

UNIVERSITÉ DUQUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

SÉBASTIEN MIGNEAULT

EFFETS DE LA LONGUEUR DES FIBRES  
SUR LA FORMATION ET LES PROPRIÉTÉS  
DES COMPOSITES BOIS-PLASTIQUES

NOVEMBRE 2007

CE MÉMOIRE A ÉTÉ RÉALISÉ  
À L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE  
DANS LE CADRE DU PROGRAMME  
DE MAÎTRISE EN INGÉNIERIE  
DE L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI  
OFFERT PAR EXTENSION À L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC  
EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

## RÉSUMÉ

Les particules de bois dans les composites bois-plastiques (CBP) se présentent généralement sous forme de farine de bois, caractérisées par un faible ratio longueur/diamètre (L/D). Ceci pour des raisons de disponibilité et pour la facilité avec laquelle la farine de bois s'intègre aux procédés de mise en forme du plastique. Or, la morphologie des fibres joue un rôle important dans la formation et dans le développement des propriétés des produits à base de fibres de bois, comme le papier et les panneaux de fibres. Il en est de même pour les composites renforcés de fibres synthétiques. Il y a cependant très peu d'information disponible en ce qui concerne le rôle de la taille des fibres dans les produits CBP. De plus, l'utilisation de fibres longues est problématique et demande plus d'efforts de recherche. Ainsi, l'objectif général de cette étude est de comprendre le rôle de la longueur des fibres dans le procédé de formation et dans le développement des propriétés des CBP.

Des fibres de pâte à papier chimico-thermomécanique (PCTM) de bouleau blanc ont été réduites mécaniquement en trois classes de longueur. Les classes mesurées à l'aide d'un analyseur de qualité de fibres (AQF) optique ont respectivement des longueurs de 0,196, 0,304 et 0,481 mm et des ratios L/D de 8,3, 13,0, 21,3. Les caractéristiques de couple du polyéthylène haute densité (PEHD) fondu pur et chargé de trois proportions massiques (20, 30, 40 %) des trois classes de fibre ont été étudiées à l'aide d'un rhéomètre à couple. Des CBP à 40 % en poids de fibres PCTM ont été fabriqués par extrusion selon neuf formulations (3 longueurs, 3 formulations chimiques) et par moulage par injection selon trois formulations (3 longueurs). Également, des fibres PCTM ont été utilisées comme additif dans une formulation typique de l'industrie des CBP à 58 % en poids de farine de pin. Les CBP ont été caractérisés en termes de propriétés physico-mécaniques. Enfin, des techniques de modélisation ont été utilisées afin de mieux comprendre le rôle des dimensions des fibres de bois dans le développement des propriétés mécaniques des CBP.

Les résultats montrent que les caractéristiques de couple du PEHD fondu chargé de fibres PCTM varient avec la proportion massique et avec la longueur des fibres. Ainsi, les paramètres de mise en forme doivent être ajustés en fonction de la taille des fibres. Les propriétés physico-mécaniques des CBP varient avec la longueur des fibres, le procédé de mise en forme et les additifs utilisés. Les propriétés mécaniques augmentent avec la taille des fibres tandis que la performance diminue lors des essais en immersion dans l'eau. L'homogénéité et la densité des CBP ne sont pas influencées par la longueur des fibres. L'utilisation de fibres PCTM comme additif dans une formulation de CBP à base de farine de pin augmente les propriétés mécaniques. Finalement, les modèles théoriques permettent d'expliquer les implications de la taille des fibres dans la résistance et la rigidité des CBP. Ils ont toutefois tendance à surestimer les effets observés lors des essais mécaniques.

**Mots clés :** bois-plastiques, longueur des fibres, propriétés physico-mécaniques, extrusion, moulage par injection, polyéthylène haute densité (PEHD), rhéomètre à couple

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur M. Ahmed Koubaa<sup>1</sup> pour le sujet, les moyens financiers qui ont permis sa réalisation ainsi que son support et sa patience. Également mon codirecteur M. Fouad Erchiqui<sup>1</sup> pour son support, pour la formation académique et pour son travail de responsable de programme. Je désire ensuite remercier M. Abdelkader Chaala<sup>2</sup>, M. Mike Wolcott<sup>3</sup>, M. Karl Englund<sup>4</sup>, pour leur aide, support, contributions financières et matérielles, M. François Godard<sup>1</sup> pour son support et pour la formation académique et Mme Cornelia Krause<sup>5</sup> pour son aide à la rédaction du mémoire. Enfin, je tiens à remercier tous les intervenants qui ont participé au projet de près ou de loin, pour leur professionnalisme et leur passion pour la recherche.

---

<sup>1</sup> Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)

<sup>2</sup> Service de recherche et d'expertise en transformation des produits forestiers (SEREX)

<sup>3</sup> Washington state University (WSU) et Wood materials and engineering laboratory (WMEL)

<sup>4</sup> Wood materials and engineering laboratory (WMEL)

<sup>5</sup> Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)

# TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	iii
REMERCIEMENTS.....	iv
TABLE DES MATIÈRES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES ACRONYMES.....	xiii
LISTE DES SYMBOLES ET INDICES.....	xiv
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1. Composites renforcés de fibres de bois.....	3
1.1.1. Les fibres de bois.....	3
1.1.2. Matrices plastiques et mise en forme des CBP.....	7
1.1.3. Adjuvants.....	8
1.2. Méthodes de mesure expérimentales.....	9
1.2.1. Rhéomètre à couple.....	9
1.2.2. Propriétés mécaniques.....	11
1.3. Modélisation des propriétés mécaniques.....	13
1.3.1. Règles des mélanges.....	14
1.3.2. Modélisation de la résistance et de la rigidité.....	15
1.4. Effets des propriétés des particules de bois dans les CBP.....	19
1.4.1. Effets de la morphologie des fibres/particules.....	20
1.4.2. Effets d'autres propriétés.....	25
1.5. Intérêts de la recherche et problématique.....	26

CHAPITRE II : ÉTABLISSEMENT DU PLAN DE RECHERCHE .....	28
2.1. Objectifs, hypothèses et démarche.....	28
2.2. Matériel et méthodes.....	29
2.2.1. Préparation et caractérisation des fibres de bois.....	29
2.2.2. Plastique et additifs.....	31
2.2.3. Caractérisation du PEHD fondu chargé de fibres PCTM.....	31
2.2.4. Formation des CBP.....	32
2.2.5. Méthodes de caractérisation des CBP.....	38
2.2.6. Modélisation des propriétés mécaniques des CBP .....	40
CHAPITRE III : RÉSULTATS .....	41
3.1. Caractéristiques de couple (rhéomètre à couple).....	42
3.2. Propriétés physiques des CBP .....	44
3.2.1. Densités apparentes et profils de densité aux rayons X.....	44
3.2.2. Essais d'immersion dans l'eau.....	47
3.3. Propriétés mécaniques des CBP .....	50
3.3.1. Formulations à 40 % en poids de fibres PCTM.....	50
3.3.2. Formulations à 58 % de bois ; utilisation de fibres PCTM comme additif dans une formulation à base de farine de pin.....	55
3.4. Modélisation des propriétés mécaniques des CBP .....	57
3.4.1. Fraction volumique de fibres .....	58
3.4.2. Résistance des CBP .....	58
3.4.3. Rigidité des CBP.....	61
CHAPITRE IV : DISCUSSION .....	65
4.1. Caractéristiques de couple et mise en forme .....	65
4.2. Effets de la longueur des fibres dans les CBP .....	66
4.3. Autres résultats pertinents.....	73
4.3.1. Effets du procédé de mise en forme.....	74

4.3.2. Relations entre la densité apparente et les propriétés mécaniques des CBP .....	78
4.3.3. Comparaison avec le matériau de la matrice et effets des additifs .....	79
CHAPITRE V : CONCLUSIONS .....	82
LISTE DES RÉFÉRENCES .....	84
ANNEXE 1 : EXEMPLE DE RÉSULTAT DE MESURE D'UNE DISTRIBUTION DE LONGUEUR DE FIBRES AVEC L'AQF ET DE CALCUL DE LA LONGUEUR MOYENNE EN NOMBRE.....	89
ANNEXE 2 : DIMENSIONS DES ÉCHANTILLONS ET NOMBRE DE MESURES UTILISÉES POUR LA CARACTÉRISATION DES CBP .....	91
ANNEXE 3 : COURBE TYPIQUE EN TRACTION DU PEHD.....	92

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Caractéristiques typiques des cellules de bois .....	5
Tableau 1.2 : Caractéristiques de farines de bois standards .....	6
Tableau 2.1 : Longueur (L), diamètre (D) et ratio L/D (moyenne en nombre, équation 1-1) pour les trois classes de longueur de fibres PCTM mesurées avec l'AQF, après réduction mécanique .....	31
Tableau 2.2 : Conditions expérimentales pour les essais au rhéomètre à couple .....	32
Tableau 2.3 : Paramètres machines utilisés pour la formation des CBP .....	34
Tableau 2.4 : Formulations des CBP extrudés et moulés par injection avec 40 % en poids des trois classes de longueur de fibres PCTM.....	34
Tableau 2.5 : Formulations des CBP extrudés avec 58 % en poids de bois : utilisation de fibres PCTM comme additif dans une formulation à base de farine de pin 60 mailles .....	35
Tableau 2.6 : Essais normalisés utilisés pour la caractérisation des CBP. ....	38
Tableau 3.1 : Caractéristiques de couple du PEHD fondu chargé des différentes classes de longueur et proportions massiques de fibres PCTM au rhéomètre à couple à 50 RPM et 180°C (coefficient de variation entre parenthèses).....	42
Tableau 3.2 : Densité apparente des CBP pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM (coefficient de variation entre parenthèses) .....	45
Tableau 3.3 : Absorption massique et gonflement volumique des CBP en immersion dans l'eau pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM.....	47

Tableau 3.4 : Propriétés en flexion et énergie d'impact Izod des CBP pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM (coefficient de variation entre parenthèses).....	51
Tableau 3.5 : Propriétés en traction des CBP pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM (coefficient de variation entre parenthèses).....	52
Tableau 3.6 : Propriétés en traction et densité des matériaux utilisées pour la modélisation et ratio longueur/diamètre (L/D) de fibres PCTM.....	57
Tableau 3.7 : Contrainte maximale en traction des CBP pour les différents ratios longueur/diamètre (L/D) de fibres PCTM selon le modèle de Kelly-Tyson et contrainte dans les fibres selon la règle des mélanges .....	60
Tableau 3.8 : Module d'élasticité en traction des CBP pour différents ratios longueur/diamètre (L/D) de fibres PCTM selon le modèle de Cox-Kelly et le modèle de Nielson .....	63
Tableau A.1: Exemple de résultat de mesure d'une distribution de longueur de fibres PCTM avec l'AQF (classe Longue). .....	90
Tableau A.2 : Dimensions des échantillons et nombre de mesures utilisées pour la caractérisation des CBP.....	91

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Schéma d'un rhéomètre à couple (Schramm, 1994) .....	9
Figure 1.2 : Courbe couple-temps typique d'un essai dans un rhéomètre à couple .....	10
Figure 1.3 : Cellule isolée d'un composite et élément différentiel en équilibre d'une fibre .....	16
Figure 1.4 : Distributions de cisssion et de contrainte normale en fonction de la longueur de la fibre selon l'équation 1-18 .....	18
Figure 1.5 : Longueur des fibres avant et après la formation de CBP pour différents paramètres d'extrusion .....	21
Figure 1.6 : Échantillon de CBP monoparticule .....	24
Figure 2.1 : Appareils utilisés pour la préparation et la caractérisation des fibres PCTM .....	30
Figure 2.2 : Distributions des trois classes de longueur de fibres PCTM mesurées avec l'AQF, après réduction mécanique .....	30
Figure 2.3 : Schéma des étapes de formation des CBP .....	33
Figure 2.4 : Photos des principaux équipements utilisés pour la formation des CBP .....	37
Figure 2.5 : Photos des principaux équipements utilisés pour la caractérisation .....	39
Figure 3.1 : Exemples typiques de courbes couple-temps de PEHD fondu pur et chargé de 40 % en poids des différentes classes de longueur de fibres PCTM au rhéomètre à couple à 50 RPM et 180°C .....	43

Figure 3.2 : Exemples typiques de courbes couple-temps de PEHD fondu pur et chargé des différentes proportions massiques de fibres PCTM de la classe Longue au rhéomètre à couple à 50 RPM et 180°C .....	43
Figure 3.3 : Variation de l'énergie mécanique du PEHD fondu pur et chargé des différentes classes de longueur et proportions massiques de fibres PCTM au rhéomètre à couple à 50 RPM et 180°C .....	44
Figure 3.4 : Exemples typiques de profils de densité de CBP à 40 % de bois pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM mesurés au densitomètre à rayons X .....	46
Figure 3.5 : Exemples typiques de profils de densité de CBP à 58 % de bois mesurés au densitomètre à rayons X.....	46
Figure 3.6 : Exemples typiques de courbes d'absorption massique en fonction du temps d'immersion dans l'eau des CBP pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM.....	48
Figure 3.7 : Exemples typiques de courbes de gonflement volumique en fonction du temps d'immersion dans l'eau des CBP pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM.....	49
Figure 3.8 : Variation de l'absorption massique et du gonflement volumique des CBP en fonction de la longueur des fibres PCTM pour différents temps d'immersion dans l'eau.....	49
Figure 3.9 : Gonflement volumique en fonction de l'absorption massique des CBP en immersion dans l'eau pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM.....	50
Figure 3.10 : Exemples typiques de courbes contrainte-déformation en flexion des CBP pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM .....	53
Figure 3.11 : Exemples typiques de courbes contrainte-déformation en traction des CBP pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM .....	53
Figure 3.12 : Variation des propriétés en traction, en flexion et de la ténacité des CBP en fonction de la longueur des fibres PCTM .....	54

Figure 3.13 : Module de rupture (MOR) et module d'élasticité (MOE) en flexion des CBP extrudés et moulés par injection en fonction de la longueur des fibres PCTM.....	55
Figure 3.14 : Exemples typiques de courbes contrainte-déformation en flexion des CBP pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM utilisées comme additif dans une formulation à base de farine de pin.....	56
Figure 3.15 : Variation des propriétés en traction par rapport au contrôle en fonction de la longueur des fibres PCTM utilisées comme additif.....	56
Figure 3.16 : Contrainte maximale des composites ( $\sigma_{c,max}$ ) en traction en fonction du ratio longueur/diamètre (L/D) de fibres PCTM selon le modèle de Kelly-Tyson.....	61
Figure 3.17 : Module d'élasticité des composites ( $E_c$ ) en traction en fonction du ratio longueur/diamètre (L/D) des fibres PCTM selon le modèle de Cox-Kelly et le modèle de Nielson.....	64
Figure 4.1 : Développement du module de rupture (MOR) en traction de composites bois-plastiques en fonction du ratio longueur/diamètre des particules de bois, selon différentes études .....	70
Figure 4.2 : Développement du module d'élasticité (MOE) en traction de composites bois-plastiques en fonction du ratio longueur/diamètre des particules de bois, selon différentes études. ....	71
Figure 4.3 : Micrographes électroniques avec un agrandissement de 100 fois pris sur la surface des échantillons a) moulés par injection et b) extrudés .....	75
Figure 4.4 : Micrographes électroniques avec un agrandissement de 450 fois pris sur la surface des échantillons a) moulés par injection et b) extrudés. I = trou ; II = empreinte de fibre ; III = bout de fibre .....	77
Figure 4.5 : Module de rupture (MOR) et module d'élasticité (MOE) en traction en fonction de la densité de CBP issus de différents procédés de mise en forme, proportions massiques, essences et ratios L/D de particules de bois.....	79
Figure A.1 : Courbe typique en traction du PEHD.....	92

## LISTE DES ACRONYMES

ASTM	American society of testing and materials
CBP	Composite bois-plastique
EBS	Éthylène bis stéaramide
AQF	Analyseur de la qualité de la fibre
MOE	Module d'élasticité ou de Young, E (GPa)
MOR	Module de rupture ou contrainte maximale, $\sigma_{\max}$ (MPa)
PCTM	Pâte chimico-thermomécanique
PE / PEHD	Polyéthylène / polyéthylène haute densité
PEMA	Polyéthylène maléaté
PP	Polypropylène
PS	Polystyrène
PTM	Pâte à papier thermomécanique
PVC	Polychlorure de vinyle
RPM	Rotations/révolutions par minute

## LISTE DES SYMBOLES ET INDICES

### Latin

$\%$	Pourcentage
$A$	Aire de section ( $\text{mm}^2$ )
$b$	Largeur d'une poutre (mm)
$C$	Couple (Nm)
$D$	Diamètre d'une fibre (mm)
$E$	Module d'élasticité, MOE (GPa)
$E_M$	Énergie mécanique (J)
$g$	Accélération gravitationnelle ( $\text{m/s}^2$ )
$G$	Module de cisaillement ou de Coulomb (GPa)
$h$	Épaisseur d'une poutre (mm) Hauteur du pendule (m)
$L$	Longueur d'une fibre (mm) Distance entre les appuis en flexion (mm)
$l$	Longueur (mm)
$L/D$	Ratio longueur/diamètre
$L_n$	Longueur moyenne en nombre (mm)
$M$	Masse (kg)
$m$	Fraction massique (entre 0 et 1)
$N$	Nombre de classes
$P$	Charge (N)
$t$	Temps (secondes)
$V$	Volume ( $\text{mm}^3$ )
$W$	Énergie potentielle (J)

### Grec

$\delta$	Déflexion nominale (mm)
$\varepsilon$	Déformation (%)
$\eta$	Coefficient d'efficacité de renfort des fibres
$\nu$	Coefficient de poisson
$\xi$	Constante utilisée pour la modélisation
$\pi$	Constante géométrique, environ égale à 3,1416
$\rho$	Densité (kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	Contrainte normale (MPa)
$\tau$	Cission (MPa)
$v$	Fraction volumique (entre 0 et 1)
$\varphi$	Constante utilisée pour la modélisation
$\Phi$	Diamètre du matériel de matrice qui entoure la fibre (mm)

### Indice

$c$	Composite
$f$	Fibre
$k$	Numéro de la classe
$m$	Matrice
$max$	Maximal (ale)
$i$	Initial (ale)

## INTRODUCTION

La hausse des coûts et la disponibilité décroissante des produits de bois débités ont amené les manufacturiers de matériaux de construction à considérer des matériaux non traditionnels (Falk et al, 1999). Les composites bois-plastiques (CBP), nouveau matériau constitué d'une matrice de plastique chargée de particules de bois, ont attiré l'attention des scientifiques et industriels à cause des nombreux avantages qu'ils présentent. Ce matériau peut être fabriqué selon différents procédés déjà utilisés dans l'industrie du plastique, ce qui présente un avantage au niveau de la formabilité, de la productivité et des coûts de production (Saheb et Jog, 1999). Les fibres de bois ont des caractéristiques intéressantes : elles sont peu coûteuses, renouvelables, biodégradables, non abrasives et ont des propriétés spécifiques élevées.

Il est logique de s'attendre à ce que les matériaux à base de fibres de bois soient influencés par la morphologie des fibres (Bodig et Jayne, 1993). Il y a cependant peu d'information disponible en ce qui concerne le rôle de la taille des fibres dans les produits CBP. Ainsi, l'objectif général de cette étude est de comprendre le rôle de la longueur des fibres dans le procédé de formation et dans le développement des propriétés des CBP.

Dans cette étude, les caractéristiques d'un plastique fondu chargé de différentes longueurs de fibres de bois ont été étudiées afin de comprendre le rôle de ce paramètre dans la formation des CBP. Ensuite, des CBP à base de différentes longueurs de fibres de bois ont été fabriqués selon différents procédés. Les CBP ont été caractérisés en termes de propriétés physico-mécaniques. Finalement, des techniques de modélisation ont été utilisées afin de mieux comprendre le rôle des dimensions des fibres dans le développement des propriétés mécaniques des CBP.

La structure de ce mémoire est classique. Le chapitre I apporte des notions théoriques utiles à la compréhension des résultats et résume les publications scientifiques pertinentes dans le cadre de cette étude. Le chapitre II définit les objectifs de recherche, les hypothèses, les matériaux et les méthodes utilisés. Le chapitre III présente les résultats. Finalement, nous discuterons des résultats dans le chapitre IV et tirerons les grandes conclusions dans le chapitre V.

# **CHAPITRE I**

## **REVUE DE LITTÉRATURE**

Ce chapitre présentera d'abord quelques notions théoriques nécessaires à la compréhension de l'ensemble du travail. Ensuite, un résumé des publications scientifiques conduira à la problématique et à l'intérêt du projet de recherche.

### **1.1. Composites renforcés de fibres de bois**

Un composite est constitué d'au moins deux composants, qui forment une structure macroscopique. Un composite peut avoir des propriétés que ses composants ne peuvent offrir individuellement. L'adhésion entre ces deux composants joue un rôle important, car les contraintes sont transmises de la matrice vers les fibres par cisaillement à l'interface (Gibson, 1994). Cette caractéristique joue un rôle particulièrement important dans les matériaux composites bois-plastiques (CBP) (Gamstedt et al., 2007 ; Wolcott et Englund, 1999).

#### **1.1.1. Les fibres de bois**

Les fibres de bois ont des propriétés physiques différentes des fibres synthétiques (fibres de verre, de carbone, etc.) traditionnellement utilisées dans les composites renforcés de fibres discontinues. Elles sont renouvelables, biodégradables, non abrasives, hydrophiles

et peuvent être la cible d'attaques biologiques. Une autre particularité souvent importante lors de la mise en forme des produits à base de bois est que la composition de la paroi cellulaire du bois subit des changements chimiques au-delà de 160°C (Saheb et Jog, 1999).

Le bois est fait de cellules allongées dans le sens longitudinal de l'arbre. Dans le bois de feuillu, on retrouve trois types de cellules : les vaisseaux, les fibres et les parenchymes (Tableau 1.1). Les cellules structurales du bois sont les fibres, elles sont caractérisées par un grand ratio longueur/diamètre (L/D). Les vaisseaux ont un diamètre plus grand que les fibres et leur fonction est de transporter l'eau et les éléments nutritifs. Le troisième type de cellules, les parenchymes, sert principalement à emmagasiner les nutriments. Dans le bois des conifères, plus que 85 % des cellules sont des trachéides et fournissent le support mécanique en plus de transporter les fluides. Ces trachéides sont uniquement accompagnées par de cellules de parenchymes (Bodig et Jayne, 1993).

Le procédé qui consiste à fractionner le bois en cellules individuelles, de façon chimique ou mécanique, est appelé défibrage (Bodig et Jayne, 1993). Les procédés plus utilisés sont ; la mise en pâte mécanique de meule, la mise en pâte thermomécanique (PTM), la mise en pâte Kraft et la mise en pâte chimico-thermomécanique (PCTM) (Garceau, 1987). Les dimensions des cellules de bois varient selon le type de cellule, l'essence et à l'intérieure de l'essence, de même qu'à l'intérieure d'un même individu (Tableau 1.1). Dans le cadre de ce travail, nous utiliserons le terme « fibre longue » pour désigner une cellule de bois de feuillu ou de bois de conifère dans sa forme naturelle.

Tableau 1.1 : Caractéristiques typiques des cellules de bois (Boding et Jayne, 1993)

	Bois des conifères		Bois des feuillus		
	Trachéide	Parenchyme	Fibre	Vaisseau	Parenchyme
Volume (%)	85 - 95	5 - 12	37 - 70	6 - 55	10 - 32
Longueur, L (mm)	2,5 - 7,0	-	0,6 - 2,3	0,2 - 1,3	-
Diamètre, D (µm)	34 - 120	-	20 - 60	40 - 700	-
Paroi cellulaire, T (µm)	2 - 7	-	1 - 11	-	-
L/D (ratio)	30 - 67,5	-	20 - 50	0,5 - 4,5	-
L/T (ratio)	45 - 105	-	20 - 50	0,5 - 22,5	-

Des appareils modernes, comme les appareils optiques automatiques, permettent de mesurer rapidement de grandes quantités de fibres de bois. Il existe différentes façons de définir la longueur moyenne d'un échantillon fibres, la plus simple est la longueur moyenne en nombre (Équation 1-1) (Carvalho et al. 1997).

$$L_n = \frac{\sum_{k=1}^N (n_k l_k)}{\sum_{k=1}^N n_k} \quad (1-1)$$

Où  $L_n$  = Longueur moyenne en nombre (mm)  
 $n_k$  = Nombre de fibres dans la classe  $k$   
 $l_k$  = Longueur moyenne de la classe  $k$  (mm)  
 $N$  = Nombre de classes

Dans les CBP, le bois n'est généralement pas sous forme de fibres, mais plutôt sous forme de farine de bois (Wolcott et Englund, 1999). La farine est constituée d'amas de fibres brisées. On l'obtient en réduisant le bois en petites particules par une action mécanique. La sciure de bois, résidu de l'industrie du sciage, en est un exemple. Une variable généralement utilisée pour caractériser la taille des particules de farine de bois est

le nombre de mailles par pouce linéaire du tamis, appelé « U.S. mesh » en anglais, ou « maille É.U. » en français (Tableau 1.2).

Tableau 1.2 : Caractéristiques de farines de bois standards (Stark et Rowlands, 2003)

Tamis standards (maille É.U.)	20	40	60	80	100	120	140
Ouverture des mailles du tamis (µm)	841	400	250	177	149	125	105
Ratio longueur/diamètre (L/D)	3,53	3,35	4,23	4,52	4,53	4,11	3,73

À cause de la nature hygroscopique du bois, la teneur en humidité des produits à base de bois s'équilibre avec l'environnement ambiant. De l'eau sous forme liée s'accumule dans la paroi cellulaire de la fibre jusqu'au point de saturation, généralement aux alentours de 30 % d'humidité sur une base massique (selon l'espèce). Au-delà de ce point, l'eau s'accumule dans les lumens sous forme d'eau libre. L'eau liée est particulièrement importante, car elle modifie les propriétés physico-mécaniques du bois tandis que l'eau libre n'a pas d'effets significatifs, à moins d'être gelée. La teneur massique en humidité d'un produit à base de bois est définie selon l'équation 1-2 et le gonflement volumique selon l'équation 1-3 (Bodig et Jayne, 1993).

$$H = \frac{M_{H2O}}{M_o} \times 100 = \frac{M_H - M_o}{M_o} \times 100 \quad (1-2)$$

$$\text{Gonflement volumique} = \frac{V_H - V_i}{V_i} \times 100 \quad (1-3)$$

Où  $H$  = Teneur massique en humidité (%)

$M_H$  = Masse à la teneur en humidité  $H$  (kg)

$M_o$  = Masse anhydre (kg)

$M_{H20}$  = Masse gagnée en eau (kg)

$V_H$  = Volume à la teneur en humidité  $H$  ( $mm^3$ )

$V_i$  = Volume à la teneur en humidité initiale ( $mm^3$ )

### 1.1.2. Matrices plastiques et mise en forme des CBP

Le rôle primaire de la matrice est de contenir les fibres pour former une unité structurale, de transférer aux fibres de renfort les charges appliquées sur le matériau et de protéger les fibres des irritants externes (Gibson, 1994). Dans les CBP par exemple, la matrice plastique protège le bois des champignons, des insectes, des bactéries et de la pourriture (Lu et al., 2003). Dans bien des cas, la matrice contribue aussi de façon désirable aux propriétés physico-mécaniques du composite comme la ductilité, la stabilité dimensionnelle et l'isolation électrique (Gibson, 1994). On distingue deux grands types de plastique : thermoplastique et thermodurcissable.

Les produits composites à base de bois traditionnels dont ; les panneaux de gaufres ou de lamelles orientées (OSB), les panneaux de fibres à densité moyenne (MDF), les contreplaqués et autres produits de bois lamellé-collé (LVL) utilisent le procédé de thermoconsolidation et des résines thermodurcissables comme l'urée-formaldéhyde et le phénol-formaldéhyde (Falk et al., 1999). Pour former ces produits, on mélange les particules (ou on assemble les placages) de bois et la résine, puis on apporte de la pression et de la chaleur pour faire polymériser la résine.

Dans les CBP, les thermoplastiques sont les plus utilisés, en particulier le

polyéthylène et le polyéthylène haute densité (PE et PEHD), le polypropylène (PP), le polystyrène (PS) et le polychlorure de vinyle (PVC) (Wolcott, 2003). Ces plastiques présentent l'avantage d'avoir un point de fusion bas. En effet, cette caractéristique limite le changement chimique du bois lors de la mise en forme du CBP (Saheb et Jog, 1999). Les CBP peuvent être mis en forme par différentes techniques déjà utilisées dans l'industrie du plastique. Les plus courantes pour la formation des CBP sont l'extrusion et le moulage par injection. Ces deux procédés profitent des propriétés rhéologiques des polymères liquides pour disperser les particules de bois dans la matrice et pour mettre en forme le produit final (Wolcott, 2003). Le procédé de mise en forme est choisi en fonction de l'application visée, mais peut également influencer les propriétés du produit final (Stark et al., 2004).

### **1.1.3. Adjuvants**

De nombreux adjuvants (ou additifs) sont utilisés afin d'améliorer les propriétés des CBP. Parmi ceux-ci, les lubrifiants aident à la mise en forme du produit final. La nature fortement polaire et hydrophile du bois rend difficile la compatibilité avec les matrices plastiques, non polaires et hydrophobes. Généralement, l'utilisation d'un agent coupleur améliore l'adhésion et favorise un transfert de charge de la matrice vers les fibres de renfort (Wolcott et al., 2001). Saheb et Jog (1999) résumant les paramètres importants pour le développement d'un CBP : la stabilité thermique des fibres ; une bonne adhésion fibre-matrice ; et une distribution uniforme des fibres dans la matrice. Selon la qualité de l'interface fibre-matrice, différents mécanismes de rupture peuvent être activés : bris des fibres ; dommage à la matrice ; et décollement des fibres de la matrice (Lee et al., 2001).

## 1.2. Méthodes de mesure expérimentales

Cette section couvrira des notions théoriques de base relatives aux techniques de mesure utilisées dans cette étude.

### 1.2.1. Rhéomètre à couple

Le rhéomètre à couple simule les conditions dans les équipements de mise en forme utilisés pour la formation des CBP, notamment les procédés d'extrusion et de moulage par injection (Schramm, 1994). Cet appareil est donc un outil de développement intéressant et il permet de faire des essais avec une très petite quantité de matériel. Son fonctionnement est simple (Figure 1.1) : un moteur fait tourner des mélangeurs dans une chambre contenant un liquide visqueux et l'appareil mesure le couple en fonction du temps.

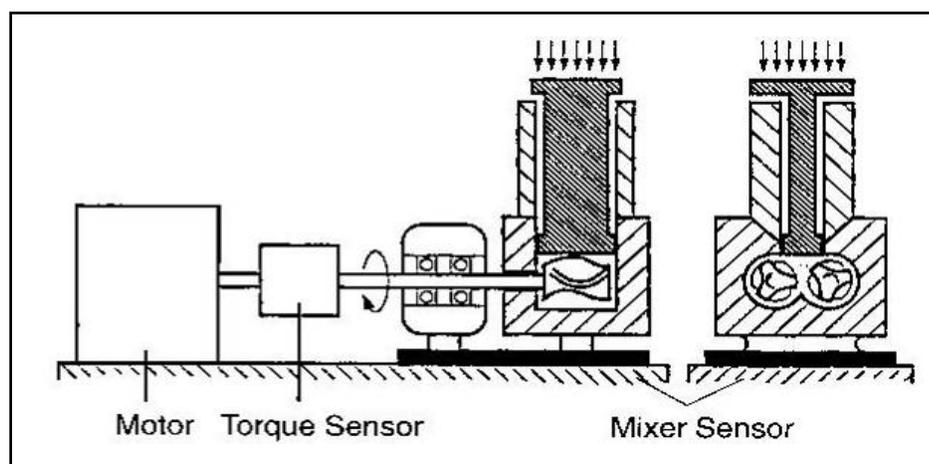


Figure 1.1 : Schéma d'un rhéomètre à couple (Schramm, 1994)

Une courbe typique couple en fonction du temps d'un essai dans un rhéomètre à couple (Figure 1.2) comprend différentes étapes dont (Soucy, 2007) ; une zone

« d'alimentation » durant laquelle l'utilisateur remplit la chambre de mélange, une valeur de « couple maximum » atteinte un peu avant la fusion du plastique, une zone de « fusion et mélangeage » et le couple se « stabilise » après un certain temps. Dans la formation d'un CBP, on retrouve des étapes similaires (Schramm, 1994). Avec le rhéomètre à couple, on peut mesurer des paramètres physiques importants dans les procédés de mise en forme des CBP dont ; le couple causé par la résistance du liquide mis en mouvement, qui est proportionnel à la viscosité, et l'énergie mécanique dépensée par la dissipation visqueuse du liquide, calculée en utilisant l'aire sous la courbe couple-temps et la vitesse de rotation des mélangeurs (Équation 1-4) (Schramm, 1994). Cet appareil ne permet cependant pas de mesurer la viscosité en unités internationalement reconnues comme par exemple en Pas.

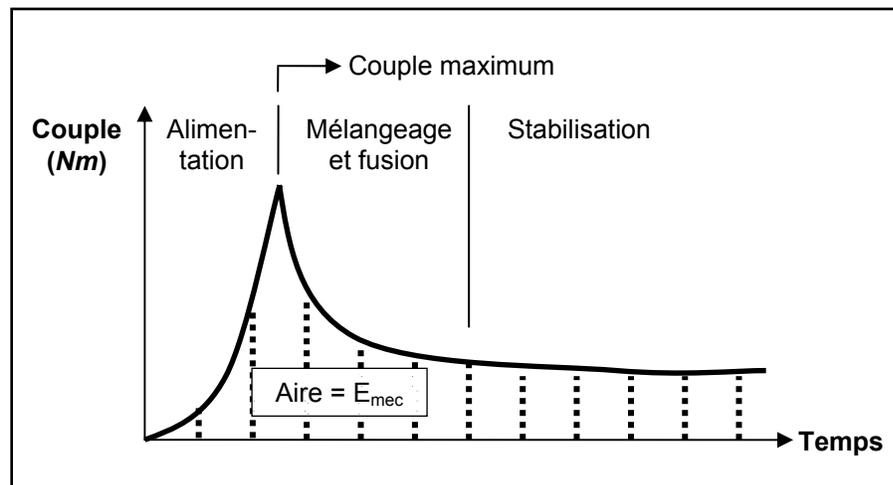


Figure 1.2 : Courbe couple-temps typique d'un essai dans un rhéomètre à couple (adapté de Soucy, 2007)

$$E_M = \frac{2\pi RPM}{60} \int_t C(t) dt \quad (1-4)$$

Où  $E_M$  = *Énergie mécanique (J)*  
 RPM = *Rotations par minutes*  
 $C$  = *Couple (Nm)*  
 $t$  = *Temps (s)*

### 1.2.2. Propriétés mécaniques

Lors de l'essai de flexion trois points (poutre de section constante supportée en deux points et chargée au centre), les contraintes et les déformations maximales se retrouvent au centre de la poutre, sur les surfaces horizontales. On calcule ces valeurs à l'aide des équations 1-5 et 1-6 (Baïlon et Dorlot, 2000).

$$|\sigma| = 3PL / 2bh^2 \quad (1-5)$$

$$|\varepsilon| = \frac{6\delta h}{L^2} \times 100 \quad (1-6)$$

Où  $\sigma$  = *Contrainte en flexion trois points (MPa)*  
 $\varepsilon$  = *Déformation en flexion (%)*  
 $P$  = *Charge appliquée verticalement au centre (N)*  
 $L$  = *Distance entre les appuis (mm)*  
 $b$  = *Largeur de la poutre (mm)*  
 $h$  = *Hauteur de la poutre (mm)*  
 $\delta$  = *Déflexion nominale au centre de la poutre (mm)*

Lorsque la contrainte en flexion est évaluée à la charge maximale, on obtient la contrainte maximale, fréquemment appelée module de rupture (MOR) dans le domaine des produits à base de bois. Le MOR est une mesure qui caractérise la résistance d'un matériau.

Le module d'élasticité (MOE) en flexion, aussi appelé module d'élasticité apparent en flexion, est déterminé par la pente de la courbe contrainte-déformation en un point inférieur à la limite d'élasticité du matériau. Le MOE est une mesure qui caractérise la rigidité d'un matériau.

Lorsqu'on soumet une éprouvette de section constante en traction simple, la contrainte et la déformation sont données par les équations 1-7 et 1-8 (Baïlon et Dorlot, 2000).

$$\sigma = P / A_i \quad (1-7)$$

$$\varepsilon = \frac{(l - l_i)}{l_i} \times 100 = \frac{\Delta l}{l_i} \times 100 \quad (1-8)$$

Où  $\sigma$  = Contrainte en traction (MPa)

$\varepsilon$  = Déformation en traction, ou élongation (%)

$P$  = Charge (N)

$A_i$  = Section initiale (mm<sup>2</sup>)

$l_i$  = Longueur initiale (mm)

$l$  = Longueur finale (mm)

La valeur de la contrainte maximale en traction est donnée par le maximum de la courbe contrainte-déformation. Tout comme en flexion on peut appeler cette valeur MOR. Le MOE en traction, aussi appelé module d'Young, est déterminé par la pente de la courbe contrainte-déformation en un point inférieur à la limite d'élasticité du matériau. Enfin, on détermine l'énergie de déformation par unité de volume avec l'aire sous la courbe contrainte-déformation.

Pour évaluer la ténacité d'un matériau, on peut le soumettre à un essai de résilience, comme l'essai d'impact Izod. Au cours de cet essai, on rompt une éprouvette entaillée (l'entaille fait office d'amorce de fissure) à l'aide d'un pendule qu'on laisse tomber sur la pièce. Après rupture de l'éprouvette, le pendule remonte à une hauteur  $h$ , dépendante de l'énergie absorbée par l'impact (Équation 1-9) (Baïlon et Dorlot, 2000). La ténacité peut également être estimée par l'énergie de déformation de l'essai de traction.

$$W = Mg (h_i - h) \quad (1-9)$$

Où  $W$  = Énergie d'impact absorbée par l'éprouvette (J)

$M$  = Masse du pendule (kg)

$g$  = Accélération gravitationnelle, environs  $9,81 \text{ m/s}^2$

$h_i$  = Hauteur initiale du pendule (m)

$h$  = Hauteur de remontée du pendule (m)

### 1.3. Modélisation des propriétés mécaniques

Des techniques pour modéliser le comportement mécanique des composites renforcés de fibres discontinues ont été développées à l'origine pour des applications en aérospatial, par exemple pour les composites renforcés de fibres de carbone (Gamstedt et al., 2007). La modélisation vise à mettre notre compréhension des principes physiques sous forme d'équations mathématiques, et ainsi de valider (ou d'invalidier) nos hypothèses.

Le développement de produits à base de bois est difficile à cause de la grande diversité naturelle des fibres (ou dû aux différents procédés de raffinage). Les techniques de modélisation sont un outil de développement intéressant pour comprendre les implications

de la morphologie des fibres de bois dans le comportement mécanique des CBP (Gamstedt et al., 2007). Cette section présente des principes de base utilisés pour la modélisation de composites renforcés de fibres discontinues.

### 1.3.1. Règles des mélanges

Les propriétés d'un composite, qui est constitué d'au moins deux composants, dépendent des propriétés des composants en présence et de leur fraction volumique dans le matériau. Ainsi, il convient d'adopter des « règles de mélanges » afin de modéliser les propriétés mécaniques d'un composite (Équations 1-10 à 1-12) (Gibson, 1994). Ces relations sont vérifiées lorsque les fibres sont alignées dans le sens d'application de la charge et que la déformation imposée au composite est égale à celle de la matrice et des fibres. Lorsque ce n'est pas le cas, on utilise des « règles des mélanges modifiées » en ajoutant un coefficient d'efficacité de renfort des fibres (Équations 1-13 à 1-14). Ce coefficient dépend de la distribution et de l'orientation des fibres dans la matrice ainsi que de la qualité de l'adhésion à l'interface fibre-matrice.

$$v_f + v_m = v_c \quad (1-10)$$

$$m_f + m_m = m_c \quad (1-11)$$

$$\rho_c = v_f \rho_f + v_m \rho_m = v_f \rho_f + (1 - v_f) \rho_m \quad (1-12)$$

$$\sigma_c = \eta_\sigma v_f \sigma_f + v_m \sigma_m = \eta_\sigma v_f \sigma_f + (1 - v_f) \sigma_m \quad (1-13)$$

$$E_c = \eta_E v_f E_f + v_m E_m = \eta_E v_f E_f + (1 - v_f) E_m \quad (1-14)$$

Où  $v$  = Fraction volumique du composant (entre 0 et 1)  
 $m$  = Fraction massique du composant (entre 0 et 1)  
 $\rho$  = Densité du composant  
 $\sigma$  = Contrainte  
 $E$  = Module d'élasticité (MOE)  
 $\eta$  = Coefficient d'efficacité de renfort des fibres

Et les indices :  $c, m, f$  = Composite, matrice, fibre

### 1.3.2. Modélisation de la résistance et de la rigidité

On retrouve, dans la littérature, des modèles qui permettent de mettre en relation les caractéristiques des fibres de renfort avec les propriétés mécaniques du composite. Dans cette section, nous résumerons les principes de base des modèles classiques.

On commence par isoler une cellule du composite (composée d'une fibre entourée du matériel de la matrice) et on prend un élément différentiel de fibre en équilibre (Figure 1.3) (Gibson, 1994). Lorsque la cellule est soumise à une contrainte en traction appliquée au composite, elle se déforme. Comme la matrice est moins rigide (plus élastique) que la fibre, il y a apparition de cisaillement à l'interface fibre-matrice puisque la matrice se déforme élastiquement plus que la fibre. On pose comme hypothèse que l'essentiel du transfert de charge se fait par cisaillement autour de la fibre (pas de transfert de charge normale par les bouts de la fibre). On fait ensuite la somme des forces statiques sur l'élément différentiel de fibre en équilibre (Équation 1-15). Par des manipulations simples, on obtient le taux de variation des contraintes normales dans la fibre en direction  $x$  en fonction de la cisaillement à l'interface (Équation 1-16). Après intégration, on obtient la

contrainte normale dans la fibre en fonction de la cission sur le contour de la fibre  
(Équation 1-17).

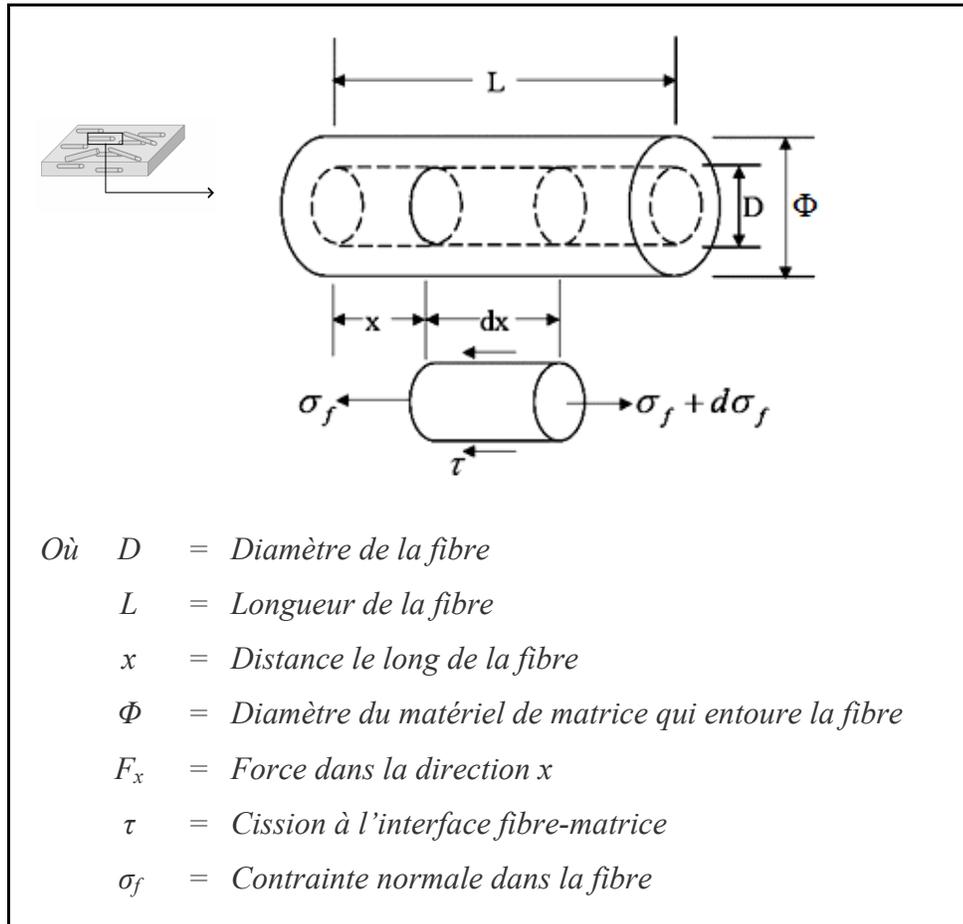


Figure 1.3 : Cellule isolée d'un composite et élément différentiel en équilibre d'une fibre (adapté de Gibson, 1994)

$$\sum F_x = (\sigma_f + d\sigma_f) \frac{\pi D^2}{4} - \sigma_f \frac{\pi D^2}{4} - \tau(\pi D) dx = 0 \quad (1-15)$$

$$\frac{d\sigma_f}{dx} = \frac{4\tau(x)}{D} \quad (1-16)$$

$$\sigma_f = \frac{4}{D} \int_0^x \tau(x) dx \quad (1-17)$$

Afin d'évaluer la contribution des fibres dans le composite (valeur de la contrainte transmise dans la fibre), on doit poser une fonction de cisssion  $[\tau(x)]$ . Le modèle de Kelly-Tyson utilise une valeur constante le long de la fibre (Équation 1-18) (Gibson, 1994). La contrainte maximale dans la fibre est donc atteinte au centre de la fibre, soit à  $x = L/2$  (Équation 1-19). On peut inclure ce modèle à la règle des mélanges modifiée (Équation 1-13) afin de prédire la résistance du composite (Équation 1-20) (Gibson, 1994).

$$\sigma_f = \frac{4}{D} \tau x \quad (1-18)$$

$$\sigma_{f,\max} = \frac{4}{D} \tau \left( \frac{L}{2} \right) = 2 \left( \frac{L}{D} \right) \tau \quad (1-19)$$

$$\sigma_{c,\max} = MOR = \eta_\sigma \nu_f 2(L/D)\tau + (1 - \nu_f)\sigma_m \quad (1-20)$$

Selon l'équation 1-18, on observe qu'à partir d'une certaine longueur de fibre, la contrainte transmise par cisssion à l'interface fibre-matrice atteint la résistance du matériau de la fibre (Figure 1.4). On appelle cette limite « longueur critique de transfert de charge ». Il faut noter que peu importe la fonction de cisssion posée, on arrive à la même conclusion (Gibson, 1994).

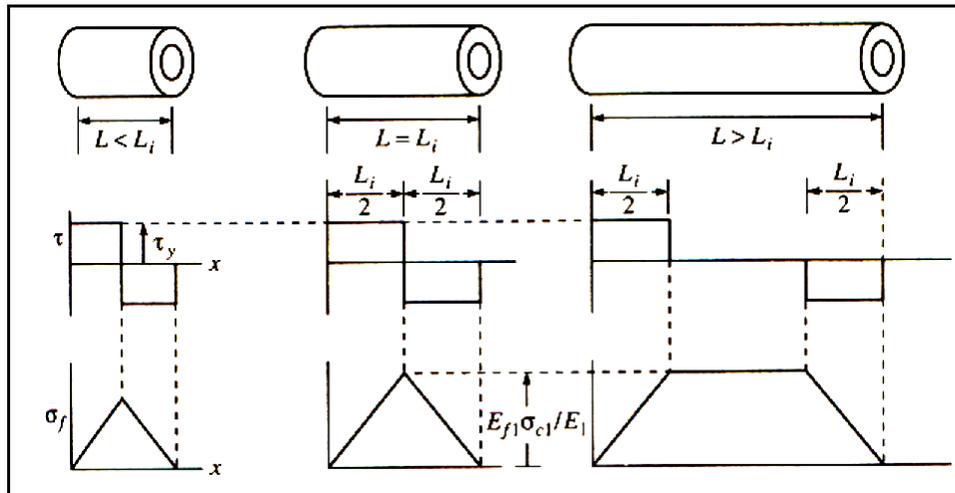


Figure 1.4 : Distributions de cisaillement et de contrainte normale en fonction de la longueur de la fibre selon l'équation 1-18 (Gibson, 1994)

Afin de modéliser la rigidité des composites renforcés de fibres, le modèle de Cox considère que le cisaillement à l'interface fibre-matrice est proportionnel à la différence entre le déplacement en un point sur la fibre et le déplacement que la matrice aurait s'il n'y avait pas de fibre (Gibson, 1994). Cette hypothèse est souvent appelée « shear lag theory ». Si on applique cette hypothèse à la somme des forces sur un élément de fibre en équilibre (Équation 1-15), on obtient le profil de contrainte dans la fibre, où  $\beta$  est un paramètre à déterminer (Équation 1-21).

$$\sigma_f = \frac{P}{A_f} = E_f e \left[ 1 - \frac{\cosh \beta(0.5L - x)}{\cosh(0.5\beta L)} \right] \quad (1-21)$$

Le modèle de Kelly utilise une forme analytique du paramètre  $\beta$ , fonction du module de cisaillement de la matrice (Équation 1-22). On peut appliquer ces résultats à la règle des mélanges modifiée (Équation 1-14) pour prédire le module d'élasticité du

composite (Équation 1-22) (Gibson, 1994).

$$E_c = MOE = \eta_E v_f \left[ 1 - \frac{\tanh(\beta L / 2)}{\cosh(\beta L / 2)} \right] E_f + (1 - v_f) E_m \quad (1-22)$$

$$\text{Avec } \beta^2 = \frac{2\pi G_m}{A_f E_f \ln(\Phi / D)}$$

Où  $G_m$  = Module de cisaillement (ou de rigidité) du matériau de la matrice  
 $A_f$  = Section normale d'une fibre

Un dernier modèle, celui de Nielson (Équation 1-23), considère le rapport de la rigidité du matériau des fibres de renfort sur la rigidité du matériau de la matrice. Il est adapté pour le cas particulier des fibres de renfort orientées aléatoirement (Lu, 2002).

$$E_c = E_m \left( \frac{1 + \xi \lambda v_f}{1 - \lambda \psi v_f} \right) \quad \text{Avec } \lambda = \frac{E_f / E_m - 1}{E_f / E_m + \xi} \quad \text{Et } \psi = 1 + v_f \left( \frac{1 - \phi}{\phi^2} \right) \quad (1-23)$$

Où  $\xi$  = Paramètre semi-empirique d'ajustement de courbe, proportionnel à  $L/D$   
 $\phi$  = Fraction maximale de compactage (Nielson propose  $\phi = 0,82$ )

#### 1.4. Effets des propriétés des particules de bois dans les CBP

Un aspect important dans le développement des produits CBP est la compréhension du rôle des caractéristiques des fibres de bois dans leurs propriétés et leur mise en forme (Soucy, 2007 ; Koubaa et al., 2004).

### **1.4.1. Effets de la morphologie des fibres/particules**

Dans la section précédente, nous avons vu par une approche théorique que les dimensions des fibres, plus particulièrement leur ratio  $L/D$ , influencent le comportement mécanique des composites renforcés de fibres discontinues. Cette section couvrira des études scientifiques qui ont vérifié expérimentalement les effets de la taille des particules de bois dans les CBP.

Quelques études ont démontré que la dimension des particules influence la formation des CBP. À titre d'exemple, Le Baillif et Oksman (2006) ont mis en évidence la difficulté d'alimenter une extrudeuse en fibres longues à cause de leurs faibles densités apparentes. Ils ont utilisé 20 et 30 % en poids de fibres de bois de conifère dans une matrice de PP. Les interactions fibre-fibre dans le mélange à sec résultent en une mauvaise dispersion des fibres dans la matrice. Cette étude montre que ce problème peut être atténué par une seconde extrusion. Cependant, cette deuxième étape résulte en une réduction de la taille des fibres car elles sont brisées dans le procédé d'extrusion. Les auteurs ont observé que les propriétés mécaniques des CBP en traction ne sont pas influencées par la dispersion, ni par la taille des fibres. Yam et al. (1990) ont également conclu qu'il y avait des relations entre le procédé d'extrusion et la longueur des fibres, notamment que la longueur finale des fibres dans le CBP dépend des paramètres d'extrusion (Figure 1.5). Ils ont utilisé de 20 à 60 % en poids de fibres de pâte à papier PCTM de tremble dans une matrice de PEHD. Un temps de mélangeage long et une vitesse élevée des vis de l'extrudeuse augmentent la dispersion des fibres dans la matrice, mais les brisent. Les

auteurs ont observé que les propriétés mécaniques des CBP varient inversement à la longueur des fibres et rapportent des résultats similaires par Wall (1987). Les auteurs posent l'hypothèse que la dispersion est un facteur dominant sur la longueur des fibres.

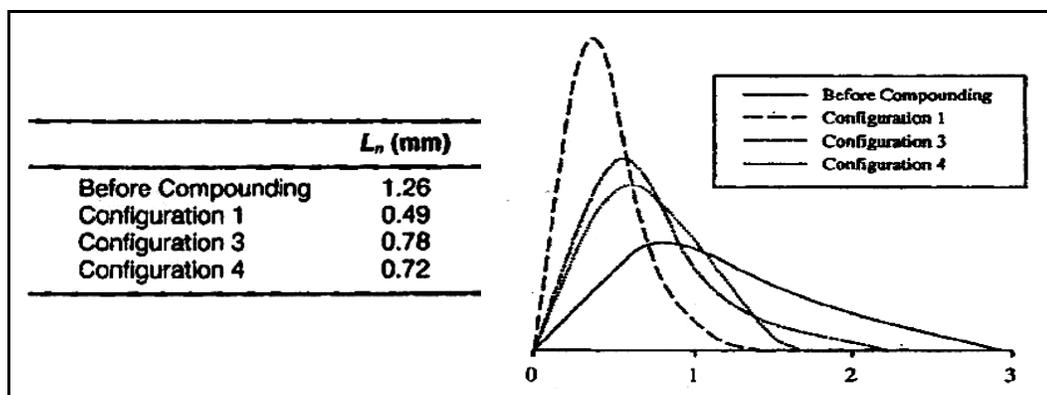


Figure 1.5 : Longueur des fibres avant et après la formation de CBP pour différents paramètres d'extrusion (Yam et al., 1990)

Le comportement rhéologique des mélanges bois-thermoplastiques à l'état fondu est un paramètre important dans la mise en forme des CBP, particulièrement pour les procédés d'extrusion et de moulage par injection (Li et al., 2004). Bien qu'il soit convenable d'étudier les propriétés rhéologiques des thermoplastiques chargés de fibres de bois à l'aide d'un rhéomètre à couple (Shi et al. 2006 ; Soucy et al. 2006 ; Li et al., 2004), cette technique est peu utilisée (Matuana et Kim, 2007). Afin de mieux comprendre les effets des caractéristiques des particules de bois dans la mise en forme des CBP, Matuana et Kim (2007) ont étudié les caractéristiques de fusion de mélanges de polychlorure de vinyle et de farine de bois en utilisant un rhéomètre à couple à une température de 180°C et une vitesse de rotation des mélangeurs de 50 RPM. Les particules fines (60 mailles É.U.) semblent être plus faciles à intégrer dans les procédés de fabrication que les plus grosses particules (20

mailles É.U.). Ils ont aussi observé que la viscosité du mélange augmente avec la proportion de fibres. Li et al. (2004) et Soucy et al. (2006) rapportent également que la viscosité des thermoplastiques chargés de particules de bois dans un rhéomètre à couple augmente avec la proportion de bois.

D'autres techniques peuvent être utilisées pour caractériser les propriétés rhéologiques des thermoplastiques fondus chargés de particules de bois. Par exemple Li et Wolcott (2005) ont utilisé un rhéomètre capillaire pour caractériser le comportement du PEHD à l'état fondu chargé de 30 à 70 % en poids de farine d'érable de différentes tailles (40 à 140 mailles É.U.). Cette étude montre que la viscosité augmente proportionnellement avec la charge massique de bois dans le thermoplastique tandis que l'effet de la taille des particules de farine est beaucoup moins significatif.

Quelques auteurs se sont intéressés aux effets de la dimension des particules de bois dans le comportement mécanique des produits CBP. À titre d'exemple, Julson et al. (2004) ont étudié les propriétés mécaniques de CBP moulés par injection avec différentes tailles de farine de bois (40, 60, 80 mailles É.U.). Les résultats de cette étude ne permettent cependant pas de faire des liens entre la taille des particules de bois et les propriétés mécaniques des CBP. Stark et Rowlands (2003) ont comparé les propriétés mécaniques de CBP à base de farine de pin à d'autres à base de fibres de bois de feuillu, obtenues par défibrage mécanique. Ils ont utilisé de 20 et 40 % en poids de bois dans une matrice de PP et le procédé de moulage par injection. L'utilisation de fibres qui ont un ratio L/D élevé comparativement aux particules de farine augmente le MOR des CBP en flexion et en

traction, augmente parfois le MOE et a un faible effet sur l'énergie d'impact. Cette étude mène à un résultat important : les propriétés mécaniques des CBP varient avec le ratio L/D, et non avec la longueur des particules.

Sanschagrín et al. (1988) ont étudié les effets du ratio L/D des fibres de bois sur les propriétés mécaniques des CBP. Ils ont utilisé une fraction volumique de 27 % de fibres de pâte à papier PCTM de tremble dans une matrice de PS et le procédé de moulage par injection. Lee et al. (2001) ont également étudié les effets de la longueur des fibres sur les propriétés physico-mécaniques des CBP. Ils ont utilisé de 0 à 40 % en poids de fibres TMP dans une matrice de PP et le procédé de thermoconsolidation. Les classes de longueur, obtenues en variant la nature des fibres, sont : 2,16 mm (pin juvénile), 2,71 mm (pin de surbille supérieur), 3,23 mm (pin mature) et 1,74 mm (eucalyptus). Ces deux études ont montré que la résistance et la rigidité des CBP augmentent avec la longueur des fibres du bois.

Plus récemment, des chercheurs ont utilisé des échantillons avec une seule particule de bois afin de mieux comprendre les effets de la taille des particules de bois sur le comportement mécanique des CBP (Figure 1.6). À titre d'exemple, Sretenovic et al. (2005) ont utilisé ce genre d'échantillon pour étudier les mécanismes de transfert de charge à l'interface particule-matrice. Les résultats de cette étude montrent que la déformation de la matrice est maximale près des bouts de la particule et nulle au centre. Ce qui confirme que les particules dans les CBP subissent une déformation très faible comparativement à la matrice, car le bois est 40 fois plus rigide que le plastique. Ce résultat est en accord avec

l'hypothèse du « shear lag theory », présentée dans la revue de littérature (Équation 1-21). Herra-Franco et Valadez-Gonzalez (2005) ont aussi effectué des essais de traction sur des échantillons de CBP monofibre. À l'aide de modèles micromécaniques, ils ont déterminé que la longueur critique de transfert de charge est atteinte pour des ratios  $L/D$  qui varient de 20 à 72, selon la qualité de l'adhésion à l'interface fibre-matrice.

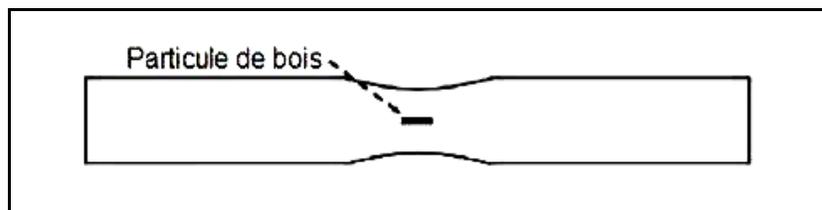


Figure 1.6 : Échantillon de CBP monoparticule (adapté de Sretenovic et al., 2005)

À ce jour, les implications de la taille des particules dans les propriétés physiques ont suscité peu d'intérêt, en comparaison avec les propriétés mécaniques. Des résultats présentés par Lee et al. (2001) suggèrent que la densité apparente, l'absorption massique et le gonflement volumique de CBP en immersion dans l'eau pendant 24 heures ne varient pas avec la longueur des fibres. À l'opposé, Steckel et al. (2006) ont observé que l'absorption d'eau et la diffusion de l'eau dans les CBP augmentent avec la taille des particules de bois. Ils ont utilisé 25 et 50 % en poids de farine de pin de deux granulométries différentes et le procédé de moulage par injection. Ces deux études ont cependant un résultat similaire, l'absorption d'eau augmente avec la proportion de bois ; car le bois est la composante hydrophile dans le CPB.

### 1.4.2. Effets d'autres propriétés

Certaines caractéristiques des particules de bois, autres que leur morphologie, influencent les propriétés des CBP dont : la nature, l'essence, la proportion de bois dans le composite et les traitements apportés aux particules de bois.

À titre d'exemple, Soucy (2007) a fabriqué des CBP avec 60 % en poids de fibres issues de différents procédés de mise en pâte. L'utilisation de fibres Kraft a conduit à de meilleures propriétés en traction et en flexion que les fibres CTMP et TMP. Les différences sont dues, selon l'auteur, aux différents teneurs en lignine des fibres. Soucy (2007) a également conclu que la nature des fibres influence les paramètres d'extrusion des CBP. Ensuite, Koubaa et al. (2004) ont montré que l'utilisation des particules de bois d'érable dans la fabrication de CBP conduit à de meilleures propriétés mécaniques que l'utilisation des particules d'écorce. En ce qui concerne l'essence, Pilarski et Matuana (2006) ont montré que des CBP faits d'érable sont plus rigides et plus résistants que ceux faits de pin.

La proportion de bois dans les CBP est un paramètre qui a été beaucoup étudié (Soucy, 2007). Généralement, l'ajout de farine de bois dans une matrice plastique augmente sa rigidité, mais diminue sa résistance (Wolcott et Englund, 1999). À titre d'exemple, Yam et al. (1990) ont conclu que la rigidité en flexion et en traction des CBP augmente avec la proportion massique de bois (de 0 à 60 %) tandis que la résistance en traction et la résistance à l'impact diminuent.

Il est finalement possible de modifier les propriétés du bois par des traitements de surface. Pour les CBP, ces modifications visent à augmenter l'adhésion entre le bois et le

thermoplastique (Sanschagrin et al., 1988) ou bien à améliorer la résistance à la pourriture (Saheb et Jog, 1999).

### **1.5. Intérêts de la recherche et problématique**

Les particules de bois dans les CBP se présentent généralement sous forme de farine de bois, caractérisées par un faible ratio L/D. Ceci pour des raisons de disponibilité et pour la facilité avec laquelle la farine de bois s'intègre aux procédés de mise en forme du plastique (Wolcott et Englund, 1999). Or, la morphologie des fibres joue un rôle important dans la formation et le développement des propriétés des produits à base de fibres de bois comme le papier et les panneaux de fibres (Bodig et Jayne, 1993; Horn, 1978 ; Wangaard et Woodson, 1971). Il en est de même pour les composites renforcés de fibres synthétiques. De plus, les modèles de prédiction des propriétés mécaniques soutiennent que la taille des fibres et le ratio L/D influencent le développement des propriétés mécaniques des composites (Lu, 2006 ; Baïlon et Dorlot, 2000 ; Gibson, 1994).

L'introduction de la farine de bois dans le plastique diminue la résistance, elle est donc utilisée comme agent de remplissage (Gamstedt et al., 2007). L'utilisation de fibres de bois, caractérisées par un ratio L/D plus élevé que les particules de farine, permet de renforcer le plastique à certaines conditions dont : une bonne adhésion entre les fibres et la matrice, des fibres orientées adéquatement et bien dispersées dans la matrice (Gamstedt et al., 2007 ; Wolcott et Englund, 1999).

Toutefois, l'utilisation de fibres longues est problématique pour plusieurs raisons dont : (1) l'alimentation des fibres dans les équipements de production est difficile à cause de leur faible masse volumique (Le Baillif et Oksman, 2006) ; (2) le procédé d'extrusion dégrade physiquement les fibres (Yam et al., 1990) ; (3) les fibres ont tendance à s'agglomérer dans le mélange à sec ce qui résulte en une mauvaise dispersion des fibres dans la matrice (Le Baillif et Oksman, 2006 ; Grande et Torres, 2003 ; Wolcott et Englund, 1999 ; Yam et al., 1990).

Ainsi, plus d'efforts de recherche sont nécessaires afin de comprendre le rôle de la longueur des fibres dans la formation et dans le développement des propriétés des matériaux composites bois-plastiques.

## CHAPITRE II

### ÉTABLISSEMENT DU PLAN DE RECHERCHE

#### 2.1. Objectifs, hypothèses et démarche

L'objectif général du projet est de comprendre le rôle de la longueur des fibres de bois dans le procédé de formation et dans le développement des propriétés des CBP.

Les objectifs spécifiques sont :

1. Évaluer diverses alternatives pour la production de CBP en utilisant des fibres longues.
2. Étudier les effets de la longueur des fibres dans le développement des propriétés physico-mécaniques des CBP.
3. Utiliser des techniques de modélisation pour comprendre les implications de la morphologie des fibres dans le développement des propriétés mécaniques des CBP.

Suite aux objectifs à atteindre, nous formulons des hypothèses à vérifier :

1. Les propriétés rhéologiques du plastique fondu chargé de fibres de bois varient avec la longueur des fibres.
2. Les propriétés physico-mécaniques des CBP varient avec la longueur des fibres.
3. Les modèles permettent d'expliquer les implications de la taille fibres de bois dans le développement des propriétés mécaniques des CBP.

Afin d'atteindre les objectifs et de vérifier les hypothèses posées, la démarche a été définie en cinq étapes :

1. Réduire des fibres de pâte à papier en classes de longueur (ou de ratio L/D).
2. Caractériser les mélanges de plastique fondu chargé de différentes longueurs de fibres.
3. Fabriquer des CBP à partir des différentes classes de longueur de fibres.
4. Caractériser les CBP en termes de propriétés physico-mécaniques.
5. Modéliser les propriétés mécaniques des CBP en fonction de la longueur des fibres.

## **2.2. Matériel et méthodes**

### **2.2.1. Préparation et caractérisation des fibres de bois**

Dans cette étude, des fibres de bois de feuillu et de la farine de bois de conifère ont été utilisées. Les fibres proviennent de pâte à papier chimico-thermomécanique (PCTM) de bouleau blanc (Tembec inc., Temcell). Les fibres ont été ramenées à trois classes de longueur (Longue, Moyenne, Courte) par réduction mécanique dans un broyeur à couteaux rotatifs de laboratoire (Thomas Wiley, modèle 4) montré à la figure 2.1. Les classes de longueur ont été obtenues en ajustant la distance entre les couteaux du stator et en utilisant différents tamis. Les fibres ont été mesurées à l'aide d'un analyseur de la qualité de la fibre (AQF) optique de marque OPTEST (Figure 2.1), selon un minimum de cinq échantillons de 5 000 fibres par classe de longueur (Tableau 2.1 et figure 2.2). Nous avons utilisé la longueur moyenne en nombre qui se calcule à l'aide de l'équation 1-1. L'annexe 1 présente un exemple de mesure d'une distribution de longueur et un exemple de calcul de la longueur moyenne en nombre. La teneur massique en humidité des fibres PCTM a été mesurée à moins de 2 %. La farine de pin de taille 60 mailles É.U. fournie par la compagnie American Wood Fibers a été utilisée après séchage à 1 % en poids d'humidité, mais n'a pas été caractérisée au AQF.

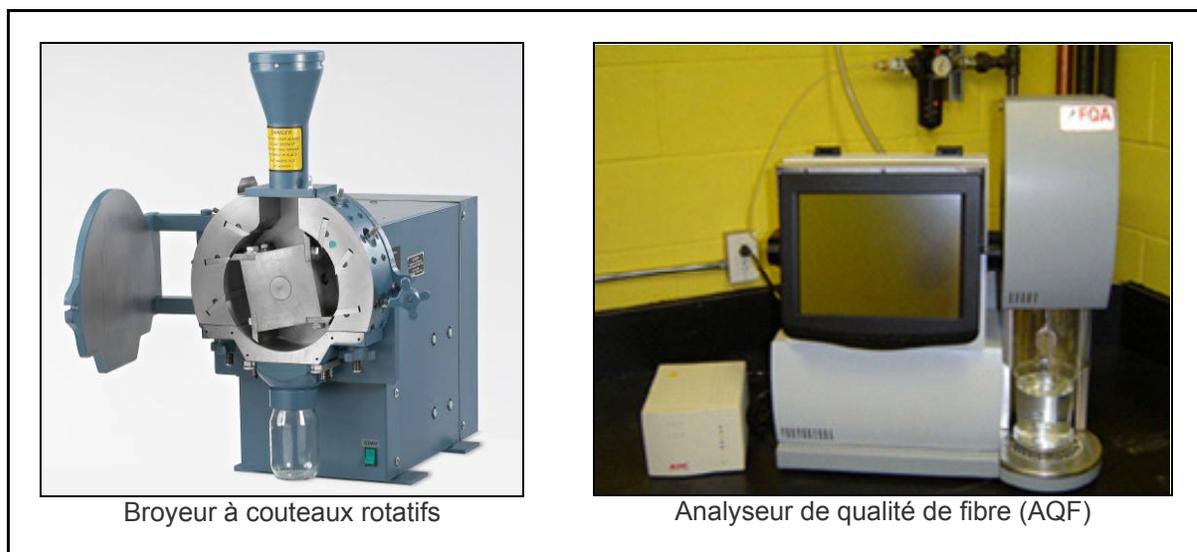


Figure 2.1 : Appareils utilisés pour la préparation et la caractérisation des fibres PCTM

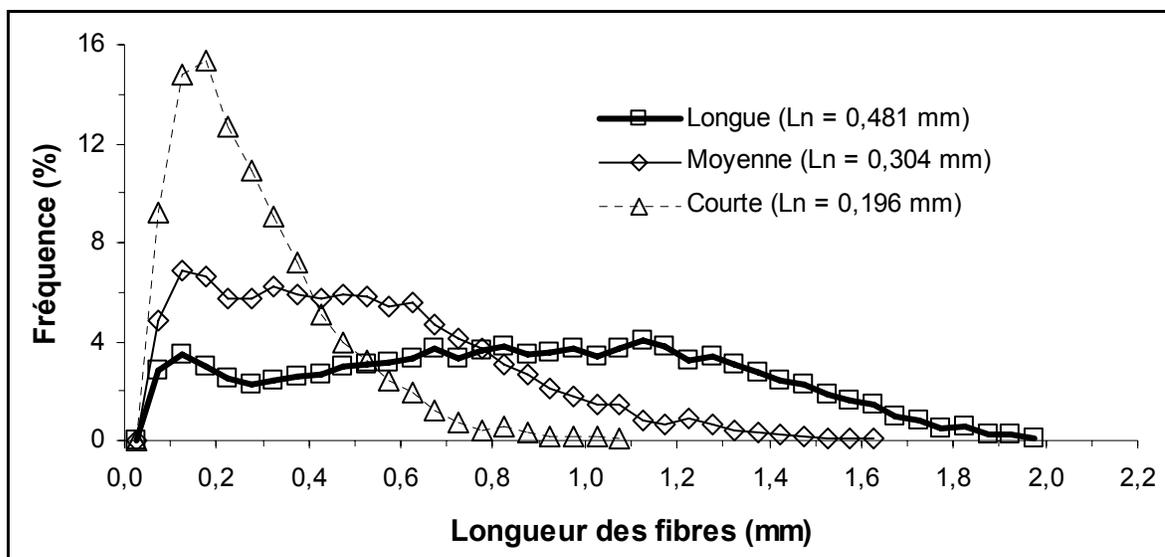


Figure 2.2 : Distributions des trois classes de longueur de fibres PCTM mesurées avec l'AQF, après réduction mécanique (Équation 1-1)

Tableau 2.1 : Longueur (L), diamètre (D) et ratio L/D (moyenne en nombre, équation 1-1) pour les trois classes de longueur de fibres PCTM mesurées avec l'AQF, après réduction mécanique

Classe	$L_n$ <i>mm</i>	$D_n$ $\mu m$	$L_n/D_n$ <i>ratio</i>
Longue	0,481	22,6	21,3
Moyenne	0,304	23,4	13,0
Courte	0,196	23,7	8,3

### 2.2.2. Plastique et additifs

Le polymère utilisé dans cette étude est du polyéthylène haute densité (PEHD) sous forme de granules (Equistar, Petrothene LB-0100). La fiche technique indique que son indice de fluidité est de 0,3 g/10 min, sa densité solide est de 953 kg/m<sup>3</sup>, sa résistance à la rupture en traction est de 27,3 MPa et son module d'élasticité en flexion est de 2,276 GPa.

Les additifs utilisés dans les CBP sont : un agent coupleur de type polyéthylène maléaté (PEMA) sous forme de poudre (Honeywell, AC-575-A), un lubrifiant à base d'ester sous forme de poudre du même fournisseur portant le nom commercial Optipack OP-100. Également, du stéarate de zinc (ZnSt) fourni par CDI inc., de l'éthylène bis stéaramide (EBS) fourni par GE Specialty Chemicals et du talc blanc sous forme de poudre ont été utilisés comme aidants au procédé d'extrusion.

### 2.2.3. Caractérisation du PEHD fondu chargé de fibres PCTM

Des courbes couple-temps de PEHD fondu pur et chargé des fibres PCTM ont été obtenues conformément à la norme ASTM D 2538 à l'aide d'un rhéomètre à couple (Haake, PolyLab) avec une chambre de mélangeage à double vis contre-rotatives (Haake,

Rheomix 600p) (Figure 2.5). Les vis ont un ratio de vitesse de 3:2. Trois répétitions ont été effectuées pour chacune des neuf conditions expérimentales (Tableau 2.2).

Tableau 2.2 : Conditions expérimentales pour les essais au rhéomètre à couple

PARAMÈTRES	
Température des vis et de la chambre de mélangeage	: 180 °C
Vitesse des vis	: 50 RPM
Volume de matériel dans la chambre de mélangeage	: 65 à 70 %
MATÉRIAUX	
Plastique	: HDPE (Petrothene LB-0100, Equistar)
Bois	: Fibres PCTM de bouleau blanc
	→ Trois classes de longueur : voir tableau 2.1 et figure 2.2
	→ Trois charges massiques : 20, 30 et 40 %, sur une base anhydre
Note : Neuf conditions expérimentales (3 longueurs et 3 proportions)	

#### 2.2.4. Formation des CPB

Tous les CPB ont été fabriqués en deux étapes (Figure 2.3) : une étape de pastillage (mélangeage dans une extrudeuse et broyage de l'extrudat) et une étape pour la formation finale (extrusion ou moulage par injection). Il était impossible de procéder en une seule étape pour les raisons énumérées dans la problématique. Le tableau 2.3 présente les paramètres machines utilisés pour la formation des CPB.

##### 2.2.4.1. Choix des conditions expérimentales

Lors de la caractérisation du PEHD fondu chargé de fibres PCTM, nous avons constaté que la charge maximale (ou critique) de fibres PCTM dans le PEHD était d'environ 45 % en poids (pour plus de détails, voir chapitre V). Donc, des formulations de CPB à 40 % en poids de fibres PCTM ont été fabriquées. Par extrusion, nous avons utilisé

trois longueurs de fibre et trois formulations chimiques (dispositif expérimental 3<sup>3</sup>) et par moulage par injection, trois longueurs et une formulation chimique (dispositif expérimental à un seul facteur à 3 niveaux ; 3<sup>1</sup>). Ainsi, il sera possible d'étudier les effets de la longueur des fibres de bois dans plusieurs conditions ; deux procédés de mise en forme et différents additifs (Tableau 2.4).

Afin d'augmenter la proportion de bois, nous avons exploré le potentiel de l'utilisation de fibres PCTM comme additif dans une formulation à base de farine de bois typique de l'industrie (Tableau 2.5). De la farine de pin 60 mailles É.U. a été utilisée car elle était disponible et déjà séchée. Nous avons ainsi utilisé 21 % de fibres PCTM des différentes classes de longueur et 37 % de farine de pin pour une charge massique totale de 58 % de bois (formulations 14 à 16) afin de les comparer au contrôle, qui contient uniquement de la farine de pin (formulation 13).

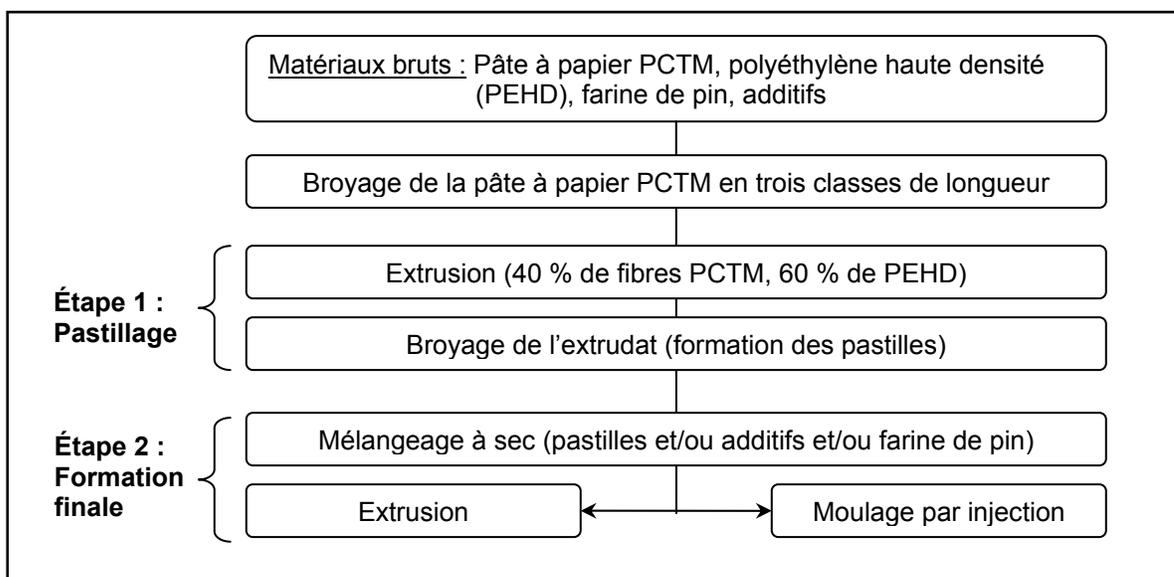


Figure 2.3 : Schéma des étapes de formation des CBP

Tableau 2.3 : Paramètres machines utilisés pour la formation des CBP

Classe PCTM ou charge de bois	Vitesse de vis (RPM)	Température (°C)			Vacuum
		Barils	Vis	Filière ou moule	
ÉTAPE 1 : EXTRUSION POUR PASTILLAGE					
Longue	43,6	197	197	sans filière	non
Moyenne	43,6	218	218	sans filière	non
Courte	28,0	224	224	sans filière	non
ÉTAPE 2 : EXTRUSION FINALE					
40 % en poids	5	163	163	171	oui
58 % en poids	15-20	163	163	171	oui
ÉTAPE 2 : MOULAGE PAR INJECTION					
Vitesse d'injection : 8 mm/s					
Pression d'injection : 167 MPa		180	90	90 (moule)	-
Temps d'injection : 2 secondes					

Tableau 2.4 : Formulations des CBP extrudés et moulés par injection avec 40 % en poids des trois classes de longueur de fibres PCTM

Formulation	Classe	Proportion massique (%)			
		PCTM	PEHD	PEMA	OP-100
EXTRUSION					
1.	Longue	40	60	0	0
2.	Moyenne	40	60	0	0
3.	Courte	40	60	0	0
4.	Longue	39	59	2	0
5.	Moyenne	39	59	2	0
6.	Courte	39	59	2	0
7.	Longue	38	57	0	4,5
8.	Moyenne	38	57	0	4,5
9.	Courte	38	57	0	4,5
MOULAGE PAR INJECTION					
10.	Longue	38	57	2	2,7
11.	Moyenne	38	57	2	2,7
12.	Courte	38	57	2	2,7

Tableau 2.5 : Formulations des CBP extrudés avec 58 % en poids de bois : utilisation de fibres PCTM comme additif dans une formulation à base de farine de pin 60 mailles

Formulation	Classe	Proportion massique (%)						
		PCTM	Farine	Bois (total)	PEHD	Talc	ZnSt	EBS
13.*	(Contrôle)	0	58	58	32	7	2	1
14.	Longue	21	37	58	32	7	2	1
15.	Moyenne	21	37	58	32	7	2	1
16.	Courte	21	37	58	32	7	2	1

\* : Composite formé sans étape de pastillage

#### 2.2.4.2. Étape 1 : pastillage

Des pastilles à 40 % en poids de fibres PCTM sur une base anhydre et 60 % de PEHD ont été fabriquées. Après extrusion, l'extrudat a été refroidi puis broyé pour former des pastilles. L'extrudeuse, de marque Cincinnati Milacron double vis coniques 55 mm contre-rotatives (Figure 2.4), a été utilisée sans filière afin de limiter la dégradation des fibres. L'extrudeuse a été alimentée manuellement. Le broyeur à couteaux rotatifs, de marque Nelmor, était équipé d'un tamis à ouvertures circulaires de 9,53 mm.

#### 2.2.4.3. Étape 2 : formation finale (extrusion ou moulage par injection)

Pour la formation finale, les équipements ont été alimentés manuellement d'ingrédients préalablement mélangés dans un mélangeur à baril rotatif pendant 10 minutes (pastilles et/ou additifs et/ou farine de pin). Les composites extrudés ont été fabriqués avec une extrudeuse double vis coniques 35 mm contre-rotatives de marque Cincinnati Milacron avec une chambre de refroidissement à jets d'eau à la sortie (Figure 2.4). L'ouverture de la filière a été mesurée à 9,53 mm par 38,10 mm. Les composites moulés par injection ont été

fabriqués avec une machine à injection Sumitomo modèle SE50D-C110-S28 (Figure 2.4). La machine était équipée d'un moule formant un échantillon pour les essais de traction et un autre pour les essais de flexion.

#### **2.2.4.3. Étape 2 : formation finale (extrusion ou moulage par injection)**

Pour la formation finale, les équipements ont été alimentés manuellement d'ingrédients préalablement mélangés dans un mélangeur à baril rotatif pendant 10 minutes (pastilles et/ou additifs et/ou farine de pin). Les composites extrudés ont été fabriqués avec une extrudeuse double vis coniques 35 mm contre-rotatives de marque Cincinnati Milacron avec une chambre de refroidissement à jets d'eau à la sortie (Figure 2.4). L'ouverture de la filière a été mesurée à 9,53 mm par 38,10 mm. Les composites moulés par injection ont été fabriqués avec une machine à injection Sumitomo modèle SE50D-C110-S28 (Figure 2.4). La machine était équipée d'un moule formant un échantillon pour les essais de traction et un autre pour les essais de flexion.



Extrudeuse double vis coniques 35 mm contre-rotatives avec chambre de refroidissement à jets d'eau



Extrudeuse double vis coniques 55 mm contre-rotatives (sans filière)



Machine à moulage par injection

Figure 2.4 : Photos des principaux équipements utilisés pour la formation des CBP

### 2.2.5. Méthodes de caractérisation des CBP

Certains essais ont été effectués selon des procédures normalisées (Tableau 2.6). Tous les essais ont été effectués dans des conditions ambiantes de 30 % d'humidité relative et une température de 21°C. Les dimensions des échantillons ont été prises à l'aide d'un pied à coulisse d'une précision de  $\pm 0.005$  mm et les masses à l'aide d'une balance de laboratoire d'une précision de  $\pm 0.005$  g. Les dimensions des échantillons et le nombre d'échantillons utilisés pour tous les essais sont regroupés en annexe (Tableau A.2).

Tableau 2.6 : Essais normalisés utilisés pour la caractérisation des CBP.

Essai ou mesure	Norme	Domaine
Densité apparente	ASTM D 2395 (1993)	Matériaux à base de bois
Immersion dans l'eau	ASTM D 1037 (1999)	Matériaux à base de bois
Flexion trois points	ASTM D 790 (2003)	Plastiques - plastiques renforcés
Résilience / Impact Izod	ASTM D 256 (2005)	Plastiques - plastiques renforcés
Traction simple	ASTM D 638 (2003)	Plastiques - plastiques renforcés
Rhéomètre à couple	ASTM D 2538 (1995)	Plastiques

La densité apparente des CBP a été déterminée à l'aide du pied à coulisse et de la balance (masse/volume). Les profils de densité ont été mesurés sur l'épaisseur des produits extrudés (plus petite dimension perpendiculaire au sens de l'extrusion) à l'aide d'un densitomètre à rayons X de marque Quintek Measurement Systems (QMS) modèle QTRS-01X (Figure 2.5). Les échantillons ont été coupés à une épaisseur moyenne de 1,6 mm.

Les essais d'immersion dans l'eau ont été effectués afin de quantifier l'absorption massique et le gonflement volumique des CBP. Les échantillons ont été mesurés et pesés à divers intervalles dans le temps. Les CBP extrudés ont été coupés puis sablés au papier fin et ceux moulés par injection ont été utilisés sans modification.

Les propriétés en flexion trois points et en traction ont été déterminées à l'aide d'un appareil d'essais universel entraîné par vis de marque Zwick/Roel modèle Z020 (Figure 2.5). Pour les essais de traction, les mâchoires utilisées étaient de type autoserrantes. Les échantillons extrudés ont été usinés à l'aide de machines-outils afin de respecter les dimensions et tolérances spécifiées par les normes.



Figure 2.5 : Photos des principaux équipements utilisés pour la caractérisation

Les essais de résilience Izod avec entaille ont été effectués à l'aide d'un pendule à essais d'impact de la compagnie Testing Machines Inc. modèle No.43-1. Les CBP extrudés ont été usinés et les échantillons moulés par injection n'ont pas pu être testés, car ils étaient de trop petite taille.

Enfin, les surfaces des échantillons ont été analysées au microscope électronique à balayage (MEB). Le MEB utilisé est un Hitachi S-3500N à pression variable. Les paramètres de travail sont : une tension de 15 kV, une intensité de courant d'environ 70  $\mu$ A, un vacuum en dessous de 1 Pa et une distance de travail variant entre 12 et 16 mm.

### **2.2.6. Modélisation des propriétés mécaniques des CBP**

Afin de mieux comprendre les implications de la longueur des fibres dans le comportement mécanique des CBP, des modèles présentés dans la revue de littérature ont été utilisés et confrontés avec les valeurs mesurées expérimentalement pour les formulations à 40 % en poids de fibres PCTM (formulations 1 à 12).

Deux caractéristiques importantes en ingénierie ont été modélisées : la contrainte maximale et le module d'élasticité en traction. La contrainte maximale a été modélisée par le modèle de Kelly-Tyson couplé à la règle des mélanges (Équation 1-20) et le module d'élasticité a été modélisée par le modèle de Cox-Kelly couplé à la règle des mélanges (Équation 1-22) et aussi par le modèle de Nielson (Équation 1-23). Enfin, la densité des fibres de bois dans les composites a été estimée.

## **CHAPITRE III**

### **RÉSULTATS**

Bien que les résultats nous permettront d'étudier les effets d'autres variables, par exemple les effets des additifs (formulations 1 à 9) ou les effets du procédé de mise en forme (formulations 1 à 12), nous nous concentrerons sur les implications de la longueur des fibres. Ce chapitre présente, dans un premier temps, les caractéristiques de couple du PEHD fondu chargé de fibres PCTM mesurées à l'aide d'un rhéomètre. Ensuite, les propriétés physiques des CBP seront présentées, suivies de leurs propriétés mécaniques. Finalement, des modèles théoriques seront confrontés aux valeurs mesurées.

### 3.1. Caractéristiques de couple (rhéomètre à couple)

Les résultats obtenus à l'aide du rhéomètre à couple montrent que l'ajout de fibres dans le PEHD fondu influence les caractéristiques de couple (Tableau 3.1). Le couple augmente proportionnellement avec la longueur des fibres (Figure 3.1) ainsi qu'avec la proportion massique de fibres (Figure 3.2). Pour la classe Longue et à la teneur massique maximale utilisée dans cette étude, l'énergie mécanique (Équation 1-4 de 0 à 12 minutes) augmente de plus de 100 % (doublent) par rapport au PEHD pur (Figure 3.3). La variation du couple stabilisé présente la même tendance. L'ajout de fibres de la classe Courte dans le PEHD tend à diminuer le couple maximum, mais on n'observe pas de tendance claire en fonction de la longueur des fibres.

Tableau 3.1 : Caractéristiques de couple du PEHD fondu chargé des différentes classes de longueur et proportions massiques de fibres PCTM au rhéomètre à couple à 50 RPM et 180°C (coefficient de variation entre parenthèses)

Proportion de fibres % en poids	Classe	Couple stabilisé <sup>1</sup> Nm	Couple maximum Nm	Énergie mécanique <sup>1</sup> (Équation 1-4) kJ
0	PEHD	10,2	66,3	38,3
20	Longue	16,3(2,6)	65,5(3,8)	58,0(2,0)
	Moyenne	15,1(1,7)	65,9(1,9)	54,7(1,8)
	Courte	13,6(4,3)	60,6(2,0)	49,8(3,7)
30	Longue	18,5(1,7)	67,1(9,0)	66,7(1,7)
	Moyenne	16,5(8,2)	66,0(2,4)	61,7(11,4)
	Courte	15,2(2,5)	62,0(4,9)	56,5(1,9)
40	Longue	21,3(0,3)	63,0(4,1)	76,7(2,2)
	Moyenne	17,1(4,0)	63,8(1,6)	65,7(7,0)
	Courte	15,5(3,9)	61,0(2,5)	58,1(3,1)

<sup>1</sup> : Valeurs à 10 minutes

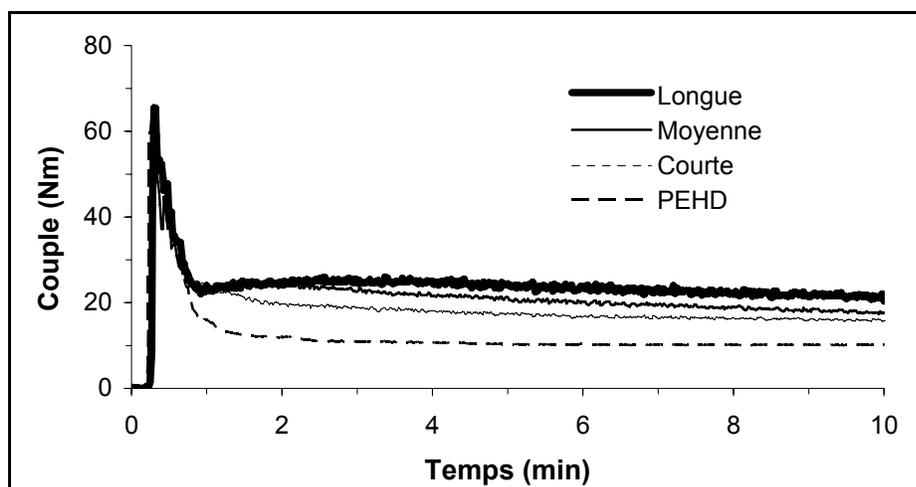


Figure 3.1 : Exemples typiques de courbes couple-temps de PEHD fondu pur et chargé de 40 % en poids des différentes classes de longueur de fibres PCTM au rhéomètre à couple à 50 RPM et 180°C

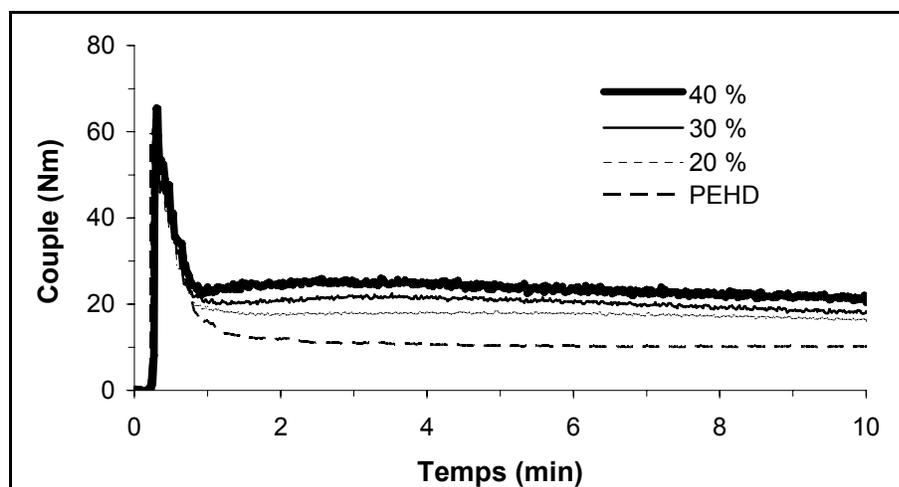


Figure 3.2 : Exemples typiques de courbes couple-temps de PEHD fondu pur et chargé des différentes proportions massiques de fibres PCTM de la classe Longue au rhéomètre à couple à 50 RPM et 180°C

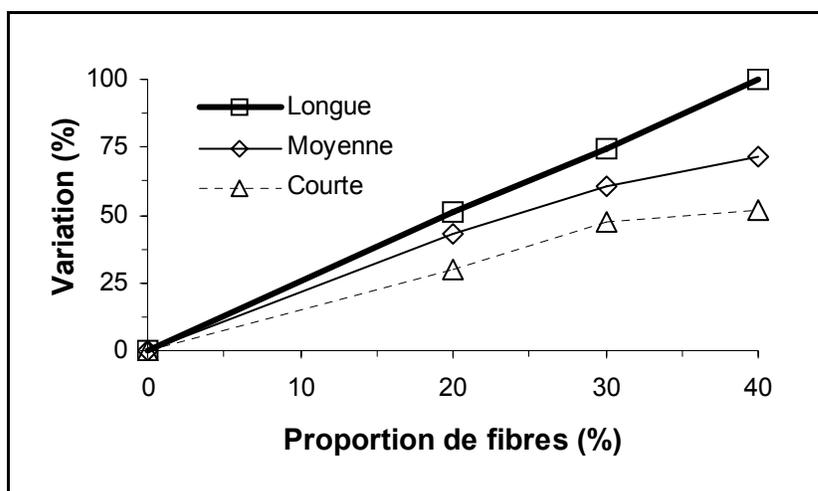


Figure 3.3 : Variation de l'énergie mécanique du PEHD fondu pur et chargé des différentes classes de longueur et proportions massiques de fibres PCTM au rhéomètre à couple à 50 RPM et 180°C

## 3.2. Propriétés physiques des CBP

### 3.2.1. Densités apparentes et profils de densité aux rayons X

La densité apparente des CBP varie très peu avec la longueur des fibres et elle est plus élevée que la densité du PEHD pur (Tableau 3.2). Par rapport au PEHD, l'augmentation moyenne de la densité apparente des composites à 40 % de fibres PCTM est de 12,9 % par extrusion et de 6,9 % par moulage par injection. L'utilisation de fibres PCTM comme additif dans une formulation à base de farine de pin influence très peu la densité apparente, soit entre +1,91 % et +2,54 %, par rapport au contrôle qui contient uniquement de la farine de bois.

Tableau 3.2 : Densité apparente des CBP pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM (coefficient de variation entre parenthèses)

Formulation	Classe	Densité apparente <i>kg/m<sup>3</sup></i>	Formulation	Classe	Densité apparente <i>kg/m<sup>3</sup></i>
EXTRUSION (40 % PTCM)			MOULAGE PAR INJECTION (40 % PTCM)		
1.	Longue	1075,6(0,8)	10.	Longue	1016,6(0,2)
2.	Moyenne	1079,6(0,9)	11.	Moyenne	1019,2(0,6)
3.	Courte	1094,4(0,6)	12.	Courte	1018,3(0,4)
4.	Longue	1084,0(0,6)	EXTRUSION (21 % PTCM, 37 % farine)		
5.	Moyenne	1064,6(2,0)	13.	(Contrôle)	1179,1(0,1)
6.	Courte	1078,6(0,2)	14.	Longue	1201,7(0,6)
7.	Longue	1064,6(0,5)	15.	Moyenne	1209,1(0,6)
8.	Moyenne	1059,8(0,7)	16.	Courte	1197,6(0,2)
9.	Courte	1073,9(0,2)			

PEHD : Densité = 952,0 kg/m<sup>3</sup> (selon la fiche technique du fabricant)

Les profils de densité des CBP à 40 % en poids de fibres PCTM mesurés au densitomètre à rayons X suggèrent que l'homogénéité des CBP varie très peu avec la longueur des fibres (Figure 3.4, formulations 1 à 3). C'est-à-dire que les profils ont des variations de densité similaires pour les trois classes de longueur de fibres utilisées. En regardant les CBP à l'œil nu, les fibres semblent uniformément dispersées dans la matrice pour toutes les formulations à 40 % de bois.

On peut voir sur les profils de densité que l'utilisation de fibres longues comme additif dans une formulation à base de farine de pin a eue un effet néfaste sur l'homogénéité des CBP (Figure 3.5, formulation 13 et 14). La différence est même perceptible à l'œil nu ; on peut voir des points blanchâtres qui sont probablement des amas de fibres PCTM.

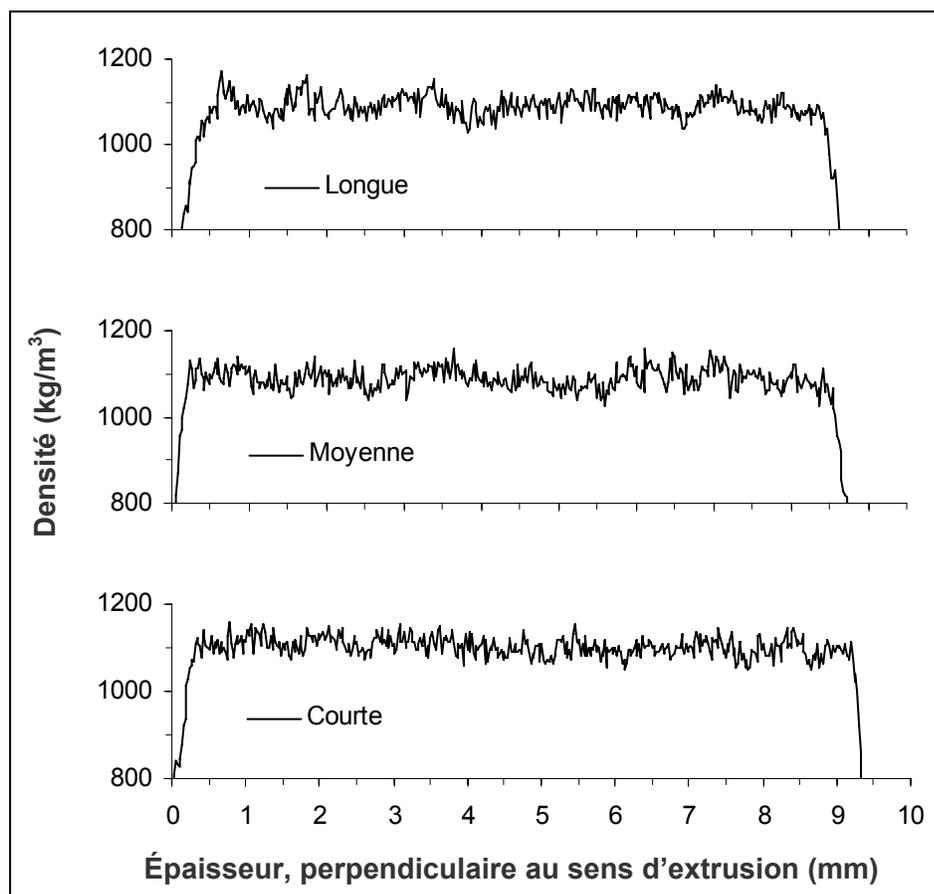


Figure 3.4 : Exemples typiques de profils de densité de CBP à 40 % de bois pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM mesurés au densitomètre à rayons X

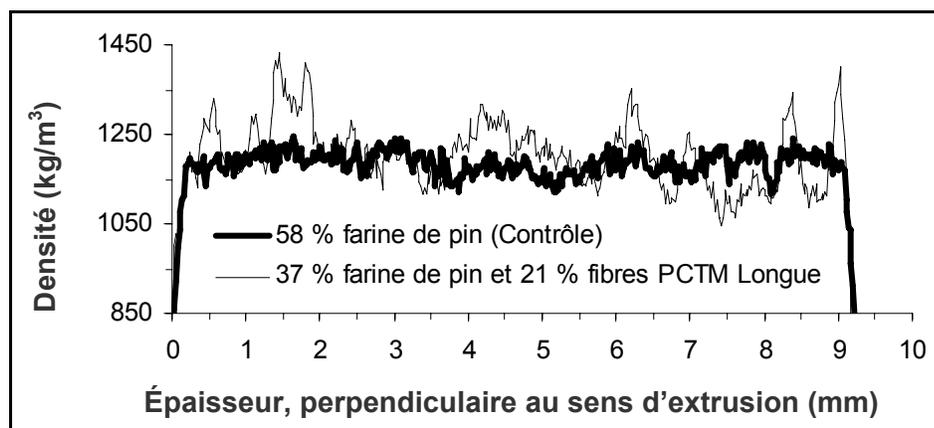


Figure 3.5 : Exemples typiques de profils de densité de CBP à 58 % de bois mesurés au densitomètre à rayons X

### 3.2.2. Essais d'immersion dans l'eau

Les résultats d'immersion en continu dans l'eau montrent que l'absorption massique et le gonflement volumique des CBP varient avec : la longueur des fibres, les additifs utilisés, le procédé de mise en forme et la proportion de bois (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 : Absorption massique et gonflement volumique des CBP en immersion dans l'eau pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM

Formulation	Classe	Absorption massique (%) (Équation 1-2)				Gonflement volumique (%) (Équation 1-3)			
		Temps d'immersion (heures)				Temps d'immersion (heures)			
		24	48	500	1000	24	48	500	1000
EXTRUSION (40 % PCTM)									
1.	Longue	0,97	1,28	3,89	5,37	0,49	1,13	3,58	5,13
2.	Moyenne	0,88	1,16	3,54	4,86	0,39	1,05	3,19	4,75
3.	Courte	0,76	1,06	3,34	4,63	0,39	1,24	2,89	4,08
4.	Longue	0,87	1,08	3,15	4,61	0,51	1,00	3,79	6,74
5.	Moyenne	0,82	1,11	3,51	5,27	0,71	1,04	4,26	6,85
6.	Courte	0,76	0,90	2,15	3,12	0,44	0,88	2,33	3,65
7.	Longue	1,57	2,18	6,43	8,94	0,91	1,81	6,32	9,25
8.	Moyenne	1,45	2,04	6,24	8,79	0,80	1,52	5,42	8,03
9.	Courte	1,13	1,55	4,93	7,19	0,84	1,29	4,71	7,49
MOULAGE PAR INJECTION (40 % PCTM)									
10.	Longue	0,93	1,06	3,05	4,24	0,29	0,75	2,47	3,51
11.	Moyenne	0,53	0,86	2,63	3,75	0,33	0,75	2,41	3,23
12.	Courte	0,59	0,79	2,10	3,34	0,12	0,67	2,29	3,03
EXTRUSION (21 % PCTM, 37 % farine de pin 60 mailles)									
13.	(Contrôle)	1,98	2,87	9,08	12,86	1,89	2,93	8,23	11,00
14.	Longue	2,05	3,06	9,41	13,23	2,39	3,57	8,98	12,25
15.	Moyenne	2,12	2,98	9,56	13,60	2,53	3,56	9,25	13,09
16.	Courte	2,20	3,08	9,77	13,57	2,47	3,49	9,32	12,52

On peut voir sur les courbes expérimentales que l'absorption massique d'eau (Figure 3.6) et le gonflement volumique (Figure 3.7) augmentent proportionnellement avec la longueur des fibres de bois (formulations 4 à 6). Pour un temps d'immersion donné, le gonflement et l'absorption augmentent jusqu'à 36 % (Figure 3.8, moyenne pour les formulations 1 à 12). Cependant, pour une teneur en humidité donnée, le gonflement n'est pas influencé par la longueur des fibres (Figure 3.9, moyenne pour les formulations 1 à 12); c'est-à-dire que le coefficient de dilatation volumique à l'humidité (pente du graphique) ne varie pas en fonction de la longueur des fibres.

Finalement, l'utilisation de fibres PCTM comme additif dans une formulation à base de farine de pin augmente l'absorption entre 2 et 12 % et le gonflement entre 8 et 31 %, en comparaison avec le contrôle.

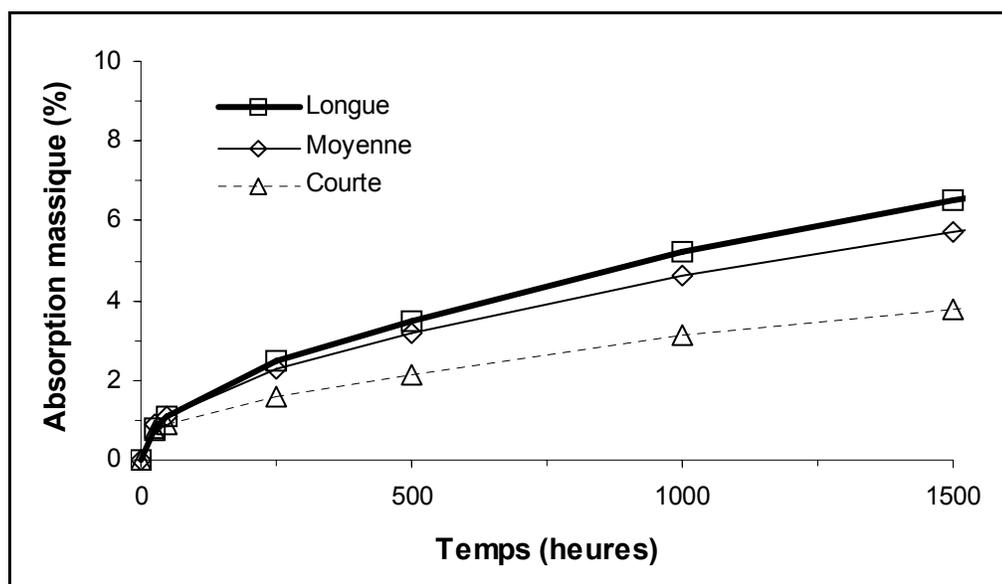


Figure 3.6 : Exemples typiques de courbes d'absorption massique en fonction du temps d'immersion dans l'eau des CBP pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM

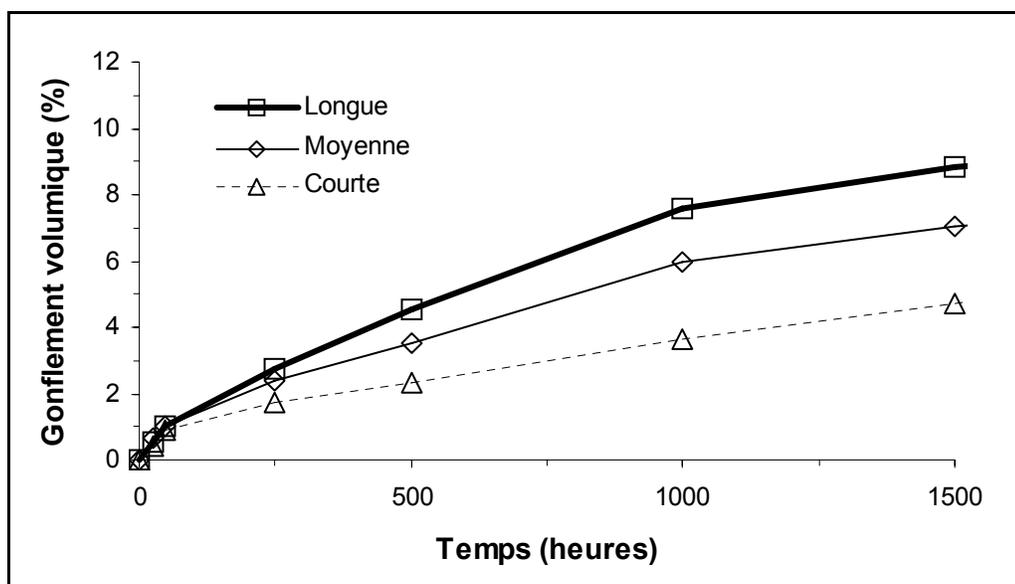


Figure 3.7 : Exemples typiques de courbes de gonflement volumique en fonction du temps d'immersion dans l'eau des CBP pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM

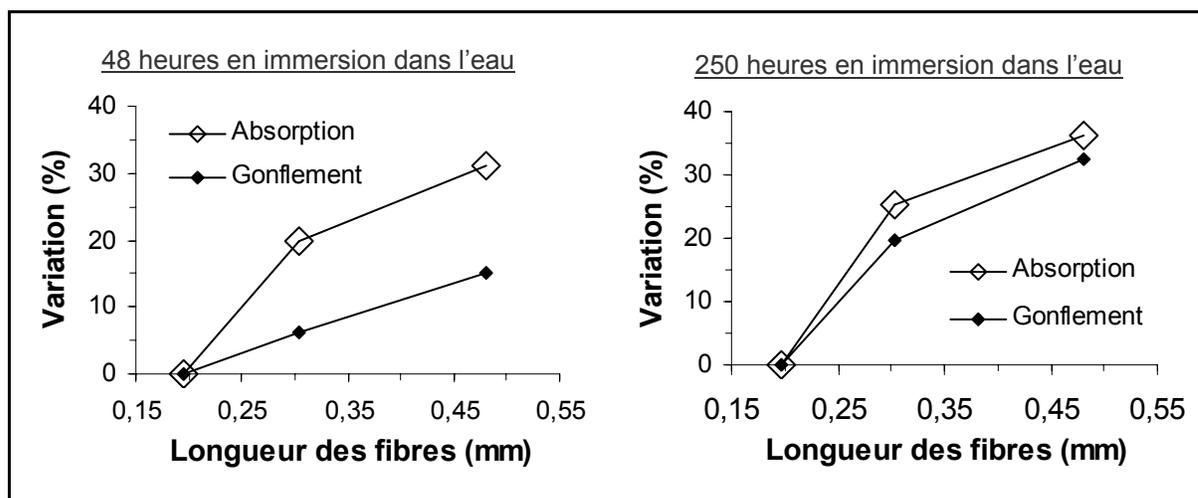


Figure 3.8 : Variation de l'absorption massique et du gonflement volumique des CBP en fonction de la longueur des fibres PCTM pour différents temps d'immersion dans l'eau

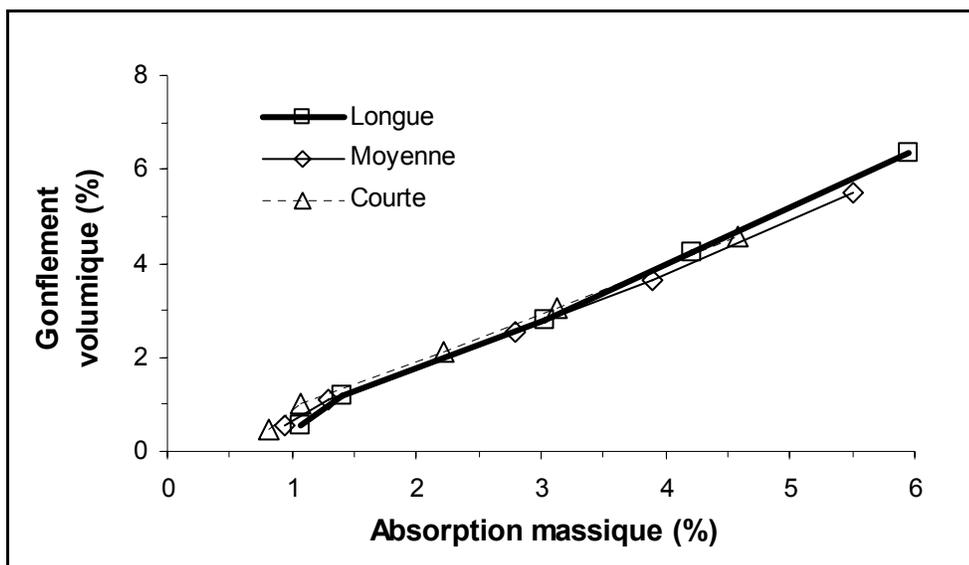


Figure 3.9 : Gonflement volumique en fonction de l'absorption massique des CBP en immersion dans l'eau pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM

### 3.3. Propriétés mécaniques des CBP

Dans cette section, les propriétés en flexion, en traction et les résultats des essais d'impact Izod seront présentés dans l'ordre.

Les propriétés en flexion trois points, en traction simple et l'énergie d'impact sont positivement influencées par la longueur des fibres (Tableau 3.4 et tableau 3.5). Les propriétés mécaniques sont aussi influencées par les additifs, par le procédé de mise en forme et par la proportion de bois.

#### 3.3.1. Formulations à 40 % en poids de fibres PCTM

On peut voir sur les courbes contrainte-déformation des CBP que les propriétés mécaniques en flexion (Figure 3.10) et en traction (Figure 3.11) augmentent

proportionnellement avec la longueur des fibres (formulations 10 à 12). Le module de rupture augmente jusqu'à 28 %, le module d'élasticité et la déformation à la charge maximale augmentent jusqu'à 17 % (Figure 3.12, moyenne pour les formulations 1 à 12). Il y a cependant une exception pour les CBP extrudés, avec comme seul additif du lubrifiant (formulations 7 à 9), où l'élongation à la charge maximale en flexion est inversement proportionnelle à la longueur des fibres.

Tableau 3.4 : Propriétés en flexion et énergie d'impact Izod des CBP pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM (coefficient de variation entre parenthèses)

Formulation	Classe	MOR	MOE	Déformation (charge max.)	Énergie d'impact Izod
	-	MPa	GPa	%	kJ/m <sup>2</sup>
EXTRUSION (40 % PCTM)					
1.	Longue	43,5(2,1)	3,38(5,5)	2,49(3,8)	5,75(2,8)
2.	Moyenne	41,4(2,2)	3,37(3,3)	2,31(4,1)	5,36(4,0)
3.	Courte	37,8(1,3)	3,20(3,7)	2,40(5,1)	4,71(3,1)
4.	Longue	40,2(5,5)	2,83(13)	2,67(9,1)	- -
5.	Moyenne	35,4(7,9)	2,57(12)	2,47(6,4)	- -
6.	Courte	29,0(3,5)	1,95(7,8)	2,50(3,2)	- -
7.	Longue	34,4(1,3)	2,77(5,7)	2,67(5,1)	6,28(3,4)
8.	Moyenne	33,1(3,8)	2,97(2,7)	2,64(5,7)	5,88(2,9)
9.	Courte	29,3(3,6)	2,80(2,0)	2,87(3,2)	5,13(2,6)
MOULAGE PAR INJECTION (40 % PCTM)					
10.	Longue	51,1(2,6)	3,39(4,8)	3,91(2,2)	- -
11.	Moyenne	46,3(3,1)	3,29(14)	3,72(3,3)	- -
12.	Courte	41,2(1,9)	2,92(7,4)	3,68(4,0)	- -
EXTRUSION (21 % PCTM, 37 % farine de pin 60 mailles)					
13.	(Contrôle)	25,9(2,3)	4,76(6,1)	0,82(3,4)	- -
14.	Longue	32,1(3,9)	4,70(3,4)	1,11(9,2)	- -
15.	Moyenne	29,7(1,6)	4,48(8,0)	0,99(5,1)	- -
16.	Courte	28,0(3,9)	4,55(6,9)	0,87(9,5)	- -

\*PEHD : MOE = 1,276 GPa (selon la fiche technique du fabricant)

La ténacité, évaluée soit par l'essai de résilience Izod soit par l'énergie de déformation en traction, augmente proportionnellement avec la longueur des fibres jusqu'à 30 % (Figure 3.12, moyenne pour les formulations 1 à 12). Les essais d'impact Izod n'ont pas pu être réalisés sur les formulations 4 à 6 parce que la section des panneaux extrudés était trop petite ; l'utilisation de PEMA a causé des problèmes de mise en forme.

Tableau 3.5 : Propriétés en traction des CBP pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM (coefficient de variation entre parenthèses)

Formulation	Classe	MOR	MOE	Déformation (charge max.)	Énergie de déformation
	-	MPa	GPa	%	kJ/m <sup>3</sup>
EXTRUSION (40 % PCTM)					
1.	Longue	28,2(1,0)	2,99(0,6)	2,58(3,0)	464(4,3)
2.	Moyenne	24,9(2,1)	2,92(3,5)	2,13(5,4)	337(6,4)
3.	Courte	23,4(0,7)	2,83(1,3)	2,20(5,0)	342(6,5)
4.	Longue	24,9(3,8)	2,79(3,3)	1,95(6,5)	306(10)
5.	Moyenne	22,1(4,6)	2,73(2,9)	1,67(3,3)	230(8,0)
6.	Courte	18,5(2,0)	2,33(5,3)	1,51(7,1)	178(9,6)
7.	Longue	24,3(4,1)	2,74(2,3)	2,28(5,7)	357(10)
8.	Moyenne	22,5(3,4)	2,75(2,7)	2,19(4,3)	328(8,0)
9.	Courte	19,2(5,1)	2,58(2,3)	2,11(5,1)	287(10)
MOULAGE PAR INJECTION (40 % PCTM)					
10.	Longue	36,5(2,7)	3,18(2,9)	3,28(3,7)	804(4,8)
11.	Moyenne	31,5(4,3)	3,00(3,9)	3,12(6,6)	668(9,2)
12.	Courte	27,3(2,0)	2,96(1,0)	2,83(5,9)	555(8,2)
EXTRUSION (21 % PCTM, 37 % farine de pin 60 mailles)					
13.	Contrôle	13,7(5,0)	3,43(3,2)	0,95(5,4)	88,0(9,1)
14.	Longue	17,4(4,7)	3,55(0,8)	1,20(8,0)	138(12)
15.	Moyenne	16,0(3,4)	3,52(2,5)	1,06(9,6)	111(13)
16.	Courte	14,9(1,6)	3,57(1,1)	0,94(3,8)	94,0(5,1)

\*PEHD : Contrainte (rupture) = 27.3 MPa ; Déformation >600 % (selon la fiche technique du fabricant)

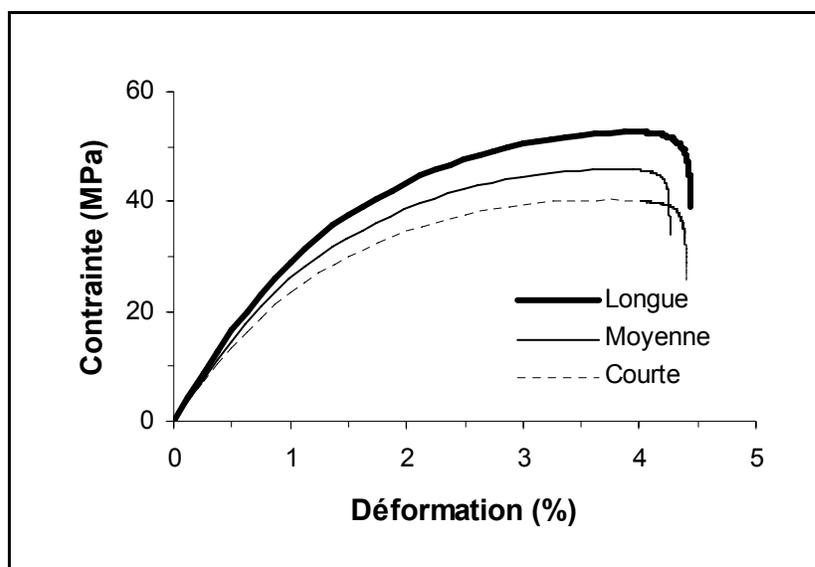


Figure 3.10 : Exemples typiques de courbes contrainte-déformation en flexion des CBP pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM

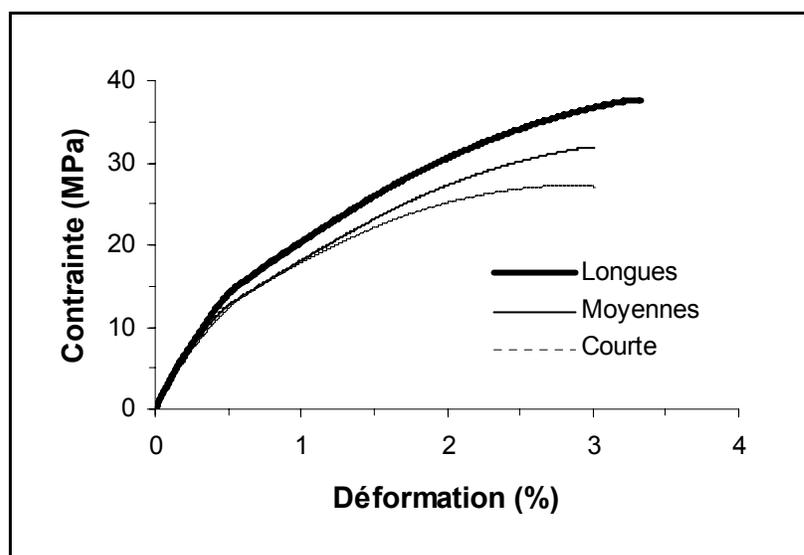


Figure 3.11 : Exemples typiques de courbes contrainte-déformation en traction des CBP pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM

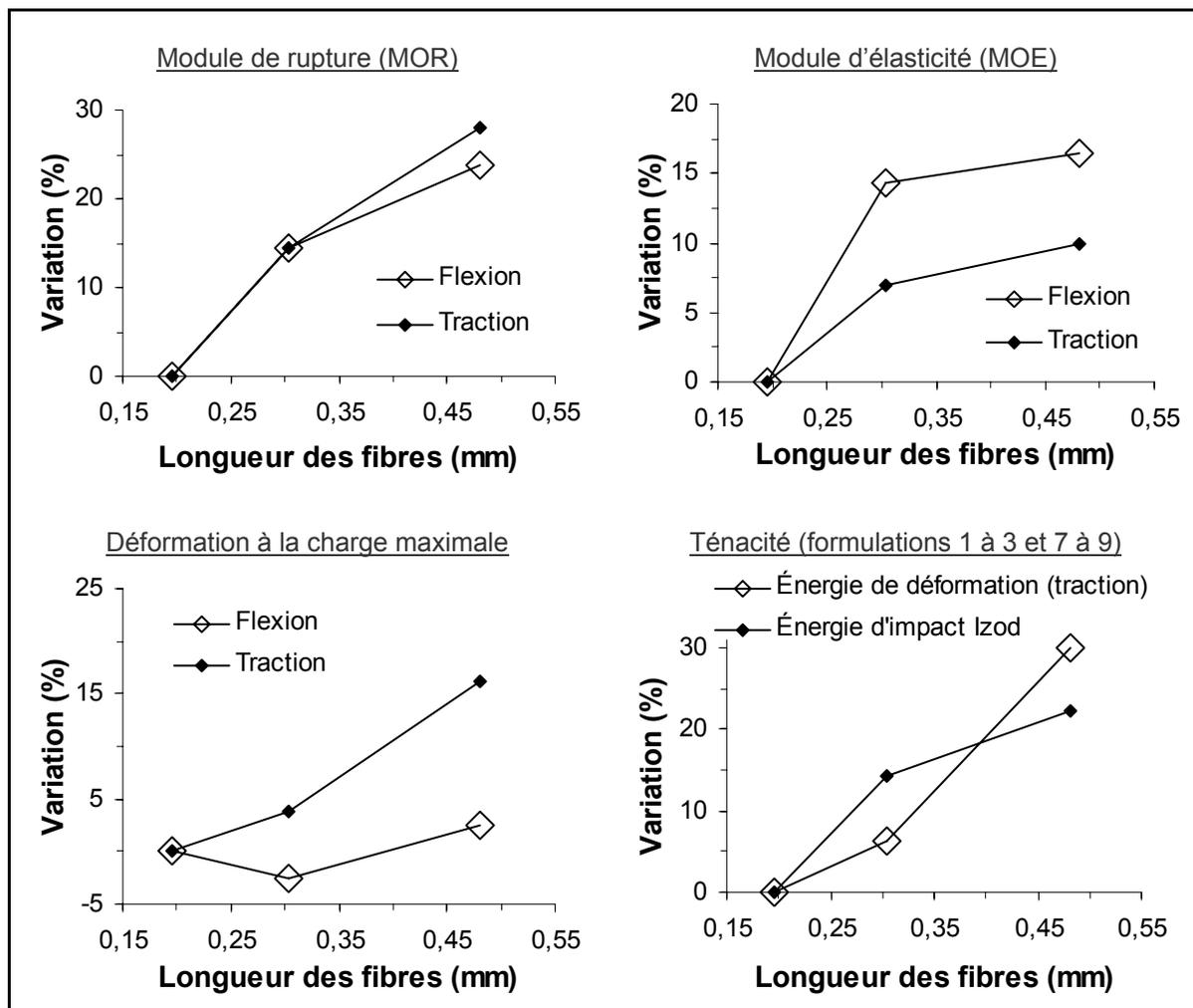


Figure 3.12 : Variation des propriétés en traction, en flexion et de la ténacité des CBP en fonction de la longueur des fibres PCTM

Les CBP moulés par injection (formulations 10 à 12) ont des propriétés mécaniques plus élevées que ceux extrudés (moyenne pour les formulations 1 à 9). Avec les deux procédés, cependant, le développement des propriétés mécaniques en flexion (Figure 3.13) et en traction en fonction de la longueur des fibres suit la même tendance.

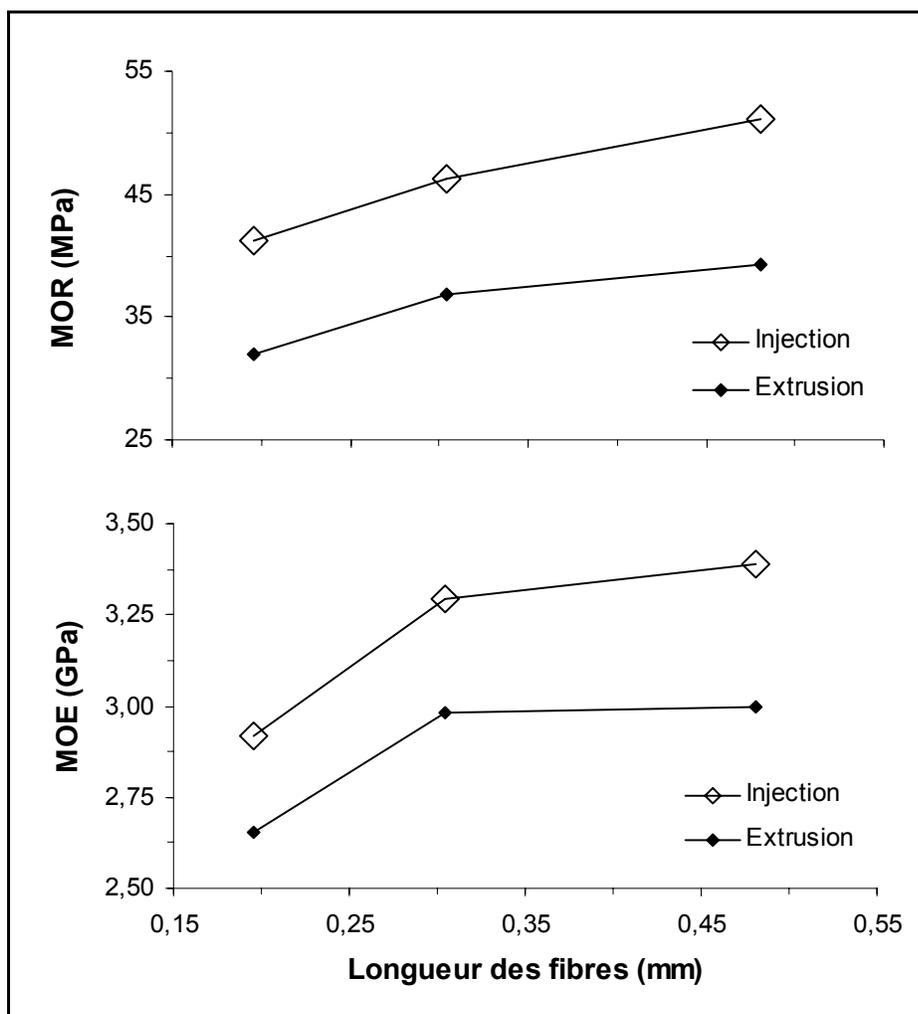


Figure 3.13 : Module de rupture (MOR) et module d'élasticité (MOE) en flexion des CBP extrudés et moulés par injection en fonction de la longueur des fibres PCTM

### 3.3.2. Formulations à 58 % de bois ; utilisation de fibres PCTM comme additif dans une formulation à base de farine de pin

L'utilisation de 21 % en poids de fibres PCTM comme additif (formulations 14 à 16) augmente les propriétés mécaniques en traction et en flexion (Figure 3.14) en comparaison avec le contrôle (formulation 13). En traction par exemple, le MOR et la déformation à la charge maximale augmentent jusqu'à 27 % et l'énergie de déformation

augmente jusqu'à 56 % (Figure 3.15). Le MOE n'est toutefois pas influencé par la longueur des fibres utilisées comme additif.

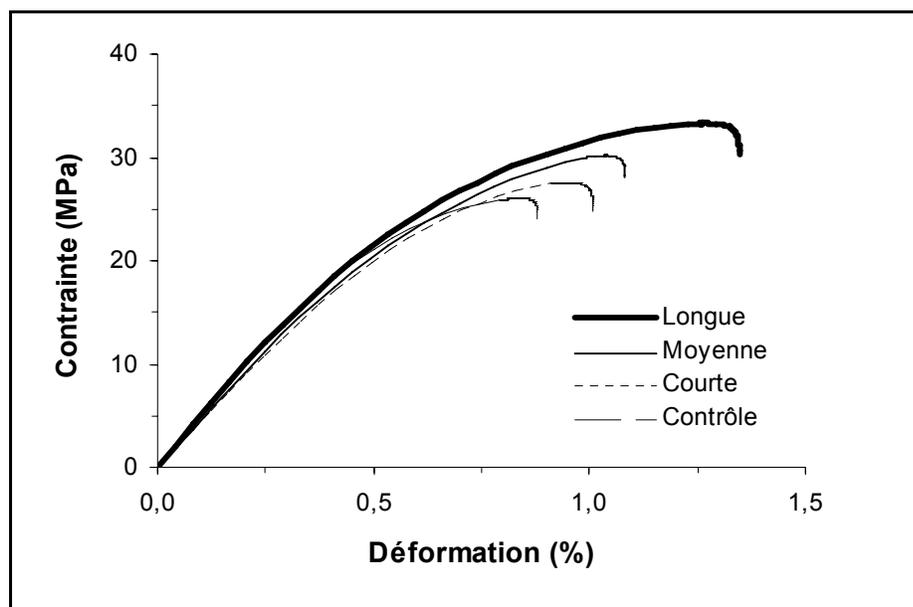


Figure 3.14 : Exemples typiques de courbes contrainte-déformation en flexion des CBP pour les différentes classes de longueur de fibres PCTM utilisées comme additif dans une formulation à base de farine de pin

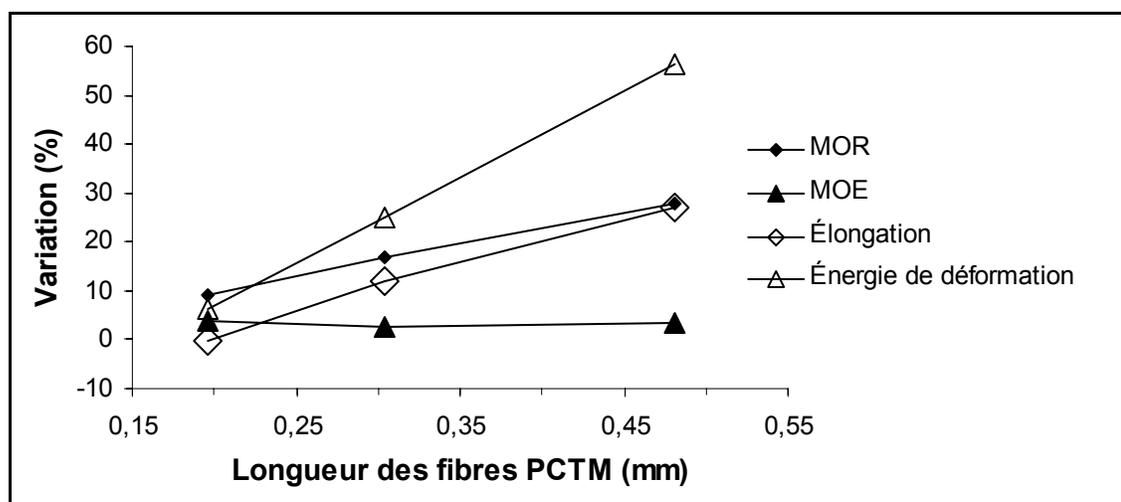


Figure 3.15 : Variation des propriétés en traction par rapport au contrôle en fonction de la longueur des fibres PCTM utilisées comme additif

### 3.4. Modélisation des propriétés mécaniques des CBP

Dans cette section, les propriétés en traction des CBP seront modélisées en fonction du ratio L/D des fibres de bois puis comparées avec les valeurs mesurées expérimentalement.

Les données expérimentales moyennes des essais de traction pour les formulations 1 à 12 ont été utilisées pour la modélisation ainsi que les propriétés en traction du PEHD (selon la fiche technique du fabricant, ou de la littérature) (Tableau 3.6). La densité a été considérée constante pour les différentes classes de longueur de fibres. La notation des modèles théoriques sera utilisée dans cette section. Ainsi, le symbole «  $\sigma_{max}$  » est utilisé pour le module de rupture, le symbole «  $E$  » est utilisé pour module d'élasticité et le symbole «  $\varepsilon$  » est utilisé pour la déformation.

Tableau 3.6 : Propriétés en traction et densité des matériaux utilisées pour la modélisation et ratio longueur/diamètre (L/D) de fibres PCTM

Matériau	L/D	Densité apparente ( $\rho$ )	Module d'élasticité ( $E$ )	Contrainte maximale ( $\sigma_{max}$ )	Déformation charge max. ( $\varepsilon_{\sigma_{max}}$ )
	Ratio	$kg/m^3$	GPa	MPa	%
CBP classe Longue <sup>1</sup>	21,3	1061	2,93	28,5	2,52
CBP classe Moyenne <sup>1</sup>	13,0		2,85	25,2	2,28
CBP classe Courte <sup>1</sup>	8,3		2,67	22,1	2,16
PEHD LB-0100	-	952 <sup>2</sup>	1,08 <sup>3</sup>	27,3 <sup>2</sup>	$\approx 9,5^3$

<sup>1</sup> : Moyenne par classe de longueur pour les formulations 1 à 12 ; 40 % PCTM (Tableau 3.5)

<sup>2</sup> : À la rupture (selon la fiche technique du fabricant)

<sup>3</sup> : PEHD ; limite élastique (ASTM D-638, 2003)

### 3.4.1. Fraction volumique de fibres

Pour appliquer les modèles, il faut connaître la fraction volumique des composants dans les composites, mais comme les mélanges ont été pesés, seules les proportions massiques sont connues. À l'aide des équations 3-1, 1-10, 1-11 et des données du tableau 3.6, on évalue que la fraction volumique occupée par les fibres de bois dans les composites est de 0,331 (Équation 3-2).

$$m_m = \frac{\rho_m v_m}{\rho_c v_c} \quad \text{Où } v_c = 1 \quad (3-1)$$

$$v_m = \frac{m_m v_c \rho_c}{\rho_m} = \frac{(0,6)(1)(1061 \text{ kg} / \text{m}^3)}{952 \text{ kg} / \text{m}^3} = 0,669 \quad (3-2)$$

$$v_f = 1 - v_m = 1 - 0,669 = 0,331$$

De façon similaire à l'équation 3-1, on évalue que la densité des fibres ( $\rho_f$ ) dans les composites de  $1282 \text{ kg} / \text{m}^3$  (Équation 3-3).

$$\rho_f = \frac{m_f \rho_c}{v_f v_c} = \frac{(0,4\%)(1061 \text{ kg} / \text{m}^3)}{(0,331)(1)} = 1282 \text{ kg} / \text{m}^3 \quad (3-3)$$

### 3.4.2. Résistance des CBP

Tout d'abord, le modèle de Kelly-Tyson couplé à la règle des mélanges a été utilisé pour modéliser la contrainte maximale dans le composite ( $\sigma_{c,max}$ ) (Équation 1-20). Dans notre cas, la valeur de la cission ( $\tau$ ) à l'interface fibre-matrice et la valeur du coefficient d'efficacité de renfort des fibres ( $\eta_\sigma$ ) sont des inconnues. On les regroupe pour former une

seule inconnue que nous appelons ici « cisssion effective » ( $\tau_{eff} = \eta_{\sigma}\tau$ ). On obtient donc l'équation 3-4.

$$\sigma_{c,max} = \nu_f 2(L/D)\tau_{eff} + (1-\nu_f)(\sigma_m)_{\sigma,max} \quad (3-4)$$

Il faut ensuite déterminer la contrainte supportée par le matériau de la matrice à  $\sigma_{c,max}$ , soit  $(\sigma_m)_{\sigma,max}$ . Pour la trouver, on pose l'hypothèse que la déformation apparente de la matrice est égale à celle du composite, soit  $\varepsilon_m = \varepsilon_c$ . Cette hypothèse est en accord avec la littérature (Sretenovic et al., 2005) ; le matériau de la matrice étant peu rigide. Dans notre cas, la déformation du composite à la charge maximale,  $(\varepsilon_c)_{\sigma,max}$ , ne dépasse pas 2,52 % (Tableau 3.6). Pour cette déformation, le matériau de la matrice est en régime élastique linéaire (Figure A.1). Comme on connaît le module d'élasticité de la matrice ( $E_m$ ), on peut utiliser la loi des solides élastiques de Hooke pour calculer  $(\sigma_m)_{\sigma,max}$  (Équation 3-5). On insère enfin l'équation 3-5 dans l'équation 3-4 et on obtient l'équation 3-6, qui modélise  $\sigma_{c,max}$  en fonction du ratio L/D des fibres de bois.

$$(\sigma_m)_{\sigma,max} = (E_m)[(\varepsilon_m)_{\sigma,max}] = (E_m)[(\varepsilon_c)_{\sigma,max}] \quad (3-5)$$

$$\sigma_{c,max} = \nu_f 2(L/D)\tau_{eff} + (1-\nu_f)(E_m)[(\varepsilon_c)_{\sigma,max}] \quad (3-6)$$

On observe que le modèle de Kelly-Tyson (Équation 3-6) évalue à la hausse le développement de la résistance en traction des composites en fonction du ratio L/D des fibres de bois (Figure 3.16 et tableau 3.7). À noter que la valeur du terme  $\tau_{eff}$  a été ajustée afin de « forcer » le modèle à être égal à la valeur mesurée pour la classe Courte. Cette

technique permet d'ajuster le modèle aux valeurs expérimentales (éliminer l'erreur de biais) afin d'évaluer le modèle par rapport au développement des propriétés en fonction de la variable principale, soit le ratio L/D des fibres de bois.

On peut également calculer la contrainte dans les fibres PCTM à  $\sigma_{c,max}$ , soit  $(\sigma_f)_{\sigma_{c,max}}$ . Selon la règle des mélanges ci-dessous (Équation 1-13), elle varie entre 19,7 MPa pour la classe Courte et 31,0 MPa pour la classe Longue (Tableau 3.7).

$$(\sigma_f)_{\sigma_{c,max}} = \frac{\sigma_{c,max} - v_m (\sigma_m)_{\sigma_{c,max}}}{v_f} = \frac{\sigma_{c,max} - v_m (E_m) [(\varepsilon_c)_{\sigma_{c,max}}]}{v_f} \quad (1-13)$$

Tableau 3.7 : Contrainte maximale en traction des CBP pour les différents ratios longueur/diamètre (L/D) de fibres PCTM selon le modèle de Kelly-Tyson et contrainte dans les fibres selon la règle des mélanges

Classe	L/D	Contrainte maximale dans le composite ( $\sigma_{c,max}$ )		Contrainte dans les fibres à $\sigma_{c,max}$ [ $(\sigma_f)_{\sigma_{c,max}}$ ] (Équation 1-13)
		Mesurée	Kelly-Tyson <sup>1</sup> (Équation 3-6)	
	Ratio	MPa	MPa	MPa
Longue	21,3	28,48	34,91	30,96
Moyenne	13,0	25,23	26,62	26,56
Courte	8,3	22,12	22,12 <sup>2</sup>	19,64

<sup>1</sup> : Kelly-Tyson :  $\tau_{eff} = 1,183 \text{ MPa}$ .

<sup>2</sup> : Valeur « forcée »

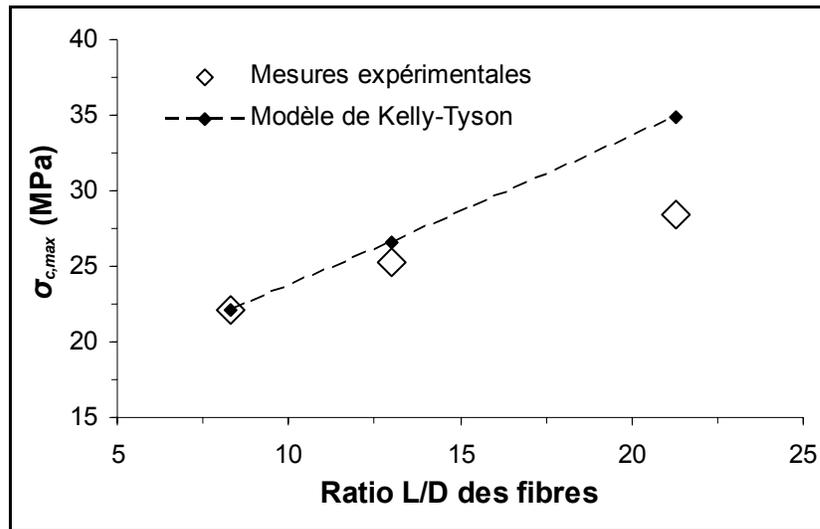


Figure 3.16 : Contrainte maximale des composites ( $\sigma_{c,max}$ ) en traction en fonction du ratio longueur/diamètre (L/D) de fibres PCTM selon le modèle de Kelly-Tyson (Équation 3-6)

### 3.4.3. Rigidité des CBP

Afin de modéliser le module d'élasticité des composites ( $E_c$ ), nous avons d'abord utilisé le modèle de Cox-Kelly couplé à la règle des mélanges (Équation 1-22) et par la suite nous avons utilisé le modèle de Nielson (Équation 1-23).

Pour un matériau isotrope, le module de cisaillement ( $G_m$ ) est donné par  $E_m/(1-\nu_m)$  (Baïlon et Dorlot, 2000). Le PEHD est un matériau isotrope, son coefficient de poisson ( $\nu_m$ ) est d'environ 0,35 (Baïlon et Dorlot, 2000). La section d'une fibre ( $A_f$ ) en forme de cylindre plein est donnée par  $\pi D^2/4$ . Dans notre cas, le coefficient d'efficacité de renfort des fibres ( $\eta_E$ ) et le module d'élasticité des fibres ( $E_f$ ) sont des inconnues. On les regroupe pour former une seule inconnue que nous appelons ici « module d'élasticité effectif des fibres » ( $E_{f,eff} = \eta_E E_f$ ). Enfin, on estime le diamètre de matériel de la matrice autour des

fibres ( $\Phi$ ) par une fonction du diamètre des fibres et de la fraction volumique des constituants dans le composite à l'aide de relations géométriques simples, en supposant que le matériau de matrice qui entoure les fibres est de forme cylindrique. On réécrit ainsi l'équation 1-22 sous la forme de l'équation 3-7.

$$E_c = \nu_f \left[ 1 - \frac{\tanh(\beta L / D)}{\cosh(\beta L / D)} \right] E_{f,eff} + (1 - \nu_f) E_m \quad (3-7)$$

$$\text{Avec } \beta^2 = \frac{E_m}{E_{f,eff}(1 - \nu_m) \ln(\Phi / D)} \quad \text{Et } \Phi = \sqrt{(\nu_m / \nu_f + 1) D^2}$$

On observe que le modèle de Cox-Kelly (Équation 3-7) évalue à la hausse le développement de la rigidité des composites en fonction du ratio L/D des fibres PCTM (Figure 3.17 et tableau 3.8). À noter que la valeur de  $E_{f,eff}$  a été ajustée afin de « forcer » le modèle à être égal à la valeur mesurée pour la classe Courte.

Nous utilisons un dernier modèle, celui de Nielson (Équation 1-23), afin de modéliser le module d'élasticité des composites ( $E_c$ ). Comme nous avons fait précédemment, on utilise un « module d'élasticité effectif des fibres ». On réécrit ainsi l'équation 1-23 sous la forme 3-8.

$$E_c = E_m \left( \frac{1 + \xi \lambda \nu_f}{1 - \lambda \psi \nu_f} \right) \quad \text{Avec } \lambda = \frac{E_{f,eff} / E_m - 1}{E_{f,eff} / E_m + \xi} \quad \text{Et } \psi = 1 + \nu_f \left( \frac{1 - \nu^2}{\nu^2} \right) \quad (3-8)$$

On conserve la valeur numérique de  $E_{f,eff}$  utilisée précédemment pour « forcer » le modèle de Cox-Kelly, car elle donne aussi un bon résultat avec ce modèle (ce qui nous

semble juste puisqu'on modélise le même matériau!). Il reste le paramètre d'ajustement empirique de courbe  $\zeta$ , proportionnel à L/D, à déterminer. On ajuste la valeur de  $\zeta$  pour « forcer » le modèle à être égal à la valeur mesurée pour la classe Courte. On observe que le modèle de Nielson (Équation 3-8) donne de meilleurs résultats que le modèle de Cox-Kelly (Tableau 3.8 et figure 3.17).

Tableau 3.8 : Module d'élasticité en traction des CBP pour différents ratios longueur/diamètre (L/D) de fibres PCTM selon le modèle de Cox-Kelly et le modèle de Nielson

Classe	L/D	Mesuré	Cox-Kelly <sup>1</sup>	Nielson <sup>1</sup>
	Ratio		(Équation 3-7)	(Équation 3-8)
			GPa	GPa
Longue	26,0	2,93	3,21	3,11
	21,3		3,16	3,05
	17,0		3,08	2,97
Moyenne	13,0	2,85	2,96	2,87
Courte	8,3	2,67	2,67 <sup>2</sup>	2,67 <sup>2</sup>
	5,0		2,19	2,44

<sup>1</sup> : Cox-Kelly :  $E_{f,eff} = 8,28 \text{ GPa}$  ; Nielson :  $E_{f,eff} = 8,28 \text{ GPa}$ ,  $\zeta = 0,837(L/D)$

<sup>2</sup> : Valeur « forcée »

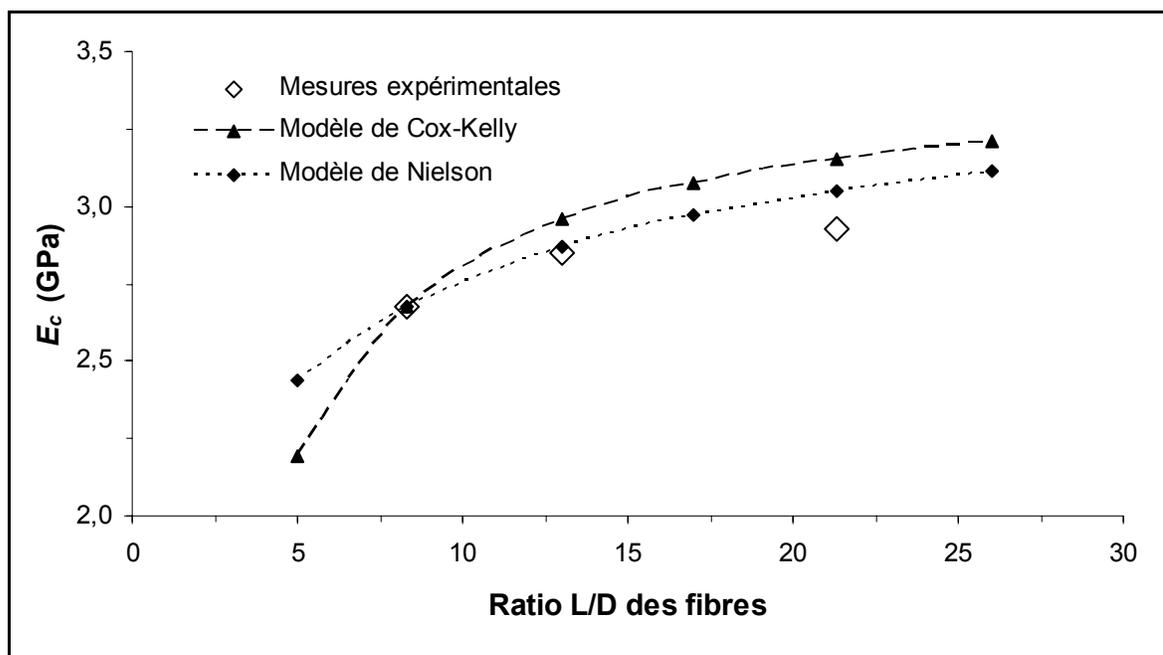


Figure 3.17 : Module d'élasticité des composites ( $E_c$ ) en traction en fonction du ratio longueur/diamètre (L/D) des fibres PCTM selon le modèle de Cox-Kelly (Équation 3-7) et le modèle de Nielson (Équation 3-8)

## CHAPITRE IV

### DISCUSSION

#### 4.1. Caractéristiques de couple et mise en forme

L'hypothèse 1, qui proposait que les propriétés rhéologiques du plastique fondu chargé de fibres de bois varient avec la longueur des fibres a été vérifiée.

Les essais au rhéomètre à couple ont montré que le couple augmente proportionnellement avec la proportion massique de fibres dans le plastique. On peut donc supposer que la viscosité suit la même tendance (Schramm, 1994). Ce résultat est en accord avec les études de Soucy et al. (2006), Li et Wolcott (2005) et Li et al. (2004). Ce résultat est logique, car lorsqu'on ajoute des particules non miscibles dans le fluide fondu, elles créent du frottement ; frottement entre les particules et les molécules du fluide et frottement entre les particules elles-mêmes. Plus le nombre de particules augmente plus les frottements augmentent et plus la viscosité augmente.

Le couple (donc la viscosité) a également augmenté avec la longueur des fibres de bois introduites dans le polymère. Pourtant, Li et Wolcott (2005) n'ont constaté aucune variation significative de la viscosité pour différentes classes de farine de bois. Il semble pourtant logique que la taille des particules introduites dans le plastique fondu influence la

viscosité. D'une part les fibres longues peuvent s'enchevêtrer, ce qui augmente la résistance au mouvement et donc la viscosité apparente. D'autre part, les fines particules ont une surface de contact spécifique plus grande, ce qui fait que la résistance à l'écoulement devient plus grande.

Ces résultats ont des implications pratiques importantes, notamment au niveau de la mise en forme des CBP. De fait, dans cette étude, les paramètres machines de formation des CBP ont dû être ajustés en fonction de la longueur des fibres (Tableau 2.3).

Lors des essais dans le rhéomètre à couple, nous avons constaté qu'il est difficile d'incorporer plus de 45 % en poids de fibres longues (ou cellules entières) dans le PEHD. Au-delà de cette valeur critique, des fibres de bois ne se mélangeaient pas au plastique fondu. Ce qui est problématique, car l'industrie des CBP utilise des charges massiques de bois aux alentours de 50 à 60 % (Wolcott, 2003). Plusieurs études qui présentent des CBP à base de fibres entières n'ont pas plus de 40 % en poids de fibres (Le Baillif et Oksman, 2006 ; Stark et Rowlands, 2003 ; Lee et al. 2001 et Sanschagrin et al., 1988).

## **4.2. Effets de la longueur des fibres dans les CBP**

L'hypothèse 2, qui proposait que les propriétés physico-mécaniques des CBP varient avec la longueur des fibres a été vérifiée. En effet, certaines propriétés physiques et toutes les propriétés mécaniques des CBP ont été influencées par la longueur des fibres de bois. Ce résultat est valide dans toutes les conditions expérimentales testées ; soit différents procédés de mise en forme, différents additifs et combinaisons d'additifs et différentes

charges massiques de bois.

La densité apparente des CBP ne varie pas en fonction de la longueur des fibres (moins de 1%). Les profils de densité aux rayons X suggèrent que l'homogénéité des CBP à 40 % de bois ne varie pas avec la longueur des fibres. Selon ces deux résultats, il semble donc que la formation en deux étapes a permis de bien disperser les fibres de bois dans la matrice de plastique. Ce résultat est en accord avec l'étude de Le Baillif et Oksman (2006), qui ont conclu qu'une deuxième extrusion améliore l'homogénéité des CBP. Stark et Rowlands (2003), Yam et al. (1990) et Sanschagrín et al. (1988) ont tous utilisé un procédé à deux étapes pour la formation de CBP à base de fibres longues. La fabrication en deux étapes demande plus de temps et est donc, à première vue, plus coûteuse. Toutefois, selon Gamstedt et al. (2007), plusieurs industriels préféreraient utiliser une étape de pastillage afin de se garantir un tampon de production.

L'utilisation de fibres longues comme additif dans une formulation à base de farine de pin typique de l'industrie a cependant eu un effet négatif sur l'homogénéité des CBP. Cette situation peut s'expliquer par le fait que les fibres longues ont tendance à s'agglomérer dans le mélange à sec, ce qui réduit la dispersion des fibres dans la matrice (Le Baillif et Oksman, 2006 ; Grande et Torres, 2003 ; Wolcott et Englund, 1999 ; Yam et al., 1990).

L'absorption massique et le gonflement volumique des CBP à 40 % de bois en immersion dans l'eau ont augmenté proportionnellement avec la taille des particules de bois, pour un même temps d'immersion. Ce résultat est en accord avec Stark et al. (2004).

Nous proposons deux explications plausibles : (1) les fibres courtes sont plus isolées par la matrice hydrophobe, (2) avec des fibres plus longues, l'eau diffuse sur une plus grande distance sans interruption, favorisant une absorption de l'eau plus rapide. Cependant, pour une même teneur en humidité, le gonflement est le même ; c'est-à-dire que le coefficient de dilatation volumique à l'humidité est le même. On aurait plutôt pensé que le gonflement diminuerait avec la longueur des fibres puisque la rigidité augmente (l'énergie nécessaire pour déformer un matériau augmente avec la rigidité). Ce résultat reste sans explications. Enfin, les CBP à 58 % de bois sont moins stables en immersion dans l'eau que ceux à 40 %. Ce résultat était attendu, car le bois est la composante hydrophile des CBP.

La résistance des CBP (en traction, en flexion et à l'impact) a augmenté proportionnellement avec la longueur des fibres (ou le ratio  $L/D$ , car les fibres des différentes classes de longueur ont le même diamètre). Ce résultat est en accord avec la majorité des résultats trouvés dans la littérature (Figure 4.1). Cependant, Le Biallif et Oksman (2006) n'ont observé aucune variation de la résistance en fonction de la longueur des fibres.

L'augmentation de la résistance des CBP avec la longueur des fibres est possible si des conditions favorables sont réunies, dont ; une bonne adhésion entre les deux composants, des fibres orientées adéquatement et bien dispersées dans la matrice (Gamstedt et al., 2007 ; Wolcott et Englund, 1999). Dans cette étude, ces trois conditions ont été réunies, même pour les formulations sans agent coupleur. Il est possible que les traitements chimiques apportés aux fibres lors du raffinage aient favorisé la compatibilité avec le

PEHD.

Soulignons ensuite que les fibres utilisées avaient une longueur inférieure à la « longueur critique de transfert de charge », et ce même pour la classe Longue (ratio L/D de 21,3). L'atteinte de la longueur critique serait représentée par un plateau dans le développement du MOR en fonction de la longueur des fibres (Figure 3.13). Ce résultat concorde avec l'étude de Sanschagrín et al. (1988), qui ont atteint la longueur critique pour un ratio L/D d'un peu plus de 20 et celle de Herra-Franco et Valadez-Gonzalez (2005), qui l'ont atteinte avec des ratios L/D de 20 à 72. Il semble donc possible dans notre cas d'augmenter encore la résistance des CBP en utilisant des fibres plus longues. On pourrait, par exemple, augmenter la longueur moyenne des fibres en réduisant le nombre de fines avec un tamis, ou encore utiliser des trachéides (bois de conifère) car elles sont généralement plus longues que les fibres (bois de feuillu).

La rigidité des CBP a augmenté proportionnellement avec la longueur des fibres. Ce résultat était attendu, car un ratio L/D élevé augmente le transfert de charge de la matrice vers les fibres. Ce résultat en accord avec les résultats trouvés dans la littérature (Figure 4.2). Le Biallif et Oksman (2006) n'ont observé aucune variation de la rigidité en fonction de la longueur des fibres.

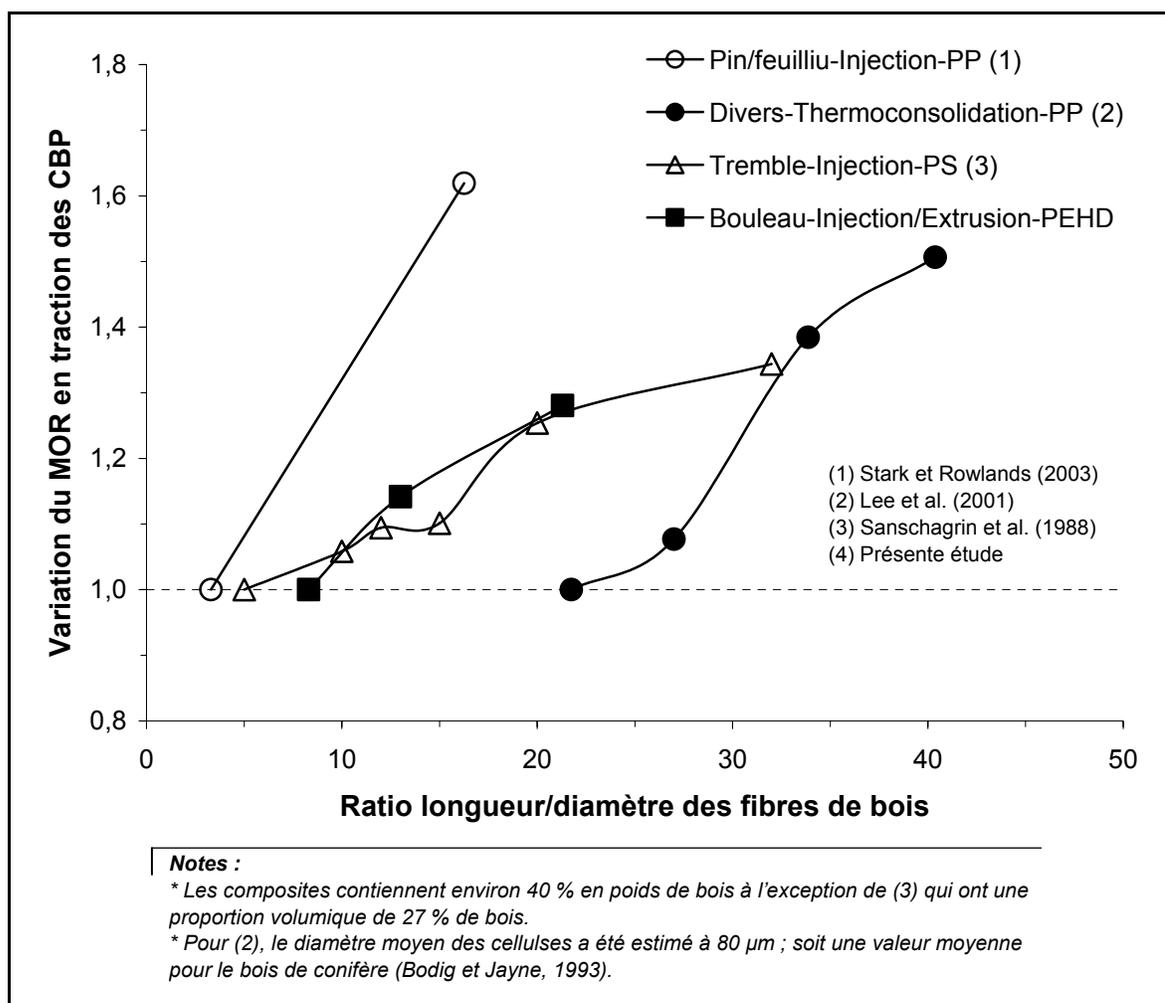


Figure 4.1 : Développement du module de rupture (MOR) en traction de composites bois-plastiques en fonction du ratio longueur/diamètre des particules de bois, selon différentes études

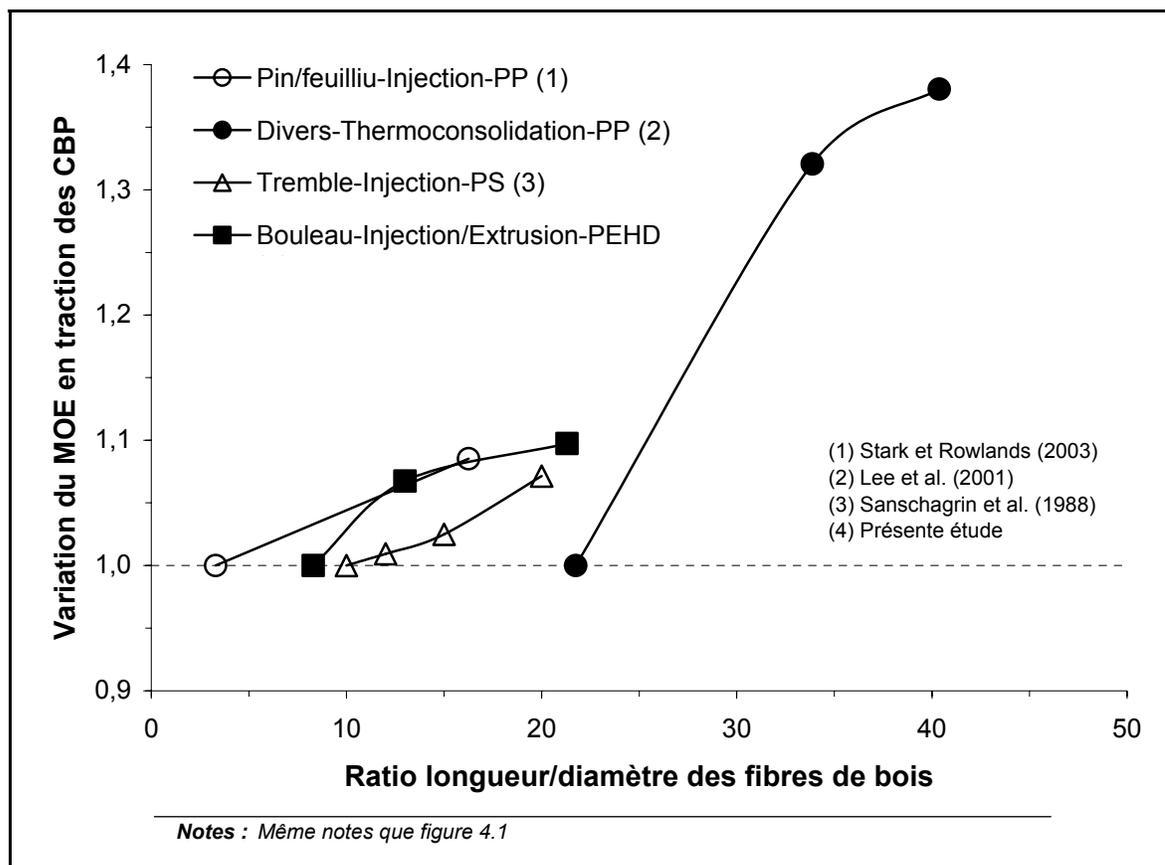


Figure 4.2 : Développement du module d'élasticité (MOE) en traction de composites bois-plastiques en fonction du ratio longueur/diamètre des particules de bois, selon différentes études.

Les particules fines créent des zones de concentration de contrainte, ce qui explique en partie les faibles performances mécaniques des CBP à base de farine de bois comparativement à ceux à base de fibres longues (Gamstedt et al., 2007). Malgré ceci, nos résultats ont montré que l'utilisation de fibres longues comme additif dans une formulation à base de farine de bois augmente considérablement la résistance du composite. L'effet de la longueur des fibres semble donc dominant sur l'effet des concentrations des contraintes occasionnées par les particules fines de farine de bois.

Les deux méthodes utilisées pour évaluer la ténacité des CBP ont montré que la ténacité augmente avec la longueur des fibres. L'augmentation est similaire selon les deux méthodes. Ce résultat est en accord avec les théories classiques de la mécanique de rupture (Baïlon et Dorlot, 2000 ; Callister, 2001).

La déformation à la charge maximale des CBP a augmenté avec la longueur des fibres. Ce résultat peut être expliqué par des notions bien connues en mécanique de rupture des composites renforcés de fibres discontinues (Gibson, 1994 ; Baïlon et Dorlot, 2000). Lors d'un essai mécanique, il y a rupture brutale lorsque la charge est suffisamment élevée pour décoller les fibres de la matrice, car toute la charge appliquée est soudainement transférée dans le matériau de la matrice. En utilisant des fibres longues, le transfert de charge de la matrice vers les fibres est plus élevé, ce qui retarde le décollement des fibres et permet d'augmenter la déformation. Ce résultat, cependant, a relativement peu d'implications pratiques.

L'hypothèse 3, qui proposait que les modèles permettent d'expliquer les implications de la taille des fibres de bois dans le développement des propriétés mécaniques des CBP a été vérifiée. En effet, nous avons observé des tendances similaires avec les techniques de modélisation et avec les mesures expérimentales. Cependant, les trois modèles utilisés surestiment les effets du ratio  $L/D$  des fibres de bois (Figure 3.16 et figure 3.17). Ce résultat peut être attribué en partie à la réduction de la taille des fibres lors de la mise en forme des CBP. Il est important de rappeler que les fibres ont été mesurées avant leur incorporation dans la matrice thermoplastique. Les hypothèses sur lesquelles sont

fondés les modèles peuvent aussi expliquer les différences obtenues. Par exemple, les fibres sont considérées comme des cylindres pleins et rectilignes alors qu'en réalité, les fibres de bois sont en forme de cylindre creux (vide à l'intérieur). En plus, dans les CBP, elles peuvent être tordues, pliées en coude, aplaties et les lumens peuvent être remplis par le matériau de la matrice (Lee et al., 2001). Aussi, certaines caractéristiques fondamentales du bois ont été négligées dans la modélisation. Par exemple, le bois de feuillu ne contient généralement pas plus de 70 % en volume de fibres (Tableau 1.1) ; les autres cellules ont des propriétés mécaniques peu élevées (Bodig et Jayne, 1993) et ne participent pas au renfort du plastique.

Selon la règle des mélanges (Équation 1-13), la contrainte dans les fibres dans les CBP atteint au maximum 31 MPa. Il est donc clair que le potentiel de renfort des fibres de bois n'a pas été pleinement utilisé, car cette valeur est environ 5 fois inférieure à la résistance du bouleau blanc (résistance en traction de 165 MPa dans la direction longitudinale, selon Bodig et Jayne, 1993). Ceci implique que les fibres de bois ont décollé de la matrice avant de se rompre. Selon Wolcott et al. (2003), ce résultat est généralement observé pour les CBP.

### **4.3. Autres résultats pertinents**

Cette étude a mené à quelques résultats originaux susceptibles d'intéresser la communauté scientifique, mais qui sont en dehors des hypothèses à vérifier. Cette section discute brièvement de ces résultats.

### 4.3.1. Effets du procédé de mise en forme

Indépendamment du procédé de mise en forme utilisé dans cette étude, les effets de la longueur des fibres sur les propriétés physico-mécaniques des CBP sont similaires. Toutefois, les CBP moulés par injection sont plus rigides et plus résistants que ceux extrudés (Figure 3.13). Ce résultat est en accord avec Stark et al. (2004). Nous proposons trois hypothèses pour expliquer ce résultat :

- (1) Les fibres de bois : Les paramètres de mise en forme peuvent influencer la longueur ou l'organisation des fibres dans le produit final (Le Baillif et Oksman, 2006 ; Yam et al., 1990), et par le fait même, ses propriétés mécaniques. Dans notre cas par exemple, les micrographes pris sur la surface des échantillons montrent que le procédé de moulage par injection a aligné les fibres dans une direction préférentielle tandis qu'avec le procédé d'extrusion, les fibres sont orientées de façon plus aléatoire (Figure 4.3, formulations 1 et 7). Ceci influence les propriétés mécaniques du composite de trois façons : (1) les fibres de bois sont beaucoup plus rigides et résistantes dans le sens longitudinal (Bodig et Jayne, 1993) ; (2) le coefficient d'efficacité de renfort des fibres est plus élevé lorsque les fibres ont un alignement préférentiel (Gibson, 1994 ; Baïlon et Dorlot, 2000) ; (3) des fibres de renfort alignées dans le sens de l'application d'une charge en traction peuvent créer un mécanisme d'arrêt de propagation de fissures, ce qui augmente la résistance du composite. Ce mécanisme est particulièrement efficace lorsque l'adhésion fibre-matrice est faible (Baïlon et Dorlot, 2000).

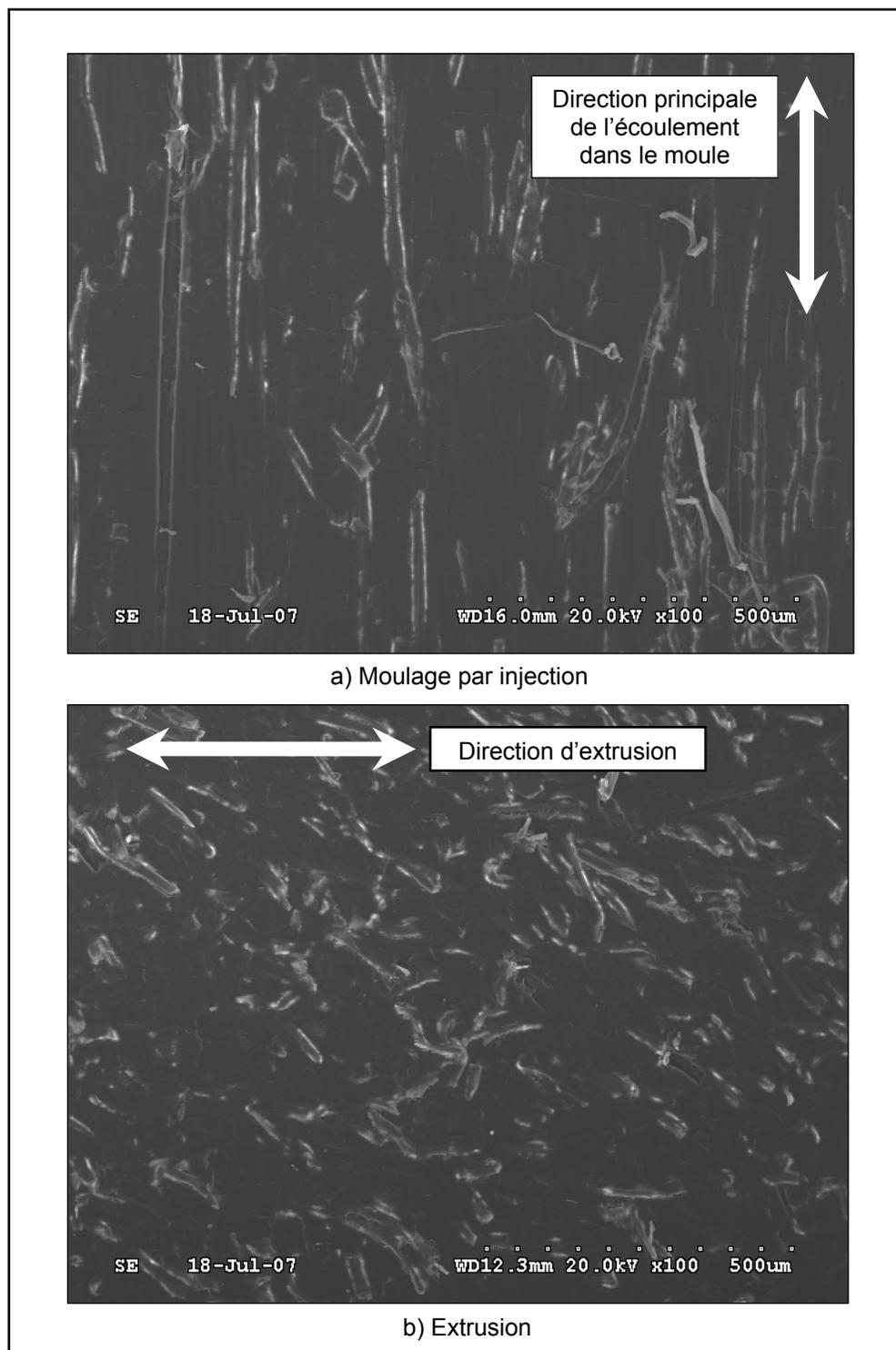


Figure 4.3 : Micrographes électroniques avec un agrandissement de 100 fois pris sur la surface des échantillons a) moulés par injection et b) extrudés

- (2) La qualité de surface des échantillons : Le procédé de moulage par injection laisse une mince couche riche en plastique à la surface des échantillons (Stark et al., 2004). La surface est donc très lisse comme on peut voir sur les micrographes électroniques (Figure 4.4). Aussi, les CBP extrudés ont été usinés afin de respecter les dimensions spécifiées pour les essais mécaniques contrairement à ceux moulés par injection. Les surfaces des échantillons extrudés présentaient donc des défauts comme des trous, des empreintes de fibres décollées et des bouts de fibres qui sortent de la surface (Figure 4.4). Ces défauts créent des zones de concentration de contrainte et peuvent réduire la résistance de l'échantillon (Baïlon et Dorlot, 2000). Toutefois, Stark et al. (2004) ont remarqué que des échantillons planés étaient plus résistants que des échantillons non planés. Ce qui est également possible, car durant le planage le polymère fond ce qui réduit la rugosité de surface tout en supprimant les points faibles qui peuvent être à l'origine de ruptures prématurées.
- (3) La matrice plastique : Afin de comparer les procédés d'extrusion et de moulage par injection, il faut considérer des paramètres de formation communs aux deux procédés, dont : la température, la pression, le taux de cisaillement, le temps de séjour et de refroidissement. Les propriétés du plastique, notamment sa cristallinité, peuvent varier avec ces paramètres (Michaeli et Menges, 1989) et ainsi influencer les propriétés physico-mécaniques du composite.

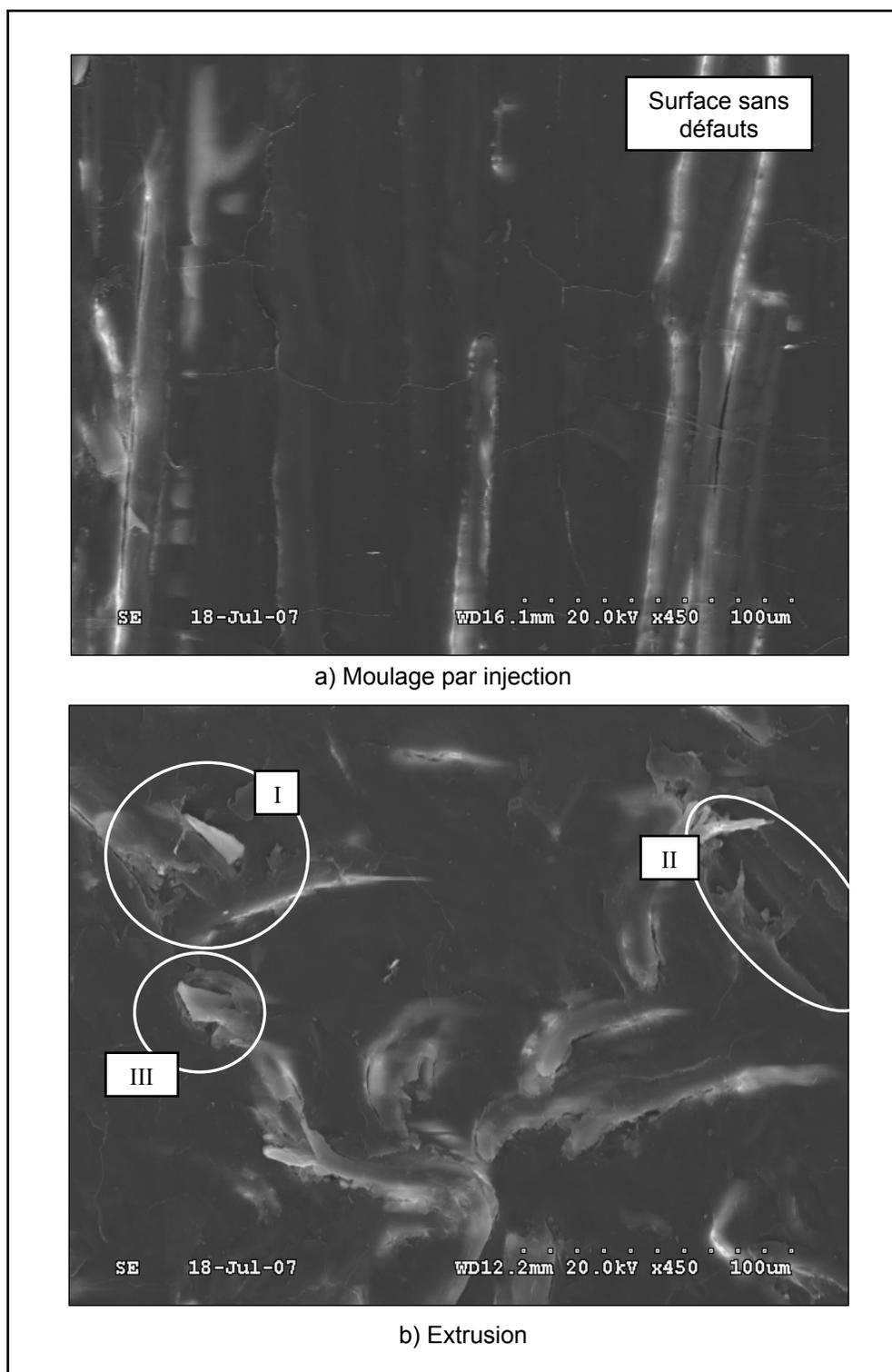


Figure 4.4 : Micrographes électroniques avec un agrandissement de 450 fois pris sur la surface des échantillons a) moulés par injection et b) extrudés. I = trou ; II = empreinte de fibre ; III = bout de fibre

#### **4.3.2. Relations entre la densité apparente et les propriétés mécaniques des CBP**

Dans l'ensemble du mémoire, nous avons discuté abondamment des propriétés physico-mécaniques des CBP sans considérer une variable très importante dans le développement des propriétés des produits à base de bois (Bodig et Jayne, 1993) : la densité apparente.

Dans le bois et les produits à base de bois une densité élevée est souhaitable, car elle augmente les propriétés mécaniques (Bodig et Jayne, 1993). Un matériau à base de bois plus dense contient plus de cellulose, donc il est plus rigide. Pourtant, dans notre étude, on observe que la résistance des CBP diminue proportionnellement avec la densité apparente (Figure 4.5). Par exemple, les CBP à 40 % de fibres PCTM moulés par injection ont de meilleures propriétés mécaniques que ceux extrudés, mais ils ont une densité moins élevée. Aussi, les CBP à 58 % de farine de pin sont moins résistants que ceux à 40 % de fibres PCTM, mais ils ont une densité plus élevée.

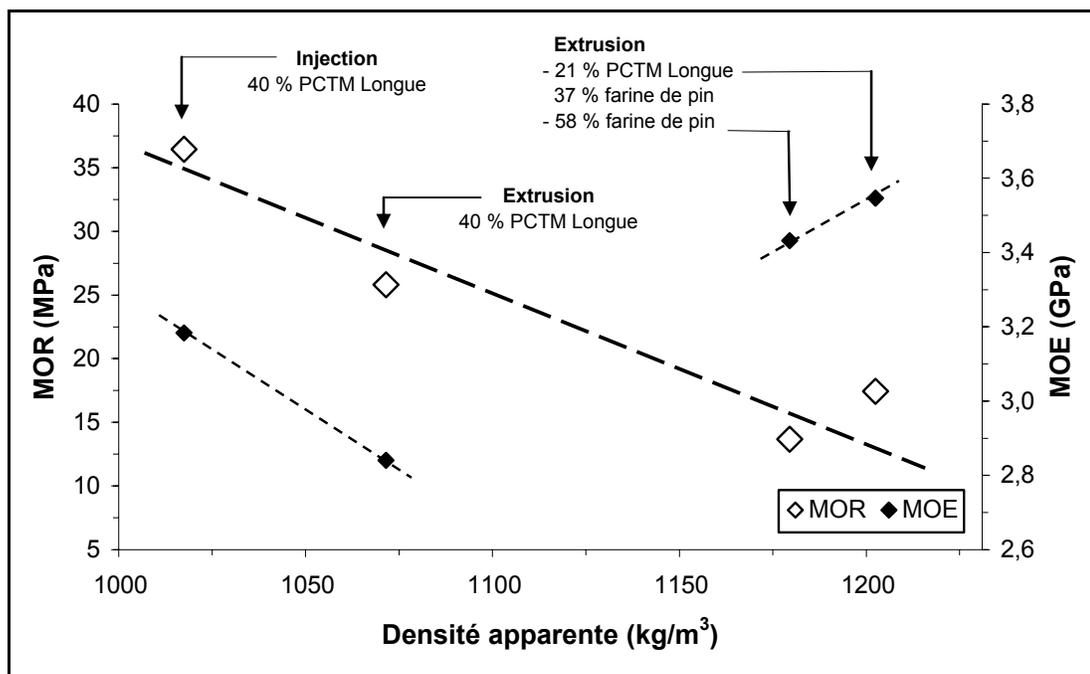


Figure 4.5 : Module de rupture (MOR) et module d'élasticité (MOE) en traction en fonction de la densité de CBP issus de différents procédés de mise en forme, proportions massiques, essences et ratios L/D de particules de bois

#### 4.3.3. Comparaison avec le matériau de la matrice et effets des additifs

Dans tous les cas, l'ajout de fibres de bois dans le PEHD a augmenté sa densité apparente. Ce résultat concorde avec Soucy (2007) tandis que Lee et al. (2001) ont observé le phénomène inverse. Nous avons estimé que la densité des fibres PCTM dans les CBP à 40 % est d'environ 1282 kg/m<sup>3</sup>. Ce résultat est en accord avec Steckel et al. (2006). Cette valeur est inférieure à la densité théorique du bois (~1500 kg/m<sup>3</sup>), mais largement supérieure à la densité apparente du bouleau blanc à l'état anhydre (480 kg/m<sup>3</sup>). Deux phénomènes pourraient expliquer cette situation : les lumens des fibres sont remplis de PEHD ou les fibres sont aplaties. Ces deux phénomènes sont moins probables avec de la farine de bois, ce qui peut expliquer pourquoi nos CBP à base de farine de bois ont une

densité plus élevée que ceux à base de fibres longues (voir figure 4.3).

L'ajout de fibres de bois dans la matrice de PEHD a généralement diminué sa résistance. C'est le résultat généralement observé dans la littérature pour les CBP à base de farine de bois (Wolcott et Englund, 1999). Nos CBP moulés par injection qui contiennent des fibres des classes de longueur *Moyenne* et *Longue* font exception ; ils ont un MOR plus élevé que celui du polymère vierge de +15.4 % et +33.5 %, respectivement. Ce résultat concorde avec les études de Sanschagrin et al. (1988), Simonsen (1997) et Stark et Rowlands (2003), qui ont obtenu les résultats avec l'utilisation de fibres entières. Pour renforcer un plastique, il faut donc utiliser des fibres qui ont un ratio L/D élevé.

L'ajout de fibres de bois dans la matrice de PEHD a augmenté sa rigidité et a diminué d'une façon très importante la déformation à la charge maximale. Ce résultat est généralement observé dans la littérature (Wolcott et Englund, 1999) et s'explique facilement ; le bois a une rigidité beaucoup plus grande que le plastique.

L'absorption d'eau a diminué légèrement avec l'utilisation d'un agent coupleur (le PEMA). Ce résultat est en accord avec la littérature (Steckel et al., 2006 ; Bledzki et Farduk, 2003).

L'utilisation du PEMA a conduit à des propriétés mécaniques inférieures en comparaison avec les formulations sans additif. Pourtant, Wolcott et al. (2001) ont obtenu une augmentation de 92 % avec le même additif et le même polymère. Il est toutefois important de mentionner que nos CBP qui contiennent du PEMA dégagent une odeur

particulière et désagréable. Ensuite, l'utilisation du OP-100 comme lubrifiant a conduit à des propriétés mécaniques légèrement inférieures en comparaison avec les formulations sans additif. Encore une fois, Wolcott et al. (2001) ont observé le résultat inverse dans des conditions similaires. Dans les deux cas, la différence doit être attribuable aux variables qui diffèrent, par exemple ; la proportion des constituants dans le matériau, la nature des fibres de bois et les conditions de formation.

# CHAPITRE V

## CONCLUSIONS

Trois classes de longueur de fibres de pâte à papier PCTM de bouleau blanc ont été obtenues par broyage mécanique. Les propriétés du PEHD fondu chargé des trois classes de fibres ont été étudiées afin de comprendre les implications de la longueur des fibres dans la formation des CBP. Des composites de bonne qualité avec les différentes classes de fibres ont été fabriqués par les procédés d'extrusion et de moulage par injection. Les CBP obtenus ont ensuite été caractérisés en termes de propriétés physico-mécaniques. Finalement, des techniques de modélisation ont été utilisées afin de mieux comprendre les implications de la longueur des fibres dans les propriétés en traction des CBP.

L'objectif général et les trois objectifs spécifiques de l'étude ont été atteints. Ainsi, le grand nombre de conditions expérimentales permettent de tirer des conclusions sans ambiguïté concernant « les effets de la longueur des fibres sur la formation et les propriétés des composites bois-plastiques (CBP) » :

- ⇒ Propriétés physiques des CBP : La densité apparente ne varie pas avec la longueur des fibres. L'homogénéité n'est pas influencée par la longueur des fibres. La performance lors des essais en immersion dans l'eau diminue avec la longueur des fibres.

- ⇒ Propriétés mécaniques des CBP : La résistance, la rigidité, la déformation et la ténacité augmentent avec la longueur des fibres. Cette conclusion est valide pour différents procédés de mise en forme (extrusion, injection) et additifs utilisés (lubrifiant, agent coupleur). Le moulage par injection conduit à de meilleures propriétés mécaniques que l'extrusion.
- ⇒ Formation des CBP : La longueur des fibres influence les caractéristiques de couple du PEHD fondu chargé de fibres. L'énergie mécanique de mélangeage et le couple maximum augmentent avec la longueur des fibres. Il faut donc ajuster les paramètres de formation en fonction de la longueur des fibres. Pour l'utilisation de fibres longues, il est nécessaire de procéder en deux étapes.
- ⇒ Charge critique de fibres longues dans le CBP : Il est difficile d'incorporer plus de 40-45 % de fibres PCTM longues dans le PEHD. On peut contourner ce problème en utilisant des fibres longues comme additif dans une formulation de CBP à base de farine de bois. On augmente ainsi les propriétés mécaniques.
- ⇒ Modélisation : Les techniques de modélisation utilisées surestiment les effets de la longueur des fibres dans le développement des propriétés en traction des composites fabriqués. Toutefois, les tendances modélisées et mesurées sont similaires.

## LISTE DES RÉFÉRENCES

- ASTM D 2538 (1995). Standard practice for fusion of poly(vinyl chloride) compounds using a torque rheometer. American society of testing and materials : West Conshohocken, PA. 5 pp.
- ASTM D 2395 (1997). Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. American society of testing and materials : West Conshohocken, PA. 8 pp.
- ASTM D 1037 (1999). Standard test method for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials. American society of testing and materials : West Conshohocken, PA. 30 pp.
- ASTM D 790 (2003). Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. American society of testing and materials: West Conshohocken, PA; 2003 11 pp.
- ASTM D 638 (2003). Standard test method for tensile properties of plastics. American society of testing and materials: West Conshohocken, PA; 2003 15 pp.
- ASTM D 256 (2005). Standard test method for determining izod pendulum impact resistance of plastics. American society of testing and materials: West Conshohocken, PA; 2003 20 pp.
- Bailon, J. et J. Dorlot (2000). Des matériaux. Presses internationales polytechnique. 736 pp.
- Bledzki, A. K. et O. Farduk (2003). Extrusion and injection moulded microcellular wood fibre reinforced polypropylene composites. Cellular polymers, vol. 23, n° 4. p. 211-227.
- Bodig, J. et B. A. Jayne (1993). Mechanics of wood and wood composites. Krieger publishing company : Malabar, Floride. 712 pp.
- Callister, D. W. (2001). Sciences et génie des matériaux. Modulo éditeur : Québec, Canada. 781 pp.
- Carvalho, G. M., P. J. Ferreira, A. A. Martins et M. M. Figueiredo (1997). A comparative study of two automated techniques for measuring fiber length. TAPPI journal vol. 80, n° 2. p. 137-142.

- Falk, R. H., D. Vos et S. M. Cramer (1999). The comparative performance of woodfiber-plastic and wood-based panels. Proceedings of the fifth international conference on woodfiber-plastic composites. Madison, WI, États-Unis, 26-27 mai. p. 269-274.
- Gamstedt, K. E., P. Nygård et M. Lindström (2007). Transfer of knowledge from papermaking to manufacture of composite materials. Actes du 3<sup>ème</sup> symposium international sur les composites bois polymères. Bordeaux, France, 26-27 mars 2007. 12 pp.
- Garceau, J. J. (1987). Pâtes mécaniques et chimico-mécaniques. Presses de l'Université de Trois-Rivières.
- Gibson, R. F. (1994). Principles of composites materials mechanics. McGraw-Hill : New-York, NY. 425 pp.
- Grande, C. et F. G. Torres (2003). Investigation of fiber organization and damage during single screw extrusion of natural fiber reinforced thermoplastics. Avances in polymer technology, vol. 24, n° 2. p.145-156.
- Herra-Franco, P.J. et A. Valadez-Gonzalez (2005). A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites. Composites part B, vol. 36, n° 8, p. 597-608.
- Horn, R. A. (1978). Morphology of pulp paper from hardwood and influence on paper strength. United States department of agriculture. Research paper FPL 312. 12 pp.
- Julson, J. L., G. Subbarao, D. D. Stokke, H. H. Gieselman, K. Muthukumarappan (2004). Mechanical properties of biorenewable fiber plastic composites. Journal of applied polymer science, vol. 93. p. 2484-2493.
- Koubaa, A., A. Cloutier et E. Villeneuve (2004). Potentiel de l'écorce pour la fabrication de panneaux composites par extrusion. Présentation au 72<sup>e</sup> congrès de l'ACFAS. Montréal, 10-14 mai.
- Le Baillif, M. et K. Oksman (2006). The influence of the extrusion process on bleached pulp fiber and its composites. Proceedings of the progress in wood & biofibrepastic composites conference. Toronto, Canada, 1-2 may. 9 pp.
- Lee, B. J., A. G. McDonald et B. James (2001). Influence of fiber length on the mechanical properties of wood-fiber/polypropylene prepreg sheets. Materials research innovations, vol. 4. p. 97-103.

- Li, T. Q. et M. P. Wolcott (2005). Rheology of wood plastics melt, part 1. Capillary rheometry of HDPE filled with maple. *Polymer engineering and science*, vol. 45, n° 4. p. 549-559.
- Li, H., S. Law, et M. Sain (2004). Process rheology and mechanical property correlation of wood flour–polypropylene composites. *Journal of reinforced plastics and composites*, vol. 23, n° 11. p. 1153-1158.
- Lu, Y. (2002). Mechanical properties of random discontinuous fiber composites manufactured from wetlay process. Mémoire, Virginia Polytechnic Institute. 116 pp.
- Lu, X., M. Q. Zhang, M. Z. Rong, G. Shi et G. C. Yang (2003). All-plant fiber composites. II. Water absorption behavior and biodegradability of unidirectional sisal fiber reinforced benzylated wood. *Journal of polymer composites*, vol. 24, n° 3. p. 367-378.
- Matuana, L. M. et J. Kim (2007). Fusion characteristics of rigid PVC/wood-flour composites by torque rheometry. *Journal of vinyl and additive technology*, vol. 13. p. 7-13.
- Michaeli, G. et W. Menges (1989). Prediction of product properties in extrusion and injection molding. *Advances in polymer technologies*, vol. 9, n° 1. p. 69-85.
- Pilarski, J. M., et L. M. Matuana (2006). Durability of wood flour-plastic composites exposed to accelerated freeze-thaw cycling. II. high density polyethylene matrix. *Journal of applied polymer science*, vol. 100. p. 35-39.
- Saheb, D. N. et J. P. Jog (1999). Natural fiber polymer composites : a review. *Advances in Polymer Technology*, vol. 18, n° 4. p. 351–363.
- Sanschagrin, B., S. T. Sean et B. V. Kokta (1988). Mechanical properties of cellulose fibers reinforced thermoplastics. Proceedings of the 43rd annual conference, composite institute. Cincinnati, OH, États-Unis, 1-5 février. 5 pp.
- Schramm, G. (1994). A practical approach to rheology and rheometry. Gebrueder HAAKE. 290 pp.
- Shi, H., B. Li, C. Chen et Y. Jia (2006). Preparation of HDPE/SEBS-g-MAH and its effect on mechanical properties of HDPE/wood flour composites. *Journal of applied polymer science*, vol. 104. p. 3161–3170.
- Simonsen, J. (1997). Efficiency of reinforcing materials in filled polymer composites. *Forest products society*, vol. 47, n° 1. p. 74-81.

- Soucy, J. (2007). Potentiel d'utilisation des fibres de papier dans la conception de composites bois-polymères par une technologie d'extrusion. Mémoire, université du Québec à Chicoutimi. 161 pp.
- Soucy, J., A. Koubaa, F. Erchiqui, K. Englund, et M. Wolcott (2006). Rheometer torque properties of thermoplastic composites filled with different pulp fibers. Proceedings of the 22nd annual meeting of the polymer processing society conference. Yamagata, Japon, juillet. 2 pp.
- Sretenovic, A., U. Müller, W. Gindl (2005). Mechanism of stress transfer in a single wood fibre-LDPE composite by means of electronic laser speckle interferometry. Composites part A, vol. 37, n° 9. p. 1406-1412.
- Stark, N. M. et R. E. Rowlands (2003). Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. Wood and fiber science, vol. 35, n° 2. p. 167-174.
- Stark, N. M., L. M. Matuana et C. M. Clemons (2004). Effect of processing method on surface and weathering characteristics of wood-flour/HDPE composites. Journal of applied polymer science, vol. 93. p. 1021-1030.
- Steckel, V., C. M. Clemons et H. Thoemen (2006). Effects of material parameters on the diffusion and sorption properties of wood-flour/polypropylene composites. Journal of applied polymer science, vol. 103. p.752-763.
- Wall, D. (1987). Processing of fiber reinforced thermoplastic using co-rotating twin screw extruders. Proceedings of the 45th annual technical conference (ANTEC). of society of plastic engineers. Los Angeles, CA, États-Unis, may.
- Wangaard, F.F. et G.E. Woodson (1971). The fiber length-fiber strength interrelationship for slash pine and its effect on pulp-sheep properties. Wood science, vol. 5, n° 3. p. 235-240.
- Wolcott, M. P. (2003). Production methods and platforms for wood plastic composites. Proceedings on the non-wood substitutes for solid wood products conference. Melbourne, Australie, octobre. 12 pp.
- Wolcott, M. P., M. Chowdhury, D. Harper, T. Li, R. Heath, et T. Rials (2001). Coupling agent/lubricant interactions in commercial wood plastic formulations. Proceedings of the sixth international conference on woodfiber-plastic composites. Madison, WI, États-Unis, 15-16 mai. p. 197-204.

- Wolcott, M. P. et K. Englund (1999). A technology review of wood-plastic composites. Proceedings of the 33rd international particleboard and composite materials symposium. Pullman, WA, États-Unis. 12-15 avril. 9 pp.
- Yam, K. L., B. K. Gogoi, C. C. Lai et S. E. Selke (1990). Composites from compounding wood fibers with recycled high density polyethylene. Polymer engineering and science, vol. 30, n° 11. p. 693-699.

## ANNEXE 1

### EXEMPLE DE RÉSULTAT DE MESURE D'UNE DISTRIBUTION DE LONGUEUR DE FIBRES AVEC L'AQF ET DE CALCUL DE LA LONGUEUR MOYENNE EN NOMBRE

Le tableau A.1 présente un exemple de mesure d'une distribution de longueur avec l'AQF. Avec les données du tableau A.1 et l'équation 1-1, on peut calculer la longueur moyenne en nombre de cette distribution (Équation A-1). Également, avec les données de la dernière colonne du tableau A.1 on peut tracer la distribution de longueur pour la classe Longue présentée à la figure 2.2.

$$L_n = \frac{\sum_{k=1}^N (n_k l_k)}{\sum_{k=1}^N n_k} = \frac{\text{Somme de la colonne } n_k l_k}{\text{Somme de la colonne } n_k} = \frac{12018}{25000} = 0,481 \text{ mm} \quad A-1$$

Tableau A.1: Exemple de résultat de mesure d'une distribution de longueur de fibres PCTM avec l'AQF (classe Longue).

Sous-classe de longueur, $l_k$ (mm)			Nombre de mesures dans la sous-classe ; $n_k$	$n_k l_k$	Fréquence %
Début	Fin	Valeur médiane			
0	0,05	0,025	0	0	0
0,05	0,10	0,075	4517	339	2,8
0,10	0,15	0,125	3376	422	3,5
0,15	0,20	0,175	2032	356	3,0
0,20	0,25	0,225	1337	301	2,5
0,25	0,30	0,275	989	272	2,3
0,30	0,35	0,325	890	289	2,4
0,35	0,40	0,375	817	306	2,5
0,40	0,45	0,425	759	323	2,7
0,45	0,50	0,475	761	361	3,0
0,50	0,55	0,525	701	368	3,1
0,55	0,60	0,575	660	380	3,2
0,60	0,65	0,625	642	401	3,3
0,65	0,70	0,675	661	446	3,7
0,70	0,75	0,725	544	394	3,3
0,75	0,80	0,775	568	440	3,7
0,80	0,85	0,825	550	454	3,8
0,85	0,90	0,875	475	416	3,5
0,90	0,95	0,925	462	427	3,6
0,95	1,00	0,975	460	449	3,7
1,00	1,05	1,025	398	408	3,4
1,05	1,10	1,075	418	449	3,7
1,10	1,15	1,125	434	488	4,1
1,15	1,20	1,175	390	458	3,8
1,20	1,25	1,225	316	387	3,2
1,25	1,30	1,275	319	407	3,4
1,30	1,35	1,325	279	370	3,1
1,35	1,40	1,375	238	327	2,7
1,40	1,45	1,425	203	289	2,4
1,45	1,50	1,475	187	276	2,3
1,50	1,55	1,525	148	226	1,9
1,55	1,60	1,575	122	192	1,6
1,60	1,65	1,625	108	176	1,5
1,65	1,70	1,675	72	121	1,0
1,70	1,75	1,725	54	93	0,8
1,75	1,80	1,775	35	62	0,5
1,80	1,85	1,825	38	69	0,6
1,85	1,90	1,875	18	34	0,3
1,90	1,95	1,925	15	29	0,2
1,95	2,00	1,975	7	14	0,1
SOMME DES COLONNES			25000	12018	100

## ANNEXE 2

### DIMENSIONS DES ÉCHANTILLONS ET NOMBRE DE MESURES UTILISÉES POUR LA CARACTÉRISATION DES CBP

Tableau A.2 : Dimensions des échantillons et nombre de mesures utilisées pour la caractérisation des CBP

Type d'essai	Formulation	Nombre de mesures	Dimensions		
			Longueur <i>mm</i>	Largeur <i>mm</i>	Épaisseur <i>mm</i>
-	-	-			
Immersion dans l'eau et densité apparente (ASTM D 1037)	1 à 3 et 7 à 9	3	150	32,5	6,35
	4 à 6				5,10
	13 à 16				9,50
	10 à 12 <sup>1</sup>				3,20
Profils de densités aux rayons X	1 à 3	10	38	9,5	1,60
Traction (ASTM D 638, Type I)	1 à 3, 7 à 9, 13 à 16	6	note 2		6,35
	4 à 6				5,10
	10 à 12 <sup>1</sup>				3,20
Flexion 3 points (ASTM D 790)	1 à 3 et 7 à 9	6	note 2 et 3		6,35
	4 à 6				5,10
	10 à 12 <sup>1</sup>				3,20
	13 à 16				9,30
Impact Izod (ASTM D256 avec entaille)	1 à 3 et 7 à 9	10	note 2		6,50

<sup>1</sup> : Dimensions du moule

<sup>2</sup> : Longueur et largeur spécifiées par la norme

<sup>3</sup> : Distance entre les appuis = 22 x l'épaisseur, largeur d'environ 0,2 x la longueur

## ANNEXE 3

### COURBE TYPIQUE EN TRACTION DU PEHD

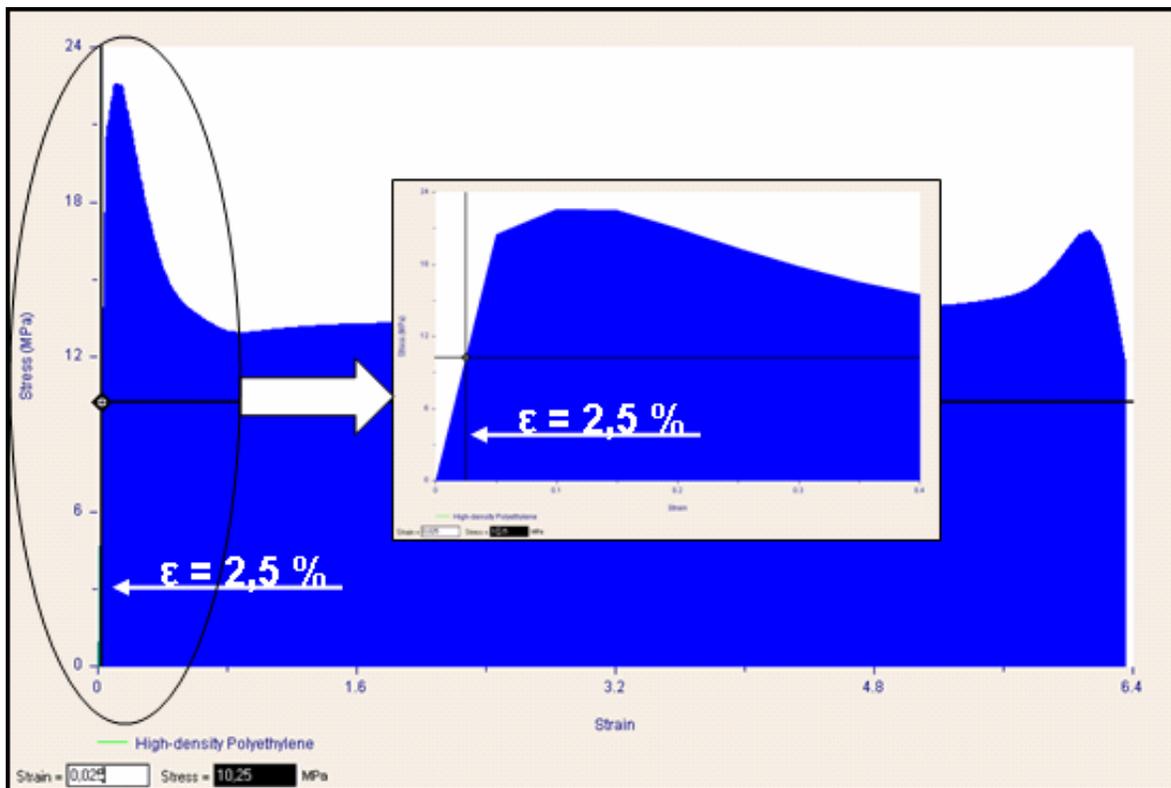


Figure A.1 : Courbe typique en traction du PEHD (Callister, 2001)