1 Tableau récapitulatif des résultats obtenus avec les différentes fibres bicomposantes

	Bico3	Bico10	Bico11
Gaine/cœur	PET/coPET	HDPE/PP	PET/coPET
Longueur de la fibre (mm)	55	46	73
Diamètre des fibres (μm)	20	16	13
Force de rupture de la fibre (cN)	13	8	6
Hydrophile/Hydrophobe	Hydrophile	Hydrophobe	Hydrophile
Contrainte à la rupture de la fibre (MPa)	413	398	452
Qualité des non-tissés	Excellente	Bonne	Mauvaise
Épaisseur des échantillons (mm)	0,6	0,8	0,7
Masse surfacique (g/m^2)	247	304	298
Température de thermoliage ($^{\circ}\text{C}$)	205	150	205
Force de rupture (Fr) des non-tissés (N)	264 SM/ 210 ST	229 SM/ 142 ST	225 SM/ 152 ST
Allongement à la rupture des non-tissés (%)	1,9 SM / 1,8 ST	14,7 SM/ 2,2 ST	7,1 SM / 4,9 ST
Fr/masse volumique ($\text{N.cm}^3/\text{g}$)	491	391	399

Le tableau précédent résume les caractéristiques des trois fibres bicomposantes et des non-tissés produits à l'aide de ces fibres. La résistance mécanique des non-tissés obtenue avec la fibre Bico3 est bien supérieure à celle observée avec les deux autres fibres bicomposantes (Bico10 et Bico11), tant au niveau de la force absolue que de la force normalisée par la masse volumique des non-tissés. Des valeurs relativement similaires ont été obtenues pour les deux autres fibres bicomposantes. Or, une analyse de la fibre Bico11 au IFTR a montré une similitude avec le spectre du PLEA ((poly (ethylene adipate-co-L-lactic acid)) qui possède aussi un point de fusion de 159°C (Bakouri, 2014; Liu et al., 2011). Or, ce polymère se dégrade à 200°C, ce qui laisse à penser que le thermoliage des non-tissés à 205°C avec la fibre Bico11 a possiblement provoqué un endommagement de la fibre bicomposante. Un thermoliage à plus basse température aurait donc possiblement permis d'atteindre des niveaux de résistance plus élevés pour les non-tissés que ce qui a été mesuré dans le cadre de ce travail.

Par ailleurs, un allongement à la rupture très élevé a été obtenu en sens machine pour la fibre Bico10, ce qui peut être attribué à la formation d'un moins grand nombre de points de contact entre la fibre bicomposante et la fibre de jute. Or cette fibre bicomposante Bico10 est hydrophobe.

Ces différentes observations semblent donc indiquer que les meilleures performances mécaniques obtenues avec la fibre Bico3 sont possiblement attribuables au caractère hydrophile de cette fibre bicomposante, qui permet une bonne compatibilité avec la fibre de jute, elle aussi hydrophile.

5.4 Conclusion

Ce chapitre présente une étude de compatibilité entre la fibre de jute recyclé et les différentes fibres bicomposantes. Trois fibres ont été choisies pour cette étude, deux fibres hydrophiles, Bico3 et Bico11, et une fibre hydrophobe Bico10. Deux températures de thermoliage ont été choisies selon les températures de fusion des fibres bicomposantes. Les tests de performance

mécanique ont montré que les non-tissés fabriqués à partir de la fibre bicomposante Bico3 semblent avoir la meilleure force à la rupture. Malgré un mauvais choix pour la température de thermoliage pour les non-tissés à base de la fibre bicomposante Bico11, les performances mécaniques de ces derniers sont similaires aux performances mécaniques des non-tissés fabriqués à base de la fibre Bico10, qui ont été thermoliés à une température plus basse, à savoir 150°C ce qui n'a pas affecté la fibre naturelle, contrairement à un thermoliage à 205°C.

En analysant les résultats de l'allongement à la rupture, il a été remarqué que les non-tissés à base de la fibre Bico10 ont des allongements plus élevés que les autres non-tissés, ce qui peut confirmer qu'il n'y a pas une bonne cohésion entre les fibres naturelles et bicomposantes.

Tous ces résultats semblent confirmer l'hypothèse de l'influence du caractère hydrophile sur la compatibilité entre les fibres et les performances mécaniques des non-tissés réalisés.

CHAPITRE 6

EFFET DU POURCETANGE DE FIBRE BICOMPOSANTE SUR LES PERFORMANCES DES NON-TISSÉS À BASE DE FIBRE DE JUTE RECYCLÉ

6.1 Introduction

La dernière étape de l'optimisation des conditions de fabrication des non-tissés concerne l'effet du pourcentage de fibre synthétique bicomposante. Cette étude consistera à faire varier le pourcentage de fibre bicomposante dans le mélange à base de jute recyclé et à évaluer l'effet produit sur les propriétés physiques et mécaniques des non-tissés produits.

6.2 Fabrication des non-tissés

Trois mélanges de fibres ont été préparés selon les proportions suivantes :

- Mélange 1 : 90% de jute recyclé et 10% de Bico3 ;
- Mélange 2 : 85% de jute recyclé et 15% de Bico3 ;
- Mélange 3 : 80% de jute recyclé et 20% de Bico3.

La fabrication des non-tissés a été faite dans les mêmes conditions que celles utilisées pour produire les résultats présentés dans le deuxième chapitre :

- Une ouvraison avec 30 grammes de fibres pendant 5 minutes sous une pression de 50 psi (345 kPa);
- Un cardage avec une vitesse 7,8 m/min ;
- Un nappage avec une vitesse de 8,3 m/min ;
- Deux passages à l'aiguilleteuse pour la consolidation mécanique avec un pré-aiguilletage suivi par un aiguilletage à 5mm, une fréquence d'aiguilletage de 197 coups/min et une vitesse d'entrée/sortie du tapis de 0,62/0,67 m/min ;
- Six spécimens de 15x5 cm de chaque non-tissé découpés dans les deux sens conventionnels (machine et travers) et thermoliés à l'aide d'une presse chauffante à

205°C sous une pression de 50 kg pendant deux minutes et une pression de 0,5 tonnes pendant une minute ;

- Conditionnement des échantillons pendant trois jours à 22°C et à 65% d'humidité relative avant la réalisation des mesures.

6.3 Résultats

6.3.1 Masse surfacique

La figure suivante (Figure 6.1) montre que la masse surfacique diminue en passant de 10% à 20% de fibres bicomposante. Ceci peut être attribué au fait que la fibre de jute recyclé est plus grossière que la fibre bicomposante Bico3. Une amélioration de la qualité des voiles sortant de la carde a également été observée lorsque la proportion de fibre synthétique augmentait.

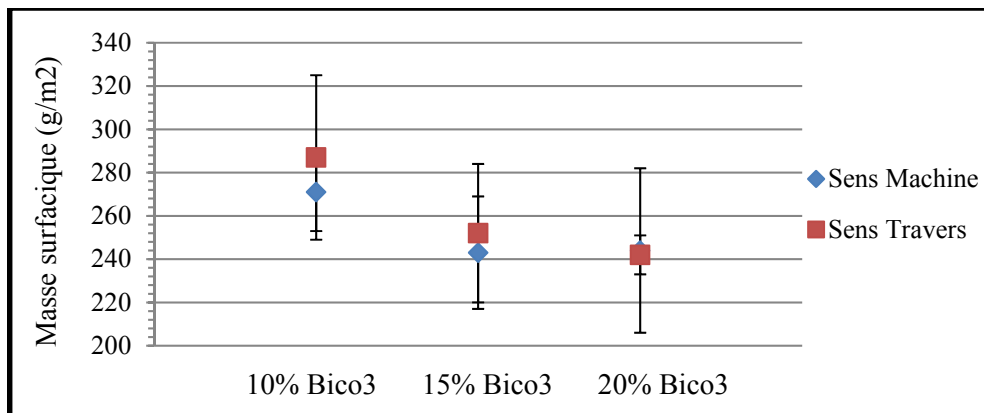


Figure 6.1 Masse surfacique des non-tissés réalisés à partir de différents pourcentages de la fibre bicomposante

6.3.2 Épaisseur

Comme il est montré dans la figure suivante (Figure 6.2), l'épaisseur suit la même variation que la masse surfacique. Ceci peut être attribué au caractère plus fin et moins fragile de la fibre bicomposante. Elle a tendance à se déformer facilement et à prendre et garder la configuration imposée durant le processus de thermoliage.

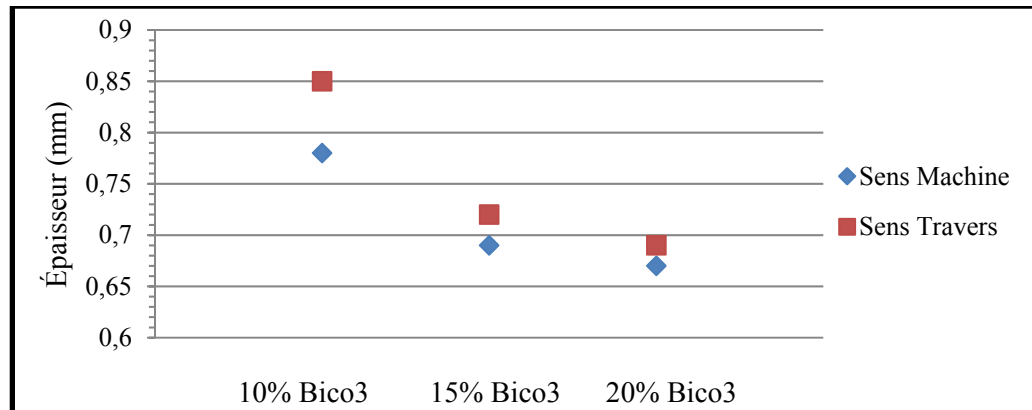


Figure 6.2 Épaisseur des non-tissés réalisés avec différents pourcentages de la fibre bicomposante

6.3.3 Force de rupture

Les résultats présentés dans la Figure 6.3 montrent l'effet du pourcentage de fibres bicomposantes PET/coPET sur les performances mécaniques des non-tissés de jute recyclé. La force de rupture des non-tissés augmente avec le pourcentage des fibres bicomposantes dans le mélange fibreux. De fait, le passage de 10% à 20% de fibres Bico3 a augmenté la force de rupture du non-tissé d'environ 87% en sens machine et d'environ 47% en sens travers.

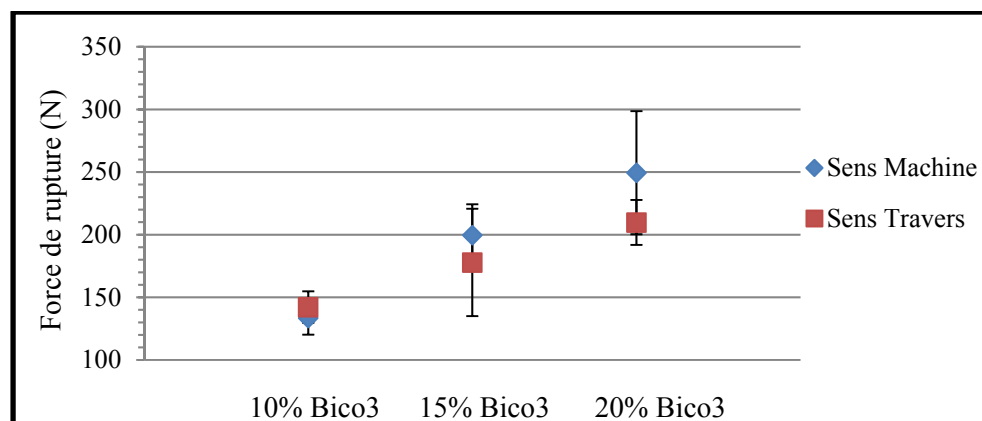


Figure 6.3 Force de rupture des non-tissés réalisés avec différents pourcentages de la fibre bicomposante

6.4 Discussion

Les résultats des tests de traction présentés dans la section précédente sont en accord avec les conclusions d'une étude de Fages et al. (Fages et al., 2013). Cette étude a analysé l'effet du pourcentage des fibres bicomposantes PA6/coPA6 sur des non-tissés en fibres de lin obtenus par voie humide. Fages et al. ont montré que le passage de 10% à 20% des fibres bicomposantes a permis d'augmenter la résistance en traction d'environ 48% en sens machine et d'environ 35% en sens travers. Cet effet a été attribué au fait que les fibres bicomposantes en plus grand nombre augmentent la quantité de points de contact avec les fibres de jute qui apportent la résistance en traction au non-tissé : plus le nombre de liens augmente, plus la force augmente.

6.5 Conclusion

La fibre bicomposante PET/coPET permet d'améliorer la performance mécanique des non-tissés de jute recyclé. Un pourcentage de fibres élevé semble augmenter la résistance en traction du renfort fabriqué. En contrepartie, l'aspect « vert » du non-tissé produit sera réduit et le coût du produit va augmenter. Il faut donc évaluer le niveau de performance mécanique minimal exigé pour chaque application afin de déterminer le pourcentage optimal de fibres bicomposantes à utiliser.

CHAPITRE 7

DISCUSSION GÉNÉRALE

Au début de ce projet, la fibre de jute recyclé a été sélectionnée pour produire des non-tissés « verts » par voie sèche avec 85% de fibre naturelle et 15% de fibre bicomposante. Cette dernière était introduite afin d'assurer un liage entre les fibres naturelles et par la suite augmenter les performances mécaniques des non-tissés. Ce projet avait pour but de trouver une alternative biosourcée aux armatures en voile de verre utilisées en génie civil. Cette armature de référence a des valeurs de 307,5 N en sens machine et de 83,5 N en sens travers.

Plusieurs étapes d'optimisation, de l'ouvrison des fibres jusqu'au thermoliage des non-tissés produits, ont été mises en oeuvre afin d'arriver aux résultats souhaités avec la fibre de jute recyclée. Les valeurs les meilleures obtenues sont respectivement de 216 N SM / 151 N ST avec une fréquence d'aiguilletage de 250 coups/min pour une vitesse de tapis de 0,62/0,67 m/min et de 268 N SM / 190 N ST avec une fréquence d'aiguilletage de 197 coups/min pour une vitesse du tapis de 0,83/0,88 m/min. Les autres paramètres correspondant aux conditions de fabrication optimales sont de 30 grammes de mélange de fibres sous une pression de 50 psi (345 kPa) pendant cinq minutes pour l'ouvrison, un cardage avec une vitesse de 7,8 m/min, un pré-aiguilletage suivi par un aiguilletage à 5 mm, et une température de thermoliage de 205°C permettant la fusion de la fibre bicomposante Bico3 sans dégrader la fibre naturelle. L'obtention d'un niveau aussi élevé de performances mécaniques pour les non-tissés à base de jute recyclé peut possiblement être attribuée en partie au caractère hydrophile de la fibre bicomposant utilisée, qui favorise l'établissement de liens entre la fibre naturelle et la fibre synthétique.

Après avoir obtenus de très bons résultats avec la fibre de jute, d'autres avenues ont été explorées afin d'obtenir une performance mécanique encore plus élevée tout en gardant le caractère biosourcé. Le choix s'est porté sur la fibre de kénafe vierge, qui est une fibre très connue pour ses performances mécaniques. Elle a également un coût d'achat très faible ainsi

qu'une bonne disponibilité et facilité d'approvisionnement. Le fait d'utiliser une fibre vierge permet aussi de limiter le niveau de perte de performances par rapport à la fibre de jute qui était recyclée. Les étapes d'optimisation des paramètres textiles pour la fibre de kénaï ont été les mêmes que pour la fibre de jute recyclé.

Au niveau de l'ouvraison, les résultats obtenus ont été les mêmes que pour la fibre de jute recyclé, à savoir 30 grammes de fibres, pendant cinq minutes sous une pression de 50 psi (345 kPa). Ceci indique possiblement que, peu importe la longueur ou la grosseur de la fibre, c'est la dimension du cylindre d'ouvraison qui contrôle le choix des paramètres optimaux.

En ce qui concerne la vitesse du cardage, la valeur optimale pour la fibre de kénaï est de 5,5 m/min, par rapport à 7,8 m/min pour la fibre de jute recyclé. Cette différence peut être associée au fait que la fibre de kénaï est plus longue et plus grossière que la fibre de jute recyclé : une vitesse plus lente est nécessaire pour mieux paralléliser la fibre de kénaï et éliminer les impuretés sans la casser. Par contre, pour la fibre de jute recyclé, une vitesse plus lente (5,5 m/min) a abîmé la fibre et une vitesse plus rapide (10,1 m/min) n'était pas suffisante pour paralléliser la fibre.

En ce qui concerne les paramètres d'aiguilletage, l'expérience acquise avec la fibre de jute a amené à élaborer un plan d'expérience permettant d'étudier les trois paramètres d'aiguilletage simultanément, à savoir la profondeur d'aiguilletage, la fréquence d'aiguilletage et la vitesse du tapis de l'aiguilleteuse. Les valeurs optimales obtenues pour le kénaï sont 467 N en sens machine et 428 N en sens travers.

Le thermoliage a joué aussi un rôle important en ce qui concerne les performances mécaniques des non-tissés. Une température de 220°C a été choisie pour la fibre de kénaï afin de ne pas risquer de dégrader la fibre de kénaï même si une valeur de 225°C donnait aussi de très bonnes performances. Par comparaison, la valeur optimale de thermoliage de la fibre de jute est de 205°C. La différence peut éventuellement être liée à l'aspect plus grossier

de la fibre de kénaf qui rend moins efficace la conduction thermique avec les plaques de la presse chauffante.

Les résultats trouvés avec la fibre de kénaf suite à l'optimisation des paramètres de fabrication sont les suivants :

- 467 N SM / 428 N ST pour une fréquence d'aiguilletage de 97 coups/min, une profondeur d'aiguilles de 5 mm pour le pré-aiguilletage et de 0 mm pour l'aiguilletage et une vitesse du tapis de l'aiguilleteuse de 0,43/0,48 m/min ;
- 442 N SM / 382 N ST pour une fréquence d'aiguilletage de 250 coups/min, une profondeur d'aiguilles de 5 mm pour le pré-aiguilletage et de 0 mm pour l'aiguilletage et une vitesse du tapis de l'aiguilleteuse de 0,83/0,88 m/min ;
- 413 N SM / 321 N ST pour une fréquence d'aiguilletage de 197 coups/min, une profondeur d'aiguille de 5 mm pour le pré-aiguilletage suivi par un aiguilletage à 0 mm et une vitesse du tapis de l'aiguilletage de 0,83/0,88 m/min.

Les meilleurs résultats avec la fibre de kénaf ont été obtenus pour une densité d'aiguilletage faible, c'est à dire avec une fréquence d'aiguilletage faible et une vitesse lente ou l'inverse, c'est à dire une fréquence d'aiguilletage élevée et une vitesse du tapis très rapide. Le comportement inverse a été observé avec la fibre de jute recyclée, c'est à dire qu'une fréquence d'aiguilletage de 197 coups/min a donné les meilleures performances en utilisant une vitesse rapide du tapis d'aiguilletage, à savoir 0,83/0,88 m/min alors qu'en augmentant la fréquence d'aiguilletage à 250 coups/min, il a fallu une vitesse moins élevée (0,62/0,67 m/min) pour obtenir de meilleures performances.

Ces résultats peuvent confirmer l'importance des caractéristiques physiques et mécaniques de la fibre naturelle sur les performances des non-tissés. En particulier, la fibre de jute utilisée dans le cadre de ce projet avait déjà été utilisée avant d'être recyclée, ce qui a donné des non-tissés plus sensible aux conditions de fabrication. Par contre, la fibre de kénaf utilisée était vierge, ce qui a permis d'avoir des non-tissés plus performants puisque la consolidation mécanique permettait d'améliorer les performances des non-tissés sans endommager la fibre comme pour le jute recyclé.

CONCLUSION

Des travaux ont été menés dans un but de développer un non-tissé structural à base de fibres naturelles pour offrir une alternative biosourcée à un voile de verre utilisé comme renfort de pièces composites en génie civil.

Deux fibres ont été sélectionnées pour l'étude, une fibre de jute recyclée et une fibre de kénaf vierge. Une caractérisation des propriétés physiques, mécaniques et thermiques des fibres a montré qu'elles répondent aux exigences du procédé de fabrication des non-tissés par voie sèche ainsi que du procédé d'imprégnation par le bitume chaud.

Des non-tissés composés de 85% de fibre naturelle et 15% de fibre bicomposant ont été produits par voie sèche suivi d'un thermoliage. Une optimisation des paramètres textiles pour l'ouvrison des mélanges (durée, pression d'air comprimé et quantité de matière traitée), le cardage (vitesse) et l'aiguilletage (profondeur d'aiguilletage, fréquence d'aiguilletage et vitesse du tapis d'entrée et de sortie) ainsi que de la température de thermoliage a été réalisée afin d'obtenir les meilleures performances mécaniques pour les non-tissés.

Une amélioration majeure des performances mécaniques a été obtenue à l'issue de cette optimisation. Pour les non-tissés à base de fibre de jute recyclé, les valeurs de force de traction ont atteint 269 N en sens machine et 190 N en sens travers, ce qui est 12% plus faible en sens machine mais plus de 120% plus élevé en sens travers par rapport au voile de verre de référence (307,5 N SM et 85,3 N ST). En ce qui concerne les non-tissés en fibres de kénaf, l'optimisation des paramètres textiles a permis d'atteindre des performances mécaniques de 467 N en sens machine et de 428 N en sens travers, soit respectivement 50% et 400% de plus que le voile de verre de référence.

Afin d'identifier la raison des très bonnes performances mécaniques obtenues, une étude a été menée avec trois fibres bicomposantes différentes, entre autres au niveau de leur caractère hydrophile/hydrophobe. Elle a permis de mettre en lumière l'avantage d'une fibre

biocomposante hydrophile pour favoriser la compatibilité avec la fibre naturelle végétale et ainsi augmenter la résistance mécanique. Dans le cadre des travaux, une analyse de l'impact du pourcentage de fibres bicomposantes sur les performances mécaniques du non-tissé a également été réalisée. L'augmentation de la force à la rupture avec le pourcentage de fibre bicomposante dans le non-tissé obtenue a été attribuée au plus grand nombre de points de contact entre les fibres naturelles ainsi créés.

Ces résultats confirment le potentiel des fibres naturelles, autant vierges que recyclées, pour des applications comme renforts non-tissés de pièces composites structurelles grâce à une optimisation des paramètres de fabrication. Il reste cependant quelques autres défis à relever, entre autres la fonctionnalisation des fibres naturelles pour permettre une bonne compatibilité avec la matrice polymère.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdul Khalil, H. P. S., Md Sohrab Hossain, Enih Rosamah, N. A. Azli, N. Saddon, Y. Davoudpoura, Md Nazrul Islam et Rudi Dungani. 2015. « The role of soil properties and it's interaction towards quality plant fiber: A review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, p. 1006-1015.
- Advani, Suresh G., et Kuang-Ting Hsiao. 2012. *Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs)* (2012). Philadelphia, Pa: Woodhead Pub., 1 ressource en ligne (xiv, 497 pages :) p.
- Akil, H. M., M. F. Omar, A. A. M. Mazuki, S. Safiee, Z. A. M. Ishak et A. Abu Bakar. 2011. « Kenaf fiber reinforced composites: A review ». *Materials & Design*, vol. 32, n° 8–9, p. 4107-4121.
- Anandjiwala, R. D.; Boguslavsky, L. 2008. « Development of Needle-punched Nonwoven Fabrics from Flax Fibers for Air Filtration Applications ». *Textile Research Journal*, vol. 78, n° 7, p. 614-624.
- Asi, Osman. 2009. « Mechanical Properties of Glass-Fiber Reinforced Epoxy Composites Filled with Al₂O₃ Particles ». *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 28, n° 23, p. 2861-2867.
- ASTM international. 2016. « Standard Practice for Compression Molding Thermoplastic Materials into Test Specimens, Plaques, or Sheets ». ASTM D4703-16, ASTM International. West Conshohocken, United States, 13p.
- ASTM international. 2015. « Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method) ». ASTM D5035-11, ASTM International. West Conshohocken, United States, 8p.
- ASTM international. 2012. « Length and Length Distribution of Manufactured Staple Fibers (Single-Fiber Test) ». ASTM D5103-07, ASTM International. West Conshohocken, United States, 4p.
- ASTM international. 2009. « Standard Test Method for Corona-Treated Polymer Films Using Water Contact Angle Measurements ». ASTM D5946-09, ASTM International. West Conshohocken, United States, 7p.
- ASTM international. 2007. « Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers ». ASTM D3822-07, ASTM International. West Conshohocken, United States, 10p.

- Aziz, Sharifah H., et Martin P. Ansell. 2004. « The effect of alkalization and fibre alignment on the mechanical and thermal properties of kenaf and hemp bast fibre composites: Part 1 – polyester resin matrix ». *Composites Science and Technology*, vol. 64, n° 9, p. 1219-1230.
- Azwa, Z. N., B. F. Yousif, A. C. Manalo et W. Karunasena. 2013. « A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres ». *Materials and Design*, vol. 47, p. 424-442.
- Bakouri, H.; Guemra, K.; Boukhouya, I. 2014. « Synthesis and in vitro Biodegradation of poly(ethylene adipate-co-D,L-lactic acid) Copolymers (PLEA) ». *Oriental Journal of Chemistry*, vol. 30, n° 3, p. 1061-1069.
- Bartels, V. T. 2011. *Handbook of medical textiles* (2011). Oxford: Woodhead Publishing, 1 texte électronique (xxv, 566 p.) p.
- Ben Abdesslem, S. 2013. « Chapitre 1 : Généralités sur les métiers circulaires ». In *Le tricotage circulaire*. < <http://www.enim.tn/portail/claroline/backends/download.php?url=L0NocDFfZ25ybHQueGRm&cidReset=true&cidReq=TC3&35fed511dda3ea125c54e8479a77802f=124k57trk11n1ofbkfr4rdif4> >. Consulté le 18 février.
- Bralla, G. J. 2007. *Handbook of Manufacturing Processes - How Products, Components and Materials are Made*. Industrial Press.
- Brebu, Mihai, et Cornelia Vasile. 2010. « Thermal degradation of lignin - A review ». *Cellulose Chemistry and Technology*, vol. 44, n° 9, p. 353-363.
- Bunsell, A. R. 2009. *Handbook of tensile properties of textile and technical fibres* (2009). Oxford: Woodhead Publishing, 1 texte électronique (xxi, 650 p.) p.
- Cammack, Richard. 2006. *Oxford dictionary of biochemistry and molecular biology* (2006), 2nd ed. Coll. « Biochemistry and molecular biology ». Oxford
New York: Oxford University Press, 1 texte électronique (xv, 720 p.) p.
- Carisconi, E.; Dotti, S.; Fleiss, F.; Petaccia, L.; Pieri, L. 2002. « Spinning : Cotton and wool spinning ». < http://ti.ivgpu.com/images/stories/facultet/MEXAN_AVT/PTM/files/Spinning.pdf >. Consulté le Avril.
- Chailly, M. 2008. « PETP : Polyéthylène téréphtalate ». < http://www.michaud-chailly.fr/custom/docs/modele/q22-petp_d/fiche-matiere-petp-petp-lmod1.pdf >.

- Chen, Ziyu. 2013. « The crystallization of Poly(ethylene terephthalate) studied by thermal analysis and FTIR spectroscopy ». University of Birmingham, 240 p. < <http://etheses.bham.ac.uk/4251/> >.
- Coste, G. 2011. « La consolidation, la finition et la transformation ». In *Les non-tissés*. < <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/tutoriel/non-tisse/page04.htm> >. Consulté le 8 mars.
- CSMO, Textile. 2009. « Chapitre3 : étoffons nos connaissances ». In *Le textile dans tous ses états*. < http://www.textiletechno.ca/fichier/atelierscsmo_chapitre3.pdf >. Consulté le 23 février.
- Dahiya, A.; Kamath, M.G.; Hedge, R.R. 2004. « Dry-laid nonwovens ». In *Nonwovens science and technology 2*. < http://www.engr.utk.edu/mse/Textiles/Dry_Laid_Nonwovens.htm >. Consulté le 9 mars.
- Danielczyk, Piotr, et Jacek Stadnicki. 2012. « Optimization of the structural form of the carding machine main cylinder ». *Textile Research Journal*, vol. 82, n° 18, p. 1897-1905.
- Debnath, Sanjoy, et M. Madhusoothanan. 2010. « Water Absorbency of Jute—Polypropylene Blended Needle-punched Nonwoven ». *Journal of Industrial Textiles*, vol. 39, n° 3, p. 215-231.
- Debnath, Sanjoy, et M. Madhusoothanan. 2012. « Compression behaviour of jute—polypropylene blended needle-punched nonwoven under wet conditions ». *The Journal of The Textile Institute*, vol. 103, n° 6, p. 583-594.
- Delmas, G-H. 2011. « La Biolignine : Structure et Application à l'élaboration de résines époxy ». Toulouse, Université de Toulouse, 140 p. < <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001605/01/delmas.pdf> >.
- Dittenber, David B., et Hota V. S. Gangarao. 2012. « Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure ». *Composites Part A*, vol. 43, n° 8, p. 1419-1429.
- Doguc, N. B.; Seyam, A. M.; Oxenham, W. 2004. « Influence of Fiber Type on Fiberweb Properties in High-Speed Carding ». In *INJ Summer*. (Raleigh), sous la dir. de Center, Nonwovens Cooperative Research, p. 48-53. < http://www.jeffjournal.org/INJ/inj04_2/p48-53-seyam.pdf >.
- Drzal, Lawrence T., A. K. Mohanty et M. Misra. 2003. « Structural BioComposites from Natural Fibers and BioPolymers ». In *61st Annual Technical Conference ANTEC 2003, May 4, 2003 - May 8, 2003*. (Nashville, TN, United states) Vol. 2, p. 2024-

2028. Coll. « Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings »: Society of Plastics Engineers.
- E.T.N. 2014. « Fibres de cellulose régénérée ». In *Fibres artificielles*. < http://www.cttn-iren.com/pdf/0809988001423037341_04_02_15.pdf >. Consulté le 5 mars.
- Edana. « Formation ». < <http://www.edana.org/discover-nonwovens/how-they're-made/formation> >. Consulté le 6 mars.
- Edana. « Products & applications ». < <http://www.edana.org/discover-nonwovens/products-applications> >. Consulté le 2 mars.
- Edana. 2015. « Facts and Figures ». < <http://www.edana.org/discover-nonwovens/facts-and-figures> >. Consulté le 2 mars.
- Eichhorn, S. J. 2009a. *Handbook of textile fibre structure. Volume 1, Fundamentals and manufactured polymer fibres* (2009). Coll. « Fundamentals and manufactured polymer fibres ». Cambridge: Woodhead Pub., 1 texte électronique (xx, 508 p.) p.
- Eichhorn, S.J.; Hearle, J.W.S.; Jaffe, M.; Kikutani, T. 2009b. *Handbook of Textile Fibre Structure, Volume 2 - Natural, Regenerated, Inorganic and Specialist Fibres*, 2. Woodhead Publishing.
- El Mogahzy, Y. E. (538). 2009. *Engineering textiles : integratings the Design and Manufacture of Textiles Products*. Woodhead Publishing in Textiles.
- El-Sabbagh, A., L. Steuernagel et J. Ring. 2016. « Natural Fibre/PA6 composites with flame retardance properties: Extrusion and characterisation ». *Composites Part B: Engineering*.
- Fages, E., M. A. Cano, S. Gironés, T. Boronat, O. Fenollar et R. Balart. 2013. « The use of wet-laid techniques to obtain flax nonwovens with different thermoplastic binding fibers for technical insulation applications ». *Textile Research Journal*, vol. 83, n° 4, p. 426-437.
- Fakirov, S.; Bhattacharyya, D;. 2007. *Handbook of Engineering Biopolymers-Homopolymers, Blends and Composites*. Hanser Publishers.
- Fangueiro, R. 2011. *Fibrous and composite materials for civil engineering applications* (2011). Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 1 ressource en ligne (xviii, 401 pages p.
- Farah, Shady, Tsadok Tsach, Alfonso Bentolila et Abraham J. Domb. 2014. « Morphological, spectral and chromatography analysis and forensic comparison of PET fibers ». *Talanta*, vol. 123, p. 54-62.

- Faruk, Omar, Andrzej K. Bledzki, Hans-Peter Fink et Mohini Sain. 2012. « Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010 ». *Progress in Polymer Science*, vol. 37, n° 11, p. 1552-1596.
- Fayala, Faten. 2013. « Chapitre IV : Cardage (Type coton) ». < <http://support-cours-filature.e-monsite.com/pages/chapitre-vi.html> >
- Forêts, Service Canadien des. 2013. « La lignine : Un élément constitutif important dans le développement de bioproduits ». < http://publications.gc.ca/collections/collection_2013/rncan-nrcan/Fo12-44-2013-4-fra.pdf >.
- Fung, Walter, et Mike Hardcastle. 2001. *Textiles in automotive engineering* (2001). Cambridge, England : Lancaster, Pa.: Woodhead Pub. , Technomic, xiv, 363 p. p.
- Gassan, Jochen, et Voytek S. Gutowski. 2000. « Effects of corona discharge and UV treatment on the properties of jute-fibre epoxy composites ». *Composites Science and Technology*, vol. 60, n° 15, p. 2857-2863.
- Ghosh, R. 2014. « Non woven fabric and the difference between Bonded and Needle punched non woven fabrics ». *IOSR Journal of Polymer and Textile Engineering (IOSR-JPTE)*, vol. 1, n° 2, p. 31-33.
- Graham-Jones, J.; Summerscales, J. 2016. *Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites*. Woodhead Publishing.
- Hindman, D. 2010. « Bicomponent Fiber ». In *Nonwoven Terms*. < <http://www.nonwoventools.com/pdf/DefVol2No12Bico.pdf> >. Consulté le Août.
- Hodzic, Alma, et Robert Shanks. 2014. *Natural fibre composites : materials, processes and properties* (2014). Oxford: Woodhead Publishing, 1 ressource en ligne (xvii, 389 pages) p.
- Horrocks, A. Richard, et Subhash Anand. 2000. *Handbook of technical textiles* (2000). Boca Raton, FL: CRC Press/Woodhead Pub., xvi, 559 p. p.
- Ichhaporia, P. K. 2008. « Composites from Natural Fibers ». Raleigh, North Carolina, North Carolina State University, 124 p.
- IFIS. 2009. *Dictionary of food science and technology* (2009), 2nd ed. Chichester, U.K. Ames, Iowa : Reading, UK
IFIS: Wiley-Blackwell, 1 ressource en ligne (xii, 473 p.) p.
- Indran, S., et R. Edwin Raj. 2015. « Characterization of new natural cellulosic fiber from *Cissus quadrangularis* stem ». *Carbohydrate Polymers*, vol. 117, p. 392-399.

- Jawaid, M., et H. P. S. Abdul Khalil. 2011. « Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review ». *Carbohydrate Polymers*, vol. 86, n° 1, p. 1-18.
- John, Maya Jacob, et Sabu Thomas. 2008. « Biofibres and biocomposites ». *Carbohydrate Polymers*, vol. 71, n° 3, p. 343-364.
- Kabir, M. M., H. Wang, K. T. Lau et F. Cardona. 2013. « Effects of chemical treatments on hemp fibre structure ». *Applied Surface Science*, vol. 276, p. 13-23.
- Khan, J. A., et M. A. Khan. 2015. « 1 - The use of jute fibers as reinforcements in composites ». In *Biofiber Reinforcements in Composite Materials*. p. 3-34. Woodhead Publishing. < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782421221500010> >.
- Kohli, Rajiv, et K. L. Mittal. 2016. *Developments in surface contamination and cleaning. Volume 1, Fundamentals and applied aspects* (2016). San Diego, CA: Elsevier : William Andrew, 1 ressource en ligne (xxii, 873 pages) p.
- Kozlowski, R. M. 2012. *Handbook of Natural Fibres, Volume 2 - Processing and Applications*, 2. Woodhead Publishing.
- Krishnan, K. B., I. Doraiswamy et K. P. Chellamani. 2005. « 2 - Jute A2 - Franck, Robert E ». In *Bast and Other Plant Fibres*. p. 24-93. Woodhead Publishing. < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781855736849500024> >.
- Kulshreshtha, A. K., et Cornelia Vasile. 2002. *Handbook of polymer blends and composites* (2002). Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, [England]: Rapra Technology, 4 v. p.
- Langenhove, L. van. 2015. *Advances in smart medical textiles : treatments and health monitoring* (2015). Cambridge: Woodhead Publishing., 1 ressource en ligne p.
- lawrence, C. A. 2003. *Fundamentals of spun yarn technology*. CRC Press, 552 p.
- Leal, Glaucio F., Luiz A. Ramos, Dean H. Barrett, Antonio Aprigio S. Curvelo et Cristiane B. Rodella. 2015. « A thermogravimetric analysis (TGA) method to determine the catalytic conversion of cellulose from carbon-supported hydrogenolysis process ». *Thermochimica Acta*, vol. 616, p. 9-13.
- Li, Xue, Lope G. Tabil et Satyanarayan Panigrahi. 2007. « Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review ». *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 15, n° 1, p. 25-33.
- Liu, Ji, Peng Chen, Jun Li, Sheng- H. Jiang, Zhi- Q. Jiang et Qun Gu. 2011. « Synthesis of poly(ethylene adipate-co-l-lactic acid) copolymers via ring opening polymerization ». *Polymer Bulletin*, vol. 66, n° 2, p. 187-197.

- Lord, P. R. 2003. *Handbook of yarn production : Technology, science and economics*. Woodhead Publishing Series in Textiles.
- Mao, N.; Russell, S. J. 2014. « Fibre to Fabric : Nonwoven Fabrics ». In *Textiles and Fashion : Materials, Design and Technology*, sous la dir. de Sinclair, R., p. 307 - 335. Woodhead Publishing Series in Textiles.
- Marques, Maria de Fátima V., Renato P. Melo, Rafael Da S. Araujo, Juliana Do N. Lunz et Vinícius de O. Aguiar. 2014. « Improvement of mechanical properties of natural fiber-polypropylene composites using successive alkaline treatments ». *Journal of Applied Polymer Science*, p. n/a-n/a.
- Milanese, Andressa Cecília, Maria Odila Hilário Cioffi et Herman Jacobus Cornelis Voorwald. 2012. « Thermal and mechanical behaviour of sisal/phenolic composites ». *Composites Part B*, vol. 43, n° 7, p. 2843-2850.
- Moriana, Rosana, Francisco Vilaplana, Sigbritt Karlsson et Amparo Ribes. 2014. « Correlation of chemical, structural and thermal properties of natural fibres for their sustainable exploitation ». *Carbohydrate Polymers*, vol. 112, p. 422-431.
- Müssig, Jörg. 2010. *Industrial Applications of Natural Fibres : Structure, Properties and Technical Applications*. Wiley series in Renewable resources.
- Mwaikambo, L. Y., et M. P. Ansell. 1999. « The effect of chemical treatment on the properties of hemp, sisal, jute and kapok for composite reinforcement ». *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, vol. 272, n° 1, p. 108-116.
- Nakajima, T. 1994. *Advanced Fiber Spinning Technology*. Woodhead Publishing Limited, 256 p.
- Nishino, Takashi, Koichi Hirao, Masaru Kotera, Katsuhiko Nakamae et Hiroshi Inagaki. 2003. « Kenaf reinforced biodegradable composite ». *Composites Science and Technology*, vol. 63, n° 9, p. 1281-1286.
- Ochi, S. 2008. « Mechanical properties of kenaf fibers and kenaf/PLA composites ». *Mechanics of Materials*, vol. 40, n° 4-5, p. 446-52.
- Ornaghi Junior, Heitor Luiz, Ademir Jose Zattera et Sandro Campos Amico. 2014. « Thermal behavior and the compensation effect of vegetal fibers ». *Cellulose*, vol. 21, n° 1, p. 189-201.
- Pérez, J., J. Muñoz-Dorado, T. de la Rubia et J. Martínez. 2002. « Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview ». *International Microbiology*, vol. 5, n° 2, p. 53-63.

- Pothan, Laly A., Zachariah Oommen et Sabu Thomas. 2003. « Dynamic mechanical analysis of banana fiber reinforced polyester composites ». *Composites Science and Technology*, vol. 63, n° 2, p. 283-293.
- Ramkumar, S. S., et C. Roedel. 2003. « Study of needle penetration speeds on frictional properties of nonwoven webs: A new approach ». *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 89, n° 13, p. 3626-3631.
- Ratna Prasad, A. V., et K. Mohana Rao. 2011. « Mechanical properties of natural fibre reinforced polyester composites: Jowar, sisal and bamboo ». *Materials & Design*, vol. 32, n° 8–9, p. 4658-4663.
- Ratner, B. D. 2004. *Biomaterials science an introduction to materials in medicine* (2004), 2nd ed. Amsterdam
Boston: Elsevier Academic Press, 1 ressource en ligne (xii, 851 p.) p.
- Ratner, B. D. 2013. *Biomaterials science : an introduction to materials in medicine* (2013), Third edition. Place of publication not identified]: Academic Press, 1 ressource en ligne. p.
- Rawal, Amit, et Rajesh Anandjiwala. 2007. « Comparative study between needlepunched nonwoven geotextile structures made from flax and polyester fibres ». *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 25, n° 1, p. 61-65.
- Reddy, Narendra, et Yiqi Yang. 2005. « Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications ». *Trends in Biotechnology*, vol. 23, n° 1, p. 22-27.
- Reddy, Narendra, et Yiqi Yang. 2007. « Natural cellulose fibers from switchgrass with tensile properties similar to cotton and linen ». *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 97, n° 5, p. 1021-1027.
- Renoud, S. 1999. « Les tissus techniques ». In *Cours complet de sérigraphie*. < http://www.renoud.com/cours/pages/bac_tissu.html >. Consulté le 23 février.
- Ridzuan, M. J. M., M. S. Abdul Majid, M. Afendi, S. N. Aqmariah Kanafiah, J. M. Zahri et A. G. Gibson. 2016. « Characterisation of natural cellulosic fibre from Pennisetum purpureum stem as potential reinforcement of polymer composites ». *Materials & Design*, vol. 89, p. 839-847.
- Rong, Min Zhi, Ming Qiu Zhang, Yuan Liu, Gui Cheng Yang et Han Min Zeng. 2001. « The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites ». *Composites Science and Technology*, vol. 61, n° 10, p. 1437-1447.

- Rouette, Hans-Karl, A. Lindner et Beate Schwager. 2001. *Encyclopedia of textile finishing* (2001). Berlin
New York: Springer, 1 ressource en ligne (3 v. (viii, 2765 p.)) p.
- Roy, S., et L. B. Lutfar. 2012. « 3 - Bast fibres: jute A2 - Kozłowski, Ryszard M ». In *Handbook of Natural Fibres*. Vol. 1, p. 24-46. Woodhead Publishing. <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845696979500035>>.
- Russell, S. J. 2006. *Handbook of nonwovens*. Woodhead Publishing Series in Textiles, 544 p.
- Saheb, D. Nabi, et J. P. Jog. 1999. « Natural fiber polymer composites: A review ». *Advances in Polymer Technology*, vol. 18, n° 4, p. 351-363.
- Satyanarayana, K. G., K. Sukumaran, P. S. Mukherjee, C. Pavithran et S. G. K. Pillai. 1990. « Natural fibre-polymer composites ». *Cement and Concrete Composites*, vol. 12, n° 2, p. 117-136.
- Savage, L., et K. Evans. 2014. « The importance of the mesostructure in toughening cellulosic short fibre composites ». *Composites Science and Technology*, vol. 93, p. 97-105.
- Scarponi, C., et C. Andreotti. 2009. « Industrial applications of natural fibres advanced composites: environmental effects and comparative life cycle analysis ». *International Journal of Materials & Product Technology*, vol. 36, n° 1-4, p. 241-60.
- Schoors, L.V.; Khay, M. 2014. « Étude multi-échelle de géotextiles polyester vieillis en sols traités ». In *Journée technique - la durabilité des géosynthétiques dans les ouvrages*. <
http://www.cfg.asso.fr/sites/default/files/files/journee-20140325/Pres_EtudeMultiEchelleGeotextilesPolyesterVieillisenSolsTraites_VanSchoors_Khay.pdf>. Consulté le juin.
- Schorr, D. 2014. « Caractérisation et modification des lignines industrielles ». Quebec, Canada, Université Laval.
- Shah, Darshil U. 2013. « Characterisation and optimisation of the mechanical performance of plant fibre composites for structural applications ». The University of Nottingham.
- Shah, Darshil U., Peter J. Schubel et Mike J. Clifford. 2013. « Can flax replace E-glass in structural composites? A small wind turbine blade case study ». *Composites Part B: Engineering*, vol. 52, p. 172-181.
- Smith, P. A. 2000. « Technical fabric structures- 3. Nonwoven fabrics ». In *Handbook of Technical Textiles*, sous la dir. de Horrocks, A. R.; Anand, S. C., p. 130 - 151. Woodhead Publishing.

- Thakur, V. K., A. S. Singha et M. K. Thakur. 2013. « Ecofriendly Biocomposites from Natural fibers: Mechanical and Weathering study ». *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, vol. 18, n° 1, p. 64-72.
- Thakur, Vijay Kumar, Manju Kumari Thakur et Raju Kumar Gupta. 2014. « Review: Raw Natural Fiber-Based Polymer Composites ». *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, vol. 19, n° 3, p. 256-271.
- Thomas, Sabu; Pothan, Laly A. 2008. *Natural Fibre Reinforced Polymer Composites : From Macro to Nanoscale*. Old City Publishing.
- Valentin, Popa. 2011. *Polysaccharides in Medicinal and Pharmaceutical Applications*. Smithers Rapra Technology.
- Wang, R.; Liu, H. 2011. *Advances in Textile Engineering*. Trans Tech Publications Ltd.
- Wertz, J-L. 2011. « Les hémicelluloses ». < <http://www.valbiom.be/files/library/Docs/Biopolymeres/leshemicelluloses1323437241.pdf> >. Consulté le Avril.
- Wertz, J. L.; Bédué, O.; Mercier, J.P. (21-25). 2010. *Cellulose Science and Technology*. CRC Press, 364 p.
- Wilson, A. 2006. « Development of the nonwovens industry ». In *Handbook of nonwovens*, sous la dir. de Russell, S. J., p. 1-15. Woodhead Publishing In Textiles.
- Wilson, A. 2010. « The formation of dry, wet, spunlaid and other types of nonwovens ». In *Applications of Nonwovens in Technical Textiles*, sous la dir. de Chapman, R. A., p. 3-17. Woodhead Publishing.
- Woodings, C. 2001. « Applications Development ». In *Regenerated Cellulose Fibres*, sous la dir. de Woodings, C., p. 235 - 272. Woodhead Publishing.
- Wulfhorst, Burkhard, Thomas Gries et Dieter Veit. 2006. *Textile technology* (2006), [English ed.]. Munich : Cincinnati, Ohio: Hanser Publishers , Distributed in the USA and in Canada by Hanser Gardner Publications, 1 texte électronique (viii, 320 p.) p.
- Yan, Libo, Nawawi Chouw et Krishnan Jayaraman. 2014. « Flax fibre and its composites – A review ». *Composites Part B*, vol. 56, p. 296-317.
- Yan, Libo, Nawawi Chouw et Xiaowen Yuan. 2012. « Improving the mechanical properties of natural fibre fabric reinforced epoxy composites by alkali treatment ». *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 31, n° 6, p. 425-437.

- Yeh, S-K.; Yen, C. C.; Bödecker, J. 2013. « Recent Progress in Polymer Natural Fibre Composites Made from Recycled Plastics ». In *Biomass-based Biocomposites*, sous la dir. de Thakur, V. K.; Singha, A. S., p. 115-143. Smithers Rapra Technology.
- Zampaloni, M., F. Pourboghrat, S. A. Yankovich, B. N. Rodgers, J. Moore, L. T. Drzal, A. K. Mohanty et M. Misra. 2007. « Kenaf natural fiber reinforced polypropylene composites: A discussion on manufacturing problems and solutions ». *Composites Part A*, vol. 38, n° 6, p. 1569-1580.