TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS ii
LISTE DES ACRONYMES vi
LISTE DES FIGURES viii
LISTE DES TABLEAUX xiv
RÉSUMÉ xiv
ABSTRACT xiii
INTRODUCTION 1
CHAPITRE 1 6
1. Généralités 6
1.1 Les fibres de bois 7
1.2 Composition chimique du bois et de la fibre 9
1.2.1 La cellulose 10
1.2.2 Les hémicelluloses 11
1.2.3 La lignine 12
1.3 Procédés de mise en pâte 14
1.4 Résidus papetiers 17
1.4.1 Nature des rejets 17
1.4.2 Système de traitement des effluents papetiers 18
1.4.3 Caractéristiques physico-chimiques des boues 20
1.5 Composition des boues de désencrage 24
1.5.1 Le procédé de désencrage 25
1.6 Méthodes de valorisation des boues 28
1.6.1 Enfouissement 29
1.6.2 Épandage agricole et sylvicole 29
1.6.3 Le compostage 31
1.6.4 La réhabilitation des terrains 31
1.6.5 La valorisation énergétique 32

a) L'incinération 32
b) L'oxydation humide 33
c) La gazéification 33
1.6.6 Utilisation pour la fabrication de panneaux à base de fibres de bois 34
1.6.7 Utilisation des résidus papetiers pour la fabrication de CBP 35
1.6.8 Autres voies de valorisation 38
1.7 Les composites bois polymères 39
1.7.1 Présentation de la matrice thermoplastique 39
1.7.1.1 Les polymères thermodurcissables 39
1.7.1.2 Les polymères thermoplastiques 40
1.7.1.3 Les adjuvants 41
1.7.2 Techniques de fabrication des composites 42
CHAPITRE 2 50
Matériel et méthodes 50
2.1 Objectifs 50
2.2 Hypothèses de la recherche 51
2.3 Matériel 51
2.3.1 Préparation des fibres 52
2.3.2 Caractérisation des propriétés des fibres 54
2.3.3 Caractéristiques du polymère 55
2.3.4 Agent de couplage 55
2.4 Méthodes 56
2.4.1 Techniques de mise en forme des composites 56
2.4.1.1 Mise en granules des composites au laboratoire 56
2.4.1.2 Mise en forme des composites à l'échelle pilote 58
2.4.2 Moulage par injection 59
2.4.2 Caractérisation des CBP 61
2.4.3.1 Propriétés physiques 61
2.4.4 Analyse statistique des résultats 65

CHAPITRE III 66
3.1 Résultats détaillés des propriétés physiques et mécaniques 66
3.2 Analyse et discussion des résultats 66
3.2.1 Effet du procédé de mise en forme et de la proportion des fibres 69
3.2.1.1 Effet du procédé de mise en forme et la proportion des fibres sur les propriétés physiques des CBP 69
3.2.1.2 Effet du procédé de mise en forme et la proportion des fibres sur les propriétés mécaniques des CBP 72
3.2.2 Effet des boues de désencrage 82
3.2.2.1 Effet de la proportion des boues de désencrage sur les propriétés physiques des CBP 82
3.2.2.2 Effet de de la proportion des boues de désencrage sur les propriétés mécaniques des CBP 85
3.2.3 Comparaison entre les effets des fibres et des BD sur les propriétés physiques et mécaniques des CBP 92
3.2.3.1 Comparaison entre les effets des fibres et des BD sur les propriétés physiques 92
3.2.3.2 Comparaison entre les effets des fibres et des BD sur les propriétés mécaniques 94
3.2.4 Effet combiné des boues et des fibres kraft sur les propriétés des composites CBP 99
3.2.4.1 Effet combiné des BD et des fibres kraft sur les propriétés physiques des CBP 100
3.2.4.2 Effet combiné des BD et des fibres kraft sur les propriétés mécaniques 102
CHAPITRE IV 108
CONCLUTIONS 108
BIBLIOGRAPHIE 111
ANNEXES 125

LISTE DES ACRONYMES

Français (Anglais)

ASTM	American Society for Testing and Materials
Al	Aluminium
BD	Boues de désencrages
BPD	Boues de papier désencré
BP (PS)	Boues primaires
BM (MS)	Boues mélangées, boues mixtes
BS (SS)	Boues secondaires, boues activées
CBP (WPC)	Composites bois-polymère, composites boues-polymère
$C_6H_{10}O_5$	Hémicellulose
CH_4	Méthane
CO	Monoxyde de carbone
CO_2	Dioxyde de carbone
Cu	Cuivre
C/N	Ratio de carbone sur l'azote
DO (OD)	Demande d'oxygène
DBO (BOD)	Demande biochimique en oxygène
DCO (COD)	Demande chimique en oxygène
E	Module d'élasticité en traction (de Young)
GE (TS)	Gonflement en épaisseur
H_2O_2	Peroxyde d'hydrogène
MA	Anhydride maléique
MDF	Panneaux de fibres de moyenne densité
MES (TSS)	Matières en suspension
Mg	Magnésium

MOE	Module d'élasticité en flexion
MOR	Module de rupture en flexion
NaOH	Hydroxyde de sodium
Na_2O_3Si	Silicate de sodium
Ni	Nickel
NOx	Oxyde d'azote
OH	Hydroxyle
Pb	Plomb
PE	Polyéthylène
PEHD (HDPE)	Polyéthylène haute densité
PEMA ou PEgMA	Polyéthylène greffé à l'anhydride maléique
PVC	Le polychlorure de vinyle
PP	Polypropylène
PTCM (CTMP)	Pâte chimico-thermomécanique
PTM (TMP)	Pâte thermomécanique
UF	Résine d'urée- formaldéhyde
Zn	Zinc

LISTE DES FIGURES

Figure Page

Figure 1 : Les principaux modes de disposition des résidus de papetières au Québec (MDDEP, 2013). 3

Figure 2 : Évolution de la demande des CBP, États-Unis, 2003-2013 (adapté de CRIQ, 2013). 5

Figure 1. 1 : Structure de la fibre du bois (Harrington, 1998). 8

Figure 1.2 : Distribution des composés organiques dans les différentes couches de la paroi cellulaire (Panshin et de Zeeuw, 1980). 9

Figure 1.3 : Structure chimique de la cellulose (Pandey, 1999).....11

Figure 1.4 : Structure de monomères d'hémicelluloses (Estournel-Pelardy, 2011). 12

Figure 1.5 : Motifs élémentaires de la lignine (Sjöström, 1993). 13

Figure 1.6 : Schéma des principales étapes du traitement des effluents papetiers (MDDEFP, 2012). 19

Figure 1.7 : Schéma du système de désencrage de l'unité de Cascades, Groupe Tissu-KingseyFalls. 27

Figure 1.8 : Méthode de gestion des boues utilisées dans l'industrie papetière (Scott et Smith, 1995). 28

Figure 1.9 : Agent de Couplage (PEMA) (Carlborn et Matuana 2006) 42

Figure 1.10 : Schéma typique d'une extrudeuse mono vis (Trotignon et al, 1996)..... 43

Figure 1.11 : Image en microscopie électronique à balayage de surfaces de fractures de composites de farine de bois (Pinus radiata)/PEHD (Adhikary et al, 2008). 48

Figure 2.1 : Préparations de la farine de bois pour la fabrication des composites au laboratoire ……52

Figure 2.2 : Préparations de la farine de bois pour la fabrication des composites à l'échelle, laboratoire pilote. ……...53

Figure 2.3 : Extrudeuse bi-vis Co-rotative, Thermo-Scientific utilisée pour les essais à l'échelle laboratoire. ……..58

Figure 2.4 : Extrudeuse à double-vis, Entek Technologies, utilisées pour les essais à l'échelle, laboratoire pilote. ……...59

Figure 2.5 : Dispositif d'essai de choc IZOD utilisé pour la mesure de la résistance à l'impact ……..63

Figure 3.1: Variation de l'absorption d'eau en fonction du temps d'immersion, du procédé de fabrication et de la proportion des fibres……71

Figure 3.2: Variation de gonflement d'eau en fonction du temps d'immersion, du procédé de fabrication et de la proportion des fibres……71

Figure 3.3: Variation de la masse volumique des composites en du temps d'immersion, du procédé de fabrication et de la proportion des fibres……...72

Figure 3.4: Variation de contrainte maximale en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des fibres……...73

Figure 3.5: Variation du module d'élasticité en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des fibres……75

Figure 3.6: Variation de déformation à la contrainte maximale en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des fibres. ……76

Figure 3.7: Variation de la contrainte maximale en traction des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des fibres. ……...77

Rapport-Gratuit.com

Figure 3.8: Variation du module d'élasticité en traction des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des fibres.……78

Figure 3.9: Variation de la déformation maximale en traction des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des fibres. ……...79

Figure 3.10: Variation de l'énergie d'impact des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des fibres. ……80

Figure 3.11: Variation de contrainte maximale en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des fibres. ……...81

Figure 3.12: Variation du module d'élasticité en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des fibres. ……...81

Figure 3.13: Variation de l'absorption d'eau en fonction du temps d'immersion, du procédé de fabrication et de la proportion des BD. ……...83

Figure 3.14: Variation de gonflement d'eau en fonction du temps d'immersion, du procédé de fabrication et de la proportion des BD. ……..84

Figure 3.15: Variation de la masse volumique des composites en du temps d'immersion, du procédé de fabrication et de la proportion des BD. ……...84

Figure 3.16: Variation de la contrainte maximale en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des BD. ……..86

Figure 3.17: Variation de la contrainte maximale en traction des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des BD.……86

Figure 3.18: Variation du module d'élasticité en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des BD. ……...87

Figure 3.19: Variation du module d'élasticité en traction des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des BD. ……..88

Figure 3.20: Variation de déformation à la contrainte maximale en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des BD.....89

Figure 3.21: Variation de l'énergie d'impact des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des BD.....90

Figure 3.22: Variation de la contrainte maximale en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des BD. 91

Figure 3.23: Variation du module d'élasticité en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des BD. 91

Figure 3.24: Comparaison entre l'absorption d'eau des CBP issus de fibres kraft et de boues de désencrage à différentes proportions après 2040 heures d'immersion.....92

Figure 3.25: Comparaison entre l'absorption des CBP issus de fibres kraft et de boues de désencrage à différentes proportions.....93

Figure 3.26: Comparaison entre la masse volumique des CBP issus de fibres kraft et de boues de désencrage à différentes proportions. 94

Figure 3.27: Comparaison entre le module d'élasticité en traction des CBP issus de fibres kraft et de boues de désencrage a différentes proportions. 96

Figure 3.28: Comparaison entre la contrainte maximale en traction des CBP issus de fibres kraft et de boues de désencrage à différentes proportions. 96

Figure 3.29: Comparaison entre la déformation maximale en traction des CBP issus de fibres kraft et de boues de désencrage à différentes proportions. 97

Figure 3.30: Comparaison entre le module d'élasticité en flexion des CBP issus de fibres kraft et des boues de désencrage à différentes proportions. 97

Figure 3.31: Comparaison entre la contrainte maximale en flexion des CBP issus de fibres kraft et des boues de désencrage à différentes proportions. ……98

Figure 3.32: Comparaison entre la déformation maximale en traction des CBP issus de fibres kraft et de boues de désencrage à différentes proportions. ……98

Figure 3.33: Comparaison entre l'énergie d'impact des CBP issus de fibres kraft et des boues de désencrage à différentes proportions. ……...99

Figure 3.34: Effet combiné des fibres et de BD sur la masse volumique des composites à un taux de charge de 40%. ……101

Figure 3.35: Effet combiné des fibres et de BD sur l'absorption des composites mis en forme selon les deux procédés à 40% de charge après 85 jours d'immersion à l'eau.……...101

Figure 3.36: Effet combiné des fibres et des BD sur le gonflement des CBP mis en forme selon les deux procédés à 40% de charge après 85 jours d'immersion à l'eau. ……102

Figure 3.37: Effet combiné des fibres et de BD sur le module d'élasticité en flexion des composites mis en forme selon les deux procédés à un taux de charge de 40%. ……103

Figure 3.38: Effet combiné des fibres et de BD sur le module d'élasticité en traction des composites mis en forme selon les deux procédés à un taux de charge de 40%. ……104

Figure 3.39: Effet combiné des fibres et de BD sur la contrainte maximale en flexion des composites mis en forme selon les deux procédés à un taux de charge de 40%. ……104

Figure 3.40: Effet combiné des fibres et de BD sur la contrainte maximale en traction des CBP mis en forme selon les deux procédés à un taux de charge de 40%. ……105

Figure 3.41: Effet combiné des fibres et de BD sur la déformation maximale en traction des CBP mis en forme selon deux procédés à un taux de charge de 40%. …….106

Figure 3.42: Effet combiné des fibres et de BD sur la déformation maximale en flexion des CBP mis en forme selon deux procédés à un taux de charge de 40%. …….107

Figure 3.43: Effet combiné des fibres et de BD sur l'énergie d'impact des CBP mis en forme selon deux procédés à un taux de charge de 40%..... 107

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux Page

Tableau 1 : Génération de boues selon le type de matériaux bruts utilisés (Scott et Smith, 1995)..... 2

Tableau 1.1 : Les avantages de la fibre naturelle (Vaucher, 2012). 7

Tableau 1.2 : La composition chimique du bois (adapté de Panshin et de Zeeuw, 1980). 10

Tableau 1.3 : Mise en pâte : Procédés, rendements et produits (Zhang et Koubaa, 2009). 14

Tableau 1.4 : Propriétés des papiers issus de différents types de pâtes à papier (Koubaa, 1996)..... 17

Tableau 1.5 : Analyse chimique des boues primaires et de désencrage. (Rashid et al, 2006). 21

Tableau 1.6 : Composition des boues PTM, PCTM et Kraft (Zerhouni, 2010). 22

Tableau 1.7 : Concentration des métaux lourds en ppm dans des boues papetières de différentes usines de pâtes et papiers (Rashid et al, 2006). 23

Tableau 1.8 : Proportions (%) des matières inorganiques dans les boues de désencrage (Davis et al, 2003)..... 24

Tableau 1.9 : Caractéristiques des polymères thermoplastiques (Morin. 2000)..... 40

Tableau 2.1: Propriétés morphologiques des différentes fibres..... 54

Tableau 2.2 : Les caractéristiques du PE-gMA fournies par le fabricant.....55

Tableau 2.3 : La combinaison des niveaux de facteurs utilisée dans chaque laboratoire..... 57

Tableau 2.4 : Paramètres de la presse à injection..... 60

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau 2.5 : Dimensions des éprouvettes d'essai pour les tests mécaniques et physiques selon les normes ASTM correspondantes…….. 60

Tableau 3.1 : Résultats des analyses de variance (ANOVA) pour les propriétés mécaniques…….. 67

Tableau 3.2 : Résultats des analyses de variance (ANOVA) pour les propriétés physiques……. 68

Tableau I.1 : Gain en volumes des CBP en fonction du temps pour les essais réalisés au laboratoire de (UQAT) et à l'échelle, laboratoire pilote (UQTR)..... 126

Tableau I.2 : Gain en poids des CBP en fonction du temps pour les essais réalisés au laboratoire (UQAT) et à l'échelle, laboratoire pilote (UQTR). 127

Tableau I.3 : La densité des CBP en fonction du temps pour les essais réalisés au laboratoire (UQAT) et à l'échelle, laboratoire pilote (UQTR). 128

Tableau I.4 : Propriétés mécanique des CBP en fonction de la proportion des fibres Kraft et des BD pour les essais réalisés à l'échelle, laboratoire pilote (UQTR)..... 129

Tableau I.5 : Moyennes des propriétés mécaniques des CBP en fonction de la proportion des fibres Kraft et des BD pour les essais réalisés au laboratoire (UQAT). 130

RÉSUMÉ

La boue de désencrage (BD) est un résidu généré lors du recyclage du papier qui contient moins de matières organiques que les boues primaires et secondaires provenant de l'industrie papetière. Actuellement, il est difficile de valoriser la BD avec les bioprocédés de digestion bactérienne. L'élimination de ces boues fait partie des problèmes environnementaux actuels. Il est ainsi impératif de trouver de nouvelles voies de valorisation pour cette boue qui est actuellement épandue ou incinérée. Ainsi, l'objectif général de cette étude est d'évaluer le potentiel des BD pour la production de composites bois-polymère. Pour atteindre cet objectif, un dispositif factoriel en deux blocs a été utilisé. Les blocs sont les procédés de mise en forme et les facteurs sont la nature de fibres qui représentent les BD et les fibres kraft. La mise en forme des composites a été effectuée selon un procédé en deux étapes ; soit la production des granules par extrusion suivi du moulage par injection des éprouvettes d'essais mécaniques et physiques. Les résultats montrent qu'il est possible de produire des composites à des proportions des fibres qui ont été variées de 5% à 50%. Les variations des propriétés des composites dues au procédé de mise en forme ont été expliquées par la différence au niveau de la longueur des fibres utilisées dans chacun des procédés et par la dispersion des fibres. L'augmentation des proportions des fibres et des BD améliorent les propriétés mécaniques des composites mais diminuent la stabilité dimensionnelle. Les fibres kraft produisent des composites avec de meilleures propriétés physiques et mécaniques. Le seul avantage de l'utilisation des BD dans les CBP est l'amélioration de la ductilité.

MOTS-CLÉS : Composites bois-polymère, boue de désencrage, fibre Kraft, propriétés physiques et mécaniques, polymère thermoplastique.

ABSTRACT

The de-inking sludge (DS) is a residue generated when recycling paper, which contains les organic matters than the primary and secondary sludger originating in the paper industry. Currently, it is difficult to valorize the DS with bacterial digestion bioprocesses. Disposal of these sludges is one of the current environmental problems. Thus, it is imperative to find new valorization paths for sludge which is currently spread or incinerated. The general objective is to evaluate the potential of DS for the production of wood plastic composites (WPC). To reach this objective, an experimental design in two blocs was used. Blocs were the manufacturing process and factors were the fiber origin, representing DS and kraft fibers, and proportions that ranged from 5% to 50%. Composites were made using a two steps process: pellets extrusion followed by the injection molding of the standard test samples for mechanical and physical properties evaluation. WPC properties variation due to the process were explained by the differences in length of the kraft fibers and the fibers dispersion used in the two processes. Increasing fibers proportions improved the mechanical properties but reduced the dimensional stability. Kraft fibers led to better mechanical properties and dimensional stability than the DS fibers. The only advantage of the use of DS fibers was the improvement of ductility.

KEYWORDS: wood plastic composite (WPC), de-inking sludge, Kraft fibers, physical and mechanical properties, thermoplastic polymers.

INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, le recyclage est devenu indispensable dans notre société. Un des buts du recyclage est de diminuer la quantité des déchets que l'on envoie au dépotoir. Il est donc tout à fait normal que les produits du papier, qui représentent 40 à 45% des déchets domestiques (Jacobson et Sallee 1992), fassent l'objet d'un recyclage intensif. Cependant, lors du recyclage des papiers, les usines de pâtes à papiers génèrent d'importantes quantités de rejets solides que l'on doit éliminer de la façon la plus acceptable possible tant au point de vue économique qu'environnemental.

Les principaux rejets papetiers sont constitués, particulièrement, des boues primaires riches en fibres issues d'un traitement physico-chimique, d'écorces, des cendres, des boues secondaires riches en matières organiques issues d'un traitement biologique et des boues de désencrage (BD) issues d'un procédé de désencrage. Celles-ci contiennent des fibres cellulosiques, des additifs minéraux qui sont constitués de kaolin (glaise), du talc, des carbonates ainsi que des métaux (Mahmood et Elliott, 2006).

La production annuelle des boues de désencrage au Québec est d'environ 45 000 tonnes/an de BD et de 10 000 tonnes/an de BP et BS, soit 1 voyage par jour pour les BP et BS et 5 voyages par jour pour les BD. Le tableau 1 présente la production moyenne des boues par tonne de pâtes pour différents types d'usine à papier. En 2011, les papeteries du Québec généraient plus de 1 380 000 tonnes de boues humides (MDDEFP, 2013). Mabee (2001) a estimé que la production mondiale de boues par les usines de pâtes et papiers sera de 4,8 millions de tonnes sèches en 2050.

Le volume des boues ainsi que le coût associé à leur gestion exigent la recherche d'autres procédés de disposition que la mise en décharge, l'incinération et l'épandage agricole. En effet, au cours de la période de 1995 à 2011, le taux de valorisation est

passé de 50 à 69%. La valorisation énergétique et l'enfouissement sont les méthodes les plus utilisées au Québec (MDDEP, 2013) telles qu'illustrées dans la figure 1.

Tableau 1 : Génération de boues selon le type de matériaux bruts utilisés (Scott et Smith, 1995).

Type de moulin	Production de boue	Type de boue
Kraft	58 kg/tonne	Primaire et secondaire
Sulfite	102 kg/tonne	Primaire et secondaire
Désencrage	234 kg/tonne + 38 kg/tonne de déchets	Désencrage

Ces dispositions représentent des inconvénients comme l'accumulation possible des métaux lourds sur une longue période de temps, la présence de charges et de glaises dans les boues qui diminuent le drainage du sol, émission de gaz à effet de serre, telle que CO2 et CH4 et il faut prévoir un espace d'entreposage des boues pendant l'hiver, où l'épandage est impossible. Il est impératif de trouver de nouvelles avenues de valorisation pour cette boue.

Au Québec, Afin de se conformer à la loi (MDDEP, 2008) les industries de papeteries mesurent certains paramètres telle que, la matière en suspension (MES), la demande en oxygène (DO) et les métaux (Al, Cu, Pb, Ni, Zn, BPC) avant de rejeter dans la nature afin d'assurer la conformité des eaux résiduelles aux normes environnementales (Gilbride et Fulthorpe, 2004). En effet, le volume des boues ainsi que les coûts associés à leur gestion exigent la recherche d'autres procédés de disposition que la mise en décharge, l'incinération, la production d'énergie, l`épandage agricole et le compostage.

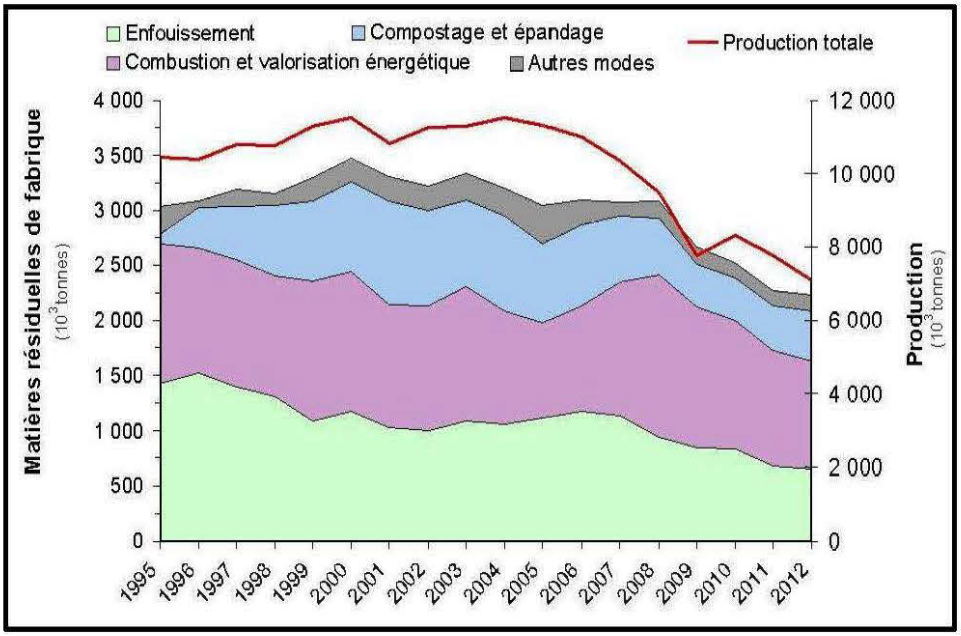


Figure 1 : Les principaux modes de disposition des résidus de papetières au Québec (MDDEP, 2013).

Quelques études scientifiques ont évalué le potentiel des boues primaires, mélangées et de désencrage comme source d'approvisionnement pour les panneaux de fibre de moyenne densité (MDF) et des panneaux de particules (Davis et al 2003, Geng et al 2006, Geng et al 2007, Migneault et al. 2010, 2011a, 2011b, Taramian et al 2006, Xing et al. 2012 et Ochoa de Alda 2008, Krigstin et Sain 2006, Zerhouni et al. 2012). Ces études ont porté sur différents aspects, notamment l'influence des propriétés physico-chimiques des boues (pouvoir adhésif, propriétés chimiques, teneur en cendres, etc.) sur le procédé de transformation et le développement des propriétés des panneaux.

Parmi les conclusions de ces études, nous pouvons citer :

1. L'utilisation des boues, jusqu'à 20 %, dans les panneaux est techniquement faisable selon les normes de qualité ;

2. Le pouvoir adhésif des boues secondaires permet de réduire la teneur en résine dans les panneaux sans nuire à leurs performances mécaniques ;
3. La teneur élevée en cendre est un facteur limitant dans la valorisation des boues pour la production de panneaux.
4. L'utilisation des boues dans la fabrication des panneaux MDF et de particules a réduit substantiellement les émissions de formaldéhyde.

Plus récemment, Migneault et al, 2014, ont examiné le potentiel de différents résidus du bois pour la production des CBP. Les composites fabriqués avec les boues de désencrage donnent les meilleurs mélanges en termes de résistance à l'impact et de ductilité. Ils proposent de l'utiliser comme agent de remplissage. Puisqu'elle contient des fibres de bois et de l'argile (kaolinite).

L'industrie des composites CBP est en croissance grâce à leur résistance à l'eau, à leur durabilité et à leur facilité de mise en forme. L'utilisation des fibres de bois permet de réduire le coût, d'augmenter la performance environnementale et de produire un matériau à haute valeur ajoutée (CRIQ, 2003 ; Vaucher, 2012). Par contre, l'addition du bois entraîne quelques inconvénients. Le caractère hydrophile du mélange augmente avec la présence du bois et le matériau final devient un peu vulnérable à l'humidité, mais également Les fibres de bois sont sensibles à haute température (Vaucher, 2012).

Pour résoudre ces deux problèmes, plusieurs traitements qui ont pour but de modifie les structures chimiques de la surface des fibres ont été envisagés, qu'ils soient chimiques ou thermiques. L'amélioration de ces propriétés permettra de développer les domaines d'utilisation des CBP, essentiellement à 1 'extérieur et dans des endroits très humides. Dans ce projet, les effets de l'ajout des BD et des fibres kraft sur les propriétés mécaniques et physiques des CBP ont été étudiés. Afin de mieux analyser et étudier ces effets, on a utilisé des fibres issues de deux procédés de granulation et des paramètres utilisés aux deux extrudeuses aux laboratoire et au laboratoires pilote. C'est sur cette base que cette recherche a été fondée, celle-ci vise à combiner les BD, les

fibres kraft et les thermoplastiques afin d'aboutir à un composite qui réunit les avantages des deux matériaux à savoir une rigidité accrue et une ductilité amoindrie.

La figure 2 présente l'évolution de la demande des CBP aux États-Unis entre 2003 et 2013. L'augmentation de la demande pour les CBP est passée de 35% en 2003 à 45% en 2013 (CRIQ, 2013). Notre objectif est d'introduire la BD dans la production de CBP, puisqu'elle contient des fibres de bois et de l'argile (kaolinite).

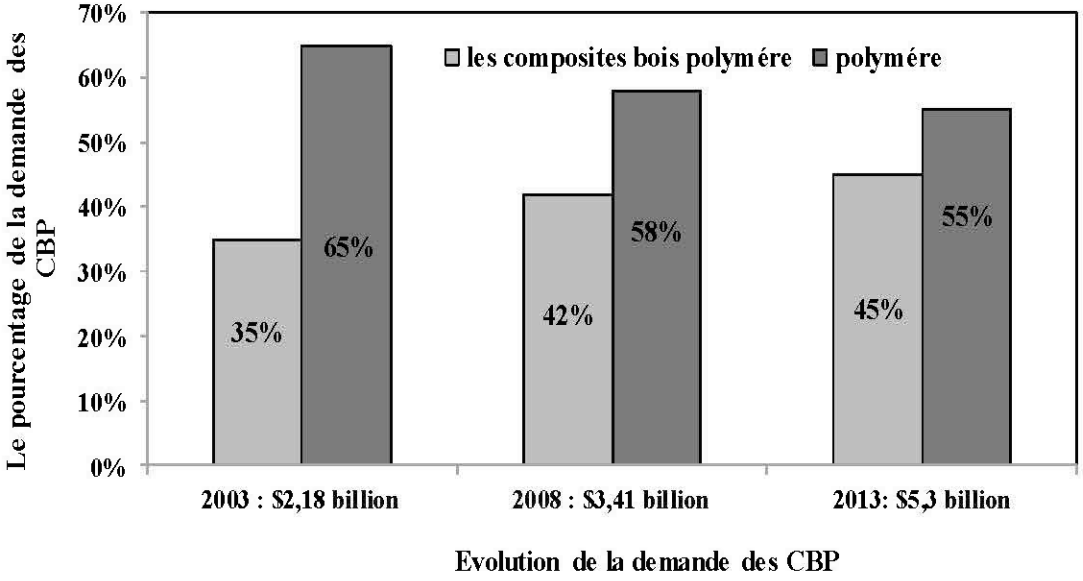


Figure 2 : Évolution de la demande des CBP, États-Unis, 2003-2013 (adapté de CRIQ, 2013).

Les CBP sont utilisés dans plusieurs applications telles que le domaine des bâtiments (lames de terrasse, portes, fenêtres, clôtures, meubles, etc.) et l'industrie automobile (panneaux de porte, etc.). Ils sont également utilisés pour la fabrication de différents objets à usage domestique, ainsi que pour les biens mobiliers (chaise, table, armoire, lit, etc.) et les fournitures de bureau. (CRIQ 2003; Yongfeng 2011).

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1. Généralités

Un matériau composite est défini comme la combinaison de deux matériaux ou plus tenues ensemble par une matrice quelconque (Rowell, 1997). L'adhésion entre eux joue un rôle important et nous donne des matériaux avec des performances améliorées (Albouy, 2013).

Le premier élément dans la mise en forme des CBP est la farine ou les fibres de bois provenant des opérations de rabotage, de sciage du bois et du recyclage en milieu urbain. Le deuxième élément est le thermoplastique, le polyéthylène haute-densité (PEHD) est le principal polymère utilisé, le polychlorure de vinyle (PVC) recyclé, le polypropylène et des résines vierges sont présents dans certaines formulations. Enfin, il y a les additifs, dont les agents de couplage qui sont généralement utilisés dans les mélanges bois-polymères pour assurer une bonne adhésion entre les fibres et la matrice (Albouy, 2013).

L'extrusion est le procédé le plus répandu pour la fabrication du bois-polymère (CRIQ, 2003). Plusieurs types d'extrudeuses sont utilisées : extrudeuses à simple-vis, à double-vis ou un tandem simple et double-vis.

Les fibres du bois possèdent beaucoup d'avantages (Tableau 1.1). Par contre, elles ont deux inconvénients (Vaucher, 2012) :

- L'absorption élevée de l'humidité qui induit un gonflement important des fibres, ce qui affecte la stabilité dimensionnelle de tous les composites. Ce phénomène peut être éliminé en créant une barrière hydrophobe sur toute la surface.

- Les fibres de bois sont sensibles à haute température. Nous ne pouvons pas procéder au-delà de 200°C, afin d'éviter la dégradation. Il faut donc trouver un compromis entre la nécessité d'opérer un bon mélange et celle de limiter les forces de cisaillement et le temps de séjour dans la vis.

Tableau 1.1: Les avantages de la fibre naturelle (Vaucher, 2012).

Avantages techniques	**Avantages socio-économiques**
- Faible densité ; - Non-abrasive (à l'inverse du verre) ; - Propriétés spécifiques ; - Ne se fracturent pas au moulage de courbes prononcées ; - Facilement recyclable.	- Larges variétés disponibles ; - Production issue de cultures non alimentaires ; - Génère des emplois locaux ; - Faible consommation d'énergie ; - Faible coût ; - Biodégradable.

1.1 Les fibres de bois

Les fibres de bois sont des structures composites qui sont considérées comme des structures cristallines et des micro-fibrilles qui jouent le rôle d'agent de renfort dans les composites à base de bois. Elles sont renouvelables, biodégradables, non abrasives et hydrophiles (Migneault, 2007). Les fibres de bois sont composées des liens

Rapport-Gratuit.com

d'hydrogènes entre le groupement hydroxyle, de la cellulose avec la contribution de l'acide carboxylique, des hémicelluloses, de la lignine et, une proportion trop faible, des protéinés, des extractibles et de certains composés inorganiques (Rowell et al, 1997).

Les fibres dépendent de la classe de l'arbre (résineux ou feuillu). La structure de bois des résineux est assez simple, elle est constituée de trachéides longitudinales. Elles ont un rôle de conduction et de soutien de l'arbre. Les feuillus ont une structure complexe. Les rayons ligneux sont constitués de cellules de parenchymes qui peuvent être accompagnées de trachéides (Panshin et al, 1980). La forme habituelle des fibres est tubulaire. Elles sont constituées de deux parois ; primaire et secondaire (Figure 1.1). La paroi primaire, qui est composée d'une membrane mince, forme une gaine de protection. La paroi secondaire, qui est formée par des micro-fibrilles, est constituée de trois couches : S_1, S_2 et S_3.

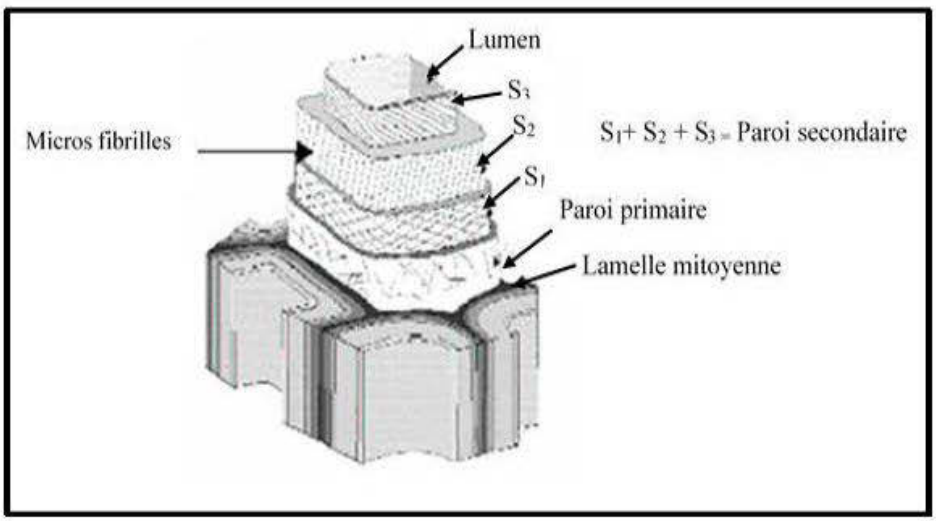


Figure 1. 1 : Structure de la fibre du bois (Harrington, 1998).

La cellulose, l'hémicellulose et la lignine se trouvent dans chacune des couches, formant la paroi cellulaire (Panshin et al, 1980). La proportion de la cellulose et de l'hémicellulose augmente en allant de la lamelle vers le centre de la couche S_2, alors

que la proportion de la lignine est concentrée dans la lamelle moyenne. La Figure 1.2 illustre la distribution des composés organiques dans les différentes couches de la paroi cellulaire (Panshin et de Zeeuw 1980). L'étude de la morphologie des fibres peut se faire par microscopie optique, par microscopie électronique à balayage ou par microscopie électronique à transmission (Vincent, 2006).

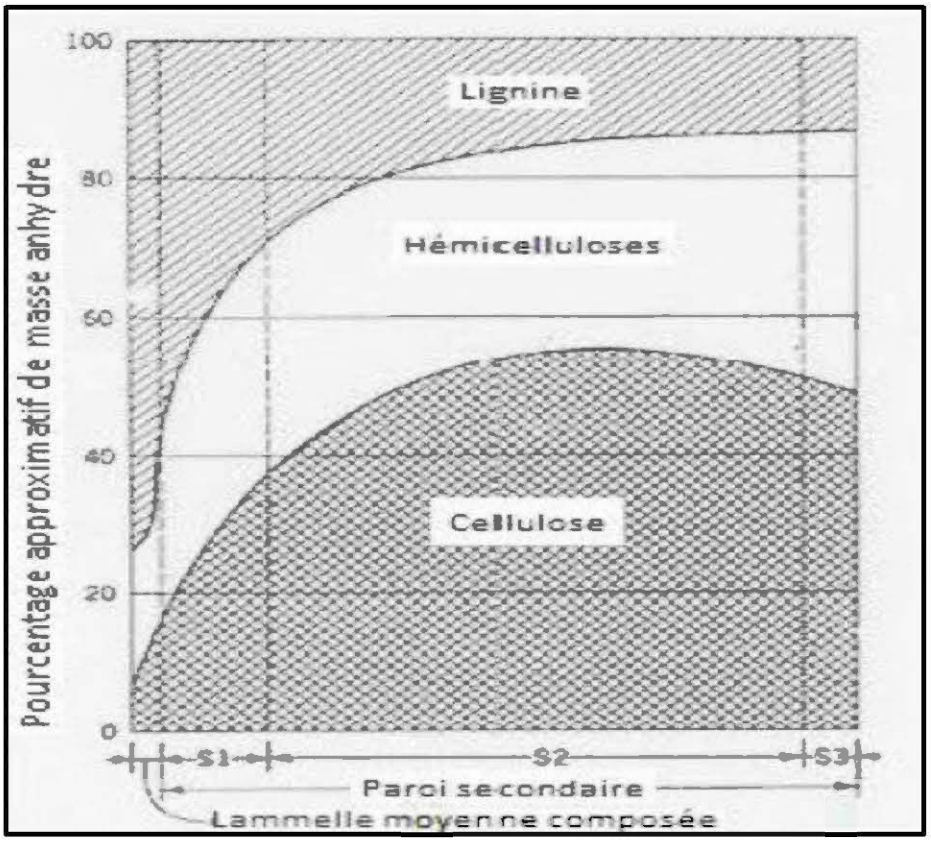


Figure 1.2 : Distribution des composés organiques dans les différentes couches de la paroi cellulaire (Panshin et de Zeeuw, 1980).

1.2 Composition chimique du bois et de la fibre

Le bois est l'un des matériaux les plus utilisés et les plus appréciés pour ses propriétés mécaniques, pour son pouvoir calorifique et comme matière première pour de multiples

branches industrielles. En plus d'être une source de plusieurs produits chimiques industriels importants, il est la source principale de fibres pour la pâte, le papier, les panneaux de fibres, les composites de bois-polymère, les panneaux de particules et le contreplaqué. Les principaux éléments chimiques du bois sont le carbone (50%), l'oxygène (42%), l'hydrogène (6%), des traces d'azote (1% et moins) et des minéraux principalement le calcium (Ca), le potassium (K), le sodium (Na), le magnésium (Mg), le fer (Fe) et le manganèse (Mn) (Hazard et al, 1990). On trouve également du soufre, du chlore, du silicium, du phosphore et d'autres éléments en faible quantité.

Le carbone, l'oxygène et l'hydrogène se combinent pour former trois types de polymères naturels : la cellulose, la lignine, les hémicelluloses. On trouve également dans le bois un groupe de composés chimiques qui peuvent être prélevés des matériaux ligneux par extraction appelés les extractibles (Hazard et al, 1990). La composition chimique du bois est résumée au tableau 1.2 (Panshin et de Zeeuw, 1980).

Tableau 1.2 : La composition chimique du bois (adapté de Panshin et de Zeeuw, 1980).

Bois	Lignine	Cellulose	Hémicelluloses	Extractibles
Feuillus	20-35 %	40-50 %	20%	1à 5% de résines, cendres
Résineux	7-35 %	40-50 %	5-35 %	1à 5 % de résines, cendres

1.2.1 La cellulose

La cellulose représente la moitié du poids du bois (40 à 50 %), elle est composée d'une longue chaîne de molécules de glucose de monosaccharides formés par photosynthèse à partir du dioxyde de carbone atmosphérique (CO_2) (Bowyer et al. 2005).

Les molécules sont reliées entre elles de façon à former de longues chaînes de cellulose. La formule empirique de la cellulose est la suivante : $(C_6H_{10}O_5)_n$. L'indice n est le degré de polymérisation où le nombre de monomères de glucose par chaîne de cellulose (Stevanovic et Perrin, 2009). Ce degré de polymérisation est compris entre 200 et 30 000. Les unités du glucose formant la chaîne de cellulose sont reliées entre elles par des liaisons β-1, 4-Glycosidiques. Ces différentes chaînes placées côte à côte sont liées par de nombreuses liaisons hydrogène(H) inter caténaire (Figure 1.3), pour constituer des micro-fibrilles extrêmement résistantes.

La cellulose est considérée comme le constituant du bois le plus stable chimiquement et thermiquement (Stevanovic et Perrin, 2009). Elle se trouve à environ 80 % sous forme cristalline dans le bois et joue un rôle primordial dans la tenue mécanique de la paroi cellulaire des fibres.

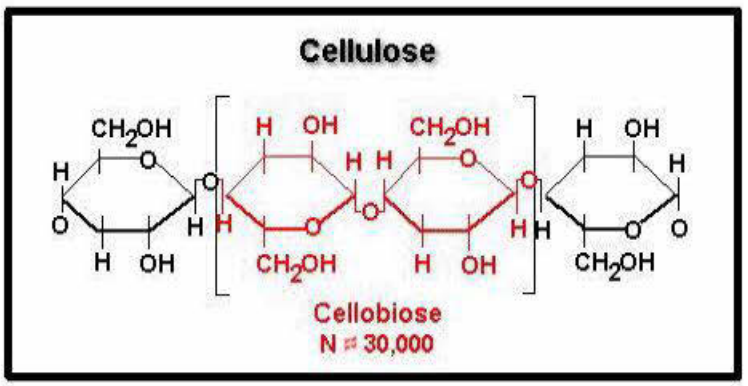


Figure 1.3 : Structure chimique de la cellulose (Pandey, 1999).

1.2.2 Les hémicelluloses

L'hémicellulose est de forme $(C_6 H_{10} O_5)_n$, avec un degré de polymérisation beaucoup plus petit que celui de la cellulose (n de l'ordre de 150), elle représente 25 % en poids du bois (El Hadji, 2008). Les hémicelluloses sont des polymères plus courts (masse

molaire inférieure) et ramifiés. Elles sont composées principalement de pentoses et d'hexoses avec des petites proportions de glucose. Elles ont une structure semi-cristalline étant donné qu'elles sont composées de polymères branchés.

Les hémicelluloses sont très hydrophiles et se dégradent beaucoup plus facilement que la cellulose (Darnell et al, 1990). Les hémicelluloses sont amorphes et sont composées de : D-glucose, D-mannose, D-galactose, D-xylose, L-arabinose, glucuronique et acide uronique (Bowyer et al, 2005 ; Hansen et Plackett. 2008). On illustre à la figure 1.4 la structure des différents monomères des hémicelluloses.

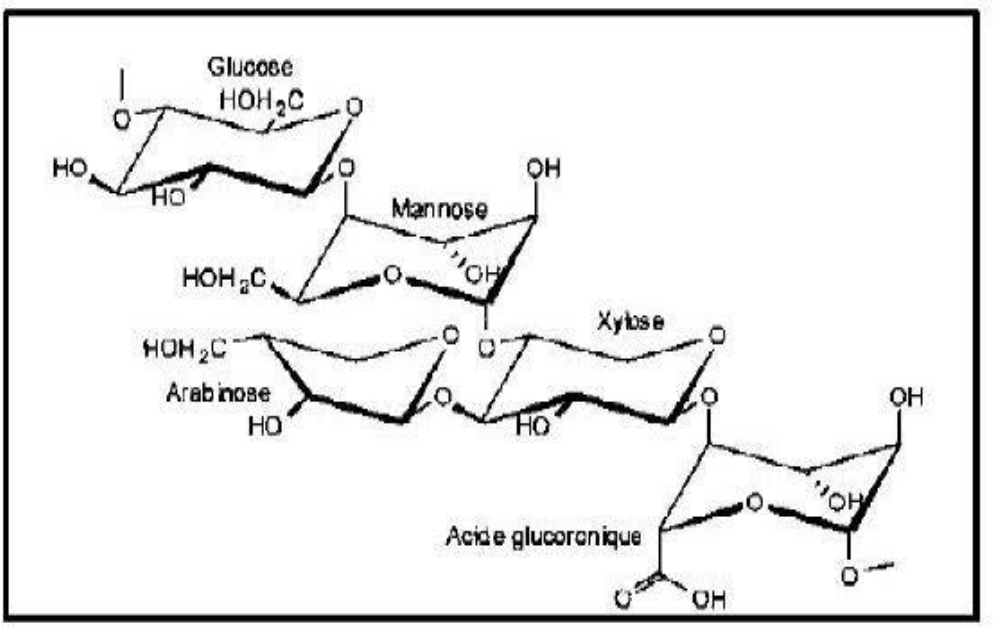


Figure 1.4 : Structure de monomères d'hémicelluloses (Estournel-Pelardy, 2011).

1.2.3 La lignine

C'est le troisième constituant de la paroi cellulaire. Elle est amorphe avec 20 à 30 % en poids du bois. Sa structure chimique est complexe, du fait qu'il existe au moins trois types de monomères différents qui sont les alcools p-coumarylique, coniférylique et

sinapylique (Figure 1.5). La lignine est une substance phénolique qui varie, comme pour les hémicelluloses, en fonction de l'espèce, de l'âge du végétal et des conditions climatiques. Elle contribue à la rigidité des parois cellulaires. Elle est thermoplastique, soluble dans les solutions alcalines et n'est pas facilement dégradable ni hydrolysable (Bowyer et al, 2005).

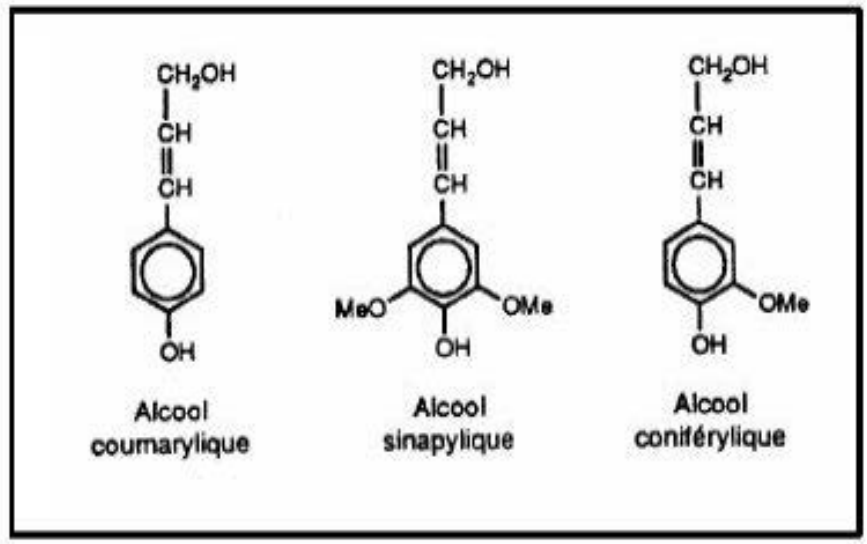


Figure 1.5 : Motifs élémentaires de la lignine (Sjöström, 1993).

1.2.4 Les extractibles

Les extractibles sont des composés solubles dans l'eau et dans les solvants organiques. Leur composition et leur quantité varient d'une espèce d'arbre à l'autre. On y trouve principalement (Repellin, 2006) :

- Les trapézoïdes et les terpènes qui sont des hydrocarbures purs et dont les usages sont multiples.
- Des sels minéraux sont à base de calcium, de magnésium et de potassium qui sont nécessaires à la vie de l'arbre.

- Les graisses et les cires sont des esters d'acides gras avec des alcools gras ou dérivés des terpènes.
- Des constituants phénoliques situés principalement dans le bois de cœur et dans les écorces qui jouent un rôle important dans la résistance aux attaques fongiques et dans la couleur du bois.

1.3 Procédés de mise en pâte

La mise en pâte consiste à défibrer les fibres cellulosiques par des moyens chimiques, mécaniques ou thermiques. Le défibrage chimique consiste à extraire la lignine et d'autres composantes contenues dans le bois, tout en gardant les propriétés mécaniques des fibres. Le défibrage mécanique consiste à séparer les fibres du bois mécaniquement. Le bois peut être traité chimiquement ou thermiquement avant ou pendant le procédé de mise en pâte (Garceau et al, 1989). Le tableau 1.3 présente les différents procédés de mise en pâte avec leur rendement.

Les pâtes mécaniques sont obtenues soit en râpant les rondins ou copeaux par une meule (pâte de meule), soit en faisant passer les copeaux à travers les disques (pâte de défibreurs). Les composés organiques du bois ; la cellulose, les hémicelluloses et la lignine conservent leurs intégrités en l'absence des produits chimiques sur la matière.

Les copeaux sont traités à la vapeur saturée et raffinés sous pression pour obtenir une pâte thermomécanique PTM (MDDEP, 2008). La pâte ainsi obtenue est néanmoins impropre à diverses utilisations du fait qu`elle contient encore de la lignine.

La lignine a pour rôle de renforcer le bois massif, mais sa présence dans la pâte mécanique a pour inconvénient de compromettre la blancheur du papier.

Tableau 1.3 : Mise en pâte : Procédés, rendements et produits (Zhang et Koubaa, 2009).

Procédé de mise en pâte	Rendement (%)	Produits
Mécanique de meule	93-96	Papier journal, papier sanitaire, papier couché.
Thermomécanique	90-93	Papier journal, papier calandré, papier couché.
Chimico-thermomécanique	82-89	Papier journal, papier d`impression.
Chimico-mécanique	78-88	Papier journal, papier d`impression.
Au bisulfite acide	65-80	Carton, carton ondulé et carton ondulé double.
Au bisulfite	65-74	Carton, carton ondulé.
Au sulfate (Kraft)	46-55	Carton, papier couché, papier fin, papier cristal.

Le procédé chimico-thermomécanique (PCTM) est un procédé de mise en pâte à haut rendement par sulfonation. L'ajout de produits chimiques permet de ramollir et de faciliter la séparation des fibres du bois.

Le traitement chimique est réalisé à l`aide d'un mélange de sulfite de sodium concentré de 4 à 12% et à une température de 120 à 160 °C pendant 15 à 110 minutes selon la nature de l'essence. Le raffinage des copeaux se fait à la pression atmosphérique (Garceau et al, 1989).

À l'origine, la pâte chimico-thermomécanique est moins polluante que la pâte chimique, toutefois l'ajout de sulfite de sodium entraîne des rejets importants de produits dissous qui nécessitent un traitement complexe des eaux (MDDEP, 2001).

Dans le procédé mi- chimique, les pâtes sont obtenues par un traitement chimique modéré, suivi d'un défibrage mécanique, qui permet d'éliminer partiellement la lignine. Le rendement est de 65 à 75 % dans ce procédé (Smook, 2002).

Le procédé chimique est le procédé le plus courant dans le monde. Il couvre de 83 à 84% de la production des pâtes en Amérique du Nord. La pâte chimique (papier Kraft) est obtenue par le mélange du bisulfite (acide) et du sulfate (alcalin), suivant le procédé décrit ci-dessous (Yang et Liu, 2005).

Avec l'action de la chaleur et des produits chimiques, la lignine se dissout sans briser les fibres du bois. La préparation de la pâte est réalisée à une température entre100 et 175 °C et elle est cuite ainsi sous pression en présence de composés chimiques (soude et sulfure) pendant 2 à 5 h. Dans le procédé (Kraft), les produits chimiques sont récupérés à la sortie de la chaudière et sont réutilisés pour la cuisson.

Lors de la vidange, la vapeur produite est condensée et envoyée au système de traitement des eaux, après l'avoir débarrassée de certains contaminants (MDDEP, 2012). Les données du tableau 1.4 présentent les propriétés des papiers issus de différents types de pâtes à papier.

Tableau 1.4 : Propriétés des papiers issus de différents types de pâtes à papier (Koubaa, 1996).

Pâte	Indice d'écoulement (ml)	Densité (kg/m^3)	Résistance Z (kPa)	Énergie d'arrachage (J/m^2)	Résistance spécifique des liaisons (kPa)
TMP résineux	130-475	231-275	124-339	42-84	827-1900
CTMP bouleau	200-420	500-609	579-761	66-112	1730-1920
Kraft Résineux blanchi	270-675	578-683	339-710	91-414	903-1 600
Kraft résineux non blanchi	260-625	543-720	381-720	38-51	1080-1540
Kraft bouleau non blanchi	430-625	605-688	484-743	39-67	1230-1650

1.4 Résidus papetiers

1.4.1 Nature des rejets

L`industrie des pâtes et papiers génère plusieurs types de résidus dilués dans un grand volume d`eau, tels que les matières en suspension (MES), des matières organiques, des composés inorganiques et d'autres substances telles que les composés organiques volatils ou semi-volatils (Gilbride et Fulthorpe, 2004). On peut trouver dans les effluents papetiers plusieurs contaminants (B.A.C.E, 2005) :

- Les MES, telles que : fibres de bois, fines particules de bois, boues biologiques, cendres et additifs (argile, carbonate de calcium, etc.) ;

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

- Des matières organiques, en majorité dissoute qui créent une demande biologique (DBO) et une demande chimique (DCO) en oxygène ainsi que des additifs ;
- Des composés inorganiques (métaux et sels provenant du bois ou des additifs) ;
- Des hydrocarbures C10-C50 qui proviennent des pertes de lubrifiants ;
- Des composés phénoliques et des acides gras et résineux, provenant du bois ;
- Des traces de biphényles polychlorés (BPC), provenant des colorants et de certains produits chimiques ;
- Des composés organochlorés tels que les dioxines et les furannes chlorés, qu'on trouve dans les effluents des usines de blanchiment des pâtes avec un produit chloré ;
- Des substances nutritives, composées d'azote et de phosphore, qui sont ajoutées au traitement biologique pour le maintien de l'activité bactérienne ;

D'autres substances telles que les composés organiques volatils ou semi-volatils : le formaldéhyde, les hydrocarbures aromatiques polycycliques, l'acétaldéhyde, etc.

1.4.2 Système de traitement des effluents papetiers

En général, l'industrie papetière utilise deux systèmes d'épurations : le traitement primaire par décantation et le traitement secondaire par la dégradation biologique. La Figure 1.6 illustre les principales étapes du traitement des effluents de papetiers.

Le traitement primaire permet d'éliminer environ 95% de MES. L'opération est réalisée dans des bassins d'eau, après décantation et flottation. Les particules tombent vers le fond ou remontent à la surface suivant leurs poids. Pour permettre à certaines particules qui ont un diamètre plus faible (1 mm à 1 micromètre) de se décanter, on ajoute des coagulants et des floculants.

Ce processus permet d'éliminer toutes les particules (MES) et de réduire également la demande biologique en oxygène sur 5 jours (DBO5) (MDDEFP, 2012).

Le traitement secondaire est réalisé par voie biologique en mettant en contact la matière organique avec une masse bactérienne. Le principe est d'utiliser des bassins d'aération et de décantation pour séparer la biomasse de l'eau épurée. La boue biologique est ensuite séchée avant son élimination. Le bassin d'aération constitue la partie principale du procédé dans lequel s'effectue le métabolisme bactérien. C'est dans ce bassin qu'ils ont lieu les réactions biochimiques. Le traitement biologique consiste à éliminer la DCO (demande chimique en oxygène) et la DBO5 (MDDEFP, 2012). Le bilan global de l'épuration se traduit par :

Pollution organique + micro-organismes + O_2 → Boues en excès + CO_2 + H_2O + NH_3

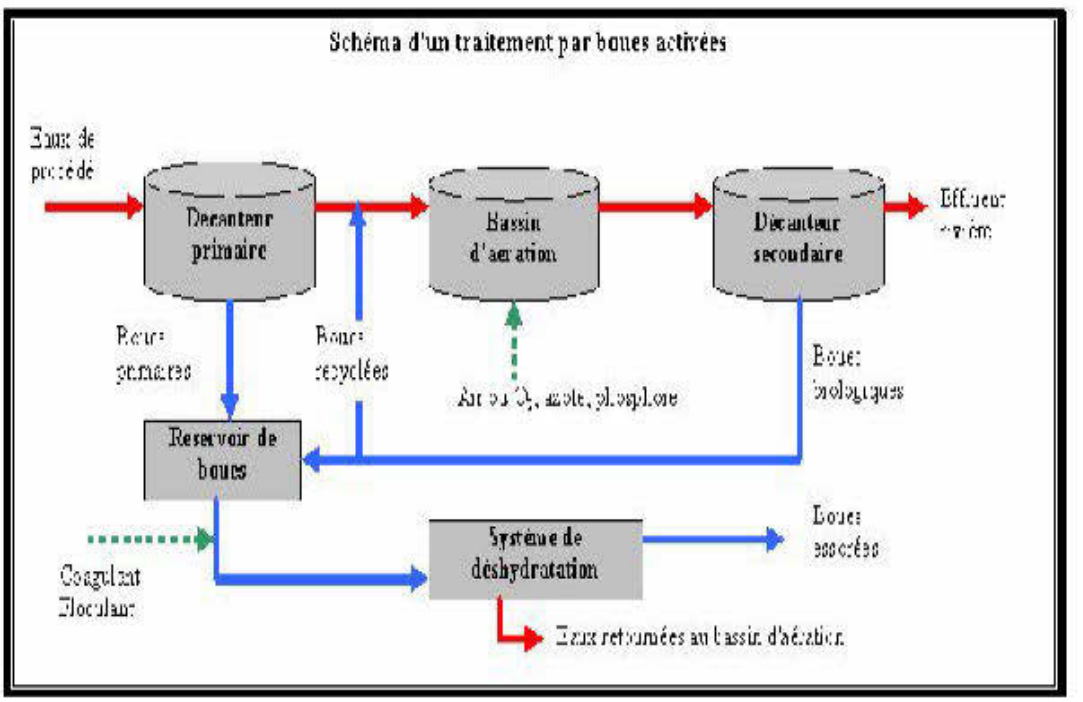


Figure 1.6 : Schéma des principales étapes du traitement des effluents papetiers (MDDEFP, 2012).

1.4.3 Caractéristiques physico-chimiques des boues

L'industrie des pâtes et papiers génère diverses quantités de rejets. La majorité de ces matières résiduelles sont éliminées par la mise en décharge, l`épandage ou l`incinération. On peut définir ces rejets de la façon suivante :

Boues primaires : Issues d'un traitement physico-chimique (décanteur, filtre, cellule de flottation, lagune de sédimentation, etc.) qui a pour but d'extraire facilement des matières en suspension et des matières organiques, très riches en fibres. Elles contiennent généralement (0,3%) d'azote en poids sec, avec un ratio C/N (Bellamy et al, 1995).

Boues secondaires : Issues d'un traitement biologique qui a pour objet l'élimination des composés solubles d'origine organique (digestion des matières organiques par les micro-organismes). Les boues secondaires sont riches en azote et ont une teneur en phosphore qui varie de 0,1 à 0,3% (Bellamy et al, 1995) et (Zibliske, 1987).

Boues de désencrage : générées à la station de désencrage par les triturateurs, les cellules de flottation, les épurateurs, les laveurs et les tamiseurs. Elles contiennent des encres, des charges minérales et des résidus de fibres cellulosiques entraînés lors du désencrage. Ces boues représentent environ 95% du volume des rejets (Brouillette, 1996). Elles proviennent principalement du procédé de désencrage ; dans les étapes de flottation, de lavage, de pressage et de clarification.

Cendres : Provenant de la combustion des particules récupérées, aux appareils de traitement des gaz de combustion et aux cendriers.

Des résidus : Écorces, nœuds, résidus de bois, de papier, de carton et ensemble des matières résiduelles récupérées (plastiques, agrafes, etc.).

Les boues papetières contiennent beaucoup d'autres éléments tels que l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), le calcium (Ca) et le magnésium (Mg). Leurs concentrations et le ratio C/N varient selon le type du procédé de mise en pâte (Vance, 2000).

Rashid et al (2006) ont étudié la possibilité de valoriser les boues sur des terres agricoles. Ils ont conclu que les BS et les BM ont des rotations C/N inférieures à 50, ce qui augmente leur pouvoir fertilisant. Ils ont regroupé quelques données dans le but de valoriser les terres agricoles au Canada (Tableau 1.5).

Tableau 1.5 : Analyse chimique des boues primaires et de désencrage. (Rashid et al, 2006).

	Goss et al, 2003	**Atiken et al, 1998**	**Simard et al, 1998**
	(n = 3)	(n = 1)	(n = 3)
Conductivité (µS/cm)	390-870	-	90-200
pH	7,7-8,2	7,7	7,8-9,1
Concentration solide (%)	39,7-49	31,5	-
Carbone organique de la fraction solide (%)	29,7-33,4	31,8	42,3-44,2
Azote total de la fraction solide (%)	0,27-0,73	0,37	0,15
Ratio C/N	42-124	86	284-292
P total (%)	0,072-0,093	0,08	0,0096-0,0097
K total (%)	0-0,09	0,2	0,0029-0,0034
Ca total (%)	2,86-5,85	-	0,46-0,56
Mg total (%)	0-0,06	0,235	0,026-0,031
Na total %2	0,05-0,06	-	0,073-0,084

Zerhouni (2010) a comparé les boues des trois procédés de fabrication (TMP, CTMP et Kraft). Comparativement aux fibres du bois (résineux), les boues de papetières contiennent des quantités inférieures en cellulose et en hémicellulose (Tableau 1.6). Par contre, on note une absence de lignine dans les pâtes kraft alors que les boues primaires et secondaires en contiennent. Cela a été expliqué par la présence des fibres de bois dans les boues qui n'ont pas été transformées chimiquement dans la cuisson de la pâte.

Tableau 1.6 : Composition des boues PTM, PCTM et Kraft (Zerhouni, 2010).

	PTM			**PCTM**			**Kraft**		
Procédé	**Pâte**	**BP**	**BS**	**Pâte**	**BP**	**BS**	**Pâte**	**BP**	**BS**
Lignine insoluble en milieu acide (%)	28,5	30,7	26,7	19,3	26	22,5	0,41	30,2	24,6
Lignine soluble en milieu acide (%)	0,3	0,96	8,52	2,43	2,59	10,2	0,28	1,13	7,35
Lignine totale (%)	28,8	31,7	35,2	21,7	29,2	32,7	0,69	31,3	34,0
Teneur en cendres (%)	-	10,4	30,2	-	2,9	17,0	-	12,5	27,4
Hémicelluloses (%)	27,1	16,42	3,4	26,5	18,5	3,4	17,2	15,9	5,4
Cellulose (%)	40,9	29,5	3,9	44,8	35,0	2,4	77,1	29,5	4,6
Polysaccharides (%)	68	45,9	7,3	71,3	53,5	5,8	94,3	45,4	10
Arabinane (%)	1,5	1,0	0,4	0,5	0,6	0,6	0,5	1,0	0,6
Xylane (%)	5,8	4,0	0,6	20,7	14,2	0,9	9,2	4,8	0,8
Mannane (%)	9,8	6,4	1,0	1,5	1,1	0,7	4,2	5,4	1,2
Galactane (%)	4,5	1,4	0,8	1,0	0,6	0,8	0,3	1,5	1,3
Glucane (%)	46,4	33,1	4,5	47,6	37,0	2,8	80,1	32,7	6,1

Rapport-Gratuit.com

Les métaux lourds dans les boues papetières sont présents soit en raison des produits chimiques ajoutés au cours du procédé de fabrication de pâte à papier ou dans le bois lui-même, les arbres ont absorbé ces métaux à partir du sol (Warren, 2001).

Les métaux lourds sont connus pour leurs effets très toxiques pour la santé des plantes et des animaux mêmes sils sont présents en faibles concentrations. Le tableau (1.7) montre les concentrations des métaux lourds en ppm dans des boues papetières de différentes papeteries (Rashid et al, 2006).

Tableau 1.7 : Concentration des métaux lourds en ppm dans des boues papetières de différentes usines de pâtes et papiers (Rashid et al, 2006).

Métaux	**Powell River**		**Paprican**	
	BP	**BS**	**BP**	**BS**
Arsenic	0,09 à 1,7	0,2 à 0,98	0,5 à 1,1	0,9
Chrome	17 à 29	31 à 46	8 à 73	20 à 40
Cobalt	< 1 - < 5	< 1	< 1 à 4	< 1
Cuivre	15 à 26	12 à 30	11 à 46	14 à 65
Plom b	< 1 - < 10	< 4 - < 10	3 à 92	5 à 37
Mercure	0,02 à 0,19	0,14	à 0,1	0,1 à 1
Moly bdène	< 4 - < 20	< 4 < 4	< 2	< 10
Nickel	7 - < 10	< 2 à 9	8 à 56	9 à 38
Sélénium	< 0,5 - < 2	< 0,5 - < 2	0,05 à 2,7	*N/A*
Zinc	26 à 83	30 à 79	30 à 94	88 à 475

Les boues de désencrage sont les plus susceptibles à contenir des métaux lourds provenant d'encres d'impression (Zerhouni, 2010).

Davis et al (2003) ont regroupés les oxydes ferreux provenant des cendres après une combustion de BD et ils ont comparé ces résultats aux BD et à une argile de type kaolinite (Tableau1.8).

Tableau 1.8 : Proportions (%) des matières inorganiques dans les boues de désencrage (Davis et al, 2003).

	Cendres BD Usine A	**Cendres BD Usine B**	**Cendres BD Usine C**	**Cendres BD Usine D**	**BD**	**Argile (kaolinite)**
SiO_2	43,9	45,7	44,2	46,4	46,08	46,3
Al_2O_3	33,4	33	44,1	40,6	33,34	39,8
CaO	7,94	8,85	2,6	7,4	9,01	0,04
TiO_2	5,55	5,54	2,94	1,5	5,8	1,55
MgO	2,14	1,65	1,19	0,9	1,71	0,1
Fe_2O_3	0,7	1,67	1,13	1,5	0,88	0,41
Na_2O	0,41	0,63	0,22	0,3	0,63	
K_2O	0,27	0,49	0,26	0	0,34	0,7
P_2O_5	0,23	0,32	0,47	0,8	0,32	0,1
SO_2	0,2	0,74	0,87	0,3	0,59	
MO	5,39	1	1,2	0,1	0,06	14

1.5 Composition des boues de désencrage

La composition des boues de désencrage diffère de la composition des autres types de boues (boues primaires et secondaires) générées par les usines de pâtes et papiers. Celles-ci sont influencées par de nombreux facteurs dans le système de désencrage utilisé lors du traitement des effluents.

Les boues se divisent en trois grandes parties : matière combustible, matière non combustible et eau (Brouillette, 1996).

- Dans la partie combustible, on trouve les fibres courtes, qui ne peuvent être réutilisées dans la fabrication du papier. On trouve aussi d'autres composants comme les encres, les polymères de floculation utilisés dans le clarificateur, les acides gras utilisés lors de la flottation, certains acides résiniques provenant du bois et d'autres composés présents en très faibles quantités (Brouillette, 1996).
- L'eau s'évapore lors de la combustion des boues et ne se retrouve pas dans les cendres.
- Dans la partie non combustible, on trouve les additifs minéraux qui sont constitués du kaolin (glaise), du talc, des carbonates et des métaux (Cu, Pb, Ni et Zn).

1.5.1 Le procédé de désencrage

Le procédé de désencrage se fait en cinq étapes : la mise en suspension de vieux papiers, la trituration, le décrochage de l'encre, la dispersion et l'élimination des particules d'encres (Brouillette, 1996) (Figure 1.7).

La trituration consiste à mélanger et agiter de vieux journaux, de vieux magazines et de l'eau, de la vapeur et parfois des produits chimiques.

Afin de décomposer le papier et de faire gonfler les fibres. L'opération se déroule dans un pulpeur et nécessite beaucoup d'eau. Dès cette étape, on ajoute habituellement :

- Hydroxyde de sodium (NaOH) : L`ajout de NaOH permet de maintenir le pH alcalin, ce qui augmente l'efficacité de blanchiment du peroxyde d'hydrogène, tout en augmentant la flexibilité des fibres pour améliorer l'action des agents de désencrage.

- Tensioactif : pour favoriser le mouillage du papier en abaissant la tension superficielle de l'eau.
- Silicate de sodium (Na_2O_3Si) : agit comme agent alcalin, agent mouillant, tampon et séquestrant du calcium et du magnésium.
- Peroxyde d'hydrogène H_2O_2 : pour blanchir la pâte obtenue à partir des vieux papiers, afin de contrer l'effet de jaunissement des fibres dû à l'utilisation de NaOH.
- Un tamisage, et parfois une centrifugation, permet d'éliminer les éléments indésirables, notamment les agrafes et trombones.

Après la trituration, la pâte est transférée aux cellules de flottation. Au cours de cette seconde étape, les fibres sont retirées du mélange liquide, en ajoutant un tensio-actif (savon) à la pâte. Des bulles d'air transitent dans la pâte à papier et entraînent les particules d'encre qui remontent ainsi à la surface. La mousse contenant les particules d'encre est évacuée par débordement ou aspiration. Une fois pressées et déshydratées, ces mousses deviennent des boues de désencrage. Les savons souvent utilisés sont des savons d'acide gras de structure $CH_3(CH_2)$ nC(O) O-/Na+.

Le lavage consiste à retirer les additifs minéraux du papier. Le lavage utilise des surfactants non ioniques, produisant peu de mousse, ce qui rend les particules stables dans la solution. Les particules entraînées dans l'effluent doivent être retirées.

Lors de l'étape du lavage, les particules d'encre finement éparpillées doivent être liées avec l'assistance d'un polymère de floculation.

À l'aide d'oxygène dissous, le floc résultant peut-être enlevé par flottation. Les résidus solides provenant de la clarification et de la flottation sont ensuite pressés pour faciliter la manipulation.

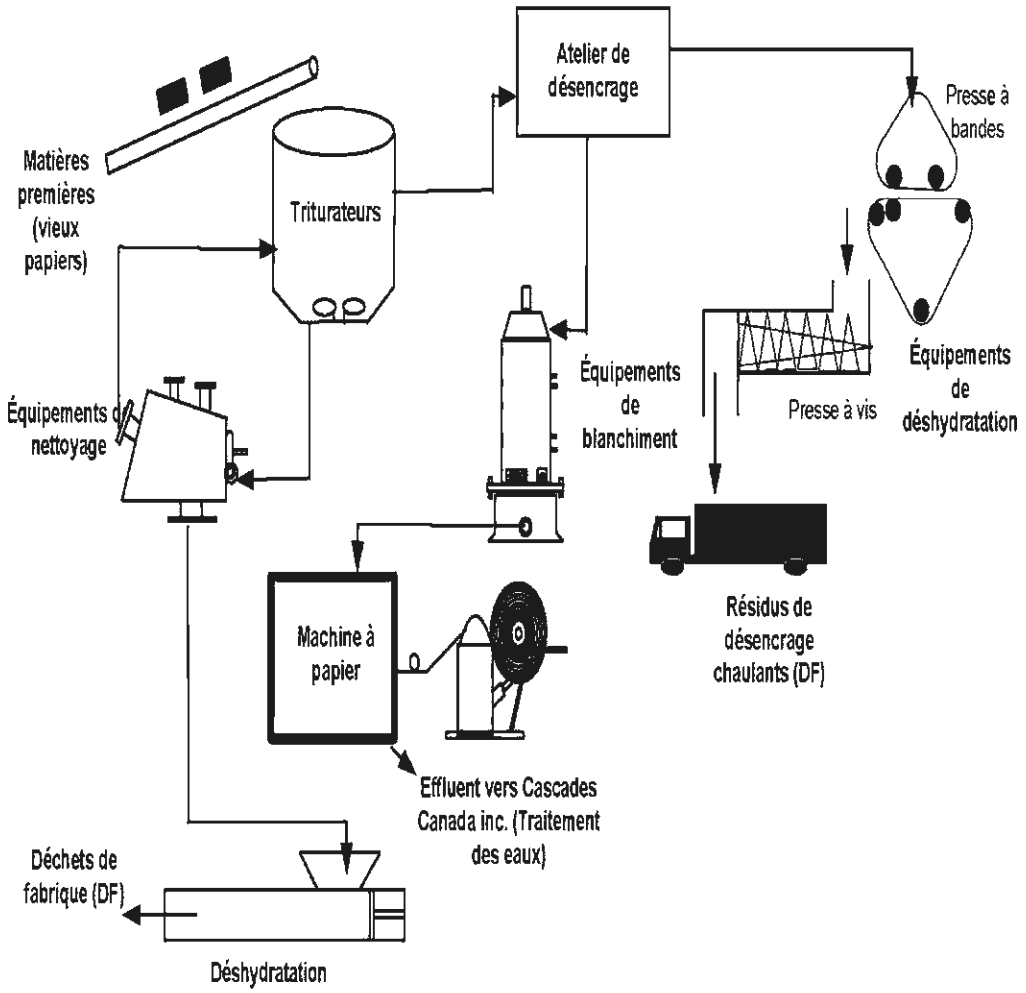


Figure 1.7 : Schéma du système de désencrage de l'unité de Cascades, Groupe Tissu-KingseyFalls.

1.6 Méthodes de valorisation des boues

Les méthodes de valorisation des boues utilisées dans l`industrie sont principalement (Scott et Smith, 1995) :

- Celles qui nécessitent le transport des boues comme dans l`épandage agricole, l`épandage sylvicole, le compostage et dans la fabrication de matériaux de construction.
- Celles qui peuvent s'appliquer directement sur le site de production : Combustion, incinération, fabrication d'éthanol, recyclage pour la fabrication de papiers.

  La figure 1.8 présente une distribution des méthodes de gestion utilisées dans l'industrie papetière (Scott et Smith, 1995).

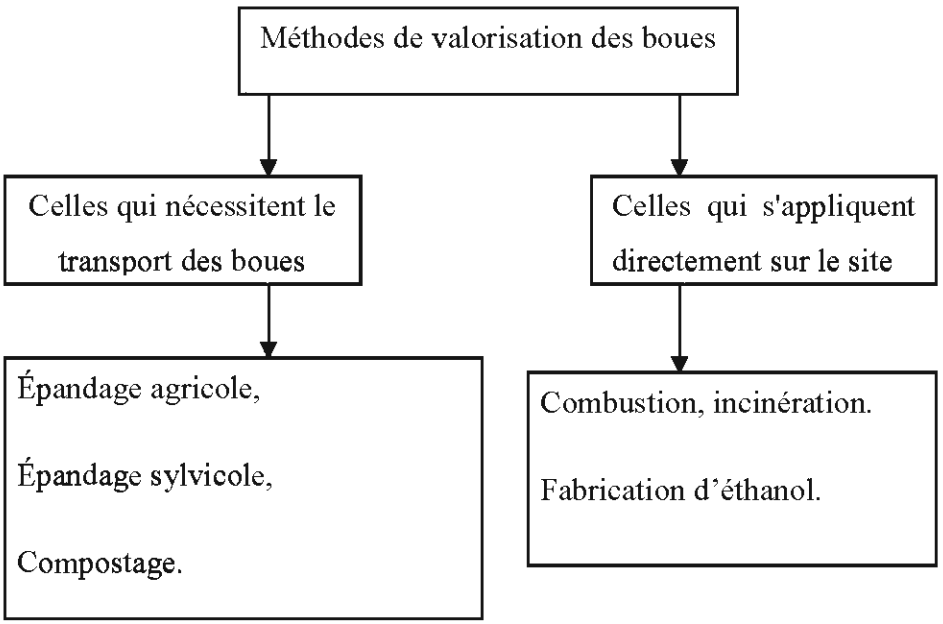


Figure 1.8 : Méthode de gestion des boues utilisées dans l'industrie papetière (Scott et Smith, 1995).

1.6.1 Enfouissement

Cette méthode consiste à déplacer les résidus solides vers un site déjà préparé pour enfouissement (Scott et Smith, 1995). Du point de vue environnemental et économique, l`enfouissement présente plusieurs avantages et inconvénients. Le principal avantage de l'utilisation de l'enfouissement comme méthode de gestion des boues est sa simplicité. Juste un camion est suffisant pour le transport des boues et un site d'enfouissement accessible.

Les inconvénients de l'utilisation de l'enfouissement comme méthode de gestion des boues incluent (Makansi et al, 1984) :

- Le coût élevé de transport à cause de l'éloignement des usines des sites d`enfouissement.
- Raréfaction du nombre de sites : les permis pour l'ouverture de nouveaux sites sont difficiles à obtenir, et ce, pour limiter la contamination des sols et des eaux souterraines.
- De nouvelles règlementations sur la gestion des déchets, avec des normes environnementales de plus en plus sévères, induisent des coûts supplémentaires de gestion.
- Émission de gaz à effet de serre, telle que le CO_2 et le CH_4.
- Possibilité de dégagement d'odeurs causées par l'activité bactérienne (Diehn et al 1990).

1.6.2 Épandage agricole et sylvicole

L'épandage des boues s'effectue suivant plusieurs façons : directement sur le sol, injecté ou vaporisé dans le sol (Eck, 1986). Des tests de germination ont été effectués

sur des plantes poussant dans des sols amendés avec des boues papetières. L'étude a montré qu'il y a eu un développement de réseaux de racine plus importante et une meilleure rétention en eau dans le sol (Diehn et al, 1990). La matière organique (carbone et azote) et certains minéraux (potassium et phosphore) contenus dans les boues favorisent la croissance des plantes.

Parmi les avantages de l'épandage, on peut citer (Boisselle, 1999) :

- Tous types de boues peuvent être utilisés sans prétraitement, seule la déshydratation mécanique est nécessaire.
- Équipements de gestion peu coûteux.
- Valorisation des boues sans génération de cendre.

Des difficultés peuvent toutefois être rencontrées si les quantités épandues sont trop importantes (Boisselle, 1999) :

- L'usine doit se trouver près des terres agricoles ou sylvicoles pour diminuer les coûts de transport.
- Plus l'hiver est long, plus la période d'épandage est courte, du fait de son interdiction en hiver. On doit ainsi prévoir un espace d'entreposage des boues pendant cette période.
- L'accumulation possible de métaux lourds et la présence de charges et de glaises dans les boues empêchent le bon drainage du sol. Les quantités de métaux lourds et de produits chlorés doivent être en conformité avec les normes environnementales.
- Également, avant d'effectuer l'épandage, on doit procéder à une étude des sites potentiels : études du sol, drainage, installation de puits piézométriques.

1.6.3 Le compostage

C'est un processus biologique, qui consiste à dégrader dans des conditions contrôlées, des substances organiques en présence de l'oxygène de l'air pour générer un produit final stable sous forme d'humus. Ce produit possède des qualités fertilisantes importantes (MDDEFP, 2012). Le compostage en tas est généralement la méthode la plus utilisée : les boues sont aérées en les retournant périodiquement à l'aide d`une pelle mécanique (Zerhouni, 2010).

Des études réalisées à l'Université Laval à Québec, en collaboration avec l'atelier de désencrage de la compagnie DAISHOWA ont démontré que, les boues de désencrage peuvent être compostées alors que, jusqu'au début des années 1990, seules les boues primaires et secondaires étaient utilisées pour le compostage (Cardwell, 1994).

Bien que le compostage des boues soit une technique intéressante, elle est peu utilisée à cause des inconvénients suivants (MDDEFP, 2012) :

- Le compostage des boues nécessite de grands espaces, elles peuvent s'accumuler assez rapidement selon la production de l'usine.
- Le marché du compost n'est pas encore suffisant pour absorber toute la quantité produite.
- Des travailleurs spécialisés sont nécessaires pour le bon fonctionnement du procédé.
- La production des composts peut générer des odeurs désagréables.

1.6.4 La réhabilitation des terrains

Le principe de cette méthode est identique à l'épandage agricole bien que le but soit différent. La méthode consiste à utiliser les boues comme fertilisants, dans des terrains

occupés antérieurement par des usines abandonnées. Srinivasan et Unwin (1995) ont étudié la qualité du sol d'une mine abandonnée où ils ont épandu les boues papetières. Cette étude a montré que l'utilisation des boues a amélioré le rendement de la réhabilitation des sols. Les coûts élevés de cette méthode obligent raisonnablement à limiter son utilisation.

1.6.5 La valorisation énergétique

a) L'incinération

C'est la combustion des boues pour produire de l'énergie sous forme de vapeur. C'est une technique intéressante puisque la plupart des usines possèdent une unité de génération de vapeur. Il existe deux méthodes d'incinération des boues ; les chaudières et le lit fluidisé (Simons, 1994).

Un lit fluidisé est un lit de particules inertes qui reposent sur un distributeur d'air. L'air injecté dans le lit est suffisamment important pour générer l'expansion des particules et également servir à la combustion des déchets.
Bien que l'incinération soit la méthode la plus populaire (Simons, 1994), elle présente toutefois quelques inconvénients (El Ouazzani, 2005) :

- Une méthode de gestion doit être utilisée pour traiter les résidus de combustion (cendres).
- Émission de SO_2, NO_x, et CO.
- Nécessité de surveiller continuellement le bon fonctionnement des appareils, pour éviter des combustions incomplètes.

b) L'oxydation humide

Elle consiste à chauffer les boues en les mettant en solution au-dessus des conditions critiques de l'eau (374°C et 22 x 10^3 kPa), en injectant de l'oxygène et de l'air. Le volume des boues est réduit et les cendres récupérées sont principalement, les composites inorganiques, qui seront réutilisés dans la production du papier (Boisselle, 1999).

Comparativement aux autres méthodes, il n'y a pas d'émissions atmosphériques nocives (NO_x, SO_x, CO...) (Boisselle, 1999). Cette méthode est néanmoins peu appréciée à cause des inconvenants suivants :

- Un investissement important est nécessaire pour la réalisation d'une unité d'incinération.
- Les travaux ont lieu dans un milieu à haute pression (risques d'éclatements).
- Problèmes de corrosion de toutes les structures métalliques (tuyauteries, contenants, échelles…) à cause du milieu à pH faible.

c) La gazéification

C'est une méthode qui transforme les boues en gaz qui peut être utilisés comme combustibles, à cause de leur pouvoir calorifique élevé (Boisselle, 1999).

La gazéification se produit dans un environnement faible en oxygène qui génère un mélange de gaz. Elle est composée principalement, de CO, d'H_2, de CO_2 et de CH_4. Le gaz produit peut-être directement utilisé dans les turbines à gaz pour la production de l`électricité. Avec cette méthode, on produit un résidu (cendre) qui nécessite une élimination dans des lieux d'enfouissement dont les coûts sont élevés. Cette méthode ne peut être considérée comme rentable que si le gaz produit revient moins cher que le gaz naturel vendu par les distributeurs.

La gazéification est parfois utilisée pour le traitement de résidus papetiers. Elle pourrait néanmoins, dans un proche avenir, être considérée comme une source importante de combustible non renouvelable (Brouillette, 1996).

1.6.6 Utilisation pour la fabrication de panneaux à base de fibres de bois

Quelques études scientifiques ont analysé le potentiel des boues primaires, des boues mélangées et des boues de désencrage, en vue de leur utilisation pour la fabrication de panneau de fibres de bois. Plusieurs travaux ont évalué les boues papetières comme matière première pour les panneaux de fibres de moyenne densité (MDF). Ces études ont porté sur différents aspects notamment l'influence des propriétés physico-chimiques des boues (pouvoir adhésif, propriétés chimiques, teneur en cendres, etc.) sur le procédé de transformation et le développement des propriétés des panneaux.

Davis et al (2003) ont étudié le potentiel d'une boue de désencrage pour la production de panneaux MDF. L'objectif de cette étude était de relier les principaux composés chimiques de la boue aux propriétés des panneaux. Les facteurs à l'étude étaient les teneurs en fines, en argile et en carbonate de calcium (un additif commun en pâtes et papiers). Les résultats montrent que l'argile est le facteur qui a le plus d'influence sur les propriétés mécaniques des panneaux. Le module d'élasticité, le module de rupture et la cohésion interne diminuent avec la proportion d'argile.

Taramian et al (2006) ont étudié le potentiel d'une boue issue d'un procédé de mise en pâte (chimico-mécanique et mi-chimique au sulfite neutre) pour la production de panneaux. Cette étude a montré que le pourcentage des boues qui peuvent être utilisées dans les panneaux est de 15%. L'ajout de la boue dans les panneaux a permis d'augmenter la stabilité dimensionnelle et de réduire les propriétés mécaniques.

Geng et al (2007) ont étudié le potentiel des boues de l'industrie du papier, soit des boues primaires (BP), des boues secondaires (BS) et des boues de désencrage (BD) ; comme co-adhésif ou agent de remplissage.

Des panneaux contre-plaqués ont été fabriqués en mélangeant le phénol-formaldéhyde (PF) avec les boues. Cette étude montre que la BP et la BS sont des agents de remplissage plus efficaces que l'agent de remplissage commercial. Par ailleurs, les panneaux contre-plaqués collés avec la BS seulement ont une résistance au cisaillement à sec acceptable, mais la résistance humide après un séjour dans l'eau bouillante est nulle. Il est à noter que la BP seule n'a aucun effet adhésif sans résine PF. Ces résultats montrent les propriétés adhésives de la BS.

Zerhouni (2010) a étudié les propriétés des boues issues de trois procédés papetiers (TMP, CTMP et Kraft) dans la perspective de valorisation pour l'industrie des panneaux. Cette étude montre que les feuilles formées à partir des boues issues du procédé TMP ont les résistances de liaisons les plus élevées. Les boues issues du procédé TMP présentent un grand potentiel dans une future utilisation comme matières premières dans l'industrie des panneaux agglomérés.

Migneault (2011) a étudié la possibilité de produire des panneaux MDF avec une faible teneur en résine UF, à l'aide des propriétés adhésives de la BS. Cette étude montre que l'ajout des boues dans les panneaux MDF a permis une réduction jusqu'à 68% des émissions de HCHO par rapport aux panneaux témoins (sans boue).

1.6.7 Utilisation des résidus papetiers pour la fabrication de CBP

De nouvelles voies de valorisation pour la boue de désencrage dans les composites bois-polymère (CBP) sont très intéressantes. La production des (CBP) renforcés par des fibres naturelles a augmenté considérablement au cours de ces dernières années en

remplacement des fibres synthétiques, de verre et de carbone ou d'amide (Sanadi et al 1994).

Zauscher et Scott (1996) ont utilisé des papiers recyclés comme source de fibres et diverses colles comme les résines phénol-formaldéhyde (PF) et la mélamine urée-formaldéhyde (MUF). Ils sont parvenus à obtenir après quatre passes dans une extrudeuse bi-vis des résistances en traction de l'ordre de 20-25 MPa.

Son et al (2001) ont étudié l'effet de la température d'extrusion sur les propriétés des CBP fabriqués avec des boues mixtes. Ils ont observé que l'augmentation de la température dans l'extrudeuse améliore la stabilité dimensionnelle. Ils ont aussi noté que les CBP fabriqués avec des fibres longues ont des meilleures performances mécaniques. Ils ont conclu que l'approche riche en matière cellulosique des boues primaires explique ces résultats.

Ismail et Abu Bakar (2006) ont étudié l'effet des modifications de surface sur les propriétés des mélanges boues-polymère. Après une estérification des boues en présence d'acide acrylique et de n-heptane et l'acétylation en présence d'acide acétique, ils ont observé une amélioration de la ténacité, de la stabilité dimensionnelle, une faible amélioration de la rigidité et de la résistance maximale à la traction.

Krigstin (2008) a fabriqué des CBP a base des boues comme source des fibres et de renfort dans une matrice PP et PEHD. Les mélanges injectés contenaient 40 % de boues dans une matrice PP et le mélange extrude contenaient 65% des boues dans une matrice PEHD. Les propriétés mécaniques obtenues après injection sont excellentes soit un module d'élasticité en flexion de l'ordre de 2,1 GPa, une résistance en flexion entre 53 et 61 MPa, une résistance à la traction entre 28 et35 MPa et une énergie d'impact entre 150 et 180 J/m. Les composites obtenus par extrusion dans une matrice de PEHD montrent des résultats dans un même ordre de grandeur variant entre 49 et 60 MPa pour la résistance en flexion, mais le module d'élasticité en flexion a augmenté pour atteindre

des valeurs entre 2,8 à 4,7 GPa. Ils ont conclu qu'il serait possible de fabriquer des CBP contenant 50 % de fibres à un coût réduit de 3 %.

Zerhouni (2010) a étudié les caractéristiques des BP et BS issues de différents procédés papetiers (PTM, PCTM et Kraft) pour évaluer le potentiel de ces boues pour la production de panneaux à base de fibres de bois. Il a constaté que les BP ont une longueur de fibre plus élevée et que les BS montrent un bon pouvoir adhésif. Ces dernières ont des teneurs élevées en fines fibres et en lignine. Ces résultats expliquent l'importance de la longueur des fibres comme paramètre qui influence les propriétés des composites.

Migneault et al (2014) ont comparé le potentiel de différents résidus du bois pour la production des CBP. Ils ont conclu que les CBP fabriqués avec les boues de désencrage sont plus résistants à l'impact, ils sont plus tenaces et absorbent moins d'eau. Cela est dû à la présence des particules inorganiques dans les BD, ce qui procure aux CBP une bonne ténacité. La présence d'une grande quantité de glaise dans les BD donne une faible absorption d'eau aux composites.

Soucy et al (2016) ont étudié l'effet des boues papetières comme une source potentielle de fibres pour l'industrie des matériaux composites bois-polymère (CBP). Ils ont utilisé les boues papetières issues de trois procédés papetiers avec des caractéristiques différentes, soient des boues issues des procédés de mise en pâte thermomécanique (PTM), chimico-thermomécanique (PCTM) et kraft. Les procédés papetiers étudiés utilisent les copeaux résineux dominés par l'épinette noire. Trois proportions de boues (20, 30 et 40 %) et deux ratios de boues primaires et secondaires (BP:BS = 1:9 et 3:7) ont été suivis pour fabriquer des CBP dans une matrice de polyéthylène haute densité (PEHD). Les résultats montrent que les BP améliorent les propriétés des CBP, alors que les BS les affaiblissent. Les boues kraft semblent les mieux adaptées pour faire des CBP, mais les boues PTM et PCTM améliorent aussi la rigidité et la résistance du

Rapport-Gratuit.com
Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

PEHD. Les tests d 'immersion montrent que les BP et les BS sont toutes deux hydrophiles et que les résultats dépendent principalement de la proportion des boues.

Haddar et al (2016) ont étudié les effets de la teneur des BD et de l'agent de couplage (3%de MAPE) sur les propriétés mécaniques, thermiques et morphologiques. Ils ont observé que l'ajout des boues de désencrages augmente la rigidité du composites BD / HDPE et diminuent leur ductilité. En outre, l'addition des BD a amélioré la stabilité thermique et a augmenté la cristallinité des composites BD / HDPE. Aussi, ils ont noté une meilleure adhérence entre le BD et le HDPE avec l'ajout de MAPE, cela est confirmé par l'apparition de groupe ester dans le spectre FTIR pour le composite.

1.6.8 Autres voies de valorisation

Les boues papetières peuvent être utilisées pour la fabrication de plusieurs produits. L'injection des boues primaires directement dans le procédé de fabrication du carton permet d'améliorer la stabilité du produit (Miner et al 1991). Un ratio de 1:4 de boue primaire dans la pâte vierge est recommandé dans le procédé de la fabrication du papier (Jesùs. 2008). Par ailleurs, les boues primaires peuvent être utilisées dans la production d'éthanol, elles permettent d'obtenir un rendement considérable (Wiegand et Unwin. 1994). Les boues ont été utilisées dans la fabrication du ciment et dans l'élaboration du béton (Ahmadi et Al-khaja, 2001). Elles sont aussi utilisées comme produits de base dans la fabrication de nourriture pour animaux (Weigand et Unwin 1994). On peut mélanger directement les boues à la nourriture ou seulement récupérer leurs protéines, mais cette technique est mal perçue par la population.

1.7 **Les composites bois polymères**

La production de polymères thermoplastiques renforcés de fibres de bois, mieux connus sous le nom composite bois plastique (CBP), a augmenté au cours des dernières années. On les utilise dans plusieurs applications, les meubles (les portes, les fenêtres et les clôtures) et dans l'industrie automobile, où les fibres de verre sont peu à peu remplacées (Moo-Young et al, 1998). Selon une étude de Migneault et al, (2016), les ventes de planches patios en CBP ont augmenté de 22% au Canada entre 2005 et 2017. Cette section présentera plus spécifiquement les types de plastiques utilisés comme matrice composite, les additifs utilisés pour améliorer les propriétés des CBP et les techniques de Fabrication des CBP

1.7.1 Présentation de la matrice thermoplastique

Ce sont des matériaux plastiques utilisés dans diverses applications. Chaque plastique répond à des besoins spécifiques en termes de caractéristiques physiques, mécaniques ou même électriques. Pour l'élaboration de composites CBP, on utilise deux grandes classes de polymères : les thermodurcissables et les thermoplastiques, qui peuvent être moulés puis mis en forme, à une température déterminée (Fontanille et Vairon, 1994).

1.7.1.1 Les polymères thermodurcissables

Un polymère thermodurcissable est susceptible d'être transformé une seule fois. Il devient réfractaire et insoluble après polymérisation et ne peut ainsi, être fondu ou moulé, même sous l'action de la température et de la pression. La résine ne pourra pas revenir à son état initial. Un polymère thermodurcissable conserve la même rigidité avec l'évaluation jusqu'à l'atteinte de sa température de décomposition (Xing, 2003). Les polymères thermodurcissables sont largement utilisés pour le collage du bois ou

dans les composites à base de bois, en particulier ceux à base de fibres cellulosiques (Pizzi, 1983).

Ils sont constitués de polyuréthane, d'époxy, de l'urée formaldéhyde (UF), de la colle iso-cyanate (PMDI), des résines phénoliques (phénol formaldéhyde : PF) et des mélamines. Les résines servent à lier les fibres entre elles, dans les panneaux reconstitués, afin d'assurer la cohésion de l'ensemble (Riedl, 2007).

1.7.1.2 Les polymères thermoplastiques

Ils sont de loin les polymères les plus utilisés et ont la propriété de ramollir à la chaleur et de durcir au froid. Il est donc possible de leur donner une nouvelle forme, et ce, à répétition, sans affecter leurs propriétés mécaniques initiales (Seymor, 1988). Les caractéristiques des polymères thermoplastiques les plus utilisés sont montrées dans le (Tableau 1.9).

Tableau 1.9 : Caractéristiques des polymères thermoplastiques (Morin. 2000).

Polymère	Densité	$\sigma_{traction}$ (MPa)	MOE (MPa)	À (%)	R(IZ_{OD}) (KJ/m^2)	T_{fle} (°C)
PVC	1,5	50	2400	10-50	-	60
PS	1,05	40	2800-3500	4	-	90
HDPE	0,95	30-35	1000	700-1000	5	77
PET	1,39	2.5	3400	90	3	80
PMMA	1,19	65	3300	4	15	95
PP	0,91	20-40	1100-1600	200-1000	-	100

PVC : polychlorure de vinyle amorphe. / *PS* : polystyrène à l'état amorphe.
HDPE : polyéthylène à haute densité. / PET : polyéthylène téréphtalique semi cristallin.
PMMA : poly-méthacrylate de méthyle à l'état amorphe. / PP : polypropylène à l'état semi-cristallin.
σ : Résistance à la traction ; / MOE : Module d'élasticité en flexion ; À : Allongement à la rupture.
R(IZ_{OD}) : Résistance au choc ; Tfle : Température de fléchissement sous charge (1,8 N/mm^2).

1.7.1.3 Les adjuvants

Les agents de couplage sont généralement utilisés dans les mélanges bois-polymères pour assurer la bonne liaison et pour améliorer l'adhésion entre les éléments du produit final. Ils diminuent le frottement externe entre le polymère et la surface métallique de l'équipement de mise en forme ; ils améliorent les caractéristiques d'écoulement interne du polymère tout en augmentant les propriétés de mouillage des composants. Aussi, ils procurent une dispersion homogène des fibres de bois dans la matrice polymère (Wolcott et al 2001).

C'est souvent l'agent de couplage (traitement à l'anhydride maléique, etc.) qui est utilisé pour améliorer l'affinité et l'adhésion fibres-matrice.

De nos jours, le couplage grâce à l'anhydride maléique greffé au polymère est généralement utilisé dans les composites à base de fibres. En effet, ce copolymère modifie non seulement la surface des fibres, mais aussi celle de la matrice polymère pour avoir une meilleure liaison qui améliorerait les propriétés mécaniques de ces composites (Faruk et Sain, 2012).

La figure 1.10 présente une reproduction simplifiée du PE-g-MA (agent tensioactif aliphatique polaire, avec une tête hydrophile et une queue hydrophobe, contenant 1% d'anhydride succinique).

La recherche a montré que le taux d'agent du couplage (PEMA) doit être égal à 3 % de la concentration massique pour avoir les performances optimales (Paunikallio et al, 2003; Keener et al, 2004). Le polyéthylène modifié à l'anhydride maléique (MAPE) est fourni en granulé, Il joue le rôle à la fois de lubrifiant et d'agent de couplage. Il est ajouté pour avoir une bonne adhésion avec les fibres de bois, le HDPE et les boues de désencrage.

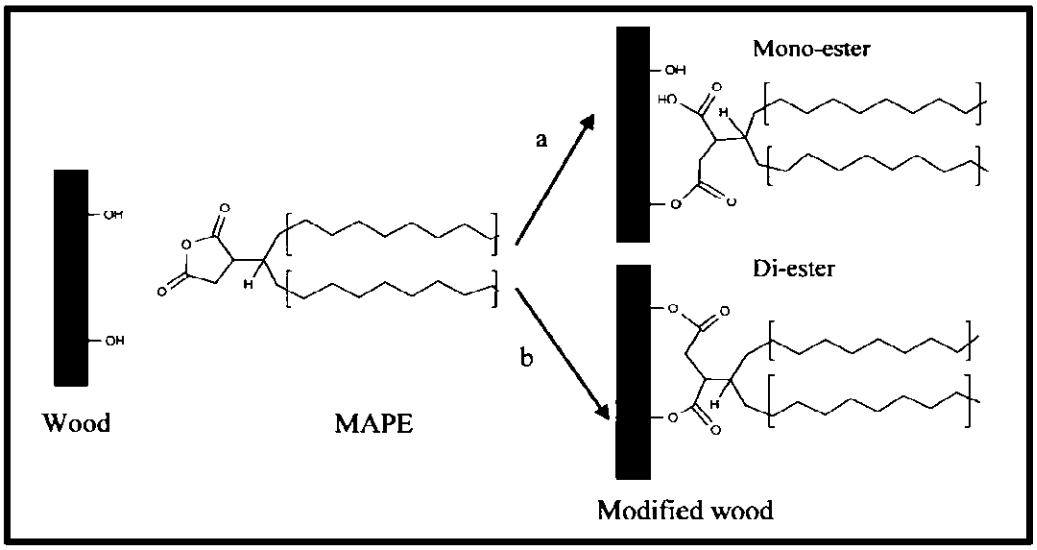


Figure 1.9 Agent de Couplage (PEMA) (Carlborn et Matuana 2006)

1.7.2 Techniques de fabrication des composites

1.7.2.1 L'extrusion

C'est le procédé de fabrication de bois-polymère le plus répandu (CRIQ, 2003). L'extrusion se définit par le mélange de fibre de bois avec un polymère thermoplastique fondu à l'aide d'un système de vis, dans le but de fabriquer un produit ayant l`apparence du bois naturel. La vitesse de rotation de la vis et le profil de température sont des éléments importants dans l`extrudeuse. Une extrudeuse comporte (figure1.9) :

- Entrée de matière dite trémie ;
- Un cylindre dans lequel tourne une vis qui assure le transport de la matière depuis l`entrée jusqu'à la filière ;
- Une tête d'extrudeuse qui sert de support à la filière.

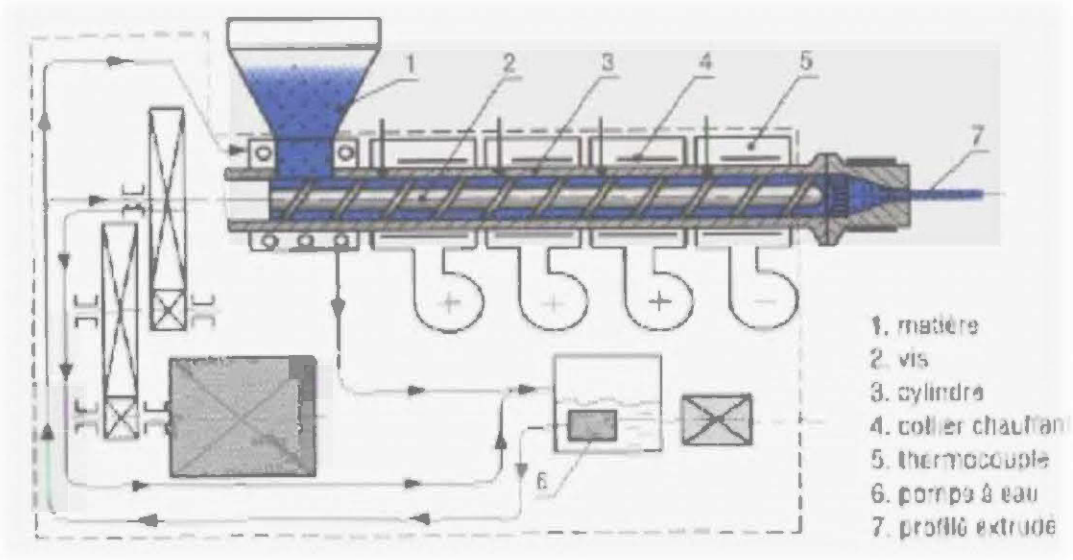


Figure 1.10 : Schéma typique d'une extrudeuse mono vis (Trotignon *et al,* 1996).

L'extrudeuse a trois fonctions principales qui correspondent à : zone d`alimentation, zone de compression et zone d`extrusion. Plusieurs types d'extrudeuses sont utilisées, soit l'équipement à simple et à double vis, mais l'extrudeuse à double vis permet, notamment, d'améliorer la qualité du mélange bois-polymère (Choulak, 2002).

1.7.2.1 Le moulage par injection

1.7.2.2 Le moulage par injection

Le moulage par injection est différent de l'extrudeuse à la fin du procédé. Le refroidissement dans l'extrudeuse se fait à l'air libre alors qu'en injection, le refroidissement a lieu à l'intérieur du moule (Zaddi, 2002, 2003). La matière sous forme de granulé est versée dans une zone d'alimentation. Elle est comprimée, malaxée

et chauffée sous la chaleur et le cisaillement, ce qui nous donne une pâte homogène qui est poussée par la vis vers l'avant.

La matière est injectée sous pression par la vis dans le moule fermé et refroidie au contact des parois du moule froid. Elle prend par la suite la forme du moule, qui va s'ouvrir pour faire sortir la pièce (Zaddi, 2002; 2003). Les CBP fabriqués par injection ont l'avantage d'avoir des performances supérieures aux CBP fabriqués par extrusion puisque les fibres de bois sont bien orientées dans la matrice (Stark et al, 2001; Beg, 2007; Migneault et al, 2009).

1.7.2.3 Thermo-consolidation

La thermo-consolidation, est utilisée essentiellement pour la fabrication des panneaux agglomérés à base de particules de bois(Falk et al, 1999). Dans ce procédé de fabrication, on utilise principalement les résines thermodurcissables. Cependant, (Falk et al, 1999) ont rapporté que les résines thermoplastiques sont également utilisées malgré les difficultés que l'on peut rencontrer. Bledzki et al (1998) ont conclu que les CBP fabriqués par thermo-consolidation Présentent de meilleures propriétés que celles des panneaux MDF. Aussi ils ont ajouté que, la nature du bois avec la quantité incorporée et du polymère utilisé, dans le mélange sont des paramètres très importants qui a influencés sur les propriétés du produit final.

1.7.2.4 La mise en granules

Il est utilisé dans le but de fabriquer des granules qui servent à alimenter la presse à injection et l'extrudeuse (Soucy, 2007). Le mélange des fibres de renfort, des additifs, des plastiques vierges et des lubrifiants se fait à une très grande vitesse pour produire

un mélange homogène. Il existe aussi d'autres techniques telles que (Bérard et al, 1996) :

- Le moulage par compression ;
- L'imprégnation ;
- Le roto moulage.

1.9 Effets de la morphologie des fibres/particules dans les CBP

La morphologie des fibres est influencée par plusieurs paramètres tels que la composition chimique, l'état de la surface et le procédé de traitement. En effet, lorsque la pâte subit une action mécanique, les liaisons inter fibres sont modifiées (Zerhouni, 2010). Les fibres de bois sont caractérisées par un rapport L/D (longueur /diamètre).

Ashori et Nourbakhsh (2010) ont étudié l'effet de la nature du bois et la taille des particules sur les propriétés mécaniques des CBP. Ils ont utilisé comme polymères le polypropylène et l'anhydride maléique comme agent de couplage. Les résultats ont montré que les caractéristiques mécaniques des CBP augmentent, à l'ajout de fibres et que les composites fabriqués avec les fibres longues ont de meilleures propriétés mécaniques.

Cette étude vient appuyer celle réalisée par Bouafif et al (2009) qui, de leurs côtés, ont conclu que l'incorporation des fibres de bois ayant un rapport L/D élevées augmente la rigidité et l'énergie de rupture. Elle vient aussi appuyer l'étude réalisée par (Migneault, 2007) qui a étudié le rôle de la longueur des fibres dans le procédé de formation. Les propriétés mécaniques augmentent avec la taille des fibres, mais la performance diminue en immersion dans l'eau. Il a aussi conclu que la longueur des fibres n'influence pas l'homogénéité et la densité des composites.

1.10 Autres facteurs influençant les propriétés des CBP

L'adhésion des fibres cellulosiques est influencée par plusieurs autres paramètres tels que la nature, l'essence, la composition chimique, l'état de la surface, la proportion des fines, la flexibilité et les traitements apportés aux particules de bois. Généralement, l'extrusion provoque une dégradation et des cassures aux fibres (Gamstedt et al, 2006).

Migneault et al (2009) ont mis en forme des composites à base de fibres de bois comme renfort et polymère HDPE, ils ont utilisé le procédé d'injection et le procédé d'extrusion. Les composites fabriqués à partir du procédé d'injection présentent de meilleures propriétés mécaniques que les composites produits par extrusion. Ce phénomène s'explique par l'orientation des fibres dans le sens longitudinal lors de moulage par injection.

De son côté, Bouafif (2009) a réalisé une étude comparative où il a utilisé le procédé d'injection, le procédé de compression et le procédé d'extrusion. Les résultats ont montré que, les composites fabriqués à partir du procédé de compression représentent les meilleures caractéristiques mécaniques, les fibres ont tendance à garder leurs natures. Il indique aussi que lors de la mise en œuvre par le procédé d'injection et par le procédé d'extrusion la vis à tendance à détruire les fibres.

Migneault et al (2014) ont comparé le potentiel de différents résidus du bois pour la production des composites de bois polymères. Les résultats ont montré que la rigidité, la résistance mécanique des CBP augmentent avec la proportion des fibres, mais la ductilité et la ténacité diminuent.

Ces résultats concordent avec les travaux de recherche de plusieurs études antérieures (Li et al, 2004, Wolcott et Schirp, 2005, Slama 2009 et Migneault et al, 2008) qui ont affirmé que l'ajout des fibres dans le composite tend à accroître les propriétés

mécaniques des composites et la stabilisation. Cela est dû à l'augmentation des contacts entre la matrice et le renfort.

Soucy (2007) et Godard et al (2008) ont obtenues des CBP qu'au-delà de 60% en fibres, les caractéristiques mécaniques diminuent. Koubaa et al, (2004) ont pareillement ajouté que l'augmentation du pourcentage de renforts lignocellulosique améliore les performances mécaniques des composites. Cependant une très grande quantité des fibres nous donne une adhésion plus difficile qui va conduire à une baisse de performance. Cela est dû au grand volume occupé par les fibres dans la chambre de rhéomètre.

Stark et al (2003) ont étudié l'effet du taux d'humidité sur les propriétés mécaniques des composites fabriqués à partir de PP et des fibres de bois. Ils ont conclu que l'augmentation du taux de fibres favorise l'absorption en humidité et les caractéristiques mécaniques diminuent. De leur côté, Espert et al (2004) ont aussi montré qu'il y a une diminution des propriétés mécaniques (le module de Young et le module de rupture) des composites humides.

Tserki et al (2005) ont observé une diminution de la teneur en eau après estérification par l'anhydride acétique. Ils ont observé que pour une humidité relative à 60%, la teneur en eau dans le bois a diminué de 6,6% à 5,8% et pour une humidité relative à 90%, la teneur en eau dans le bois a diminué de 12,8% à 9,9%.

Soucy (2007) a fabriqué des CBP avec 60% en fibres de bois issues de différents procédés de mise en pâte tels que CTMP, TMP et Kraft. Les résultats montrent que les CBP fabriqués avec la fibre kraft donnent de meilleurs résultats en propriétés mécaniques et en stabilité dimensionnelle, les fibres CTMP et Kraft ont tendance à s'agglomérer. Les propriétés physicomécaniques du CBP ne dépendent pas seulement de l'orientation, du taux et de la nature du renfort, mais elles dépendent aussi de la nature et de la quantité d'agent de couplage utilisé (Bledzki et Gassan, 1999).

La nature hydrophile du bois et la nature hydrophobe du plastique rendent l'adhésion difficile. Alors, l'agent de couplage sert principalement à lier chimiquement le groupe OH du bois au plastique (George et al, 2001). La recherche a montré que le taux d'agent de couplage (PEMA) doit être égal à 3 % de la concentration massique pour avoir les performances optimales. Au-delà de cette concentration, une diminution des propriétés mécaniques a été observée (Paunikallio et al, 2003 ; Keener et al, 2004).

Bouafif et al (2009) et Saputra et al (2004) ont également ajouté que l'agent de couplage n'est efficace que lors de l'utilisation avec du bois qui a une faible teneur en extractibles et en lignine.

Adhicary et al (2008) ont aussi étudié l'effet de l'agent de couplage le polyéthylène modifié à l'anhydride maléique (MAPE) sur les composites du bois de pin radiata (*Pinus radiata*) /HDPE. La présence de MAPP a amélioré les propriétés mécaniques en traction et en flexion. L'observation microscopique à balayage MEB (figure 27) a montré l'absence de porosité entre la farine de bois et HDPE, ce qui indique une bonne adhésion.

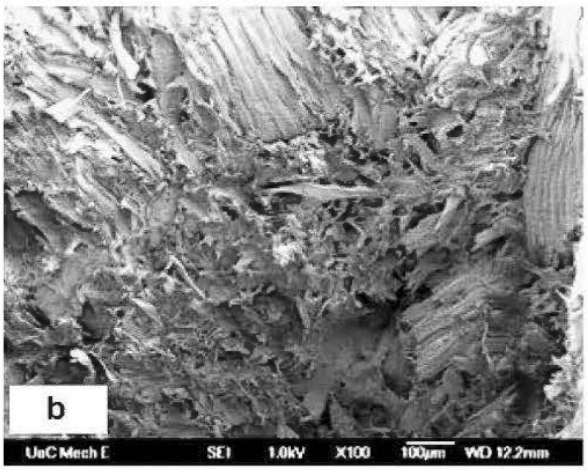


Figure 1.11 : Image en microscopie électronique à balayage de surfaces de fractures de composites de farine de bois (*Pinus radiata*)/PEHD (Adhikary et al, 2008).

Migneault et al, 2015, ont étudié l'effet de la chimie de surface des fibres de bois sur la résistance des matériaux CBP. Les différentes fibres ont été sélectionnés et en utilisant la spectroscopie photo électronique à rayons X (XPS) et la spectroscopie infrarouge (FTIR). WPC échantillons ont été fabriqués à une teneur de 40% de fibres et avec six fibres différentes. Le polyéthylène haute densité a été utilisé comme matrice. Il a été trouvé que la force CBP diminue la quantité de carbone non oxydé (attribué à la lignine et de produits d'extraction) mesurée avec XPS sur l'augmentation de surface de la fibre. Dans le cas contraire, la force CBP augmente avec le niveau croissant de carbone oxydé (attribué à des hydrates de carbone) sur la surface de la fibre. Les mêmes conclusions ont été trouvés avec FTIR où la force WPC diminue avec l'augmentation de l'intensité des pics de lignine.

CHAPITRE 2

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Migneault et al (2014) ont introduit les BD dans les CBP. Ils ont constaté que leur introduction donne des composites avec une certaine ductilité et une meilleure stabilité dimensionnelle. Par contre, l'ajout des BD dans les CBP diminue les propriétés mécaniques. Ils proposent d'utiliser ces boues comme agent de remplissage dans les produits dérivés du bois. Ainsi, le but du projet est d'introduire les BD et les fibres Kraft dans la production des CBP puisqu'elles contiennent des fibres de bois et d'autres composés désirables.

2.1 Objectifs

L'objectif général de l'étude est d'évaluer le potentiel des boues de désencrage pour la production des composites bois-polymère.

Les objectifs spécifiques du projet sont les suivants :

- Étudier l'effet du procédé de mise en forme sur les propriétés physico-mécaniques des CBP issus de fibres kraft et de boues de désencrage ;
- Étudier et comparer l'effets des proportions des fibres kraft et des boues de désencrage sur les propriétés physico-mécaniques des CBP ;
- Étudier les effets combinés des fibres kraft et de boues de désencrage sur le développement des propriétés physico-mécaniques des CBP.

2.2 Hypothèses de la recherche

Cette étude se base sur les hypothèses suivantes :

- Il est possible d'utiliser les boues de désencrage pour produire des composites bois-boues-polymères avec les mêmes paramètres de procédé de production de CBP ;
- L'introduction des BD dans les CBP n'influe pas négativement les propriétés mécaniques des composites tout en permettant de maintenir une certaine ductilité aux composites ;
- L'utilisation des boues de désencrage dans la production des composites se traduira par une meilleure stabilité dimensionnelle comparativement aux CBP issus de fibres de bois ;
- Les CBP fabriqués avec des fibres longues ont de meilleures propriétés physico-mécaniques que les ceux fabriqués avec des fibres courtes.

2.3 Matériel

Cette partie a pour but de définir la démarche expérimentale et les caractéristiques des matériaux utilisés dans notre recherche. La partie expérimentale du projet a été réalisée dans deux laboratoires : Le laboratoire de biomatériaux de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue et le centre de recherche sur les matériaux lignocellulosiques de l'Université du Québec à Trois-Rivières. Les équipements du centre de recherche sur les matériaux lignocellulosiques sont des équipements pilotes plus adaptés pour l'optimisation des paramètres de mise en forme des composites, fibres kraft - boues-polymères (CBP), en vue d'une application industrielle.

2.3.1 Préparation des fibres

Dans cette étude, la BD utilisée provient du Groupe tissu de Cascades - KingseyFalls, une division de Cascades Canada. La BD utilisée est pure et non mélangée avec d'autres boues. Elle est constituée d'un mélange déshydraté de fibres courtes, d'encres et de glaises ; retiré lors du procédé de désencrage. Sa densité apparente a été mesurée à l'aide d'un pycnomètre et estimée à 40kg/m^3. Les fibres des pâtes Kraft utilisée sont reçues sous forme de feuilles de carton. Les fibres ont été ramenées en farine de bois, en utilisant un broyeur à couteaux rotatifs de Thomas-Willey modèle 4 (Figure 2.1) et un désintégrateur, puis un séparateur des fibres, montrés à la (Figure 2.2).

Figure 2.1 : Préparations de la farine de bois pour la fabrication des composites au laboratoire

RapportGratuit.com

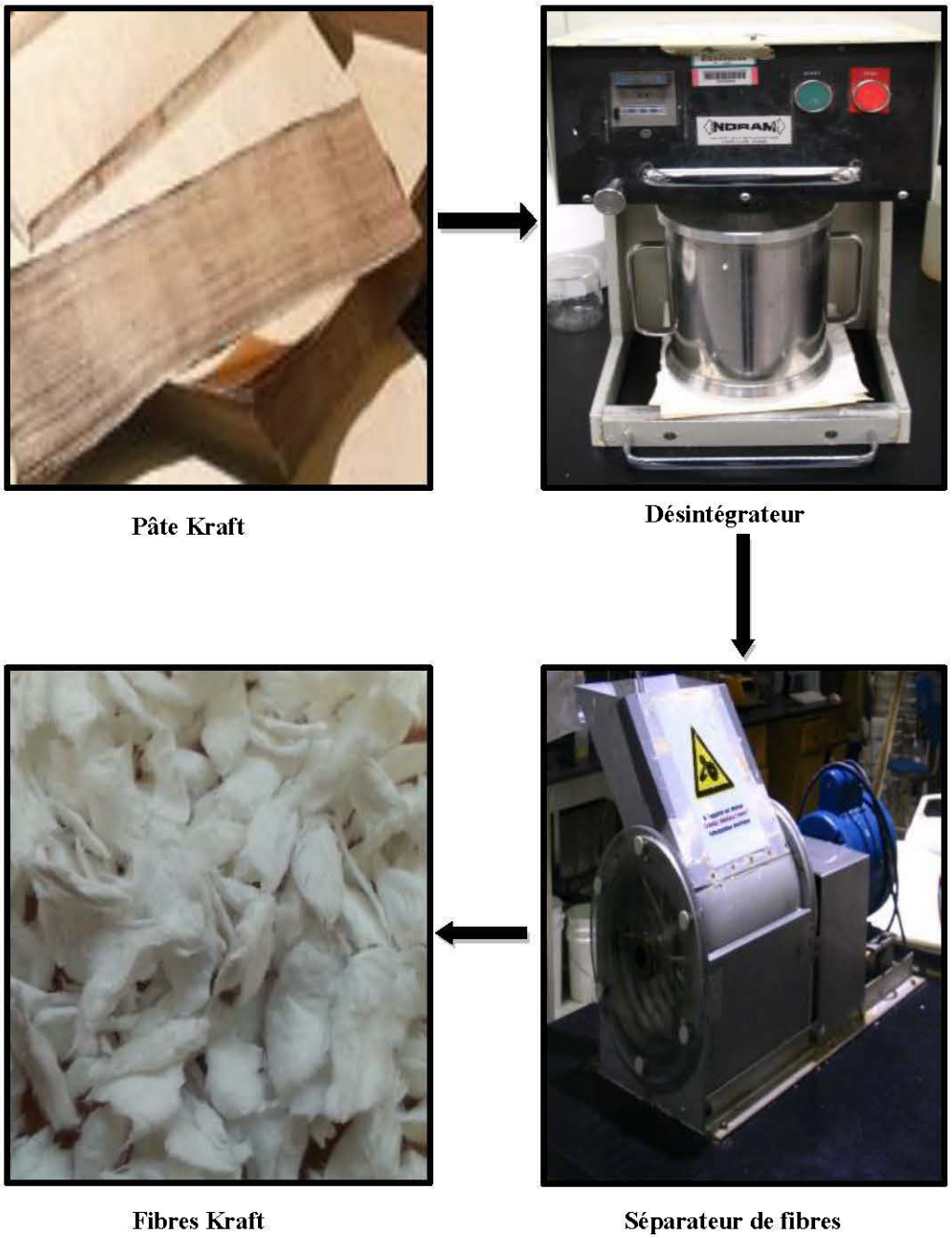


Figure 2.2 : Préparations de la farine de bois pour la fabrication des composites à l'échelle, laboratoire pilote.

2.3.2 Caractérisation des propriétés des fibres

Pour déterminer les caractéristiques des fibres avant la conception de composites, nous avons utilisé un analyseur de la Qualité de la Fibre (AQF) optique de marque OPTEST LDA02. Il mesure avec précision la longueur des fibres, la largeur des fibres, les angles, des faux plis ainsi que la masse linéique. Nos mesures sont importantes pour notre étude qui sera aussi importante pour l'industrie.

Les caractéristiques morphologiques moyennes des différentes fibres sont données dans le tableau 2.1. La longueur des fibres kraft qui ont été ramenées en farine de bois en utilisant un broyeur à couteaux rotatifs, figure 2.1, est moins importante que la longueur des fibres kraft qui ont été traitées en utilisant le désintégrateur puis le séparateur de fibres, montrés à la figure 2.2.

Tableau 2.1: Propriétés morphologiques des différentes fibres

Type	**Longueur moyenne de la fibre (mm)**	**Diamètre moyen de la fibre (µm)**	**Facteur de la forme (L/D)**
Fibres kraft à l'échelle, laboratoire pilote	1,75 (0,43)	22,08 (1.22)	79,25
Fibres kraft au laboratoire	0,87 (0,18)	23,48 (2,27)	36,85
Les fibres de boues	0,78 (0,14)	22,70 (0.83)	34.36

2.3.3 Caractéristiques du polymère

Le PEHD fut utilisé dans cette étude (Nova Chemicals (R) 2907). Il est présenté sous forme de granulé, sa masse volumique est de 0,96g/cm^3, son indice de fluidité est de 4,9g/10min, son module de flexion est de 1280MPA et sa température (thermoformage) est de 170-215 °C.

2.3.4 Agent de couplage

Le polyéthylène modifié à l'anhydride maléique (MAPE) est fourni en granulé sous le nom commercial MAPE 575 de la compagnie A-C^R. Il joue le rôle à la fois de lubrifiant et d'agent de couplage. Il est ajouté pour avoir une bonne adhésion avec les fibres de bois, le HDPE et les boues de désencrage. Le tableau 2.1 représente les caractéristiques du PE-gMA que nous avons utilisé.

Tableau 2.2 : Les caractéristiques du PE-gMA fournies par le fabricant.

Caractéristiques	Valeurs	Unité
Indice de fluidité à chaud (190°C /325 g)	10	g/10 min
Point de fusion	167	°C
Point de ramollissement Vicat (1kg)	147	°C
Module d'élasticité en flexion	880	MPa
Contrainte au seuil	22	MPa

2.4 Méthodes

2.4.1 Techniques de mise en forme des composites

La mise en granules a été réalisée selon un dispositif expérimental en deux blocs où les blocs sont les échelles du procédé de mise en forme soit au laboratoire (Laboratoire de biomatériaux de l'UQAT) et à l'échelle pilote (Laboratoire du CRML de l'UQTR).

Le tableau 2.3 dresse le plan expérimental complet qui a été mis en place afin de décrire le mode de fabrication des produits composites et le moulage par injection.

Les fibres kraft et les boues de désencrage ont été séchées dans une étuve à 70°C pendant 12 heures. Les fibres sont introduites dans des sacs et bien fermés pour assurer que leur contenu en humidité ne change pas avec les conditions environnantes. Le mélange fibre kraft, boue de désencrage et polymère a été réalisé à l'aide d'une extrudeuse à double vis contre-rotative.

2.4.1.1 Mise en granules des composites au laboratoire

La mise en forme des composites a été réalisée à l'aide d'une extrudeuse bi-vis co-rotative Thermo-Scientific représentée sur la figure 2.3. Le mélange fibres kraft, boues et polymère a été extrudé. Cette étape s'effectue à l'aide d'un fourreau interne en réglant la température. Nous avons choisi la température de manière à limiter la dégradation thermique tout en assurant une bonne fluidité. La vitesse de la vis était de 50 tours par minute. La matière extrudée a été refroidie dans un bassin d'eau à température ambiante. Nous avons procédé par la suite à la granulation de l'extrudé à une vitesse de rotation de 180 tours/min.

Tableau 2.3 : La combinaison des niveaux de facteurs utilisée dans chaque laboratoire.

Formations des composites au laboratoire pilote de l'UQTR				Formations des composites au laboratoire de l'UQAT			
Taux de BD (%)	**Taux de fibres Kraft (%)**	**Taux de HDPE (%)**	**Taux d'agent de couplage (%)**	**Taux de BD (%)**	**Taux de fibres Kraft (%)**	**Taux de HDPE (%)**	**Taux d'agent de couplage (%)**
0,0	50,0	47	3	/	/	/	/
0,0	40,0	57	3	0,0	40,0	57	3
0,0	20,0	77	3	0,0	20,0	77	3
5,0	15,0	77	3	5,0	15,0	77	3
10,0	40,0	47	3	/	/	/	/
10,0	30,0	57	3	10,0	30	57	3
10,0	20,0	67	3	10,0	20,0	67	3
10,0	10,0	77	3	10,0	10,0	77	3
15,0	15,0	67	3	15,0	15,0	67	3
15,0	5,0	77	3	15,0	5,0	77	3
20,0	30,0	47	3	/	/	/	/
20,0	20,0	57	3	20,0	20,0	57	3
20,0	10,0	67	3	20,0	10,0	67	3
20,0	0,0	77	3	20,0	0,0	77	3
25,0	25,0	47	3	/	/	/	/
30,0	20,0	47	3	/	/	/	/
30,0	10,0	57	3	30,0	10,0	57	3
30,0	0,0	67	3	30,0	0,0	67	3
40,0	10,0	47	3	/	/	/	/
40,0	0,0	57	3	40,0	0,0	57	3
50,0	0,0	47	3	/	/	/	/

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Figure 2.3 : Extrudeuse bi-vis Co-rotative, Thermo-Scientific utilisée pour les essais à l'échelle laboratoire.

2.4.1.2 Mise en forme des composites à l'échelle pilote

La deuxième extrudeuse utilisée est une extrudeuse pilote E-max 27mm de Entek Technologie (Portland, États-Unis), représentée sur la figure 2.4, avec un diamètre de vis de 27 mm et une longueur de 1,3m. Les mélanges des CBP ont été effectués avec un malaxeur interne en réglant la température à un intervalle de 150°C à 180°C et en maintenant la vitesse de rotation de la vis entre 50 et 80 tours/minute. Les avantages de l'extrudeuse E-max 27mm sont :

- Le diamètre de la vis est plus élevé ; d'où un meilleur rendement thermique et mécanique ;
- Possibilité d'utiliser les fibres longues (1,725 mm) ;
- Huit (08) proportions de fibres (5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40%,50%) ont été utilisées au lieu de six (06) avec l'extrudeuse Thermo-Scientific.

Figure 2.4 : Extrudeuse à double-vis, Entek Technologies, utilisées pour les essais à l'échelle, laboratoire pilote.

2.4.2 Moulage par injection

Une presse d'injection de marque Aarburg 370A (600 kN) avec un diamètre de vis de 2" et un profil de température(Buse) 190/190/190/190/171 °C a été utilisée pour la préparation des éprouvettes, tableau 2.3. Les échantillons injectés correspondent à des éprouvettes d'essai pour les tests mécaniques et physiques selon les normes ASTM correspondantes (tableau 2.4). Ces tests ont permis de mesurer les propriétés suivantes :

- La teneur en humidité, l'absorption de l'eau et le gonflement du CBP ;
- Le module d'élasticité (MOE) et le module à la rupture, en flexion (MOR) ;
- Le Module de Young E et la contrainte de rupture en traction ;
- L'énergie d'impact.

Tableau 2.4 : Paramètres de la presse à injection.

Paramètre	**Valeur / Étendue**
Température du moule fixe/mobile (°C)	25
Pression d'injection (bar)	1600 à 1700
Pression de maintien (bar)	750 à 800
Pression de succion (bar)	65
Temps d'injection (s)	0,84 à 1,13
Temps de maintien (s)	10.1
Temps de refroidissement (s)	20
Temps de cycle total (s)	34,91 à 38, 95
Volume de dosage (cm^3)	44
Volume de décompression (cm^3)	5
Vitesse de rotation de la vis (RPM)	125
Coussin :(cm^3)	0,8

Tableau 2.5 : Dimensions des éprouvettes d'essai pour les tests mécaniques et physiques selon les normes ASTM correspondantes.

Les essais	**Normes**	**Les dimensions des éprouvettes**			
		Épaisseur (mm)	**Longueur (mm)**	**Largeur (mm)**	**Diamètre (mm)**
Gonflement en épaisseur (GE)	ASTM D 570	4,10±0,16	-	-	50±0,05
Flexion en trois points	ASTM D 790	2,98±0,06	125,95±0,07	12,34±0,05	
Traction simple	ASTM D 638	2,96±0,07	185±0,03	12,35±0,03	
Ténacité	ASTM D 256	2,93±0,08	82,71±0,6	12,32±0,07	

2.4.2 Caractérisation des CBP

2.4.3.1 Propriétés physiques

Cette méthode d'essai couvre la détermination de la vitesse de l'absorption de l'eau par les matières plastiques lorsqu'elles sont immergées dans l'eau selon la norme ASTM D570 (Standard Test Method for Water Absorption of Plastics). Les dimensions des échantillons d'essai pour les CBP moulés sous forme de disque avant immersion dans l'eau sont portées dans le tableau 2.3.

Le diamètre, l'épaisseur et la masse des CBP ont été mesuré suite à différents temps d'immersion dans l'eau, de deux heures à cinq mois. À partir de ces données, les propriétés suivantes ont été calculé :

- La teneur en humidité : C'est la quantité d'eau contenue dans un échantillon CBP. Elle est calculée selon la formule suivante :

$$H(\%) = \left(\frac{m_{eau}}{m_0}\right) X100 = \frac{m_h - m_0}{m_0} X100 \qquad (2.1)$$

Avec ;

- H(%) : Teneur en humidité ;
- m_{eau} : Masse de l'eau ;
- m_0 : Masse du Composite à l'état anhydre ;
- m_h : Masse du Composite à l'état humide.

- Le gonflement en épaisseur et le gonflement volumique : L'absorption de l'eau est généralement suivie par une prise de masse des matériaux et un gain de volume. Cette caractéristique est traduite par le gonflement dont nous pouvons mesurer le pourcentage grâce à la formule suivante :

$$Gonflement\ (\%) = \frac{D_h - D_0}{D_0} X100 \qquad (2.2)$$

- L'absorption d'eau :

$$\grave{A}(\%) = \left(\frac{m_{eau}}{m_i}\right) X100 = \frac{m_h - m_i}{m_i} X100 \qquad (2.3)$$

Avec ;

- À(%) : Taux d'absorption ;
- m_{eau} : Masse de l'eau ;
- m_i : Masse du composite à l'état initial ;
- m_h : Masse du composite dû à la teneur en humidité.

- La densité : Elle est définie comme étant le rapport de la masse volumique d'un corps sur la masse volumique de l'eau (Slama, 2009).

La densité anhydre (ρ_0) :

$$\rho_0 = \left(\frac{\frac{m_0}{v_0}}{\rho_e}\right) \qquad (2.4)$$

La densité humide (ρ_h) :

$$\rho_h = \left(\frac{\frac{m_0}{v_h}}{\rho_e}\right) \qquad (2.5)$$

Avec ;

- *m0*= masse du composite à l'état anhydre ;

- ρe = masse volumique de l'eau (1 g/cm³) à 4°C ;
- V_0 = volume du composite à l'état anhydre ;
- V_h = volume du composite à l'état humide.

2.4.3.2 Propriétés mécaniques

L'essai de choc Izod permet de mesurer la résistance à l'impact d'un matériel donné selon la norme ASTM D 256. Nous avons utilisé, comme dispositif pour rompre l'éprouvette, un pendule de capacité maximale (5J) en utilisant des éprouvettes dont les dimensions sont présentées au tableau 2.4. Ainsi, nous avons mesuré l'énergie de choc absorbée par la rupture d'une éprouvette (exprimée en kJ/m²). La figure 2.5 nous montre le dispositif utilisé pour l'essai de résistance à l'impact.

Figure 2.5 : Dispositif d'essai de choc IZOD utilisé pour la mesure de la résistance à l'impact

L'essai de flexion permet de déterminer la rigidité et la résistance en flexion des matériaux. Nous avons effectué les tests avec une machine d'essai universel statique de Zwick Roell Modèle Z020 selon la norme ASTM D790. Les dimensions des éprouvettes testées sont présentées au tableau 2.4. Le test a été réalisé à une vitesse constante de 5 mm/min. Ce test mesure plusieurs propriétés dont les principales sont le module d'élasticité (MOE) et le module de rupture en flexion (MOR). Les équations 2.7 et 2.8 donnent les expressions du MOE et MOR en flexion, respectivement.

- Le module d'élasticité

$$MOE = \frac{Pp \,.\, L^3}{4 \,.\, b \,.\, h^3} \qquad (2.7)$$

- La contrainte à la rupture en flexion

$$MOR = \frac{3 \,.\, Pu \,.\, L}{2 \,.\, b \,.\, h^2} \qquad (2.8)$$

Avec ;

L : Longueur entre les appuis (mm) ;

b : Largeur (mm) ;
Pp : Force mesurée à la limite proportionnelle (N) ;
h : Epaisseur (mm) ;
Pu : Force maximale mesurée (N).

L'essai de traction permet de déterminer plusieurs propriétés mécaniques en traction des matériaux, dont les suivantes :

- ✓ **Résistance à la rupture Rm (MPa)** : exprimée par le module de rupture, cette valeur est utilisée pour estimer la limite d'endurance à la charge.

- ✓ **Allongement à la rupture ε (%)** : Il mesure la capacité des matériaux à s'allonger sous charge avant sa rupture. Cette mesure est indicative de la ductilité des matériaux, propriété importante pour plusieurs applications.
- ✓ **Module d'Young ou module d`élasticité (MOE) :** est la constante qui relie la contrainte de traction et la déformation dans la zone élastique de déformation.

Nous avons effectué les tests avec la machine universelle Zwick Roell Z020 ont utilisant des éprouvettes de dimensions indiquées dans le tableau 2.3. Ces essais ont été effectués sur des éprouvettes obtenues par moulage. Les éprouvettes pour, les essais de traction sont de type haltères selon la norme (ASTM D638) et de type poutre pour les essais de flexion 3 points comme indiqué dans la norme (ASTM D790). Les tests ont été réalisés à une vitesse constante de 5mm/min.

2.4.4 Analyse statistique des résultats

Pour vérifier l'effet des paramètres de l'étude, nous avons entrepris une analyse de variance où les variables dépendantes sont les propriétés mécaniques et les propriétés physiques des composites. Les variables indépendantes sont les facteurs à l'étude et les interactions entre les facteurs. Les facteurs sont le bloc, la proportion de la boue de désencrage et la proportion des fibres de bois.

Les blocs correspondent aux procédés de fabrication des composites soient : 1) le procédé pilote (Laboratoire de Trois-Rivières) et le procédé de laboratoire (Laboratoire de biomatériaux de l'UQAT). Le seuil de signification de 0,05 (α=0,05) a été utilisé pour déclarer l'effet d'un facteur ou une interaction significative.

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Résultats détaillés des propriétés physiques et mécaniques

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de produire des composites à des proportions des fibres qui ont été variées de 5% à 50%. La variation des propriétés physiques et mécaniques est dues au procédé de mise en forme. L'ajout de BD dans le polymère permet de produire des composites avec une grande résistance à l'eau, une ténacité et une ductilité élevées en comparaison aux CBP traditionnels. La fibre Kraft produit des CBP plus rigides et plus résistants en comparaison aux CBP formés avec la BD. Les résultats détaillés de l'étude sont présentés à l'Annexe I (Tableaux I.1, I.2, I.3 et I.4). Les résultats des gains en volume et de gain en poids sont présentés au tableau I.1et I.2, respectivement. Les résultats des propriétés mécaniques sont présentés aux tableaux I.3 et I.4.

3.2 Analyse et discussion des résultats

Les tableaux 3.1 et 3.2 illustrent les résultats des analyses de variance des effets des facteurs à l'étude pour les propriétés physiques et mécaniques, respectivement. Les résultats indiquent des effets hautement significatifs des facteurs à l'étude et de leur interaction. L'effet du bloc s'explique par la déférence de procédé de granulation et des paramètres utilisés aux deux extrudeuses aux laboratoire et au laboratoires pilote. De plus, les fibres des pâtes kraft utilisées dans les deux procédés ont des longueurs initiales différentes. La longueur initiale des fibres utilisées pour la mise en granules au laboratoire de l'UQAT est de 0,67 mm comparativement à 1,73 mm pour les fibres utilisées au laboratoire de l'UQTR.

Tableau 3.1 : Résultats des analyses de variance (ANOVA) pour les propriétés mécaniques.

Source	Traction simple			Flexion 3 points			Énergie d'impact
	MOE	Rm	ε	MOE	σ max	ε max	
Modèle corrigé	150,7**	174,7**	117,8**	184,7**	417,0**	1862,0**	23,9**
Constante	49286,2**	79810,0**	13873,2**	57751,5**	111012,5**	18408,8**	7891,7**
Bloc	844,6**	732,2**	32,6**	11,3**	2327,9**	5564,7**	32,7**
Boue	134,8**	81,5**	289,9**	187,3**	235,0**	999,9**	91,2**
Kraft	250,1**	185,3**	304,7**	519,7**	564,9**	1000,8**	31,1**
Bloc * Boue	19,4**	22,484	4,7**	20,2**	18,2**	866,840	2,7*
Bloc * Kraft	7,7**	12,1**	11,4**	6,3**	34,5**	756,928	2,1n.s.
Boue * Kraft	13,6**	9,1**	47,5**	31,2**	20,6**	3, 623,978	2,7*
Bloc * Boue * Kraft	1,6n.s.	3,7*	1,0n.s.	18,2**	51,8**	7, 715,892	3,0*

*** : significatif à 0.05 ; ** : significatif à 0.01 ; ns : non significatif**

ort-Gratuit.com

Tableau 3.2 : Résultats des analyses de variance (ANOVA) pour les propriétés physiques.

Source	Absorption						Gonflement					
	168 h	**504 h**	**840 h**	**1176 h**	**1512 h**	**2040 h**	**168 h**	**504 h**	**840 h**	**1176 h**	**1512 h**	**2040 h**
Modèle corrigé	18,7**	45,3**	104,8**	79,6**	93,6**	88,2**	8,7**	379,4**	59,8**	61,0**	107,0**	106,5**
Constante	1116,2**	2520,6**	5994,9**	5051,2**	6532,0**	6646,5**	450,3**	6323,9**	9322,9**	16084**	27460**	37546**
Bloc	8,9**	11,6**	21,0**	27,2**	49,7**	31,1**	0,0n.s.	761,2**	584,2**	479,0**	1146,8**	545,3**
Boue	60,5**	160,2**	374,3**	284,6**	330,7**	305,7**	16,5**	438,4**	34,9**	60,2**	42,4**	123,3**
Kraft	12,7**	32,9**	81,8**	72,8**	80,9**	85,7**	8,5**	45,4**	22,5**	16,4**	71,5**	41,1**
Bloc * Boue	4,4**	12,8**	25,4**	22,7**	34,7**	28,8**	0,9n.s.	898,6**	46,1**	9,8**	24,8**	12,9**
Bloc * Kraft	1,2n.s.	0,94n.s.	2,5*	1,0n.s.	1,2n.s.	1,0n.s.	1,9n.s.	102,7**	39,3**	23,4**	9,9**	13,4**
Boue * Kraft	11,1**	26,5**	57,0*	42,3**	49,7**	41,5**	19,4**	98,0**	25,7**	13,7**	10,2**	68,5**
Bloc * Boue * Kraft	n.s.	2,4n.s.	7,8**	6,5**	5,9**	8,8	0,1n.s.	221,6**	28,6**	52,9**	34,0**	60,6**

* : significatif à 0.05 ; ** : significatif à 0.01 ; ns : non significatif

3.2.1 Effet du procédé de mise en forme et de la proportion des fibres

L'équipement du laboratoire de l'UQAT (Laboratoire de biomatériaux, La Sarre), a permis d'extruder jusqu'à 40% de fibres kraft. Par contre, il n'a pas été possible d'extruder des granules avec 50% de fibres kraft. Par contre, l'équipement du laboratoire pilote de Trois-Rivières a permis d'extruder un taux de 50% de charges, soit une combinaison de fibres Kraft et de BD. Cette situation s'explique par la plus grande puissance de l'extrudeuse pilote de l'UQTR, la longueur de sa filière et des paramètres d'opérations plus avancés sur cette extrudeuse comparativement à l'extrudeuse du laboratoire de l'UQAT. Les paramètres de mise en forme étaient différents pour les deux extrudeuses. Dans les analyses de variance l'effet du procédé est indiqué par les effets des blocs. Pour l'ensemble des propriétés mesurées, l'effet du bloc était hautement significatif. Cet effet s'explique par les différences entre les paramètres de procédé tel que discuté ci-haut mais aussi par les différences dans la morphologie des fibres kraft utilisées dans les deux laboratoires. La longueur des fibres utilisées à l'échelle pilote (UQTR) étaient plus longues que celles utilisées à l'échelle laboratoire (UQAT). Pour simplifier la discussion sur l'effet du procédé, nous présentons les résultats des variations des propriétés des composites qui ont été fabriqués avec les fibres kraft seulement.

3.2.1.1 Effet du procédé de mise en forme et la proportion des fibres sur les propriétés physiques des CBP

La figure 3.1 illustre l'évolution de l'absorption d'eau dans le temps en fonction du procédé de mise en forme pour les composites à 20%, 40% et 50%. À 20% de fibres kraft, il n'y a pas de différence entre l'absorption d'eau des composites issus des deux procédés. Par contre, à 40% de fibres kraft, les composites issus du procédé pilote

absorbent plus d'eau que ceux issus du procédé laboratoire. Parmi les explications plausibles, il y a la différence au niveau de la morphologie des fibres. Les composites avec les fibres longues ont tendance à absorber plus d'eau que ceux avec des fibres courtes Migneault (2007). Ce résultat est attendu puisque Steckel et al (2006) et Migneault (2007), ont déjà constaté que les fibres les plus courtes donnent des composites bois polymère avec une meilleure stabilité dimensionnelle. De plus, l'absorption massique d'eau des fibres longues et de 72% plus grande que les fibres courtes (Migneault, 2007 ; Migneault et al, 2008a). Ceci peut être expliqué par la bonne isolation par la matrice hydrophobe pour les fibres courtes, ce qui réduit l'espacement et empêche l'infiltration d'eau, alors qu'avec des fibres plus longues on a tendance à s`agglomérer dans le mélange, ce qui donne de l'espace et la pénétration d'eau devient plus facile.

La figure 3.1 illustre aussi l'effet de la proportion des fibres sur l'absorption d'eau des composites. Plus la proportion des fibres est élevée, plus l'absorption d'eau est grande. Ce résultat est prévu et concorde avec les résultats des études antérieures dont ceux de Stark et al (2003), Migneault et al (2007) et Bouafif et al (2009). Qui ont constaté que le caractère hydrophile des fibres est responsable de l'absorption de l'eau. De ce fait, lorsque la teneur en fibres est faible, nous avons moins de composantes hydrophiles dans notre mélange.

La figure 3.2 illustre l'évolution du gonflement dans le temps en fonction du procédé de mise en forme pour les composites à 20%, 40% et 50%. Des résultats similaires à ceux de l'absorption ont été trouvés, plus la proportion des fibres est élevée, plus le gonflement augmente. Ces résultats concordent avec les travaux de recherche de plusieurs études antérieures (Li et al 2004, Wolcott et Schirp, 2005, Slama 2009 et Migneault et al, 2008) qui ont affirmé que l'ajout des fibres dans le composite augmente la stabilité dimensionnelle.

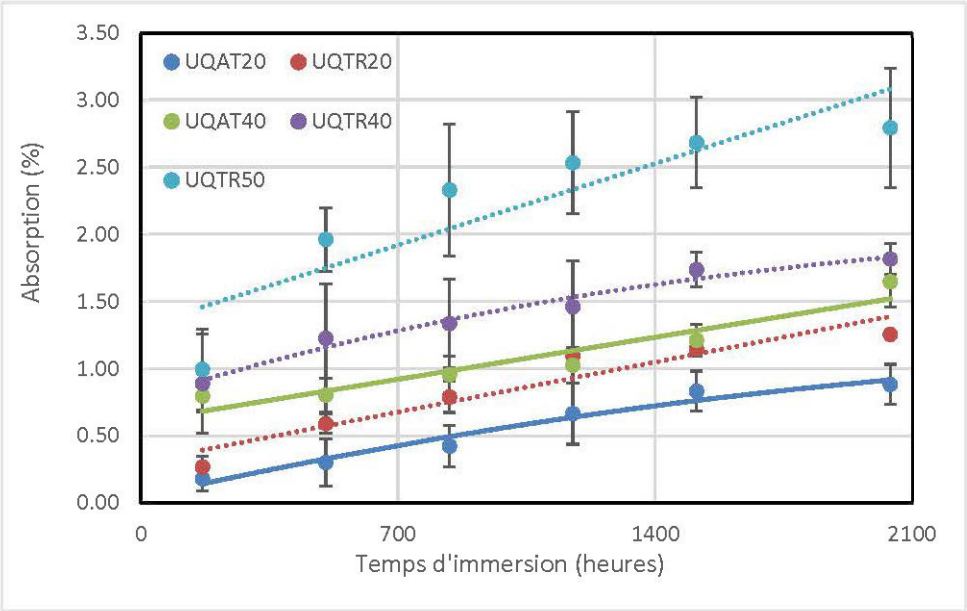


Figure 3.1: Variation de l'absorption d'eau en fonction du temps d'immersion, du procédé de fabrication et de la proportion des fibres.

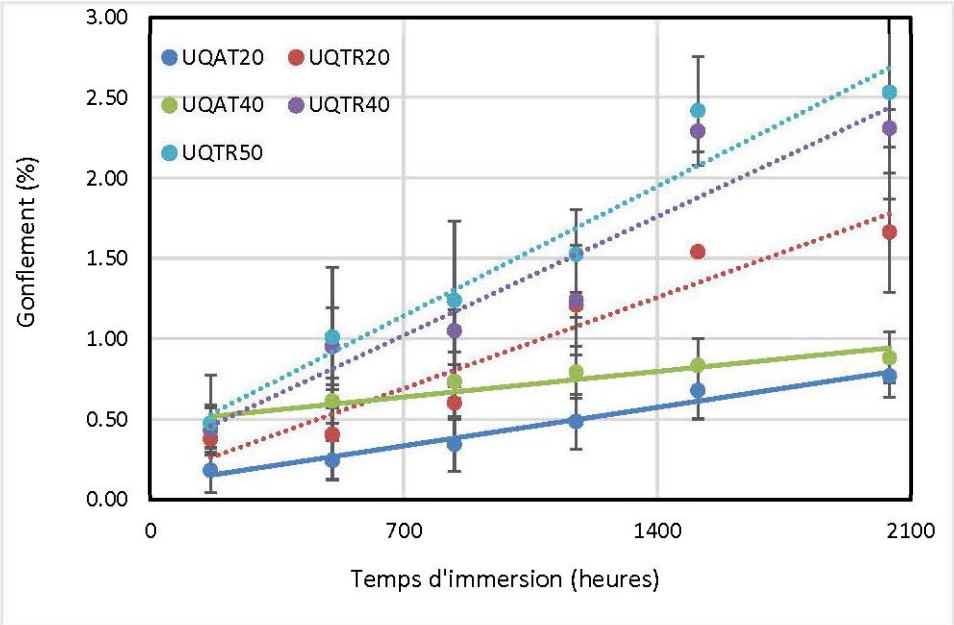


Figure 3.2: Variation de gonflement d'eau en fonction du temps d'immersion, du procédé de fabrication et de la proportion des fibres.

La figure 3.3 présente la variation de la masse volumique des composites en fonction du procédé de mise en forme du temps d'immersion et la proportion des fibres. Le procédé de mise en forme et la proportion n'affecte pas d'une manière importante la masse volumique des composites. En effet, la masse volumique variait de 0,81 et 0,86 Ce résultat est en accord avec l'étude de Sébastien Migneault (2007), qui a conclu qu'il y a une différence de moins de (1%), la densité apparente ne varie pas avec la longueur des fibres. Dans notre cas. Nous avons trouvé une différence de moins de (5%).

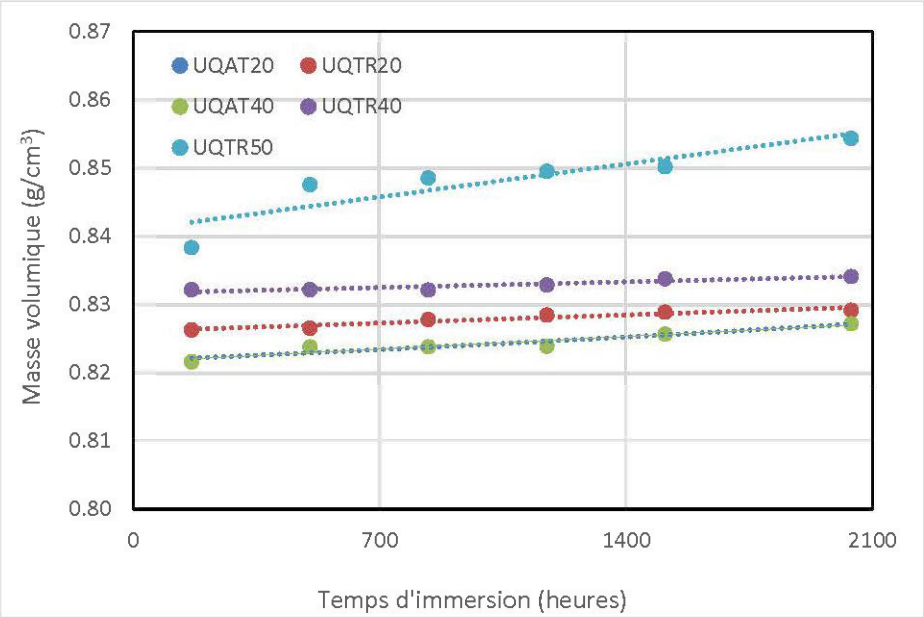


Figure 3.3: Variation de la masse volumique des composites en du temps d'immersion, du procédé de fabrication et de la proportion des fibres.

3.2.1.2 Effet du procédé de mise en forme et la proportion des fibres sur les propriétés mécaniques des CBP

L'effet du procédé sur les propriétés mécaniques en flexion, en traction et à l'impact est présenté aux figures 3.4 à 3.12. À la figure 3.4, qui présente la variation de contrainte maximale en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication

et de la proportion des fibres, on remarque qu'à 20% de fibres kraft, les composites fabriqués par le procédé pilote de l'UQTR montrent une contrainte maximale plus élevée que celle des composites issus du procédé laboratoire de l'UQAT. Ce résultat pourra s'expliquer par le fait que les fibres kraft utilisées dans le procédé pilote sont plus longue que celles utilisées dans le procédé laboratoire. Des fibres plus longues dans le composite permettent une meilleure distribution de la charge lors d'une application d'une contrainte en traction (Migneault et al, 2010). Par contre, pour les composites à plus forte proportion des fibres, il n'y a pas de différence entre les contraintes maximales en flexion des composites issus des deux procédés. Des phénomènes, autres que la distribution de la charge pourrait expliquer ce résultat dont la diminution de la qualité de dispersion des fibres avec l'augmentation de leur proportion dans le composite. Ce résultat est en accord avec la Majorité des résultats trouvés dans la littérature (Wolcott et Englund. 1999 ; Migneault et al, 2007; 2010).

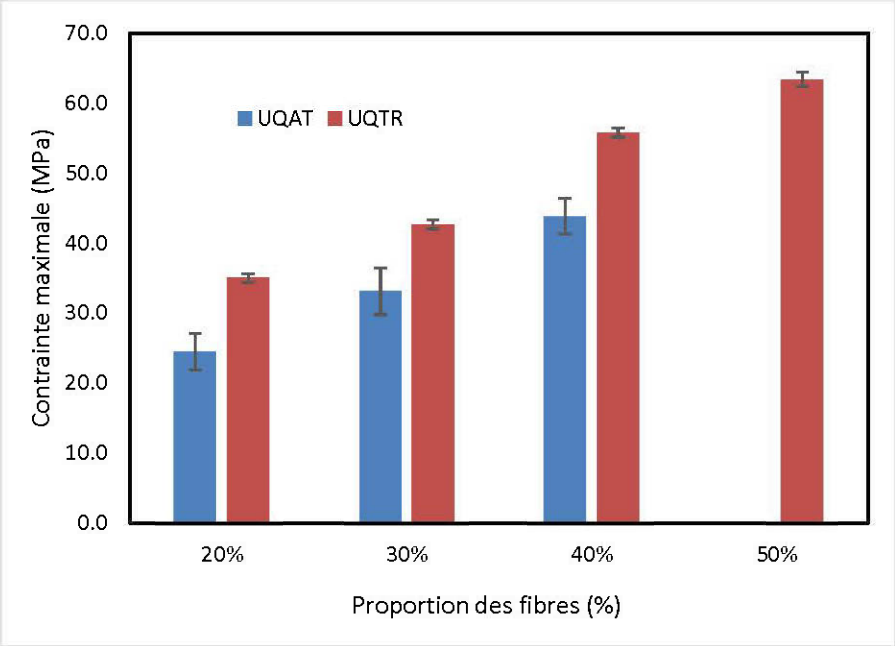


Figure 3.4: Variation de contrainte maximale en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des fibres.

On remarque que l'augmentation de la proportion des fibres dans les composites améliore substantiellement sa contrainte maximale quelques soit le procédé de fabrication. Ce résultat est prévu compte tenu que les fibres kraft sont plus résistantes que le PEHD. Ce résultat concorde avec ceux rapportés dans plusieurs études (Li et al, 2004; Wolcott, 2005; Beg, 2007; Slama 2009; Godard et al, 2008; Migneault et al, 2008; 2014) qui ont montré que l'augmentation du pourcentage de fibres améliore quasi systématiquement la résistance à la traction des composites bois/polymère.

La figure 3.5 montre la variation du modèle d'élasticité en flexion avec le procédé de mise en forme et la proportion des fibres kraft. D'une façon générale, les composites issus du procédé pilote montrent un module d'élasticité en flexion supérieur à ceux issus du procédé laboratoire. Ce résultat pourra s'expliquer encore une fois par les fibres plus longues utilisées dans le procédé pilote. Ce résultat concorde avec ceux de Migneault et al (2007 ; 2009), Bouafif et al (2009) et Ashori et Nourbakhsh (2010). Les résultats ont montré que les caractéristiques mécaniques augmentent avec l'ajout de fibres et que les composites fabriqués avec les fibres longues ont de meilleures propriétés mécaniques. Stark et Rowlands (2003) ont remarqué que, le facteur de forme, indépendamment de la taille des particules de bois, a une grande influence sur la résistance mécanique et la rigidité des composites.

Par ailleurs, l'augmentation de la proportion de fibres kraft améliore le module d'élasticité en flexion des composites issus des deux procédés. En effet, lorsque nous augmentons la proportion des fibres kraft en allant de 20 %, 40%, jusqu'à 50%, les MOE en flexion augmentent. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par Bendahou et al (2009). Ils ont conclu qu'au-delà de cette concentration, une faible diminution est observée. Ils ont constaté qu'un taux élevé des fibres augmente l'incompatibilité entre la matrice et fibres et diminue l'adhésion entre les deux phases, ce qui fragilise le système et provoque une diminution du module d'élasticité des composites. Ces résultats concordent aussi avec les travaux de recherche de plusieurs études antérieures (Li et al, 2004; Wolcott et Schirp, 2005; Soucy, 2007; Slama 2009;

Migneault et al, 2008) qui ont affirmé que l'ajout des fibres dans le composite tend à accroître le module d'élasticité en flexion des CBP.

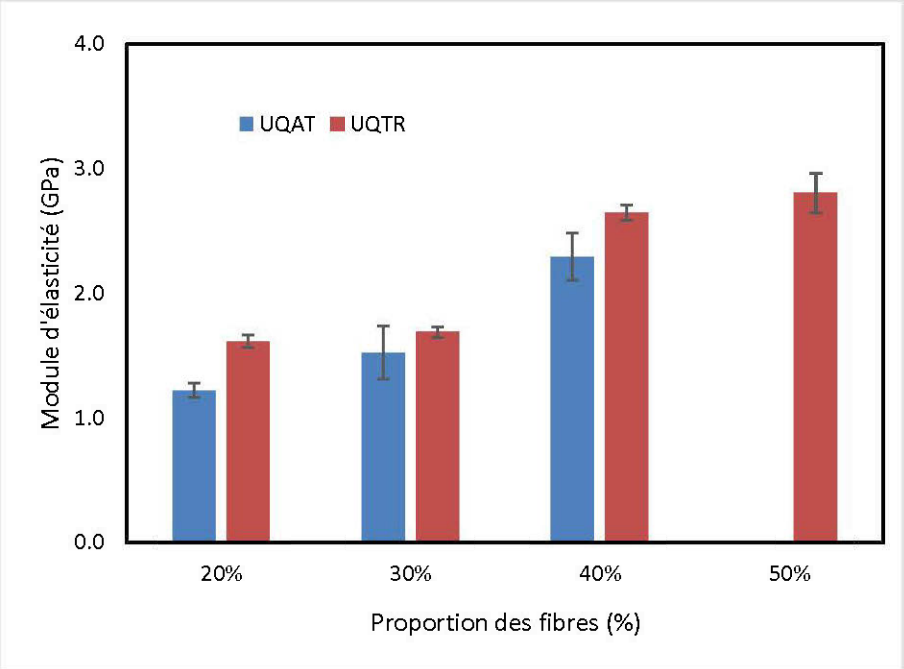


Figure 3.5: Variation du module d'élasticité en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des fibres.

On présente à La figure 3.6 la variation de la déformation en flexion à la contrainte maximale. La déformation maximale variait très peu en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des fibres. Elle se situait entre 8,16% et 9,6%. Les composites fabriqués à l'aide du procédé pilote montrent une déformation maximale légèrement supérieure à celles des composites issus du procédé laboratoire.

Une légère diminution de la déformation maximale est observée pour les composites contenant 50% de fibres comparativement à ceux contenant 30% et 40% de fibres. D'autres chercheurs (Steckel et al, 2006, Migneault 2007, Pasquini et al, 2008, Godard et al, 2008 et Arrakhiz et al, 2013) ont constaté que la déformation maximale diminue

avec l'augmentation du taux des fibres. Ils ont obtenu des CBP avec de faibles élongations à la rupture.

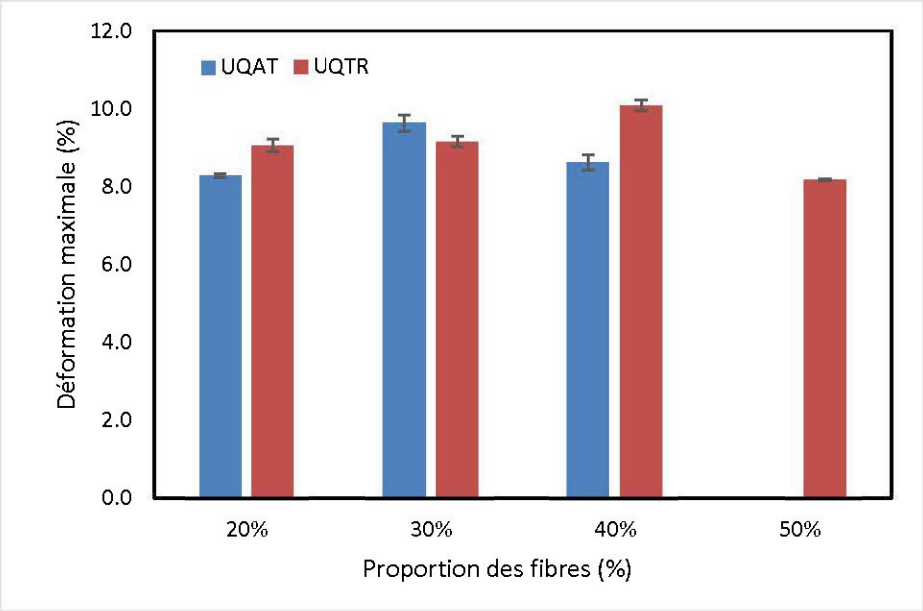


Figure 3.6: Variation de déformation à la contrainte maximale en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des fibres.

La variation de la contrainte maximale à la traction est présentée à la figure 3.7. À 20%, 30% et 40% de fibres, le procédé pilote produit des composites plus résistants que ceux du procédé laboratoire. Ce résultat s'explique aussi par les fibres plus longues utilisées dans ce procédé comparativement à celles utilisées dans le procédé laboratoire. Par ailleurs, la contrainte maximale en traction des composites fabriqués selon les deux procédés augmente avec la teneur en fibres. Ce résultat concorde avec ceux de plusieurs études (Migneault et al, 2008 ; Bouafif et al, 2009 ; Ashori et Nourbakhsh, 2010). L'amélioration de la résistance en traction des composites avec l'augmentation de la proportion des fibres s'explique par le fait que les fibres de bois sont plus résistantes que le PEHD. Une augmentation de leur teneur combinée à une bonne adhésion résulte en une amélioration de la résistance à la traction. Ces constatations viennent aussi

appuyer les résultats de Beg (2007) et Migneault et al. (2014), qui ont conclu que la résistance en traction des composites bois-polymère sont améliorés en augmentant la proportion des fibres, de 10% jusqu'à 60%. Soucy (2007) a également rapporté qu'au-delà de 60% en fibres, les caractéristiques mécaniques diminuent. Koubaa et al (2004) ont aussi rapporté que l'augmentation du pourcentage de renforts améliore les performances mécaniques des composites. Cependant, une très grande quantité des fibres conduit à une baisse de performance.

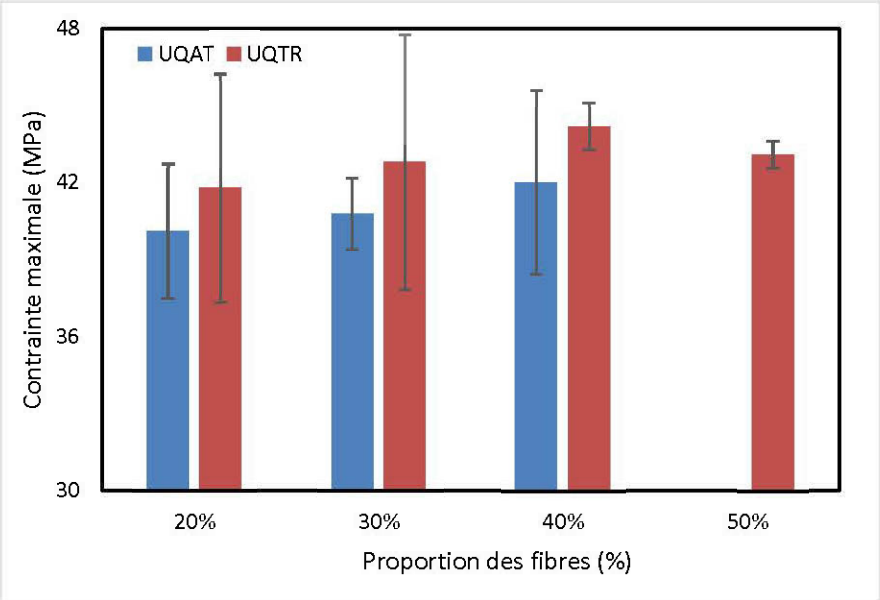


Figure 3.7: Variation de la contrainte maximale en traction des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des fibres.

On présente à la figure 3.8 le module d'élasticité en traction des composites en fonction du procédé de mise en forme et de la proportion des fibres. Le module d'élasticité en traction des composites fabriqués selon le procédé pilote est légèrement supérieur à celui des composites fabriqués au laboratoire et cela quelques soit la proportion des fibres (Figure 3.8). Les fibres plus longues utilisées dans le procédé pilote expliquent ce résultat. Migneault et al (2007; 2009) rapportent que le module d'élasticité en

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

traction augmente avec la longueur des fibres. D'autre part, le module d'élasticité augmente avec l'augmentation de la proportion des fibres pour les composites issus des deux procédés.

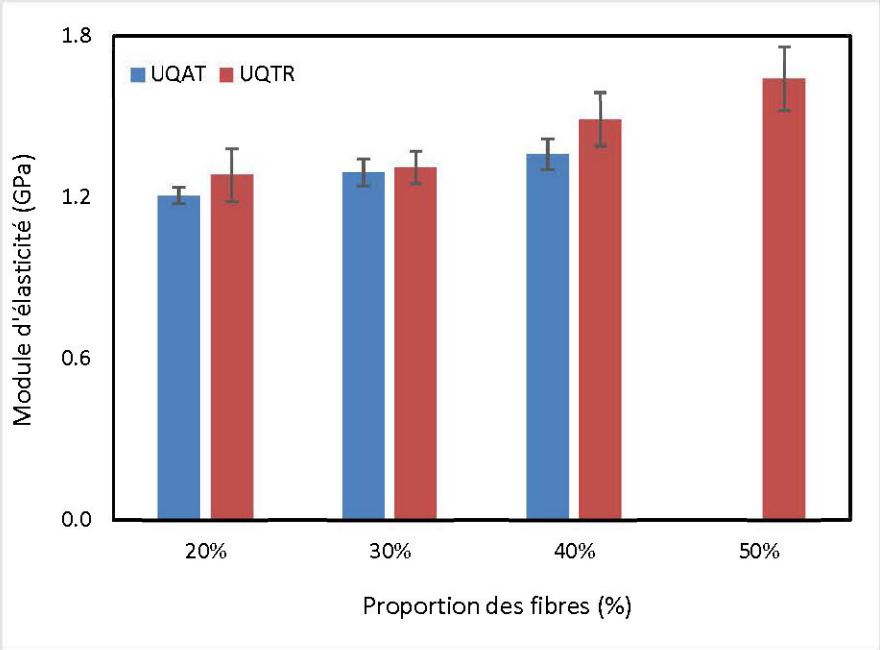


Figure 3.8: Variation du module d'élasticité en traction des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des fibres.

La figure 3.9 illustre la variation de la déformation maximale en traction en fonction du procédé de mise en forme et la proportion des fibres. La déformation augmente légèrement avec la proportion des fibres et est généralement supérieure pour les composites mis en forme à l'aide du procédé pilote. Cependant, la variation de la déformation maximale à 40% est très faible avec un écart-type assez important. Elle varie entre 5,21% et 6,45%. Les écarts types sont plus grands que la différence entre les traitements donc il semble que les différences soient non significatives.

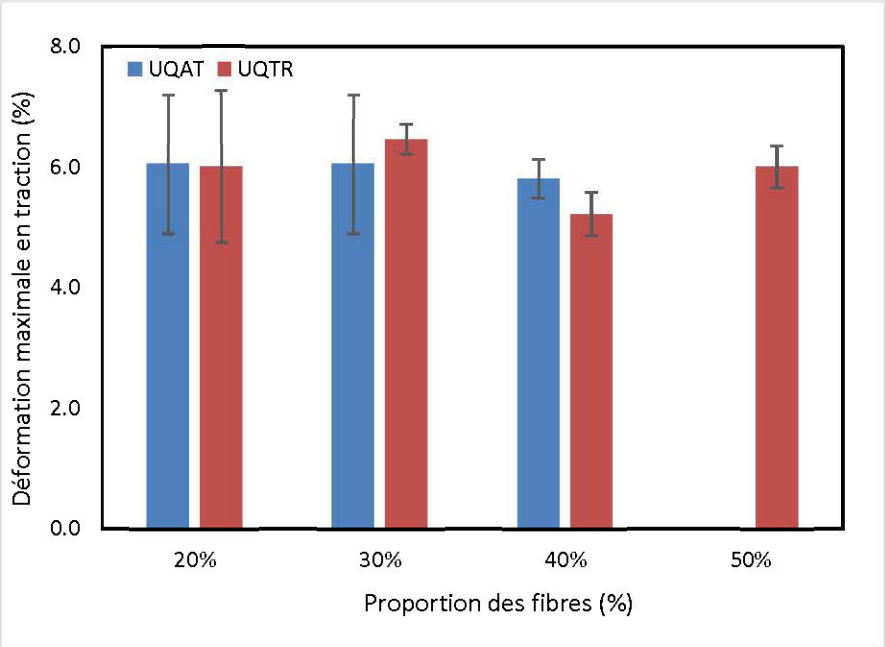


Figure 3.9: Variation de la déformation maximale en traction des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des fibres.

Le procédé de mise en forme a un effet significatif sur l'énergie d'impact (Tableau I.3 et I.4). Les composites issus du procédé pilote ont énergie d'impact supérieur à ceux issus du procédé laboratoire (Figure 3.10), ce résultat est expliqué par la longueur des fibres importantes au laboratoire pilote. Ces Résultats ont également été rapportés par (Baïlon et Dorlot, 2005; Callister, 2001; Migneault 2007). Qui ont trouvé que la ténacité des CBP augmente avec la longueur des fibres.

L'énergie d'impact diminue avec l'augmentation de la proportion des fibres quelques soit le procédé de mise en forme (Figure 3.10). Ce résultat est attendu puisqu'il est bien connu que la ductilité des composites diminue avec l'augmentation de la proportion des fibres. Ces mêmes résultats ont également été rapportés par Bouafif et al (2009). La charge à l'interface fibres polymère absorbe une énergie au choc importante dans

les composites d'où l'obtention d'une structure beaucoup plus rigide et fragile (Bengtsson et al.2006).

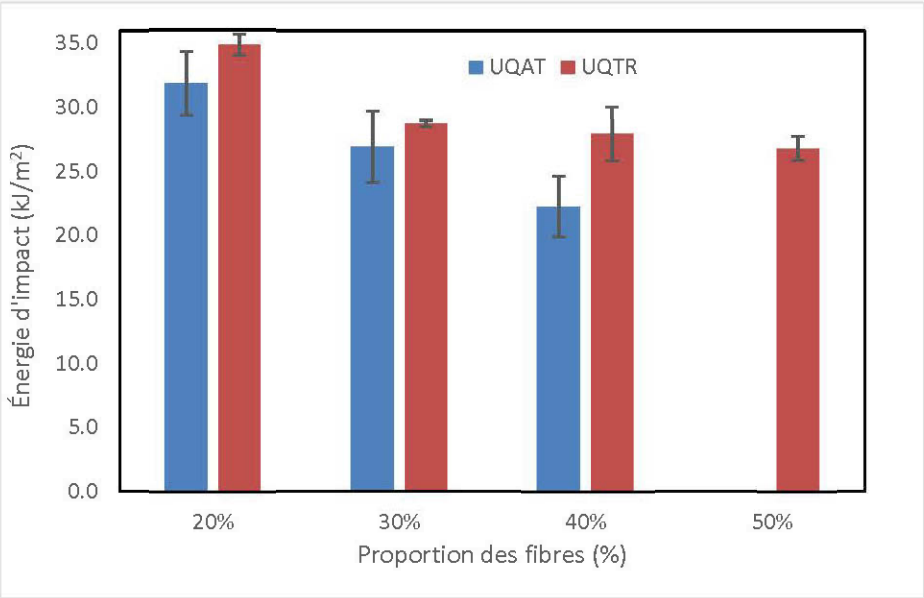


Figure 3.10: Variation de l'énergie d'impact des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des fibres.

Les figures 3.11 et 3.12 représentent la variation de contrainte maximale en flexion et du module d'élasticité des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des fibres. Les propriétés mécaniques des CBP étudiés varient en fonction de la proportion de fibres kraft, nous observons une croissance linéaire du module d'élasticité et de la contrainte maximale pour tous les composites formés. Plus la teneur des fibres est importante dans le composite, plus le module d'élasticité et le module de rupture sont importants la variation augmente linéairement, contrairement aux indications de Bendahou et al (2009). Ils ont constaté qu'un taux élevé des fibres augmente l'incompatibilité entre la matrice et fibres et diminue l'adhésion entre les deux phases, ce qui fragilise le système et provoque une diminution du module d'élasticité des composites. Soucy (2007) a également ajouté qu'au-delà de 60% en fibres, les caractéristiques mécaniques diminuent. Koubaa et al, (2004) ont

pareillement ajouté que l'augmentation du pourcentage de renforts lignocellulosique améliore les performances mécaniques des composites. Cependant une très grande quantité des fibres nous donne une adhésion plus difficile qui va conduire à une baisse de performance. Cela est dû au grand volume occupé par les fibres dans la chambre de rhéomètre.

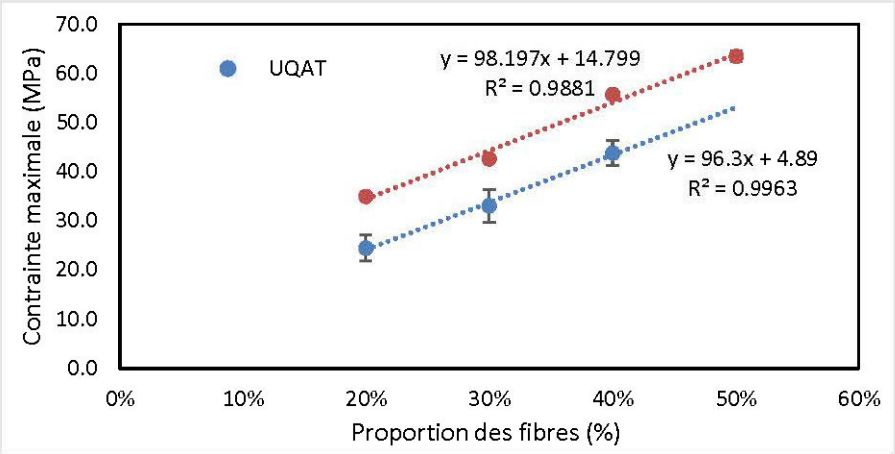


Figure 3.11: Variation de contrainte maximale en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des fibres.

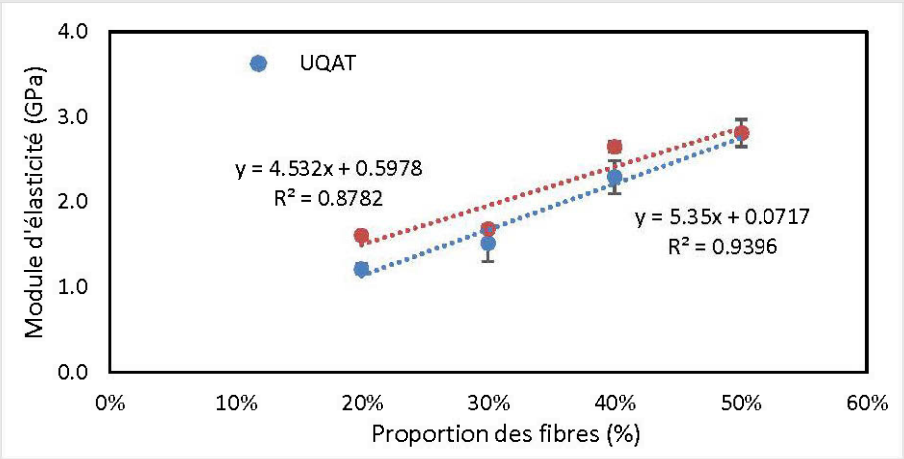


Figure 3.12: Variation du module d'élasticité en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des fibres.

3.2.2 Effet des boues de désencrage

L'addition des boues de désencrage n'a pas affecté la mise en forme des composites. En effet, il a été possible d'introduire jusqu'à 50% de boue de désencrage dans la fabrication des composites selon les deux procédés utilisés. Les résultats des analyses de variance indiquent que la proportion des boues de désencrage a des effets significatifs sur toutes les propriétés des CBP (Tableaux 3.1 et 3.2).

3.2.2.1 Effet de la proportion des boues de désencrage sur les propriétés physiques des CBP

La figure 3.13 illustre l'évolution de l'absorption d'eau dans le temps en fonction du procédé de mise en forme pour les composites à 20%, 40% et 50% de BD. Les résultats d'immersion en continu dans l'eau montrent que, les composites issus du procédé pilote absorbent plus d'eau que ceux issus du procédé laboratoire. Parmi les explications plausibles, la présence des défauts liées aux paramètres d'extrusion contenu en BD, leurs orientations, l'adhésion entre BD et matrice.

La figure 3.13 illustre aussi l'effet de la proportion des BD sur l'absorption d'eau des composites. Plus la proportion des BD est élevée, plus l'absorption d'eau est grande. Ce résultat s'explique par le fait que les BD contiennent des fibres de bois de nature hydrophile, donc plus la teneur en BD est plus élevée, plus il y a de fibres et par conséquent plus ils absorbent d'eau. Nous avons obtenu des valeurs de d'absorption d'eau de l'ordre de 6% en six mois pour les composites contenant 50% de BD. Ces valeurs sont plus élevées que celles obtenues pour les composites à base de fibres Kraft à la même teneur (Figure 3.1). Ce résultat est surprenant et contredit les résultats de Migneault et al (2014) qui ont rapporté que les composites à base de boues de désencrage absorbent moins d'eau, comparativement aux composites à base de fibres

Rapport-Gratuit.com

de bois et aux résidus de l'industrie de panneaux. Une des explications plausibles à ce résultat est le caractère cristallin des fibres kraft utilisées dans la présente étude qui favorise une meilleure stabilité dimensionnelle tel que rapporté par Soucy (2007).

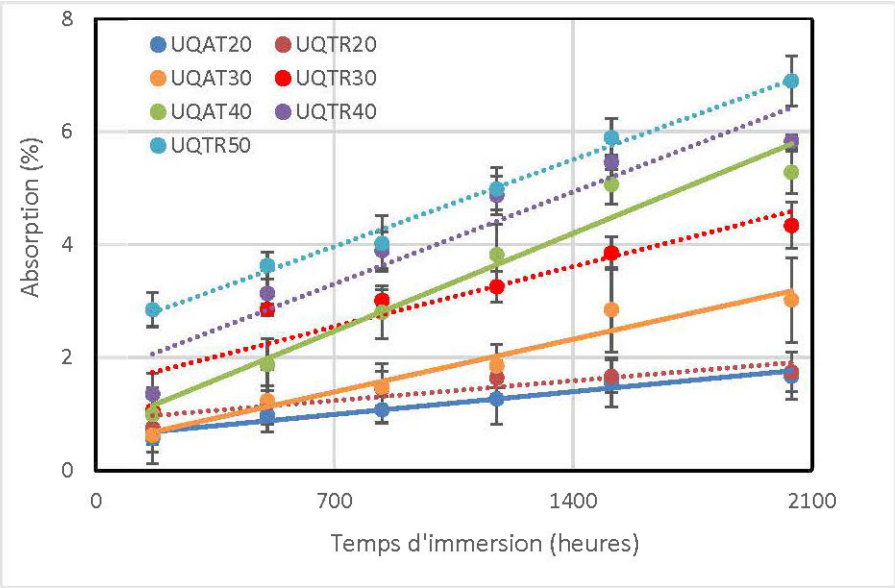


Figure 3.13: Variation de l'absorption d'eau en fonction du temps d'immersion, du procédé de fabrication et de la proportion des BD.

La figure 3.14 illustre l'évolution du gonflement dans le temps en fonction du procédé de mise en forme pour les composites à 20%, 40% et 50%. Des résultats similaires à ceux de l'absorption ont été trouvés. La figure 3.14 illustre aussi l'effet de la proportion des BD sur le gonflement des composites. Plus la proportion des BD est élevée, plus le gonflement d'eau est grand.

La figure 3.15 présente la variation de masse volumique des composites en fonction du procédé de mise en forme du temps d'immersion et la proportion des BD. Le procédé de mise en forme et la proportion n'affecte pas d'une manière significative la masse volumique des composites. En effet, la masse volumique variait de 0,987et 1,034

g/cm^3. Elle a atteint 1,167 g/cm^3 pour les composites contenant 50% de boue de désencrage (Voir résultats de densité en annexe).

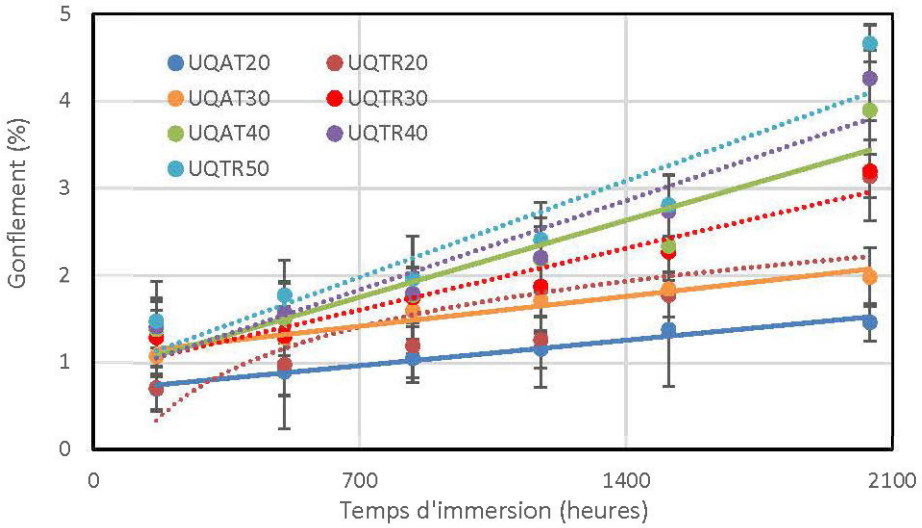


Figure 3.14: Variation de gonflement d'eau en fonction du temps d'immersion, du procédé de fabrication et de la proportion des BD.

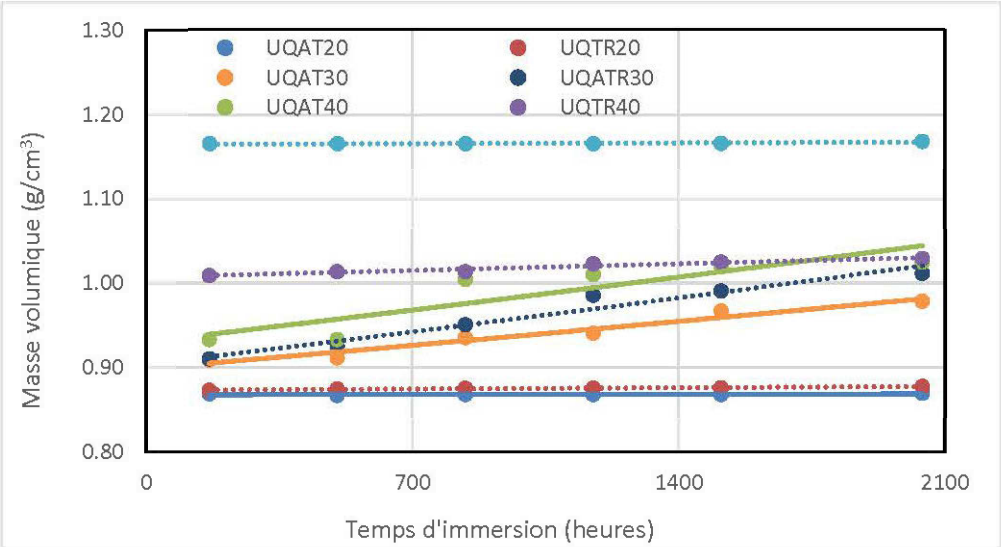


Figure 3.15: Variation de la masse volumique des composites en du temps d'immersion, du procédé de fabrication et de la proportion des BD.

3.2.2.2 Effet de de la proportion des boues de désencrage sur les propriétés mécaniques des CBP

L'effet de la proportion des BD sur les propriétés mécaniques en flexion, en traction et à l'impact sont présentés aux figures 3.16 à 3.23. Les variations des contraintes maximales en flexion (figure 3.15) et en traction (figure 3.16) indiquent que l'on peut incorporer jusqu'à 50% de BD dans les CBP. Les composites fabriqués par le procédé pilote de l'UQTR montrent des contraintes maximales en flexion et en traction plus élevées que celles des composites issus du procédé laboratoire de l'UQAT. Par ailleurs, l'ajout des boues à différentes proportions a amélioré la contrainte maximale en flexion et en traction quelques soit le procédé de fabrication. Ces résultats sont en bon accord avec ceux trouvés par (Ismail et Bakar, 2006; Krigstin et Sain, 2006; Migneault et al. 2010; Migneault et al, 2014 ; Soucy et al, 2016; Haddar et al, 2016) qui ont conclu que, l'ajout de boues à différentes proportions a amélioré la contrainte maximale en flexion et en traction. L'amélioration de des propriétés mécaniques avec l'augmentation de la proportion des boues de désencrage est surprenante compte tenu de la très faible taille des particules dans les BD. La matière minérale dans les BD pourrait être la raison de cet effet sachant que Les additifs minéraux utilises dans les polymères augmentent la résistance mécanique. Les additifs minéraux qui sont constitués du kaolin (glaise), du talc, des carbonates et des métaux (Cu, Pb, Ni et Zn), qui peuvent être utilisés comme renforcements Charge dans le CBP. On se prévoyait que lors de sollicitation mécanique des composites, il y aura des concentrations de contraintes autour des particules ce qui affaiblirait les propriétés mécaniques (Migneault et al, 2011). Ainsi, nous pouvons conclure que les particules des BD, par leurs petites tailles se sont bien dispersées dans la matrice et ne représentent pas de défauts dans le composite. L'amélioration des propriétés des composites avec la proportion des BD pourra s'expliquer en partie par la présence de fibres de bois qui permettront une distribution des charges lors de la sollicitation mécanique des composites (Migneault et al, 2011). En conclusion,

l'augmentation des propriétés mécaniques des composites suite à l'ajout de BD est attribuée à une bonne dispersion des particules dans le HDPE et par la présence de fibres de bois dans les BD qui permettent une meilleure distribution des charges. Ces résultats concordent avec ceux d'Ismail et Bakar (2006) qui ont rapporté que l'augmentation de la proportion de boues a amélioré les propriétés des CBP.

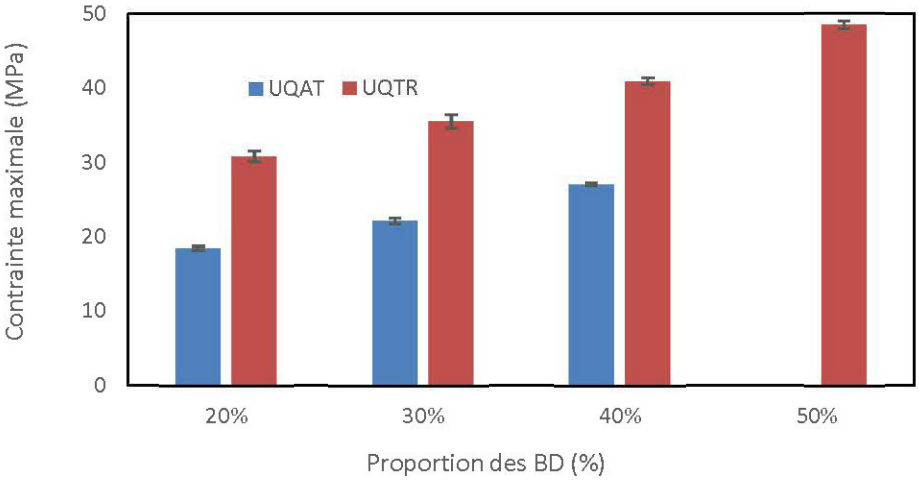


Figure 3.16: Variation de la contrainte maximale en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des BD.

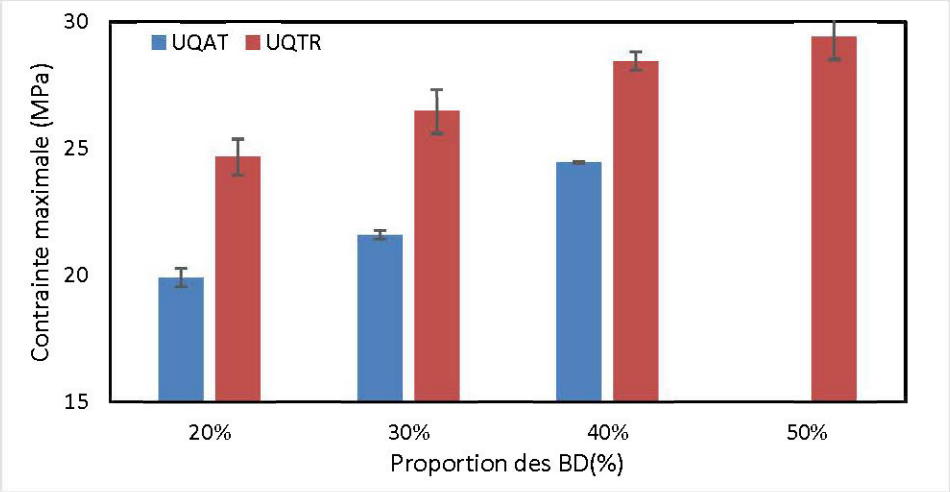


Figure 3.17: Variation de la contrainte maximale en traction des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des BD.

Les figures 3.18 et 3.19 montrent la variation du module d'élasticité en flexion et en traction avec le procédé de mise en forme et la proportion des BD. Les composites issus du procédé pilote montrent des modules d'élasticité en flexion et en traction supérieurs à ceux issus du procédé laboratoire. Par ailleurs, l'augmentation de la proportion de BD améliore le module d'élasticité en flexion et en traction des composites issus des deux procédés. Ces résultats sont en bon accord avec ceux trouvés par (Ismail et Bakar, 2006 ; Krigstin et Sain, 2006 ; Migneault et al, 2010 ; Migneault et al, 2014; Soucy et al, 2016; et Haddar et al, 2016) qui ont conclu que, l'ajout de boues à différentes proportions a amélioré le module d'élasticité en traction et flexion. Migneault et al (2014), de leur côté ont travaillé avec les boues de désencrage, ils ont obtenu des composites avec les propriétés mécaniques moins importantes comparativement aux composites à base de fibres de bois et aux résidus de l'industrie de panneaux.

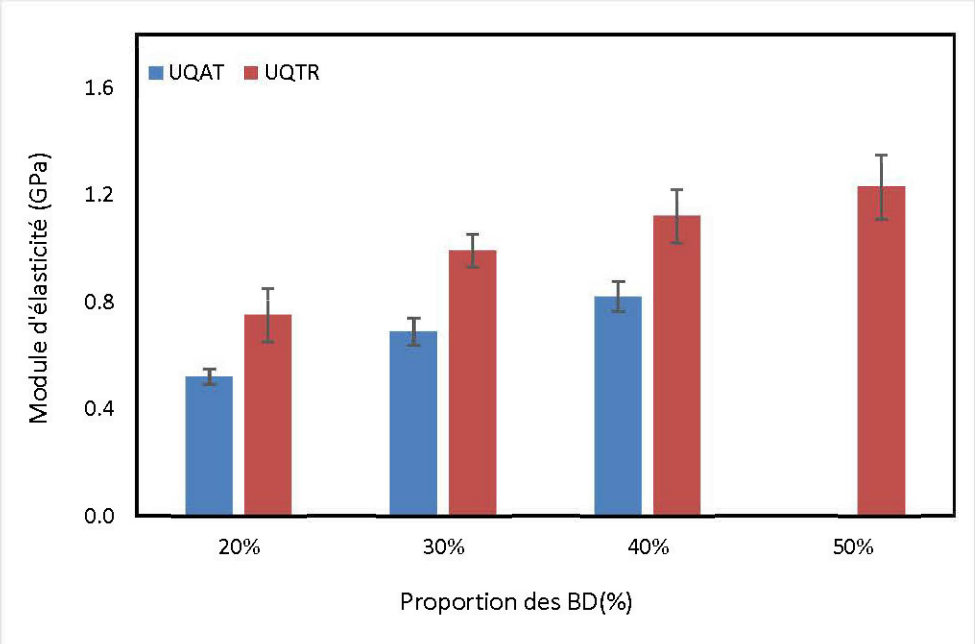


Figure 3.18: Variation du module d'élasticité en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des BD.

La figure 3.19 illustre aussi l'effet du module d'élasticité en traction des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des BD.

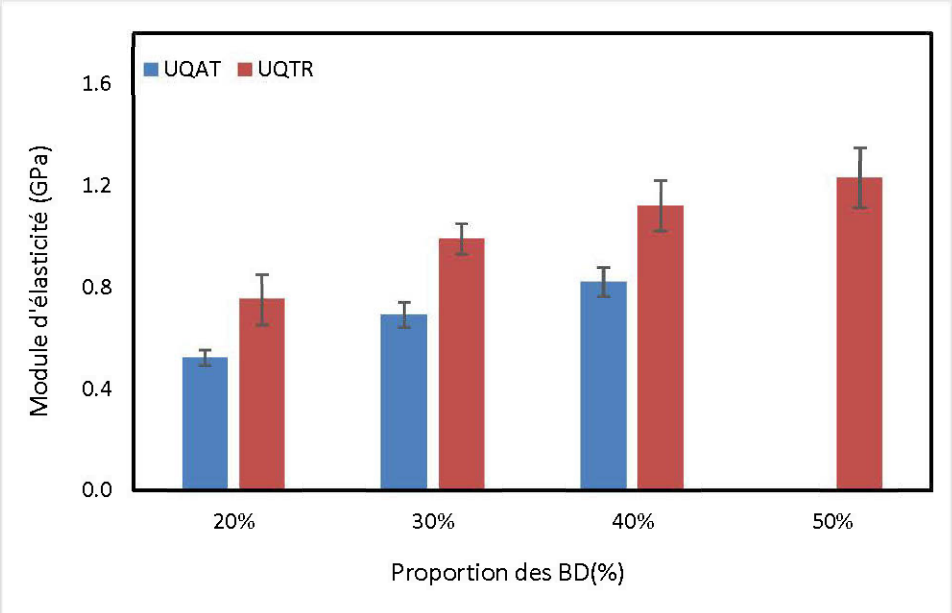


Figure 3.19: Variation du module d'élasticité en traction des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des BD.

On présente à la figure 3.20 la variation de la déformation à la contrainte maximale en flexion en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des BD. Les composites fabriqués à l'aide du procédé pilote montrent une déformation maximale légèrement supérieure à celles des composites issus du procédé laboratoire. Il n'y a pas d'effet notable de la proportion des BD sur la déformation maximale. En effet, nous avons observé que la déformation en flexion se situe entre 8,23% et 8,50% pour les composites fabriqués à l'aide du procédé pilote et entre 7,35% et 7,55% pour ceux fabriqués à l'aide du procédé laboratoire. En effet l'augmentation de la proportion de BD améliore l'élongation à la rupture des composites CBP. Contrairement aux résultats obtenus par d'autres auteurs (Godard et al, 2008 ; Steckel et al, 2006 ; Migneault et al, 2010 ; Soucy et al, 2016 et Haddar et al, 2016), le taux de déformation de diminues avec la proportion des fibres. Nous avons obtenu des résultats nettement supérieurs aux

valeurs indiquées dans l'article de (Godard et al, 2008). Ce comportement traduit le caractère ductile des composites avec lesquels nous avons travaillé.

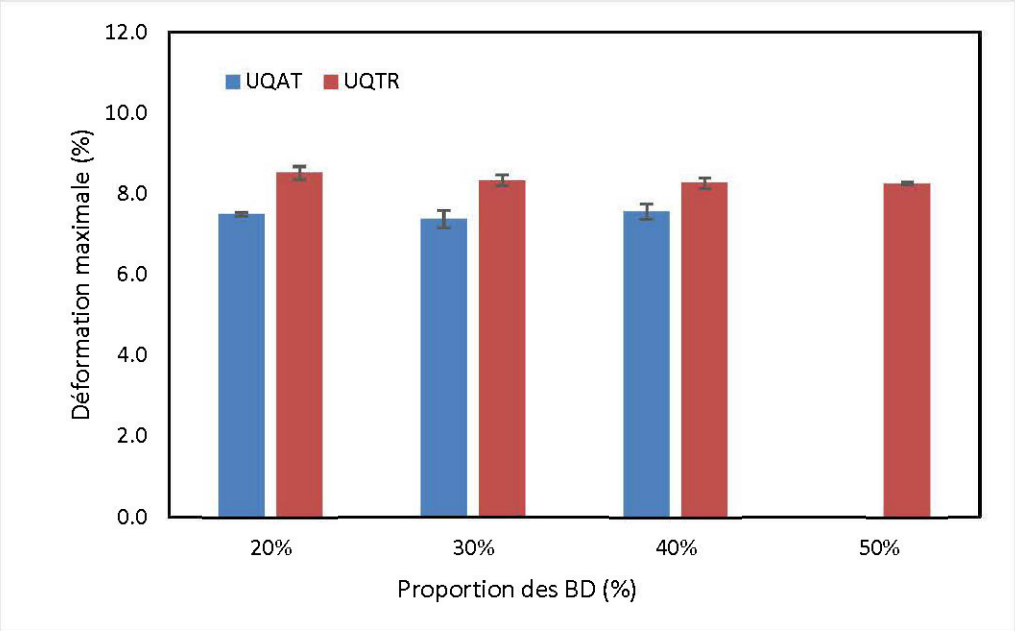


Figure 3.20: Variation de déformation à la contrainte maximale en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des BD.

La figure 3.21 montre la variation de l'énergie d'impact en fonction de la proportion des BD et de procéder de mise en forme. L'énergie d'impact diminue avec l'augmentation de la proportion des BD quelques soit le procédé de mise en forme (Figure 3.19). Cela concorde avec les résultats rapportés par (Ismail et Bakar, 2006 ; Krigstin et Sain, 2006 ; Soucy et al, 2016 et Haddar et al, 2016). Ils ont conclu que l'énergie de rupture a diminué avec l'augmentation de la proportion de boues. Par contre, ces résultats contredisent ceux obtenus par Migneault et al (2014) qui ont, ont comparé le potentiel de différents résidus du bois pour la production des CBP. Ils ont conclu que les CBP fabriqués avec les boues de désencrage sont plus résistants à l'impact, ils sont plus tenaces et absorbent moins d'eau. Cela est dû à la présence des particules inorganiques dans les BD, ce qui procure aux CBP une bonne ténacité. La

présence d'une grande quantité de glaise dans les BD donne une faible absorption d'eau aux composites.

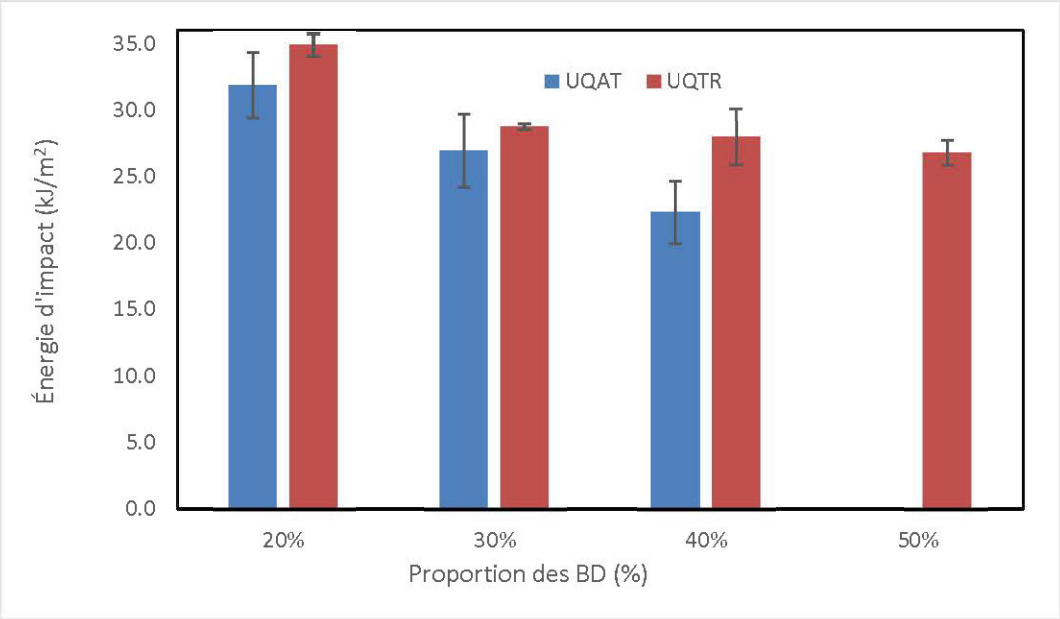


Figure 3.21: Variation de l'énergie d'impact des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des BD.

Les figures 3.12 et 3.23 représentent la variation de contrainte maximale en flexion et du module d'élasticité des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des BD. Les propriétés mécaniques des CBP étudiés varient en fonction de la proportion de BD, nous observons une croissance linéaire du module d'élasticité et de la contrainte maximale pour tous les composites formés. Plus la teneur des BD est importante dans le composite, plus le module d'élasticité et le module de rupture sont importants la variation augmente linéairement, Ces résultats sont en bon accord avec ceux trouvés par (Haddar et al, 2016) qui ont conclu que, l'ajout de boues à différentes proportions a amélioré la contrainte maximale en flexion et en traction. L'amélioration de des propriétés mécaniques avec l'augmentation de la. La matière minérale dans les BD pourrait être la raison de cet effet sachant que Les additifs minéraux utilises dans

les polymères augmentent la résistance mécanique, qui peuvent être utilisés comme renforcements Charge dans le CBP.

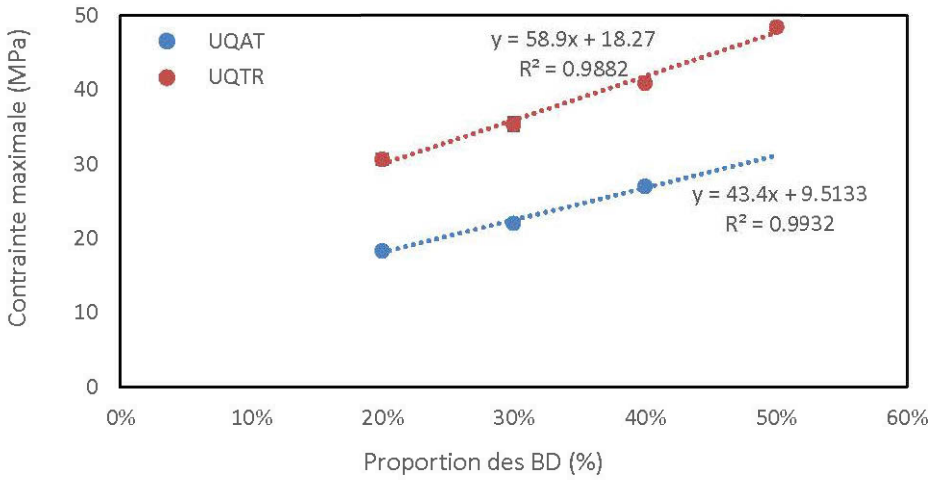


Figure 3.22: Variation de la contrainte maximale en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des BD.

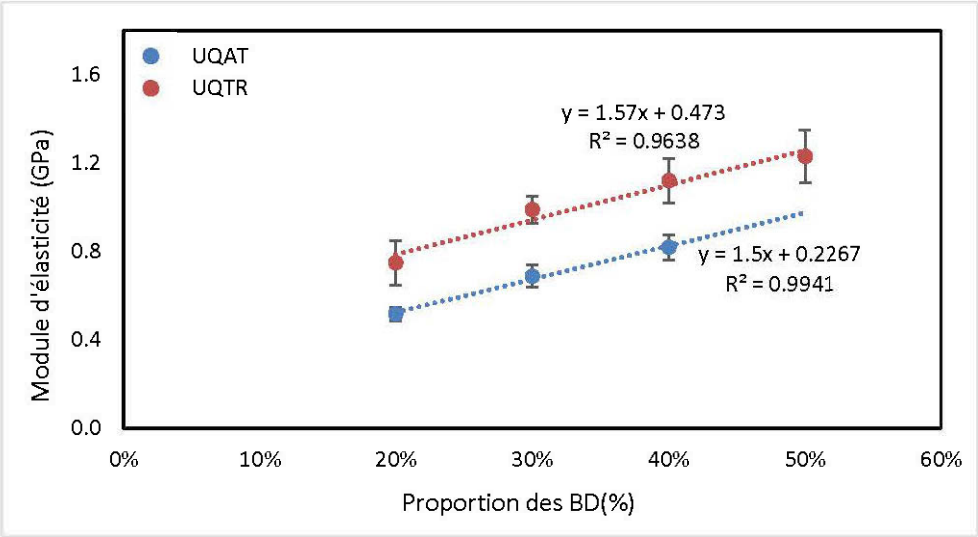


Figure 3.23: Variation du module d'élasticité en flexion des composites en fonction du procédé de fabrication et de la proportion des BD.

3.2.3 Comparaison entre les effets des fibres et des BD sur les propriétés physiques et mécaniques des CBP

3.2.3.1 Comparaison entre les effets des fibres et des BD sur les propriétés physiques

L'augmentation de la proportion des fibres Kraft et des BD augmentent l'absorption d'eau et le gonflement des composites (Figures 3.24et 3.25). La figure 3.20 représente Comparaison entre l'absorption d'eau des CBP issus de fibres kraft et de boues de désencrage à différentes proportions après 2040 heures d'immersion. Les composites contenant des BD absorbent plus d'eau que ceux contenant des fibres kraft, En effet, pour le même temps d'immersion à 2040 h l'absorption d'eau a augmenté de 6,90% pour un composite contenant 50% des BD comparativement aux composites qui contient 50% en fibres kraft, leur absorption massique est de 2,79%.

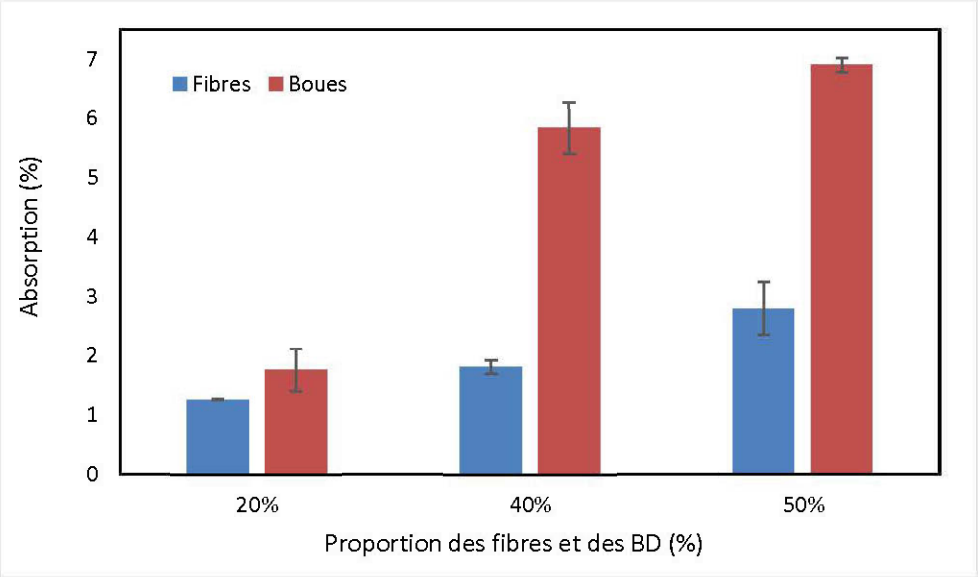


Figure 3.24: Comparaison entre l'absorption d'eau des CBP issus de fibres kraft et de boues de désencrage à différentes proportions après 2040 heures d'immersion.

Des tendances similaires sont observées pour le gonflement (Figure 3.25). Le gonflement volumique des CBP ont augmenté légèrement de 4,66 % pour les CBP issus des BD et de 2,53% pour les CBP issus de fibres kraft. Parmi les explications plausibles à ce résultat, il y a le caractère cristallin des fibres kraft qui se traduit par une réduction des zones amorphes qui servent d'espacement et empêchent l'infiltration d'eau. Soucy (2007) a travaillé avec la fibre Kraft et a obtenu des composites avec de meilleures propriétés de stabilité dimensionnelle par rapport aux composites issus de pâtes TMP et CTMP. La présence des additifs minéraux qui sont constitués du kaolin (glaise), du talc, des carbonates et des métaux (Cu, Pb, Ni et Zn) dans les BD pourrait aussi expliquer ce résultat.

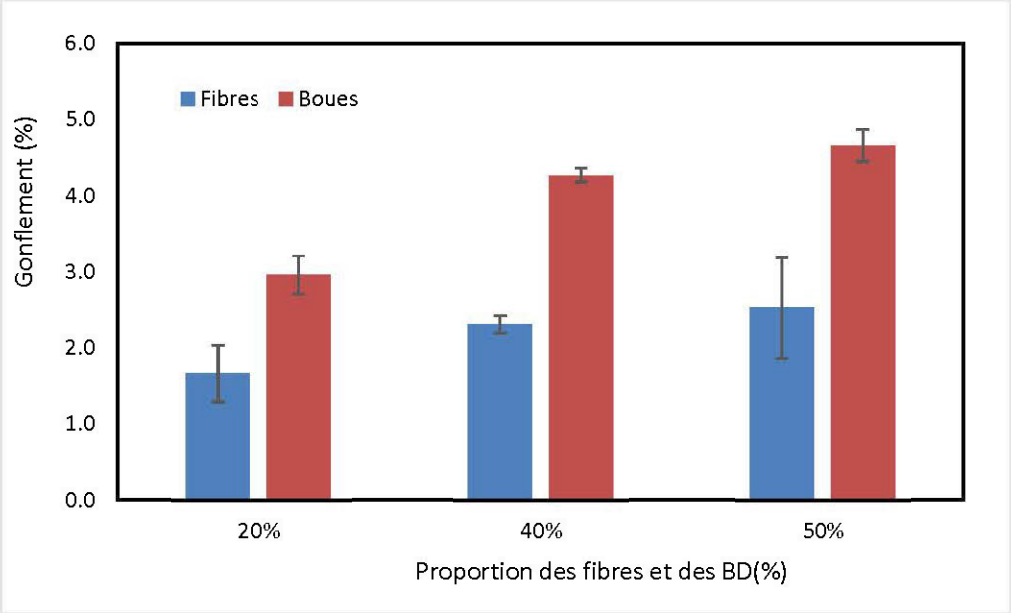


Figure 3.25: Comparaison entre l'absorption des CBP issus de fibres kraft et de boues de désencrage à différentes proportions.

La (Figure 3.26) représente la comparaison entre la masse volumique des CBP issus de fibres kraft et de boues de désencrage à différentes proportions. Les composites issue des BD possèdent les valeurs de masse volumiques les plus élevées (1,16)

comparativement aux composites issus des fibres (0,84). Ce résultat s'explique par la présence de minéraux dans les BD qui sont composé de calcium, du carbonate, du kaolin et du talc.

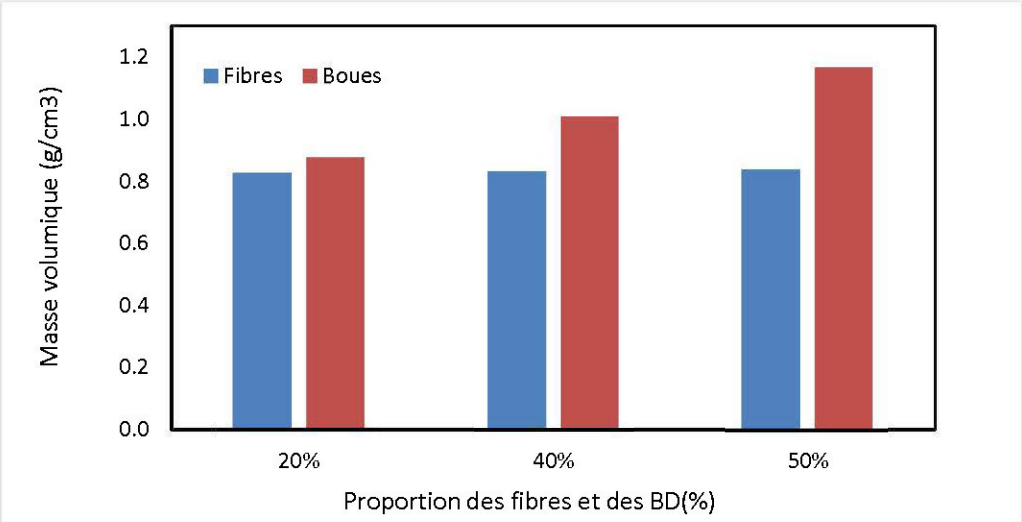


Figure 3.26: Comparaison entre la masse volumique des CBP issus de fibres kraft et de boues de désencrage à différentes proportions.

3.2.3.2 Comparaison entre les effets des fibres et des BD sur les propriétés mécaniques

Les composites fabriqués avec des fibres ont montré des modules d'élasticité et des contraintes maximales en traction largement supérieurs à ceux fabriqués avec des boues de désencrage quel que soit la proportion des fibres (Figures 3.27 et 3.28). Le module d'élasticité en traction des composites fabrique avec des fibres kraft est de 24% à 50% supérieur à celui des composites fabriqués avec des BD (Figure 3.27). De la même façon, la contrainte maximale en traction des composites issus de fibres est 46% à 69 % supérieure à celle des boues de désencrage (Figure3.28). Cela concorde avec les travaux de recherche de (Soucy.2007 ; Soucy et al, 2016) a travaillé avec les fibres

kraft et les boues kraft, ils ont obtenu des composites avec de meilleures propriétés de stabilité dimensionnelle par rapport aux composites issus de pâtes TMP et CTMP. Comparativement aux composites à base de fibres kraft, la déformation maximale des composites à base de BD est plus élevée (Figure 3.29). La différence est particulièrement importante dans le cas des composites contenant 20% de charge. Cela concorde avec celui de Migneault et al (2014) qui ont rapporté que les BD améliorent la ductilité des CBP qui se traduit par est dû à la présence des particules inorganiques et d'une grande quantité de glaise dans les BD.

Des tendances similaires sont observées pour les propriétés en flexion. Le module d'élasticité en flexion des composites issus des fibres de kraft est de 38% à 74% supérieur à celui des composites issus des BD (Figure 3.30). La contrainte maximale en flexion des CBP des fibres kraft est de 14% à 36% supérieure à celle des CBP issus des BD (Figure 3.31). La déformation maximale en flexion des composites issus des BD est supérieure à celle des composites issus des fibres kraft (Figure 3.32).

Les composites issus de BD montrent des valeurs d'énergie d'impact supérieures à celles issus des fibres kraft (Figure 3.33) quel que soit la proportion des charges. L'énergie d'impact diminue avec l'augmentation de la proportion des fibres et des BD. Ce résultat est attendu puisqu'il est bien connu que la ductilité des composites diminue avec l'augmentation de la proportion des fibres. Ces résultats concordent avec plusieurs études antérieures dont ceux rapportés par Bouafif et al (2009).

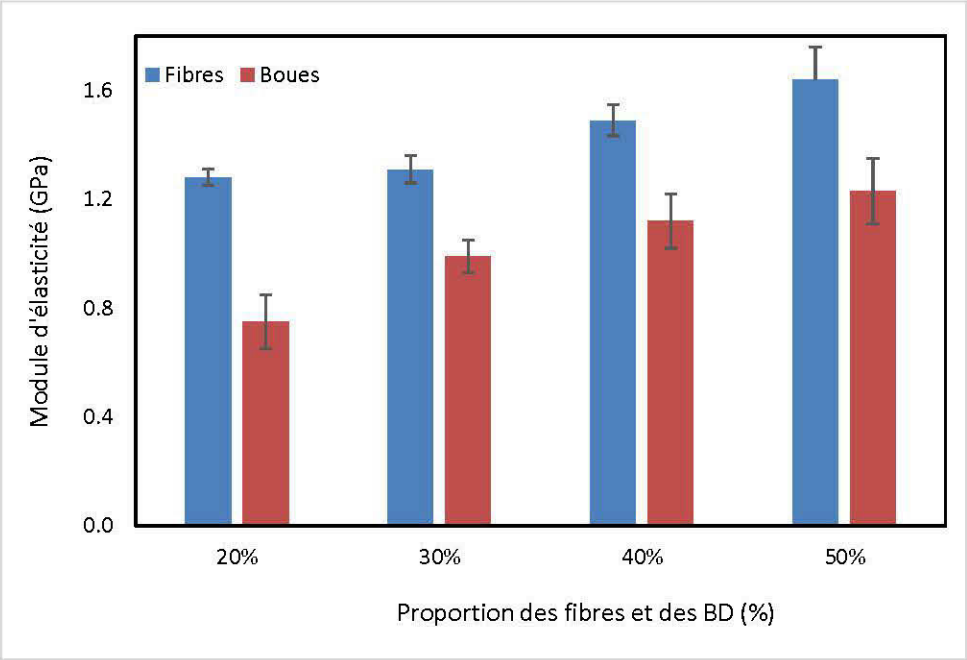


Figure 3.27: Comparaison entre le module d'élasticité en traction des CBP issus de fibres kraft et de boues de désencrage a différentes proportions.

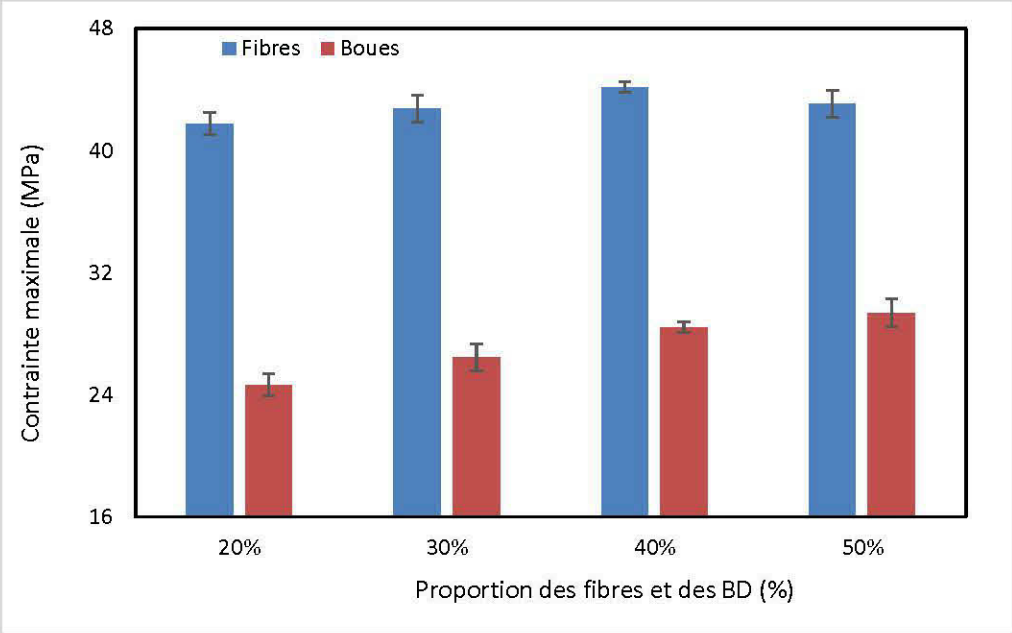


Figure 3.28: Comparaison entre la contrainte maximale en traction des CBP issus de fibres kraft et de boues de désencrage à différentes proportions.

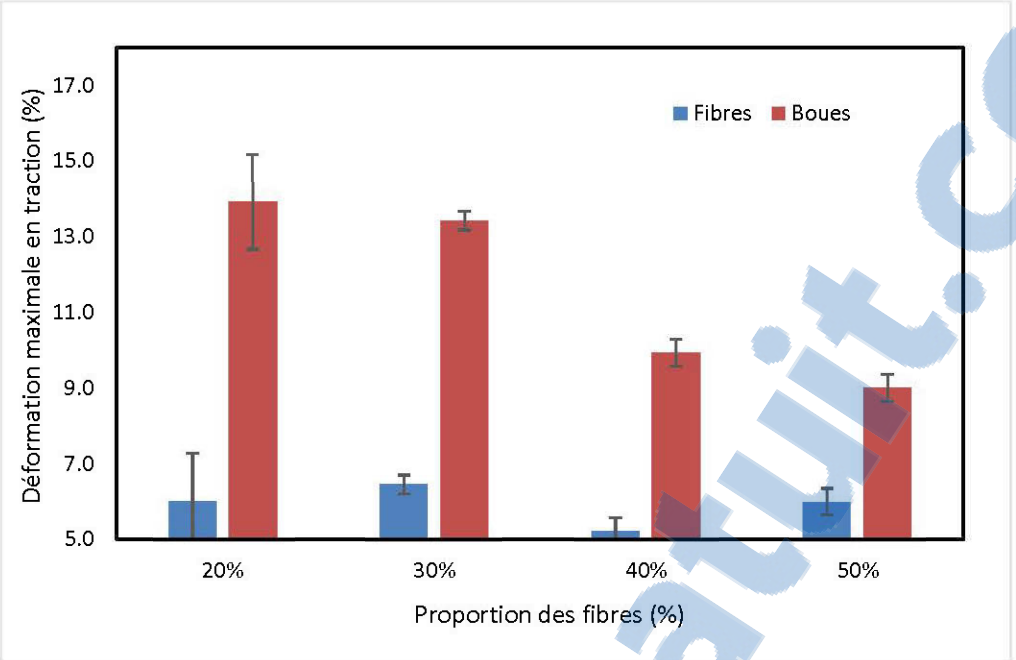


Figure 3.29: Comparaison entre la déformation maximale en traction des CBP issus de fibres kraft et de boues de désencrage à différentes proportions.

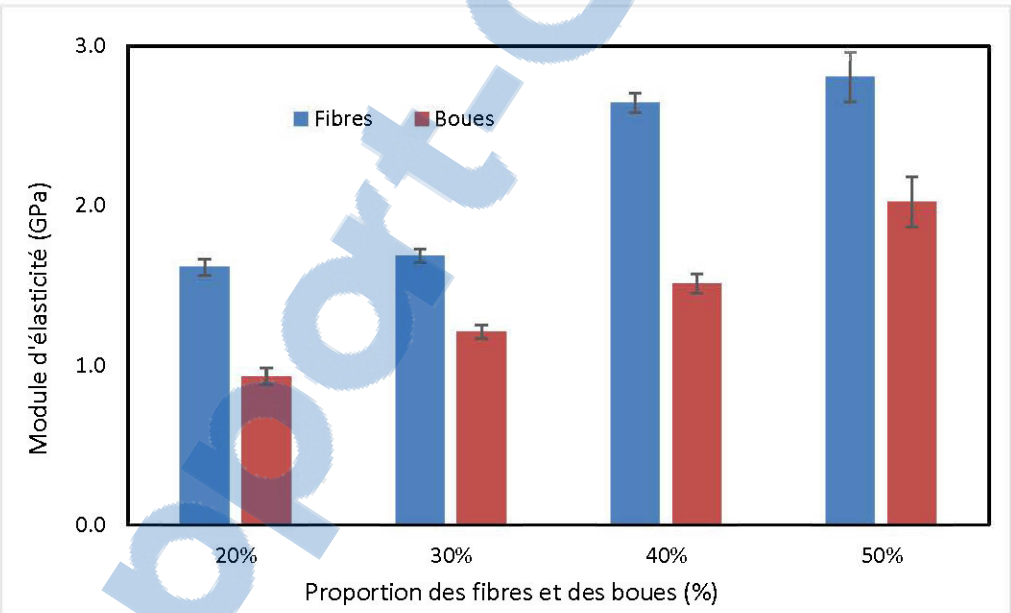


Figure 3.30: Comparaison entre le module d'élasticité en flexion des CBP issus de fibres kraft et des boues de désencrage à différentes proportions.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

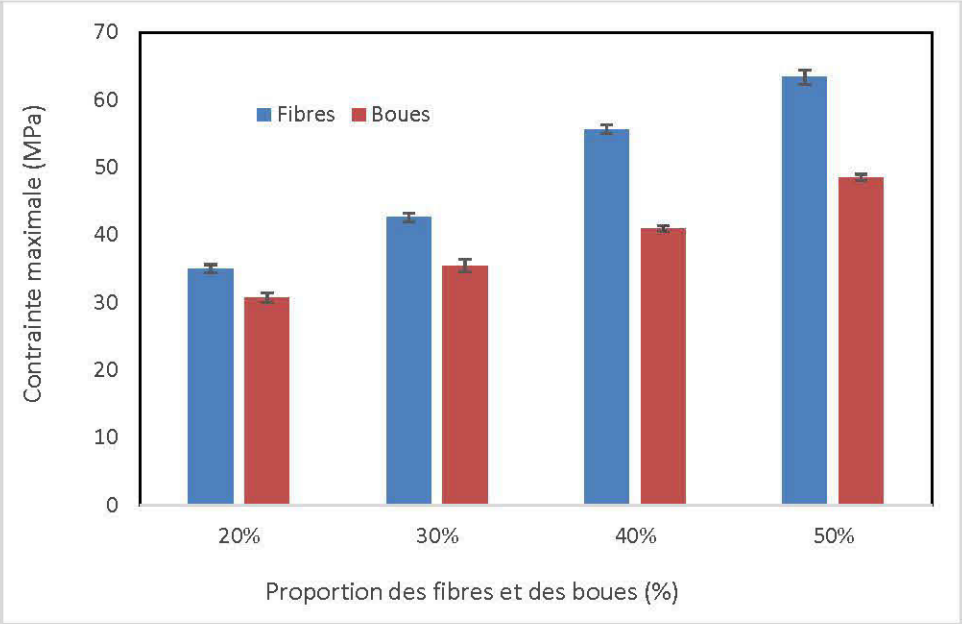


Figure 3.31: Comparaison entre la contrainte maximale en flexion des CBP issus de fibres kraft et des boues de désencrage à différentes proportions.

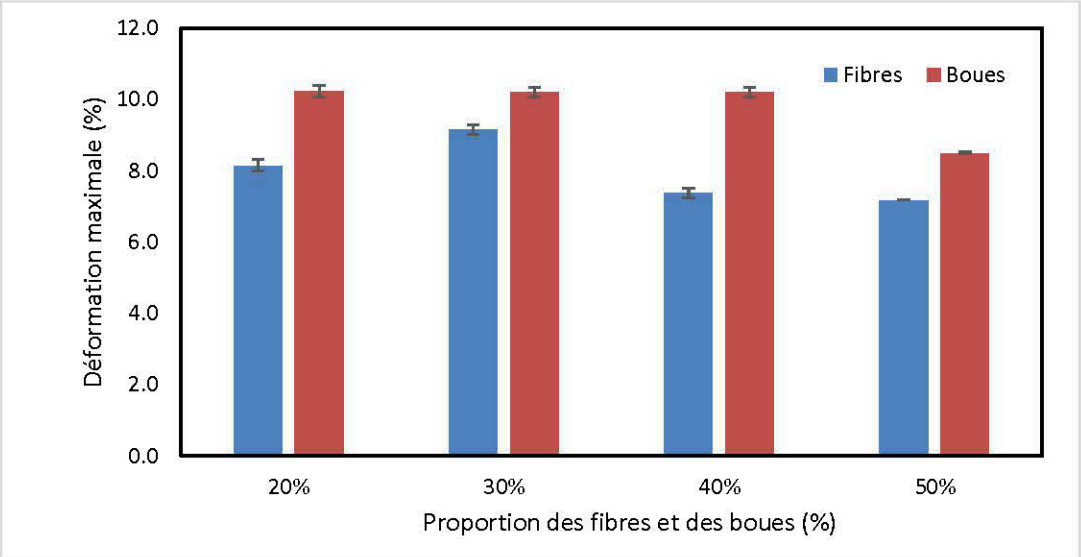


Figure 3.32: Comparaison entre la déformation maximale en traction des CBP issus de fibres kraft et de boues de désencrage à différentes proportions.

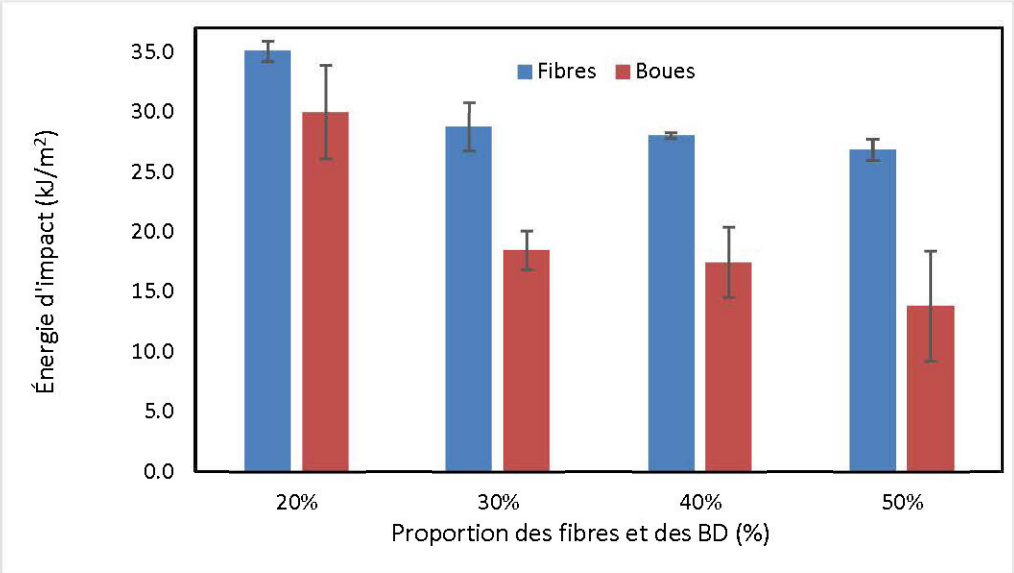


Figure 3.33: Comparaison entre l'énergie d'impact des CBP issus de fibres kraft et des boues de désencrage à différentes proportions.

3.2.4 Effet combiné des boues et des fibres kraft sur les propriétés des composites CBP

Les résultats des sections précédentes indiquent clairement que les fibres kraft donnent des composites avec de meilleures propriétés physico-mécaniques que les BD. Pour étudier l'effet combiné des fibres et des BD sur les propriétés physico-mécaniques des composites, nous analyserons les variations de ces propriétés à un taux de charge fixe de 40%. Les résultats des propriétés physiques et mécaniques pour toutes les combinaisons des fibres et des BD sont présentés à l'annexe II.

3.2.4.1 Effet combiné des BD et des fibres kraft sur les propriétés physiques des CBP

On illustre à la figure 3.34 la variation de la masse volumique à un taux de charge fixe de 40%. Les composites les moins denses sont ceux contenant 40% de fibres kraft et les composites les plus denses sont ceux contenant 40% de BD. La masse volumique augmente linéairement avec la proportion des BD. L'augmentation de la masse volumique avec la proportion de BD s'explique par l'augmentation du contenu en minéraux tel que discuté dans les sections précédentes.

Les composites contenant la plus forte proportion de fibres kraft montrent les valeurs d'absorption d'eau (Figure 3.35) et de gonflement (Figure 3.36) les plus faibles. Ces deux propriétés augmentent linéairement avec l'augmentation de la teneur en BD. La faible absorption d'eau des composites contenant des fibres kraft s'explique par la cristallinité des fibres tel que discuté précédemment. L'augmentation de de l'absorption d'eau avec l'augmentation des proportions de BD s'explique, entre autres, par la présence de matériaux hydrophiles tel que les fibres de bois et de la glaise. Ce résultat est surprenant et contredit les résultats de travaux antérieurs dont ceux de Migneault et al (2014). En fait, les BD contiennent des quantités importantes de minéraux qui sont hydrophobes dons ils n'absorbent pas d'eau. Il est possible que ces minéraux n'adhèrent pas aux polymères et aux fibres de bois et occuper ces interfaces. L'augmentation de l'absorption d'eau et du gonflement avec la teneur en charges hydrophiles concordent avec plusieurs études antérieurs (Li et al, 2004, Li et Wolcott et Schirp 2005, Migneault et al, 2008, Stark et al, 2004;). Slama (2009) suggère que les fibres hydrophiles subissent ainsi des déformations importantes lorsqu'elles se trouvent dans milieu humide. Par ailleurs, les résultats des figures 3.35 et 3.36 confirment ceux sur l'effet du procédé présentés dans les sections précédentes. Les composites issus du procédé laboratoire montrent une meilleure stabilité dimensionnelle que ceux issus du procédé pilote. La longueur des fibres aux deux laboratoires explique ces résultats,

puisque à l'échelle laboratoire nous avons une longueur des fibres qui est de 0.67mm. Les fibres longues ont tendance à se rassembler dans le mélange, ce qui réduit leurs dispersions et va faciliter la pénétration d'eau.

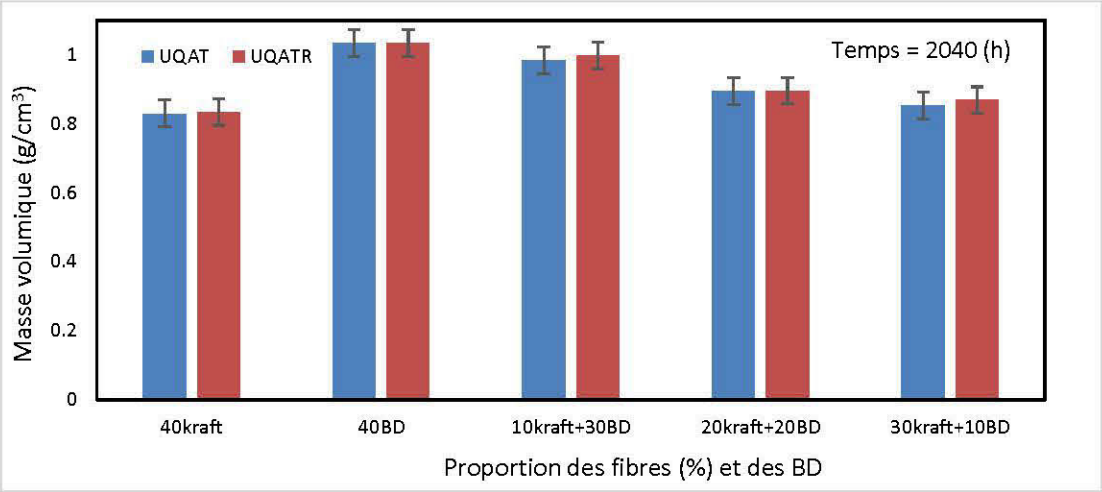


Figure 3.34: Effet combiné des fibres et de BD sur la masse volumique des composites à un taux de charge de 40%.

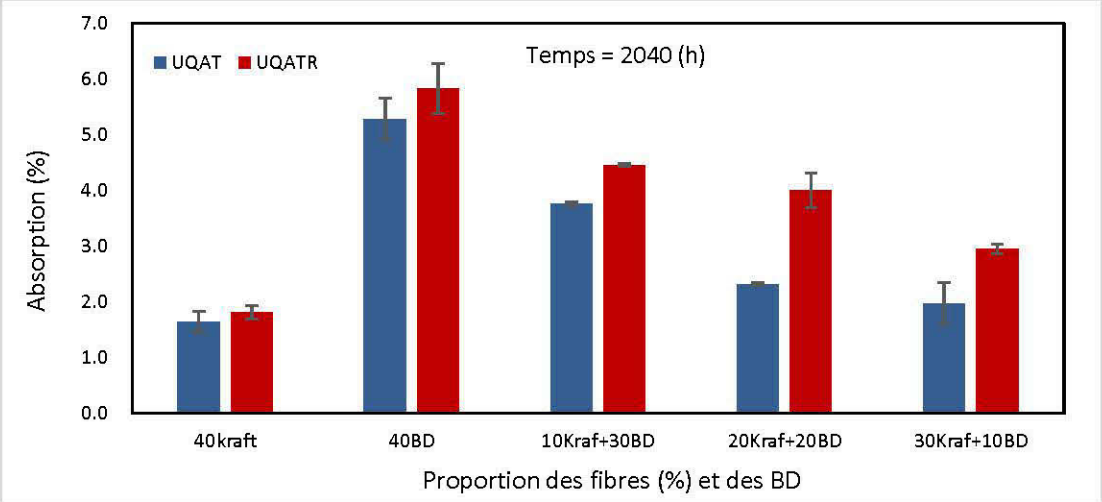


Figure 3.35: Effet combiné des fibres et de BD sur l'absorption des composites mis en forme selon les deux procédés à 40% de charge après 85 jours d'immersion à l'eau.

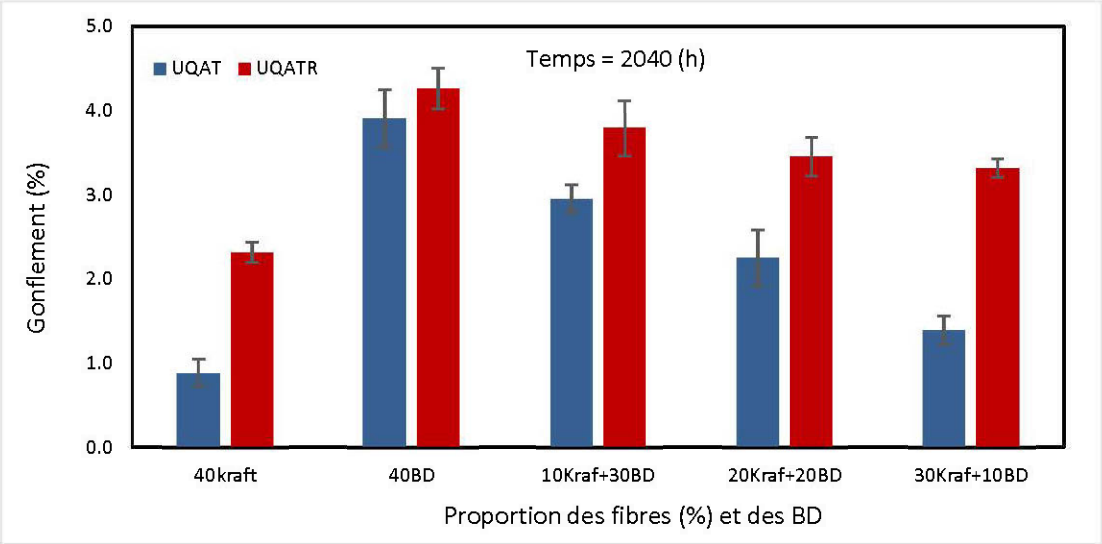


Figure 3.36: Effet combiné des fibres et des BD sur le gonflement des CBP mis en forme selon les deux procédés à 40% de charge après 85 jours d'immersion à l'eau.

3.2.4.2 Effet combiné des BD et des fibres kraft sur les propriétés mécaniques

On illustre aux figures 3.37 à 3.45 les variations des propriétés mécaniques à un taux de charge constant à 40% tout en variant les proportions de fibres et de BD. Ces illustrations indiquent clairement que les modules d'élasticités en flexion (Figure 3.37) et en traction (Figure 3.38) ainsi que les contraintes maximales en flexion (Figure 3.39) et en traction (Figure 3.40) sont les plus élevées à une proportion de fibres kraft à 40% et les plus faibles à une proportion de BD de 40%. Toutes ces propriétés montrent une diminution quasi linéaire avec l'augmentation de la proportion des BD. Tel que discuté dans les sections précédentes, l'amélioration des propriétés des CBP avec la proportion des fibres s'explique par la rigidité des fibres comparativement à la matrice, la cristallinité des fibres kraft et par une meilleure distribution des charges dans les composites lors des sollicitations mécaniques (Soucy 2007 ; Bouafif et al, 2009). Ces résultats concordent avec ceux de plusieurs études antérieures (Beg 2007; Bouafif et

al, 2009; Godard et al, 2008 ; Li et al, 2004 ; Migneault et al, 2008 ; Soucy, 2007; Wolcott et Schirp, 2005).

Malgré que les CBP contenant des BD sont moins résistants que ceux contenant des fibres kraft, ils sont plus résistants que le PEHD vierge tel que proposé par Haddar et al (2016) et Migneault et al (2014). La combinaison de fibres et de BD quel que soit les proportions donnent des composites plus résistants que le PEHD et les composites contenant seulement des BD. Ainsi, il est possible de valoriser les BD combinées à des fibres de bois pour la production de CBP.

Par ailleurs, les résultats des figures 3.37 à 40, confirment que le procédé pilote donne des composites avec de meilleures propriétés que celui du laboratoire tel que discuté dans la section 3.2.1. Ces résultats s'expliquent par le fait que les fibres kraft utilisées dans le procédé pilote sont plus longues que ceux dans le procédé laboratoire. Ce résultat concorde avec ceux de Migneault et al (2007; 2008) et Bouafif et al (2009).

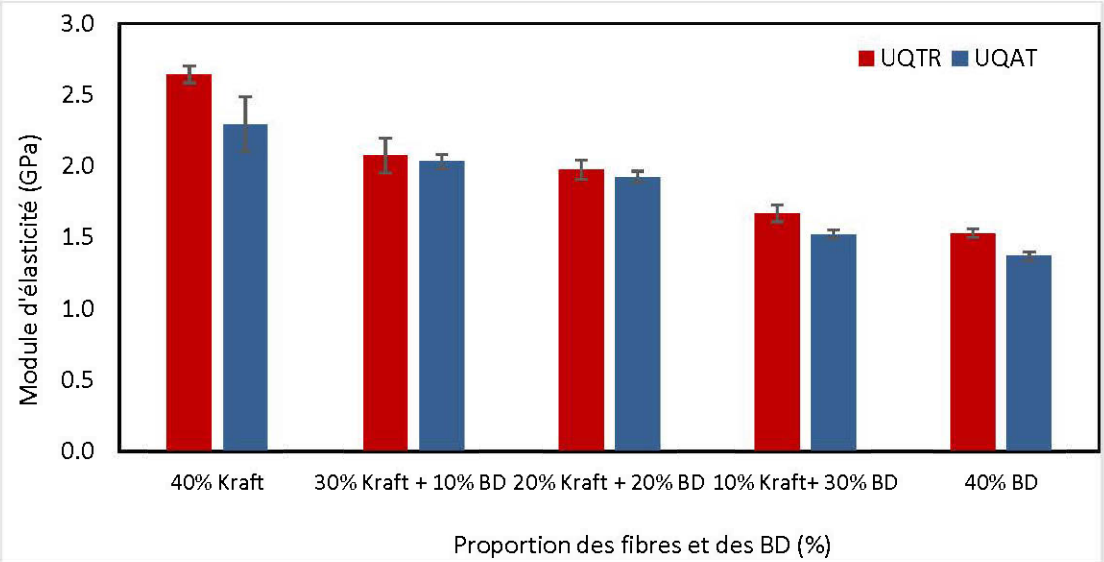


Figure 3.37: Effet combiné des fibres et de BD sur le module d'élasticité en flexion des composites mis en forme selon les deux procédés à un taux de charge de 40%.

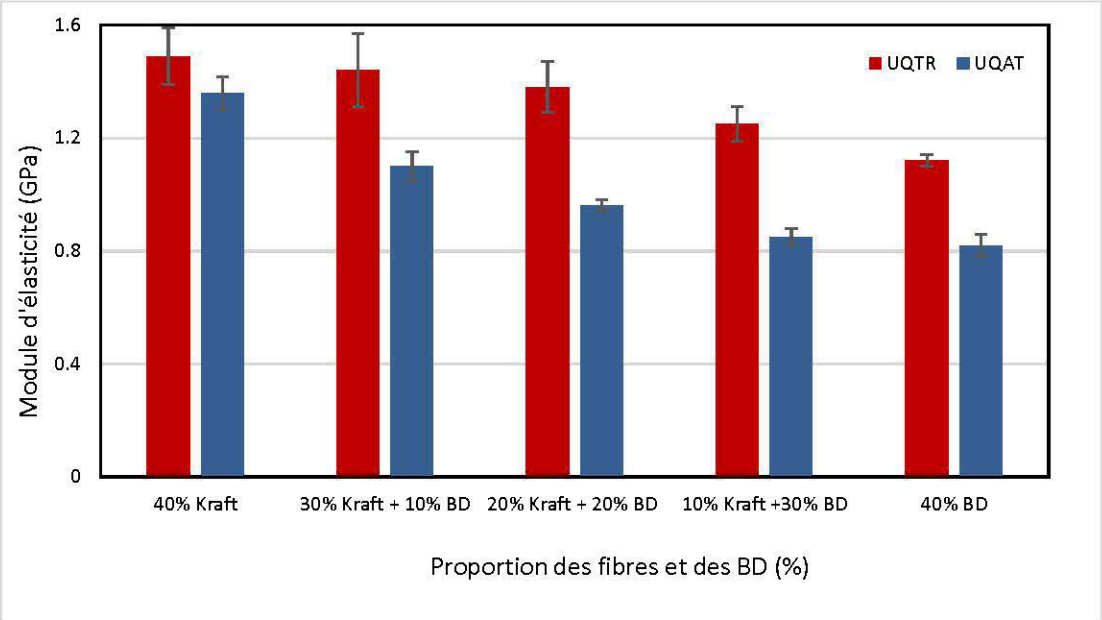


Figure 3.38: Effet combiné des fibres et de BD sur le module d'élasticité en traction des composites mis en forme selon les deux procédés à un taux de charge de 40%.

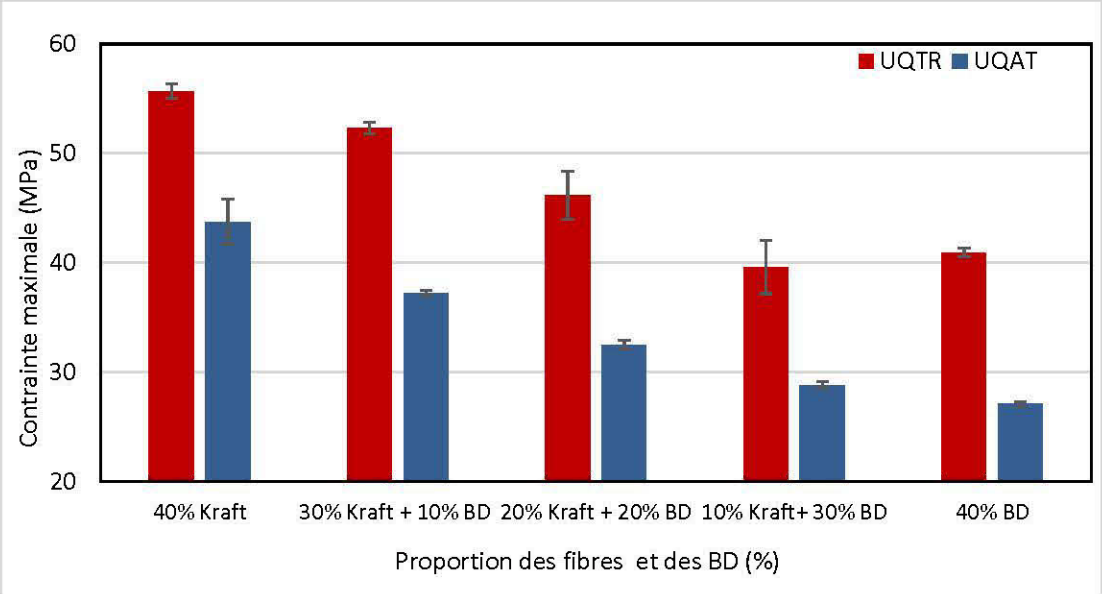


Figure 3.39: Effet combiné des fibres et de BD sur la contrainte maximale en flexion des composites mis en forme selon les deux procédés à un taux de charge de 40%.

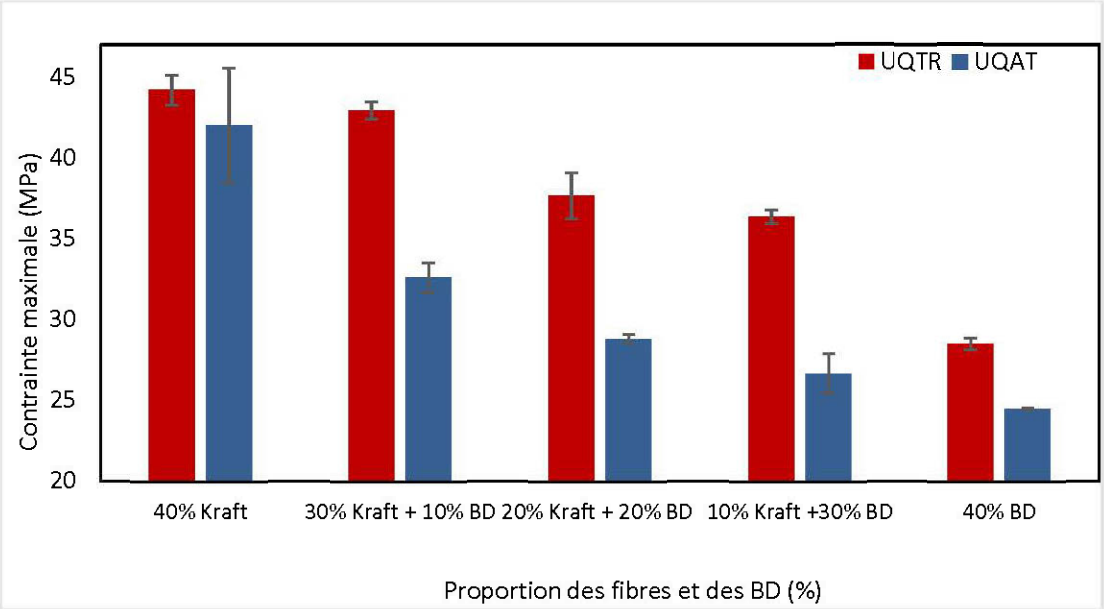


Figure 3.40: Effet combiné des fibres et de BD sur la contrainte maximale en traction des CBP mis en forme selon les deux procédés à un taux de charge de 40%.

Les déformations maximales en traction (Figure 3.41) et en flexion (Figure 3.42) les plus faibles sont obtenues pour les composites à 40% de fibres alors que les déformations les plus faibles sont obtenues avec 40% de BD. La diminution de la déformation maximale avec l'augmentation de la proportion de fibres de bois concorde avec les résultats des études antérieures (Arrakhiz et al, 2013; Godard et al, 2008; Migneault 2007, Pasquini et al, 2008; Steckel et al, 2006).

La substitution de fibres kraft avec des BD améliore les déformations maximales en traction (Figure 3.41) et en flexion (Figure 3.42). Migneault et al (2014) rapportent aussi que la déformation maximale en traction est plus élevée pour les composites à base de BD comparativement à ceux fabriqués avec des fibres de bois. La déformation maximale en traction est une mesure indicative de la ductilité des matériaux (Baïlon et Dorlot 2005). Or, on sait que la ductilité est un point faible des CBP qui limite leur potentiel d'utilisation pour différentes applications. L'amélioration de cette propriété est d'intérêt à la fois scientifique et industriel. Ainsi, l'amélioration observée de la

déformation maximale en traction avec l'incorporation des BD est prometteuse en termes d'amélioration de la ductilité des CBP.

Les résultats des figures 3.41 et 3.42 confirment les résultats de la section 3.2.1 concernant l'effet du procédé sur la ductilité des CBP. Les composites issus du procédé laboratoire sont plus ductiles que ceux du procédé pilote.

L'énergie d'impact est une propriété qui détermine la ténacité des matériaux (Baïlon et Dorlot 2005). La figure 3.43, illustre l'énergie d'impact à 40% de charge tout en variant les proportions de fibres et de BD. Les composites avec la plus forte proportion de fibres kraft sont les plus tenaces tel que le montre l'énergie d'impact la plus élevée à 40% de fibres kraft. Les composites avec 40% de BD sont les moins tenaces. L'énergie d'impact diminue de façon monotone avec l'augmentation de la proportion de BD.

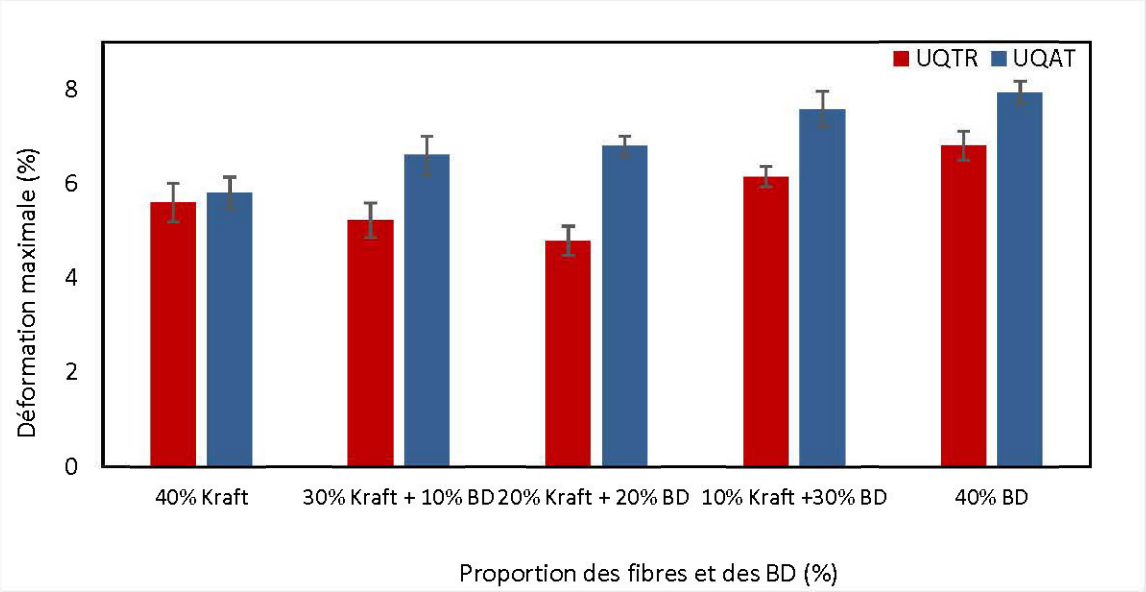


Figure 3.41: Effet combiné des fibres et de BD sur la déformation maximale en traction des CBP mis en forme selon deux procédés à un taux de charge de 40%.

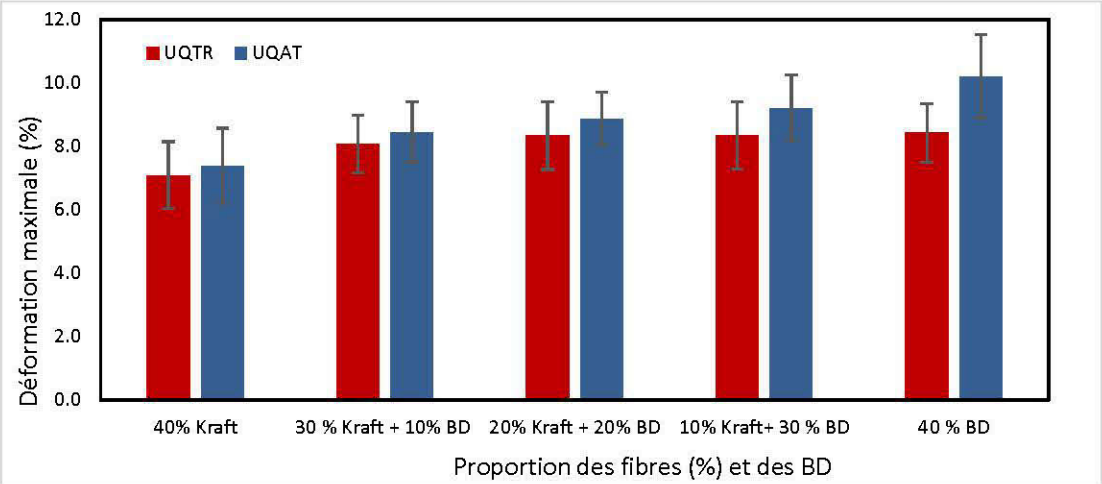


Figure 3.42: Effet combiné des fibres et de BD sur la déformation maximale en flexion des CBP mis en forme selon deux procédés à un taux de charge de 40%.

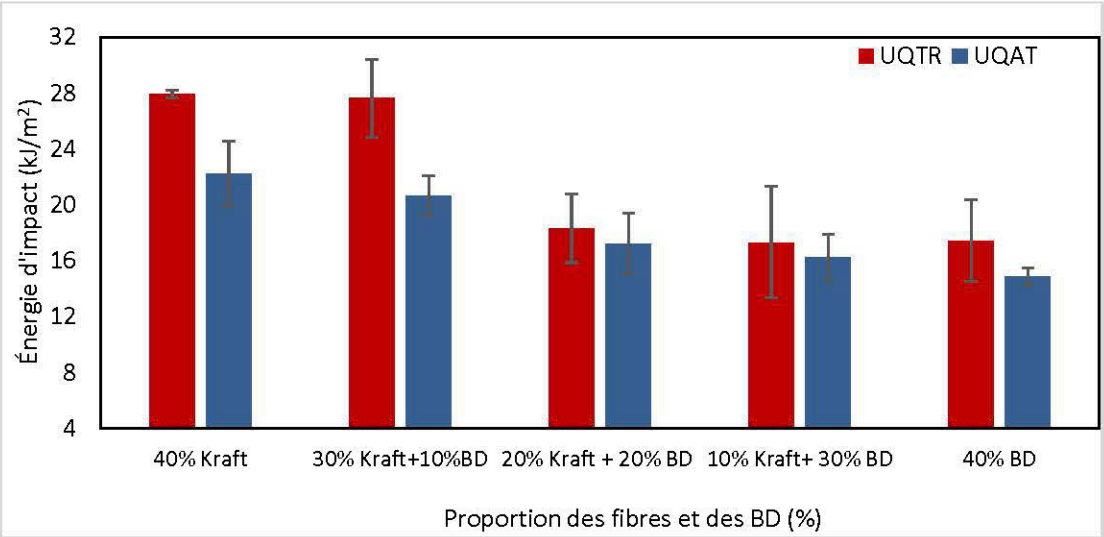


Figure 3.43: Effet combiné des fibres et de BD sur l'énergie d'impact des CBP mis en forme selon deux procédés à un taux de charge de 40%.

Finalement, les résultats de la figure 3.43 confirment les résultats de la section 3.2.1 concernant l'effet du procédé sur la ténacité des composites. Les composites issus du procédé pilote sont plus tenaces es que ceux du procédé laboratoire.

CHAPITRE IV

CONCLUSIONS

Cette étude a permis d'évaluer le potentiel des boues de désencrage pour la production des composites bois-polymères. Il a été possible de mettre en forme contenant jusqu'à 50% de boues de désencrage à l'aide de deux procédés (laboratoire et laboratoire pilote).

Cette étude a permis, entre autres d'étudier l'évolution des propriétés physico-mécaniques en fonction du procédé de mise en forme et des proportions des BD et de fibres de bois.

Deux procédés de mise en forme ont été étudiés, un procédé pilote (UQTR) et un laboratoire (UQAT). D'une façon générale, le procédé de mise en forme pilote a donné des composites avec de meilleures propriétés mécaniques pour toutes les formulations étudiées. Par contre, le procédé de mise en forme laboratoire a donné des composites avec une meilleure stabilité dimensionnelle pour toutes les formulations étudiées.

La proportion des fibres kraft et des boues ont des effets significatifs sur l'ensemble des propriétés physico-mécaniques des composites. L'augmentation des proportions des boues et des fibres améliore généralement les propriétés mécaniques des composites mais affecte négativement leur stabilité dimensionnelle.

À l'exception de la ductilité, les composites issus de fibres kraft montrent de meilleures propriétés physiques et mécaniques comparativement aux composites issus des boues de désencrage. Ces derniers améliorent la ductilité quel que soit la formulation des

composites. Ainsi l'augmentation de la proportion des fibres kraft dans les formulations se traduit par une augmentation linéaire des propriétés mécaniques des composites. Par contre, l'augmentation des proportions des boues de désencrage dans les formulations se traduit par des diminutions des propriétés mécaniques des composites. Concernant la stabilité dimensionnelle, l'augmentation des proportions des deux types de charge se traduisait par des augmentations de l'absorption d'eau et du gonflement. L'effet négatif des BD sur la stabilité dimensionnelle est plus important que celui des fibres kraft.

Ainsi, les conclusions précédentes indiquent que tous les objectifs du projet ont été atteints. Certaines hypothèses ont été affirmées et d'autres infirmées.

La première hypothèse qui stipule qu'il est possible d'utiliser les boues de désencrage pour produire des composites bois-boues-polymères avec les mêmes paramètres de procédé de production de composites-bois-polymères (CBP) a été confirmée. Les deux procédés étudiés ont permis de produire des composites avec des proportions de boues de désencrage allant jusqu'à 50%.

La deuxième hypothèse qui stipule que l'utilisation des boues de désencrage dans la production des composites se traduira par une meilleure stabilité dimensionnelle comparativement aux CBP issus de fibres kraft a été infirmée. En effet, les fibres kraft ont produit des composites avec une meilleure stabilité dimensionnelle que ceux issus de boues de désencrage. Ce résultat a été expliqué par la cristallinité des fibres kraft, très riches en cellulose comparativement aux fibres de bois.

La troisième hypothèse qui stipule que les CBP fabriqués avec des fibres longues ont de meilleures propriétés physico-mécaniques que les ceux fabriqués avec des fibres courtes a été partiellement confirmée. Dans le procédé pilote, les fibres de bois utilisées sont plus longues que celles utilisées dans le procédé laboratoire. Cela s'est traduit par

de meilleures propriétés mécaniques des composites. Par contre, la stabilité dimensionnelle a été meilleure pour les composites mis en forme à l'aide du procédé laboratoire.

La quatrième hypothèse qui stipule que l'introduction des BD dans les CBP n'influe pas négativement les propriétés mécaniques des composites tout en permettant de maintenir une certaine ductilité aux composites ne s'est malheureusement pas avérée. En effet, malgré un effet positif sur la ductilité, les BD ont généralement eu un effet négatif sur la résistance à la traction, la rigidité et la résistance à l'impact.

Les perspectives

Puisque les résultats révèlent que nous avons des échantillons qui ont une faible absorption en eau, autant dans le procédé de mise en forme que lorsque le contenu en fibres augmente, il serait intéressant de voir la variation des propriétés mécaniques en fonction de la teneur en humidité des CBP étudiées et par la suite, d'optimiser les paramètres de mise en forme pour les CBP fabrique avec le mélange kraft boues. L'optimisation devrait tenir en compte des facteurs, tels la morphologie et la proportion des fibres. Les résultats du présent projet indiquent que les CBP obtenus avec le mélange (30% de Kraft +10 % de boue) ont les meilleures caractéristiques mécaniques et physique. L'intérêt de ce projet consistait à évaluer le potentiel de valorise les boues en raison de la problématique environnementale. Suite à nous résultats l'utilisation de BD comme agent de remplissage dans les composites bois plastiques est envisageable elles pourront avoir un rôle important dans le développement des propriétés des composite bois plastique.

BIBLIOGRAPHIE

Ahmadi B., Al-khaja W. (2001). Utilization of paper waste sludge in the building construction industry. Resources conservation and recycling, 32:105-113.

Adhikary K.B., Pang S., stagier M.P. (2008). Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites. Based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). Composite Part B., 39:807-815.

Albouy W. (2013). De la contribution de la viscoélasto-plasticité au comportement en fatigue de composites à matrice thermoplastique et thermodurcissable. Thèse de doctorat, Institut des Sciences Appliquées de Rouen, France, 188 pages.

Arrakhiz F.Z., El Achaby M., Malha M., Bensalah M.O., Fassi-Fehri O., Bouhfid R., Benmoussa k., Qaiss A. (2013). Mechanical and thermal properties of natural fibers reinforced polymer composites: Doum/low density polyethylene. Materials and Design. 43:200–205.

Ashori A., Noubakhsh A. (2010). Reinforced polypropylene composites: effects of chemical compositions and particle size). Bioresource Technology. 101:2515-2519.

ASTM D 570 (1998). Standard Test Method for Water Absorption of Plastics1. American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA.

ASTM D1037 (1999). Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials1. American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA.

ASTM D 790 (2003). Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials1. American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PAASTM D 638 (2003). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA.

ASTM D 7031 (2004). Standard Guide for Evaluating Mechanical and Physical Properties of Wood- Plastic Composite Products. American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA.

Bilan annuel de conformité environnementale, sécateurs des pâtes et papiers B.A.C.E. (2005). Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. Québec, Canada.

Baïlon J.P., Dorlot J.M, (2005). Des matériaux, troisième édition, presses internationales Polytechniques, école Polytechnique de Montréal, 736 pages.

Beg M.D.H. (2007). The improvement of interfacial Bonding, Weathering and Recycling of Wood Fiber Reinforced Polypropylene Composites. Thèse de doctorat, Université de Waikato, Hamilton, Nouvelle Zélande.Bledzki A.K, Gassan J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. Progress Polymer Science. 24:221-274.

Bledzki A. K., Faruk O., Huque M. (2003). Physic-mechanical studies of wood fibre Reinforced composites. Polymer Plastic Technology and Engineering. 41:435-451.

Bellamy K.L., Chong C., Cline R.A. (1995). Paper sludge utilization in agriculture and container nursery culture. Journal of journal of Environnemental Quality 24:1074-1082.

Bendahou A., Habbibi Y., Kaddami H., Dufresne A. (2009). Matériaux composites à base des fibres lignocellulosiques et de matrices thermoplastiques (PP et PEBD). Revue Roumaine de Chimie, 54:557-563.

Bengtsson, M., Oksman K. (2006). The Use of Silane Technology in Crosslinking Polyethylene/Wood Flour Composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 37:752-765.

Bledzki, A.K., Gassan, J., Theis, S. (1998). Wood-filled thermoplastic composites. Mechanics of composite materials, 34(6):563-568.

Bodig J., et Jayne, B. A. (1993). Mechanics of wood and wood composites. Reprinted edition, Krieger Publishing Company, Malabar, Floride, 712 pags.

Rapport-Gratuit.com

Boisselle, F. (1999). Évaluation des performances de l'incinération de boues de désencrage dans un lit fluidisé circulant interne. Thèse de doctorat de l'école polytechnique de Montréal, Québec, Canada, 144 pages.

Bouafif H, Koubaa A, Perré P, Cloutier A, Riedl B (2008). Analysis of among-species variability in wood fiber surface using DRIFTS and XPS: effects on esterification efficiency. Journal of Wood Chemistry and Technology 28:296-315.

Bouafif H., Koubaa A., Perré P., Cloutier, A. (2009). Effects of fiber characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites. Composites Part A. : Applied Science and Manufacturing, 40:1975-1981.

Bouafif, H. (2009). Effet des caractéristiques intrinsèques des fibres de bois et des procédés de mise en forme sur la performance des matériaux composites bois/thermoplastiques. Thèse de doctorat Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Québec, Canada, 215 pages.

Bowyer J.L., Haygreen J.G., Shmulsky, R. (2005). Le bois et ses usages. Centre collégial de développement de matériel didactique (CCDMD), Cégep de Sainte-Foy. Traduction de la 4e édition Forest Product and Wood Science, 522 pages.

Brouillette, F. (1996). Valorisation des boues de désencrage par combustion. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, 59 pages.

Callister, D. W. (2001). Sciences et génie des matériaux. Modulo éditeur : Québec, Canada. pp.781.

Cardwell, M. (1994). Utilizing De-Inking Sludge – From Mill to Soil. Biocycle. March. CemenTech, Inc. http://www.cementech.com

Carlborn K., Matuana L.M. (2006). Functionalization of wood particles through a reactive extrusion process. Journal of Applied Polymer Science, 101(5):3131-3142.

Choulak S. (2002). Modélisation et commande d'un procédé d'extrusion réactive.

Thèse de doctorat, Université Claude Bernard-Lyon 1, France, 329 pages.

Centre de recherche industriel du Québec (CRIQ). (2003). Profil des produits forestiers, deuxième transformation. Produits composites, bois-polymère. Québec : ministère des Ressources naturelles, 53 page.

Davis E, Shaler SM, Goodell B (2003). The incorporation of paper deinking sludge into fiberboard. Forest Products Journal, 53(11/12):46-54.

Diehn K., Zuercher, B.A. (1990). Waste management program for paper mill sludge high in ash, Tappi, Journal 73(4):81-86.

Eck, T. H. (1986). Primary and Secondary Sludge Disposal by Spray Irrigation, Tappi Journal 69(11):54-59.

El Hadji B. LY. (2008). Nouveaux matériaux composites thermoformables à base des fibres de cellulose. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.

El Ouazzani, D.C. (2005). Caractérisation physico-chimique et valorisation en bâtiment et travaux publics des cendres issues de 1' incinération des boues de papeterie. Thèse de doctorat de l'iInstitut national des sciences appliquées de Lyon, Université de Lyon, France, pages 16, 20 et 37.

Espert A, Vilaplana F, Karlsson S. (2004). Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one- year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties. Composites, part A, 35:1267-1276.

Estournel-Pelardy, C. (2011). Étude de la structure moléculaire de la matière organique des sols. Nouvelles stratégies de dégradation chimique. Thèse de doctorat, Université de Poitiers, France, 229 pages.

Falk R. H., Vos, D., Cramer, S. M. (1999). The comparative performance of wood fiber-plastic and wood-based panels. Pages 269-274, Compte rendu du 5th International Conference on Wood Fiber-Plastic-Composites, Madison, Wisconsin, May 26-27, 1999.

Faruk O., Bledzki A.K., Fink H. P., Sain, M. (2012). Bio-composites rreinforced with natural fibers: 2000–2010. Progress in Polymer Science. 37(11):1552–1596.

Fontanille M., Vairon, P. (1994) Polymérisation, traité plastiques et composites. Techniques de L'ingénieur (A3 040).

Garceau J., Chen R., Danneault C., Goel K., Kokta B.V., Koran Z., Lavallée H.C., Law K.N., Lebel R.G., Lemay Y., et Rémillard, B. (1989). Pâtes mécaniques et chimico-mécaniques. Section technique de l'ACPPP, 299 pages.

Gamstedt, E. K., Neagu, R. C., Bogren, K et Lindstrom, M. (2006). More mechanical approaches to development of improved wood-fibre bio composites. Proc International Conference on Progress in Wood and Bio-Fibre Plastic Composites, Toronto, Canada.

Geng X., Deng J., Zhang, S.Y. (2006). Effects of hot-pressing parameters and wax content on the properties of fibreboard made from paper mill sludge. Wood and Fiber Science, 38:736-741.

Geng, X., Deng, J. et Zhang, S.Y. (2007). Pulp and paper sludge as a component of wood adhesive formulation. Holzforschung, 61:688-692.

George J., Sreekala M.S., Thomas, S. (2001). A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites. Polymer Engineering and Science, 41:1471-1485.

Gilbride K. A., Fulthorpe, R. R. (2004). A survey of the composition and diversity of bacterial populations in bleached Kraft pulp-mill wastewater secondary treatment systems. Canadian Journal of Microbiology, 50:633-644.

Godard F., Vincent M., Agassant J.F., Vergnes, B. (2008). Étude du comportement rhéologique et des propriétés mécaniques de composites sciures de bois-polyéthylène haut densité. Rhéologie, 13:9-21.

Haddar M., Elloumi A., Koubaa A., Elhalouani, F. (2016) Effect of High Content of Deinking Paper Sludge (DPS) on the Reinforcement of HDPE. Journal of

Polymers and the Environment (JOOE), En ligne: DOI: 10.1007/s10924-016-0837-9.

Hansen N.M. L., Plackett, D. (2008). Sustainable Films and Coatings from Hémicelluloses: A Review. Biomacromolecules, 9(6), 1493-1505.

Harrington J.J., Astley R.J., Tang S., Neumann j. (1997). Modelling the influence of microfibril angle on stiffness and shrinkage in radiata pine. Pages 272-295 dans Proc. of IAWA /IUFRO International Workshop on the Significance of Microfibril Angle to Wood Quality.

Hazard C., Barette J.P., Mayer J., Darnell J., Lodish H., Baltimore, D. (1990). Mémo Tech Bois et matériaux associés Moléculaire Cell Biology, Second Edition. Scientific American Books, Distributed by W.H. Freeman and Company.

Ismail S.H., Bakar A.A. (2006). Effects of chemical modification of paper sludge filled polypropylene (PP)/ethylene propylene diameter polymer (EPDM) composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 25 (1):43-58.

Jacobson W., Sallee, B. (1992). Full-Scale Bubbling Fluidized-Bed Combustion System for Sludge disposed and Energy Generation for the Paper Recycling Process, TAPPI Environ. Conf. Proc., Richmond, Virginia, pp. 127-140

Jesùs, A.G. (2008). Feasibility of recycling pulp and paper mill sludge in the paper and board industries. Ressources, Conservation and Recycling 52:965-972.

Keener T. J., Stuart R. K., Brown T. K. (2004). Maleated coupling agents for natural fibre composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 35(3):357-362.

Koubaa, A. 1996. Amélioration de la résistance des liaisons dans le papier et le carton par raffinage et par pressage et séchage simultanés. Thèse de doctorat de l'Université du Québec à Trois-Rivières, Québec Canada, 271 pages.

Koubaa A, Cloutier A. et Villeneuve E. 2004. Potentiel de l'écorce pour la fabrication de panneaux composites par extrusion. Présentation dans le cadre du 72e congrès de L'ACFAS à Montréal.

Krigstin, S. et Sain, M. (2006). Characterization and potential utilization of recycled paper mill sludge. Conférence présentée au 91e Congrès annuel de l'Association Technique des Pâtes et Papiers du Canada (ATPPC), Montréal, Canada.

Krigstin, S. (2008). Characterization of recycled paper mill sludge an evaluation of potential applications. Thèse de doctorat, Université de Toronto, Ontario, Canada, 250 pages.

Kuan C.F., Kuan H.C., Ma C.C.M., Huang C.M. (2006) Mechanical, Thermal and Morphological Properties of Water-Crosslinked Wood Flour Reinforced Linear Low- Density Polyethylene Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 37:1696-1707.

Li H., Law S., Sain M. (2004). Process rheology and mechanical property correlations hip of wood flour-polypropylene composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 23(11):1153-1158.

Mahmood T., Elliott, A. (2006). A review of secondary sludge reduction technologies for the pulp and paper industry. Water research, 40:2093-2112.

Mabee, W.E. (2001). Study of woody fibre in paper mill sludge. Thèse de doctorat, Université de Toronto, Ontario, Canada 190 pages.

Makansi, J. (1984). Power from sludge, Power (New York) CISNN: 0032-5929. vol. 128, S. I-S. 16.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et lutte contre le changement climatique (MDDEP). (2001). Bilan annuel de conformité environnementale, secteur des pâtes et papiers. Québec : gouvernement du Québec. Chapitre 1.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). (2008). Bilan annuel de conformité environnementale, secteur des pâtes et papiers. Québec : gouvernement du Québec.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP). (2012). Bilan annuel de conformité environnementale, secteur des pâtes et papiers. Québec : gouvernement du Québec 5p.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP). (2013). Bilan annuel de conformité environnementale 2011, secteur des pâtes et papiers. Québec : gouvernement du Québec.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). (2015). Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 2011. Plan d'action à lier économie et environnement. Québec : gouvernement du Québec.

Migneault, S. (2007). Effets de la longueur des fibres sur la formation et les propriétés des composites bois-plastiques. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi.

Migneault S., Koubaa, A., Erchiqui, F., Chaala, A., Englund, K. et Wolcott, M.P. (2009). Effect of processing method and fiber size on the structure and properties of WPC. Composites Part A, 40 :80-85.

Migneault S., Koubaa, A., Nadji, H., Riedl, B., Zhang, T. et Deng, J. (2010b). Medium-density fibreboard produced using pulp and paper sludge from different pulping processes. Wood and Fiber Science, 42:292-303

Migneault S., Koubaa, A., Erchiqui, F., Chaala, A., Englund, K. et Wolcott, M. P. (2010 a). Application of micromechanical models to tensile properties of wood-plastic composites. Wood Science and Technology, 45:521-532.

Migneault S., Koubaa, A., Riedl, B., Nadji, H., Deng, J. et Zhang, S. Y. (2011a). Binderless fibreboard made from primary and secondary pulp and paper sludge. Wood and Fiber Science, 43:180-193.

Migneault S., Koubaa, A., Riedl, B., Wang, X.-M. et Deng, J. (2011b). Potential of pulp and paper sludge as a formaldehyde scavenger agent in MDF resins. Holzforschung, 65:403-409.

Migneault S. (2011). Recyclage des résidus papetiers pour la production de panneaux de fibres. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada, 114 pages.

Migneault S., Koubaa, A. et Perré, P. (2014). Effect of fiber origin, proportion, and chemical composition on the mechanical and physical properties of wood plastic composites. Journal of Wood Chemistry and Technology. 34:241-261.

Migneault S., Koubaa, A., Perré, P., Riedl, B. (2015). Effects of wood fiber surface chemistry on strength of wood-plastic composites. Applied Surface Science 343:11–18.

Miner, R. et al. (1991). Environmental considerations and information needs associated with an increased reliance on recycled fiber. Pages 343-362 dans Proc. Focus 95, TAPPI PRESS, Atlanta, GA.

Moo-Young H.K., Zimmie T.F. (1998). Geotechnical properties of paper mill sludge for use in landfill covers. Journal of geotechnical engineering, 124:1043-1051.

Morin, J.C. (2000). Guide de l`utilisation des profils plastiques. Syndicat national des profilés plastiques, Paris, France.

Ochoa de Alda, J. A. G. (2008). Feasibility of recycling pulp and paper mill sludge in the paper and board industries. Resources, Conservation and Recycling, 52:965-972.

Pandey, K.K. (1999). A Study of Chemical Structure of Soft and Hardwood and Wood Polymers by FTIR Spectroscopy. Journal of Applied Polymer Science 71:1969-1975.

Paunikallio T., J. Kasanen, M. Suvanto, Pakkanen T.T. (2003). Influence of maltreated polypropylene on mechanical properties of composite made of viscose fiber and polypropylene. Journal of Applied Polymer Science 87(12):1895-1900.

Panshin, A.J., de Zeeuw, C. 1980. Test book of Wood Technology, 4e edition, Mc Graw-Hill, New York, 722 pages.

Pizzi A (1983). Wood Adhesives chemistry and technology. Edited by A. Pizzi, Marcel Dekker Inc., NY, 364 pages.

Pasquini, D. et al. (2008). Surface esterification of cellulose: Processing and characterization of low-density polyethylene cellulose fibers composite. Composites Science and Technology, 68:193-201.

Rashid, M.T., Barry, D. et Goss, M. (2006). Paper mill bio solid application to agricultural lands: benefits and environmental concerns with special reference to the situation in Canada. Journal of Soil Science and Environnemental Management, 25:85-98.

Repellin, V. 2006. Optimisation des paramètres durée et température d'un traitement thermique du bois. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne et Université Jean Monnet de Saint-Etienne, France, 262 pages.

Riedl, B. (2007). Les adhésifs. Notes de cours, Université Laval, 177 pages.

Rowell R.M., J.K. Rowell et R.A. Young (1997). Paper and composites from agro-based resources. CRC Press, 446 pages.

Sanadi A.R., Caulfield D.F. et Rowell R.M. (1994). Reinforcing polypropylene with natural fibers. Plastics Engineering, 50(4):27.

Saputra H., Simonsen J., Li K. (2004). Effect of extractives on the flexural properties of wood plastic composites. Composite Interface, 11(7):515-524.

Scott, G.M., Smith A. (1995). Sludge Characteristics and disposed alternatives for the pulp and paper industry. Proc. of the 1995 International environmental conference, May 7-10; Atlanta, GA, Tappi press: 269-279.

Seymour R.B. (1988). Polymers are everywhere. Journal of Chemical Education, 65(4):327.

Simons, H.A. (1994). Méthodes de gestion des boues générées par les fabriques des pâtes et papiers. Rapport Synthèse Gouvernement du Québec, Ministère de l'environnement et de la faune.

Sjöström, E. (1993). Wood Chemistry: Fundamentals and Applications. 2e Édition, Academic Press, San Diego, 293 pages.

Slama, I. (2009) caractéristiques physico-mécaniques des composites bois-plastiques provenant de la valorisation des résidus des panneaux MDF- Étude des possibilités de recyclage. Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Québec. 115 pages

Smook, G. A. (2002). Handbook for Pulp and Paper Technologists. Angus Wilde Publications Inc. Vancouver, Canada, 425 pages

Son, J., Kim, H.-J. et Lee, P.-W. (2001). Role of paper sludge particle size and extrusion temperature on performance of paper sludge- thermoplastic polymer composites. Journal of Applied Polymer Science, 82 :2709-2718.

Soucy, J. (2007). Potentiel d'utilisation des fibres de papier dans la conception de composites bois polymères par une technologie d'extrusion. Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Québec, Canada, 159 pages.

Soucy J., Koubaa, A. Migneault, S. Riedl, B. (2016). Chemical composition and surface properties of paper mill sludge and their impact on High Density Polyethylene (HDPE) composites. Journal of Wood Chemistry and Technology, 36(2):77-93.

Srinivasan, D., Unwin, J. P. (1995). Pulp and paper effluent management. Water Environment Research. 67(4):531-544.

Stark, N. M. (2001). Influence of moisture absorption on mechanical properties of wood flour-polypropylene composites. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 14:421-432.

Stark N.M., Rowlands, R.E. (2003). Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. Wood and Fiber Science, 35(2):167–174.

Stark N.M., Matuana, L.M. et Clemons, C.M. (2004). Effect of processing method on Surface and weathering characteristics of wood–flour/HDPE composites. Journal of applied polymer science, 93:1021–1030 p.

Steckel V., Clemons C.M., Thoemen H. (2006) Effects of material parameters on the diffusion and sorption properties of wood-flour/polypropylene composites. Journal of Applied Polymer Science (103) :752-763.

Stevanovic T., Perrin, D. (2009). Chimie du bois, Presses polytechniques et universitaires romandes, 256 pages.

Taramian A., Doosthoseini, K., Mirshokraii, S.A. et Faezipour, M. (2007). Particleboard manufacturing: An innovative way to recycle paper sludge. Waste Management, 27, 1739-1746.

Trotignon J.P., Verdus, J., Dobraczynski, A., Piperau, M. (1996). Matière plastique, structures-propriétés, mise en œuvre, normalisation, Edition Nathan.

Tserki, V., Zafeiropoulos, N.E., Simon, F., Panayiotou, C., (2005). A study of the effect of acetylation and propionylation surface treatments on natural fibres. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 36:1110-1118.

Vance, E.D. (2000). Utilizing paper mill bi-products as forest soil amendments: forest responses, recommendations and industry case studies. NCASI Technical Bulletin No. 798.

Vaucher, K. (2012). Valorisations des boues papetières et du peuplier hybride dans la fabrication de panneaux de fibres de moyenne densité (MDF). Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada150 pages.

Vincent, R. (2006). Modélisation et simulation en trois dimensions d'un réseau fibreux en vue de prédire ses propriétés physiques. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 126 pages.

Weigand P. S., Unwin, J. P. (1994). Alternative management of pulp and paper industry solid wastes. Tappi 77(4):91-97.

Wolcott MP., Chowdhury M.J.A., Heath R.B., Rials, T.G. (2001). Coupling agent/lubricant interactions in commercials Wood fire-composite plastic formulations. Proc. Sixth International Conference on Wood Fiber-Plastic Composites. May 15-16.

Wolcott M.P., Schirp, A. (2005). Influence of fungal decay and moisture absorption on mechanical properties of extruded wood-plastic composites. Wood and Fiber Science. 37(4):643-652.

Xing C. (2003) Characterization of urea-formaldehyde resin efficiency affected by four factors in the manufacture of medium-density fibre board. Thèse De Doctorat, Université Laval, Québec, Canada, 230 pages.

Xing S., Riedl, B., Nadji, H., Deng, J. et Koubaa, A. (2012).Potential of pulp and paper secondary sludge as co-adhesive for particleboard manufacturing. Conférence présentée au Second International Forest Biorefinery Symposium, Pulp and Paper Technical Association of Canada (PAPTAC), Montréal, Canada.

Yang, L. et Liu S. (2005). Kinetic model for kraft pulping process. Industrial & engineering chemistry research, 44(18):7078-7085.

Yongfeng, L. (2011). Wood-Polymer Composites. Pages 230-284 dans Advanced in composite materials-analysis of natural and Man-Made Materials. Dr. Pavla Tesinova (Ed.) Intech open access publisher. https://www.intechopen.com/books/advances-in-composite-materials-analysis-of-natural-and-man-made-materials/wood-polymer-composites

Zaddi, E.H. (2002). Procédé de transformation des matières plastiques 1. Notes de cours, Université Laval.

Zaddi, E.H. (2003). Procédé de transformation des matières plastiques II. Notes de cours, Université Laval.

Zauscher, S. et Scott, C. T. (1996). Pulp extrusion: A new processing method for recycling wastepaper and sludge and its application for building materials. Conference présentée au The Use of Recycled Wood and Paper in Building Applications, Madison, Wisconsin.

Zerhouni, A. (2010). Caractérisation des propriétés physico-chimiques des boues issues des principaux procédés papetiers. Mémoire de maîtrise, Univesrité du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Québec, Canada, 109 pages.

Zerhouni, A., Mahmood, T, Koubaa, A. (2012). The use of paper mill bio treatment residue as furnish or as a bonding agent in the manufacture of fibre-based boards. J-For. 2(2):19-24.

Zhang, S.Y., Koubaa, A. (2009). Les résineux de l'est du Canada : écologie forestière, caractéristique, transformation et usages. SP-526F, Innovations. ISBN 978-0-86488-538-8.

Zibliske, L.M. (1987). Dynamics of nitrogen and carbon in soil during paper mill sludge decomposition. Soil Science 143:26-33.

ANNEXES

ANNEXE I :

Les résultats des tests d'absorption d'eau et des propriétés mécaniques des CBP sont présentés à l'annexe (tableaux I.1, I.2, I.3, I.4 et I.5).

Les résultats des gains en volume, de densité et de gain en poids sont présentés au tableau I.1, I.2 et I.3, respectivement.

Les résultats des propriétés mécaniques sont présentés aux tableaux I.4 et I.5.

ANNEXE II :

Les propriétés physiques et mécaniques pour toutes les combinaisons des fibres kraft et des BD

Tableau I.1 : Gain en volumes des CBP en fonction du temps pour les essais réalisés au laboratoire de (UQAT) et à l'échelle, laboratoire pilote (UQTR).

Proportion de mélange			Gain en volumes à l'échelle laboratoire pilote (UQTR)						Gain en volume au laboratoire (UQAT)					
Boue	Kraft	Polymère	168 h		1512h		2040h		168 h		1512h		2040h	
0	50	50	0,47	(0,30)	2,41	(0,33)	2,53	(0,66)						
0	40	60	0,43	(0,13)	2,29	(0,13)	2,30	(0,11)	0,43	(0,15)	0,83	(0,17)	0,88	(0,16)
0	20	80	0,38	(0,05)	1,54	(0,10)	1,66	(0,37)	0,18	(0,14)	0,68	(0,17)	0,77	(0,13)
5	15	80	0,44	(0,12)	2,54	(0,09)	2,84	(0,09)	0,41	(0,09)	0,99	(0,13)	1,18	(0,09)
10	40	50	0.77	(0,00)	1,29	(0,25)	3,41	0,24						
10	30	60	0,75	(0,09)	1,25	(0,22)	3,13	(0,11)	0,71	(0,01)	1,20	(0,15)	1,40	(0,17)
10	20	70	0,70	(0,13)	1,22	(0,25)	2,82	(0,17)	0,68	(0,02)	1,12	(0,12)	1,30	(0,02)
10	10	80	0,68	(0,14)	1,13	(0,25)	2,80	(0,25)	0,56	(0,09)	1,09	(0,28)	1,19	(0,04)
15	15	70	0,75	(0,24)	1,47	(0,17)	2,95	(0,20)	0,64	(0,01)	1,37	(0,02)	1,37	(0,11)
15	5	80	0,72	(0,32)	1,42	(0,24)	2,92	(0,07)	0,67	(0,10)	1,26	(0,07)	1,37	(0,10)
20	30	50	0,81	(0,03)	2,01	(0,10)	3,59	(0,25)						
20	20	60	0,82	0,10	1,87	(0,10)	3,44	(0,23)	0,80	(0,15)	1,55	0,11	2,24	(0,33)
20	10	70	0,75	(0,10)	1,51	(0,10)	3,14	(0,23)	0,72	(0,10)	1,52	(0,03)	1,53	(0,03)
20	0	80	0,71	(0,25)	1,37	(0,25)	2,95	(0,25)	0,70	(0,25)	1,39	(0,65)	1,47	(0,21)
25	25	50	0,87	0,12	2,20	(0,09)	3,76	(0,09)						
30	20	50	0,93	(0,10)	2,47	(0,17)	4,19	(0,10)						
30	10	60	0,97	(0,32)	2,38	(0,10)	4,18	(0,32)	0,91	(0,12)	2,05	(0,11)	2,95	(0,17)
30	0	70	0,99	(0,41)	2,27	(0,57)	4,09	(0,48)	1,29	(0,24)	1,85	(0,46)	1,98	(0,33)
40	10	50	0,99	(0,32)	2,82	(0,35)	4,29	(0,32)						
40	0	60	1,42	(0,02)	2,63	(0,10)	4,26	(0,09)	1,38	(0,21)	2,34	(0,40)	3,90	(0,34)
50	0	50	1,48	(0,45)	2,98	(0,35)	4,66	(0,21)						

Tableau I.2 : Gain en poids des CBP en fonction du temps pour les essais réalisés au laboratoire (UQAT) et à l'échelle, laboratoire pilote (UQTR).

Proportion de mélange			Gain en poids à l'échelle laboratoire pilote							Gain en poids laboratoire						
Boue	Kraft	Polymère	Densité	168 h		1512h		2040h		Densité	168 h		1512h		2040h	
0.0	50.0	50	0,8384	0,99	(0,30)	2,68	(0,34)	2,79	(0,44)							
0.0	40.0	60	0,8322	0,89	(0,37)	1,74	(0,13)	1,82	(0,12)	0,822	0,80	(0,12)	1,21	(0,12)	1,64	(0,19)
0.0	20.0	80	0,8264	0,27	(0,08)	1,15	(0,02)	1,26	(0,01)	0,810	0,18	(0,09)	0,83	(0,15)	0,88	(0,15)
5.0	15.0	80	0,8616	0,39	(0,05)	1,11	(0,03)	1.20	(0,03)	0,853	0,32	(0,07)	0,84	(0,17)	0,94	(0,18)
10.0	40.0	50	0,8550	1,62	(0,57)	3,98	(0,29)	4.01	(0,33)							
10.0	30.0	60	0,8642	0,90	(0,38)	2,45	(0,13)	2,95	(0,12)	0,830	0,42	(0,47)	1,75	(0,35)	1,97	(0,38)
10.0	20.0	70	0,9285	0,70	(0,12)	1,86	(0,53)	1,96	(0,52)	0,889	0,38	(0,07)	1,45	(0,14)	1,48	(0,07)
10.0	10.0	80	0,8547	0,46	(0,29)	1,34	(0,12)	1,40	(0,12)	0,848	0,32	(0,20)	0,89	(0,50)	1,03	(0,20)
15.0	15.0	70	0,8796	1,03	(0,08)	2.04	(0,13)	2.52	(0,18)	0,895	0,49	(0,17)	1,35	(0,11)	1,85	(0,03)
15.0	5.0	80	0,8848	0,63	(0,17)	1,49	(0,09)	1,58	(0,10)	0,885	0,47	(0,21)	1,16	(0,21)	1,47	(0,21)
20.0	30.0	50	0,9468	1,85	(0,57)	5,36	(0,75)	5,35	(0,55)							
20.0	20.0	60	0,8871	0,96	(0,32)	3,45	(0,14)	4,00	(0,31)	0,883	0,66	(0,04)	2,04	(0,06)	2,32	(0,03)
20.0	10.0	70	0,8525	0,67	(0,32)	2,46	(0,15)	2,90	(0,31)	0,847	0,61	(0,08)	1,87	(0,02)	2,1	(0,08)
20.0	0.0	80	0,8732	0,75	(0,29)	1,67	(0,29)	1,75	(0,35)	0,869	0,58	(0,25)	1,56	(0,44)	1,68	(0,42)
25.0	25.0	50	0,9613	2,84	(0,11)	5,68	(0,24)	5,78	(0,30)							
30.0	20.0	50	0,9613	1,50	(0,86)	5,01	(0,54)	5,87	(0,55)							
30.0	10.0	60	0,9669	0,89	(0,37)	4,08	(0,11)	4,46	(0,13)	0,925	0,89	(0,36)	2,49	(0,05)	3,76	(0,04)
30.0	0.0	70	0,9103	1,06	(0,32)	3,85	(0,28)	4,34	(0,41)	0,909	0,63	(0,51)	2,84	(0,74)	3,02	(0,75)
40.0	10.0	50	0,987	2,88	(0,29)	5,87	(0,43)	6,89	(0,32)							
40.0	0.0	60	0,998	1,36	(0,36)	5,46	(0,26)	5,83	(0,44)	0,822	0,99	(0,47)	5,06	(0,36)	5,28	(0,38)
50.0	0.0	50	0,8384	2,85	(0,74)	5.89	(0,12)	6,90	(0,12)							

portgratuit.com

Tableau I. 3 : La densité des CBP en fonction du temps pour les essais réalisés au laboratoire (UQAT) et à l'échelle, laboratoire pilote (UQTR).

Proportion de mélange			La densité **à** l'échelle, laboratoire pilote						Densité au laboratoire					
Boue	Kraft	Polymère	168h		1512h		2040h		168h		1512h		2040h	
0	50	50	0,838	(0,02)	0,854	(0,03)	0,856	(0,01)						
0	40	60	0,832	(0,04)	0,834	(0,04)	0,835	(0,06)	0,822	(0,01)	0,827	(0,01)	0,830	(0,01)
0	20	80	0,826	(0,07)	0,829	(0,08)	0,831	(0,03)	0,810	(0,09)	0,829	(0,02)	0,831	(0,02)
5	15	80	0,862	(0,05)	0,869	(0,05)	0,870	(0,01)	0,853	(0,07)	0,862	(0,01)	0,864	(0,02)
10	40	50	0,855	(0,06)	0,869	(0,06)	0,870	(0,02)						
10	30	60	0,864	(0,04)	0,870	(0,04)	0,869	(0,03)	0,830	(0,01)	0,850	(0,07)	0,854	(0,05)
10	20	70	0,929	(0,03)	0,943	(0,03)	0,946	(0,03)	0,889	(0,07)	0,940	(0,05)	0,941	(0,01)
10	10	80	0,855	(0,04)	0,858	(0,03)	0,867	(0,01)	0,848	(0,02)	0,855	(0,02)	0,859	(0,02)
15	15	70	0,879	(0,07)	0,884	(0,08)	0,887	(0,05)						
15	5	80	0,885	(0,01)	0,984	(0,02)	0,987	(0,01)	0,885	(0,02)	0,950	(0,02)	0,969	(0,01)
20	30	50	0,947	(0,05)	0,972	(0,02)	0,972	(0,01)	0,895	(0,02)	0,966	(0,02)	0,971	(0,02)
20	20	60	0,887	(0,02)	0,893	(0,05)	0,897	(0,09)	0,883	(0,04)	0,892	(0,05)	0,895	(0,05)
20	10	70	0,853	(0,08)	0,856	(0,08)	0,859	(0,07)	0,847	(0,01)	0,854	(0,06)	0,856	(0,02)
20	0	80	0,873	(0,03)	0,878	(0,03)	0,880	(0,05)	0,869	(0,03)	0,870	(0,05)	0,869	(0,04)
25	25	50	0,961	(0,01)	1,011	(0,01)	1,018	(0,06)						
30	20	50	0,962	(0,08)	1,030	(0,04)	1,041	(0,04)						
30	10	60	0,966	(0,01)	0,998	(0,03)	0,999	(0,07)	0,925	(0,06)	0,966	(0,05)	0,984	(0,07)
30	0	70	0,911	(0,06)	1,011	(0,07)	1,018	(0,02)	0,909	(0,05)	0,978	(0,04)	0,978	(0,07)
40	0	60	0,987	(0,06)	1,029	(0,04)	1,034	(0,01)	0,933	(0,05)	1,025	(0,05)	1,034	(0,04)
50	0	50	0,998	(0,03)	1,169	(0,03)	1,165	(0,04)						

Tableau I.4 : Propriétés mécanique des CBP en fonction de la proportion des fibres Kraft et des BD pour les essais réalisés à l'échelle, laboratoire pilote (UQTR).

Proportion de mélange			Test de traction			Test d'impact	Test flexion		
Boue	Kraft	Polymère	Emod (GPa)	Rm(MPa)	ε %	ak kJ/m²	Emod GPa	Fmax MPa	ε %
0.00	50.00	50.00	1,64 (0,12)	43,08 (0,51)	5,31 (0,33)	26,73 (0,90)	2,80 (0,08)	63,50 (1,18)	7,16 (1,21)
0.00	40.00	60.00	1,49 (0,10)	44,17 (0,92)	5,04 (1,15)	27,95 (0,27)	2,64 (0,06)	55,67 (0,67)	7,09(1,06)
0.00	20.00	80.00	1,28 (0,1)	41,77 (4,47)	6,43 (1,15)	34,98 (0,82)	1,61 (0,05)	35,05 (0,61)	8,15(0,98)
5.00	15.00	80.00	1,03 (0,03)	33,22 (0,25)	6,43 (1,66)	33,44 (1,1)	1,27 (0,03)	34,51 (0,6)	8,05(0,41)
10.00	40.00	50.00	1,61 (0,11)	41,55 (0,42)	6,59 (0,42)	23,42 (2,1)	2,3 (0,09)	59,82 (1,09)	9,57(0,84)
10.00	30.00	60.00	1,44 (0,13)	42,87 (0,54)	7,91 (0,59)	27,64 (2,79)	2,07 (0,12)	52,31 (0,52)	8.08(0.91)
10.00	20.00	70.00	1,20 (0,07)	37,65 (0,53)	8,61 (0,84)	25,25 (1,92)	1,37 (0,07)	37,23 (0,96)	8,22(0,54)
10.00	10.00	80.00	0,89 (0,03)	29,94 (0,50)	8,37 (0,50)	31,06 (4,09)	1,13 (0,06)	32,61 (2,45)	9,15(0,25)
15.00	15.00	70.00	1,15 (0,07)	33,43 (0,51)	11,68(1,12)	24,68 (2,2)	1,29 (0,09)	36,21 (1,04)	8,90(0.98)
15.00	5.00	80.00	0,79 (0,03)	27,35 (0,36)	6,23 (0,21)	30,43 (1,06)	1,12 (0,04)	31,06 (1,27)	10,04(1,85)
20.00	30.00	50.00	1,59 (0,08)	40,78 (1,07)	8,24 (0,83)	15,68 (2,81)	2,28 (0,08)	58,70 (1,07)	9,45(2,21)
20.00	20.00	60.00	1,38 (0,09)	37,65 (1,41)	8,02 (2,13)	18,33 (2,46)	1,97 (0,07)	46,16 (2,21)	8.34(1,07)
20.00	10.00	70.00	1,14 (0,08)	34,94 (0,65)	10,63(0,38)	20,98 (3,89)	1,24 (0,08)	35,89 (1,89)	9,07(2,19)
20.00	0.00	80.00	0,75 (0,04)	24,66 (0,71)	13,91 (0,47)	29,93 (3,89)	0,93 (0,04)	30,69 (0,75)	10,230(1,78)
25.00	25.00	50.00	1,49 (0,04)	39,91 (2,24)	9,93 (0,23)	15,55 (1,70)	/	/	8,11(2,12)
30.00	20.00	50.00	1,45 (0,08)	37,43 (1,32)	7,31 (0,33)	14,57 (2,63)	/	/	8,01(3,87)
30.00	10.00	60.00	1,25 (0,06)	36,34 (0,40)	8,34 (1,15)	17,32 (3,99)	1,28 (0,1)	39,61 (2,45)	8.35(1,06)
30.00	0.00	70.00	0,99 (0,08)	26,44 (0,88)	13,43(1,15)	18,41 (1,58)	1,03 (0,06)	35,43 (0,94)	9,32(0,98)
40.00	10.00	50.00	1,33 (0,08)	36,68 (1,83)	7,43 (1,66)	12,85 (2,66)	1,71 (0,14)	53,42 (2,02)	8,35(2,12)
40.00	0.00	60.00	1,12 (0,02)	28,43 (0,36)	9,91 (0,42)	17,43 (2,93)	1,37 (0,03)	40,93 (0,41)	8.43(0,93)
50.00	0.00	50.00	1,23 (0,08)	29,38 (0,90)	9,091(0,59)	13,77 (4,54)	2,02 (0,08)	48,49 (0,49)	10,23(2,98)
HDPE (Migneault et al 2014)			0,63	21,6	1100	-	0,56	19,9	

Tableau I.5 : Moyennes des propriétés mécaniques des CBP en fonction de la proportion des fibres Kraft et des BD pour les essais réalisés au laboratoire (UQAT).

Proportion de mélange			Test de traction			Test d'impact	Test flexion		
Boue	Kraft	Polymère	Emod(GPa)	Rm(MPa)	ε %	ak (kJ/m²)	Emod (GPa)	Fmax (MPa)	ε %
0	40	60	1,36 (0,06)	41,99 (1,99)	5,31 (0,33)	22,26 (2,29)	2,29 (0,19)	43,75 (2,08)	7.39 (1,19)
0	30	70	1,29 (0,14)	40,75 (3.57)	6,04 (1,15)	26.64 (1.61)	1,52 (0,22)	33,1 (2,68)	8,62(0,98)
0	20	80	1.20 (0,03)	40,09 (2,62)	6.85 (1,15)	31,66 (2,99)	1,22 (0,06)	24,49 (1,65)	8,24 (1,85)
5	15	80	0,68 (0,02)	25,31 (0,21)	8,43 (1,66)	29,29 (2,35)	1,19 (0,02)	23,21 (0,18)	8,04 (3,54)
10	30	60	1,10 (0,05)	32,58 (0,92)	6,59 (2,42)	20,66 (1,40)	2,03 (0,05)	37,23 (0,27)	8.46 (2,12)
10	20	70	0,84 (0,01)	28,15 (0,55)	8,91 (0,59)	23,72 (2,02)	1,35 (0,03)	28,14 (0,32)	8,44 (0,99)
10	10	80	0,59 (0,02)	22,01 (0,17)	13,61(0,84)	28,39 (2,71)	1,12 (0,01)	20,90 (0,11)	9,52 (0,56)
15	15	70	0,78 (0,02)	25,34 (0,32)	8,37 (0,50)	22,18 (2,18)	1,25 (0,02)	26,15 (0,15)	9,05 (0,78)
15	5	80	0,58 (0,05)	20,10 (1,12)	11,68(1,12)	28,32 (2,09)	1,01 (0,02)	19,47 (0,24)	11,24 (3,78)
20	20	60	0,96 (0,02)	28,80 (0,27)	9,23 (0,21)	17,25 (2,18)	1,92 (0,04)	32,49 (0,38)	8.87 (2,36)
20	10	70	0,70 (0,02)	25,97 (0,25)	12,24(0,83)	18,76 (2,27)	1,02 (0,02)	22,83 (0,12)	9,78 (3,02)
20	0	80	0,52 (0,02)	19,91 (0,37)	16,02(2,13)	20,57 (2,92)	0,85 (0,03)	18,4 (0,28)	12,88 (1,22)
30	10	60	0,85 (0,03)	26,68 (1,21)	9,63 (0,38)	16,25 (1,65)	1,52 (0,03)	28,81 (0,28)	10.22 (0,65)
30	0	70	0,69 (0,02)	21,57 (0,17)	10,00(0,47)	17,99 (2,07)	1,21 (0,03)	22,12 (0,38)	9,54 (0,56)
40	0	60	0,82 (0,04)	24,45 (0,03)	9,93 (0,23)	14,88 (0,60)	1,51 (0,03)	27,08 (0,20)	8.21 (0,58)

Les figures II.1 a II.5 illustrent l'effet du module d'élasticité (MOE) et de rupture en traction et en flexion en fonction des composites fabriqué au laboratoire pilote.

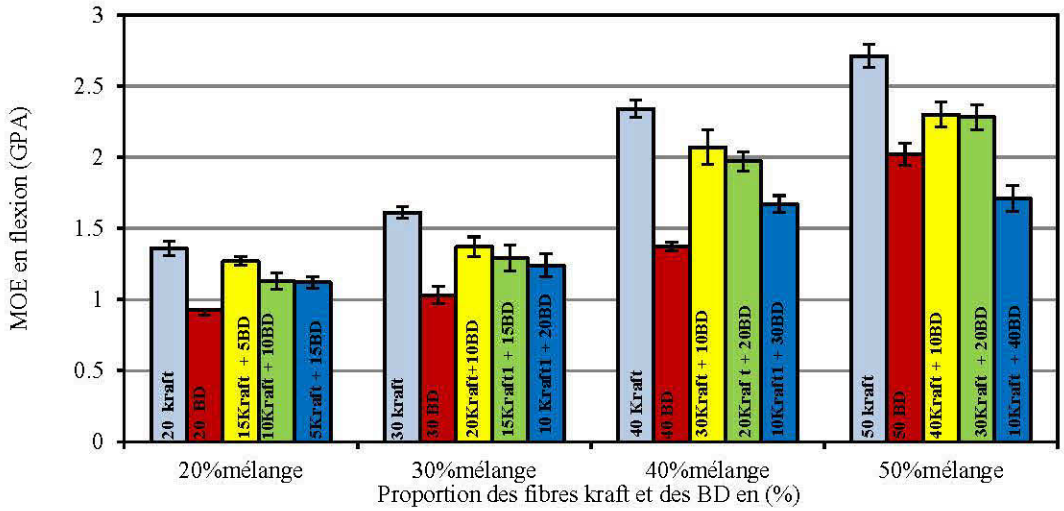


Figure II. 1: Comparaison des modules d'élasticité (MOE) en flexion en fonction des composites obtenus avec des fibres kraft et des BD.

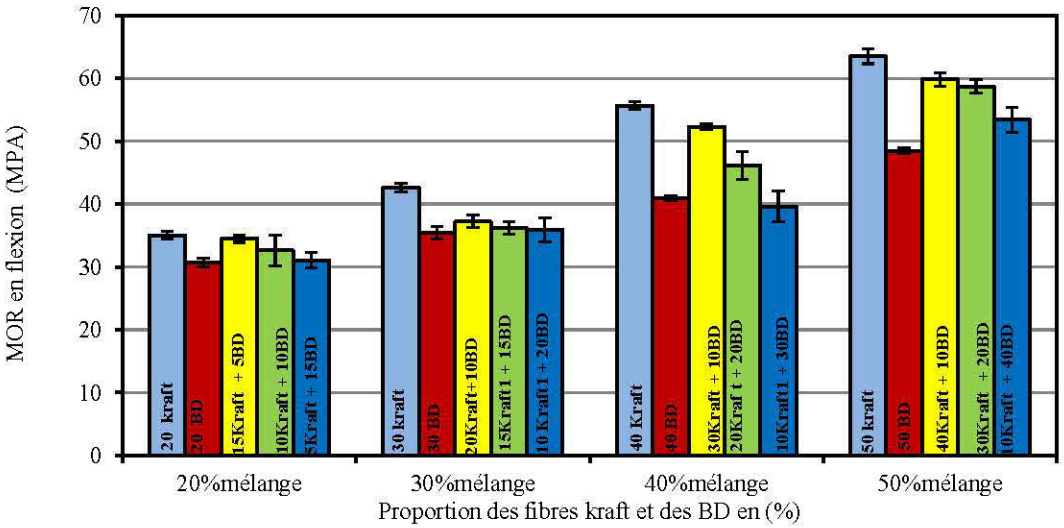


Figure II. 2: Comparaison des modules de rupture en flexion et en traction en fonction des composites obtenus avec des fibres kraft et des BD.

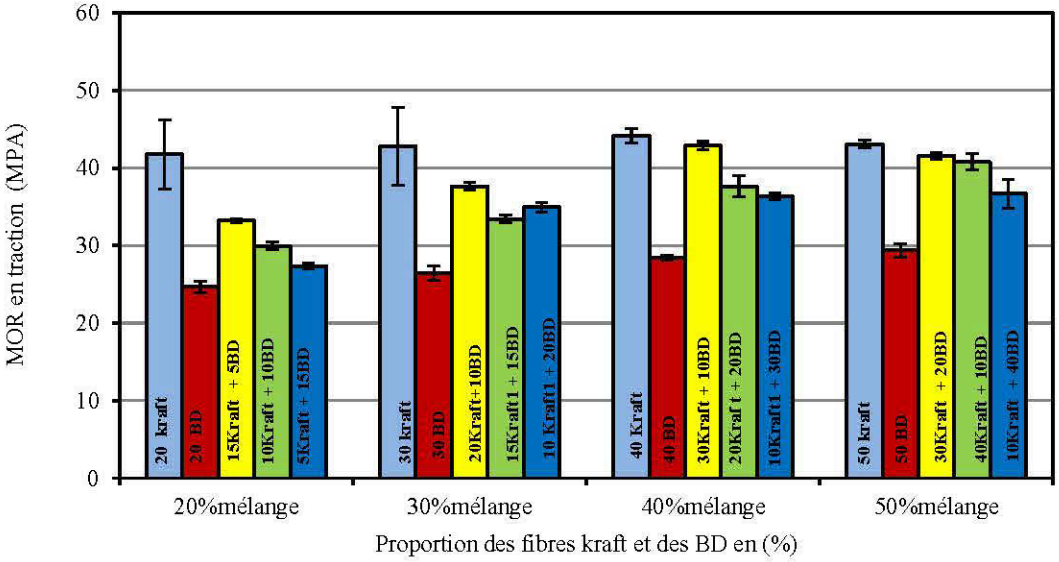


Figure II. 3: Comparaison des modules de rupture en traction en fonction des composites obtenus avec des fibres kraft et des BD.

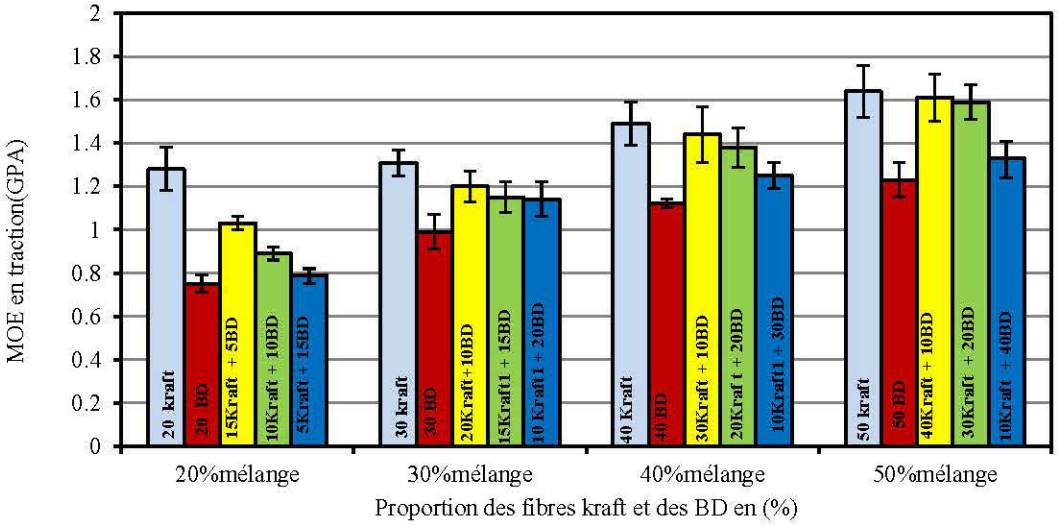


Figure II. 4 : Comparaison des modules d'élasticité (MOE) en traction en fonction des composites obtenus avec des fibres kraft et des BD.

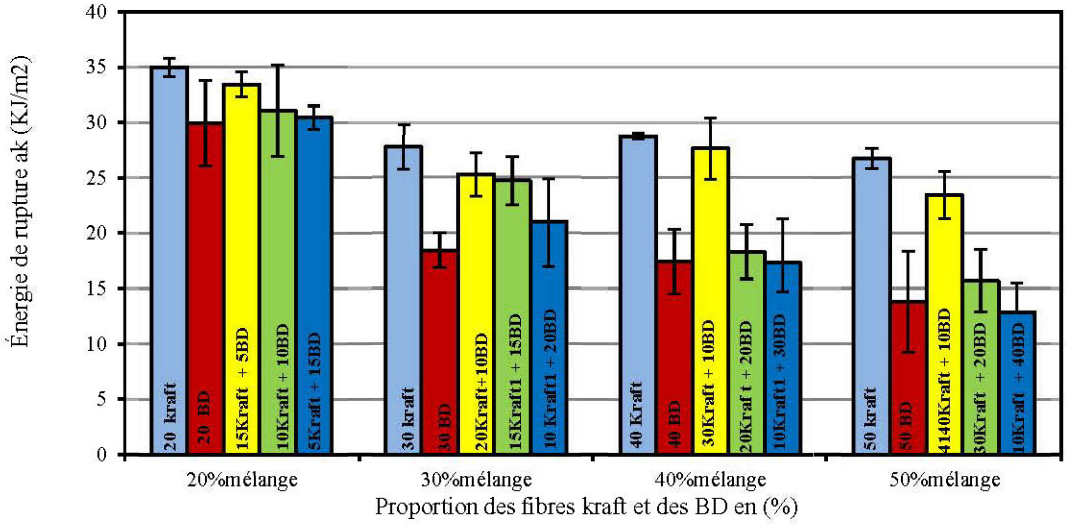


Figure II. 5 : Énergie de rupture en fonction des composites obtenus avec des fibres kraft et des BD.

Les figures II.6 a II.10 illustrent l'effet du module d'élasticité (MOE) et de rupture en traction en fonction des composites fabriqué au laboratoire.

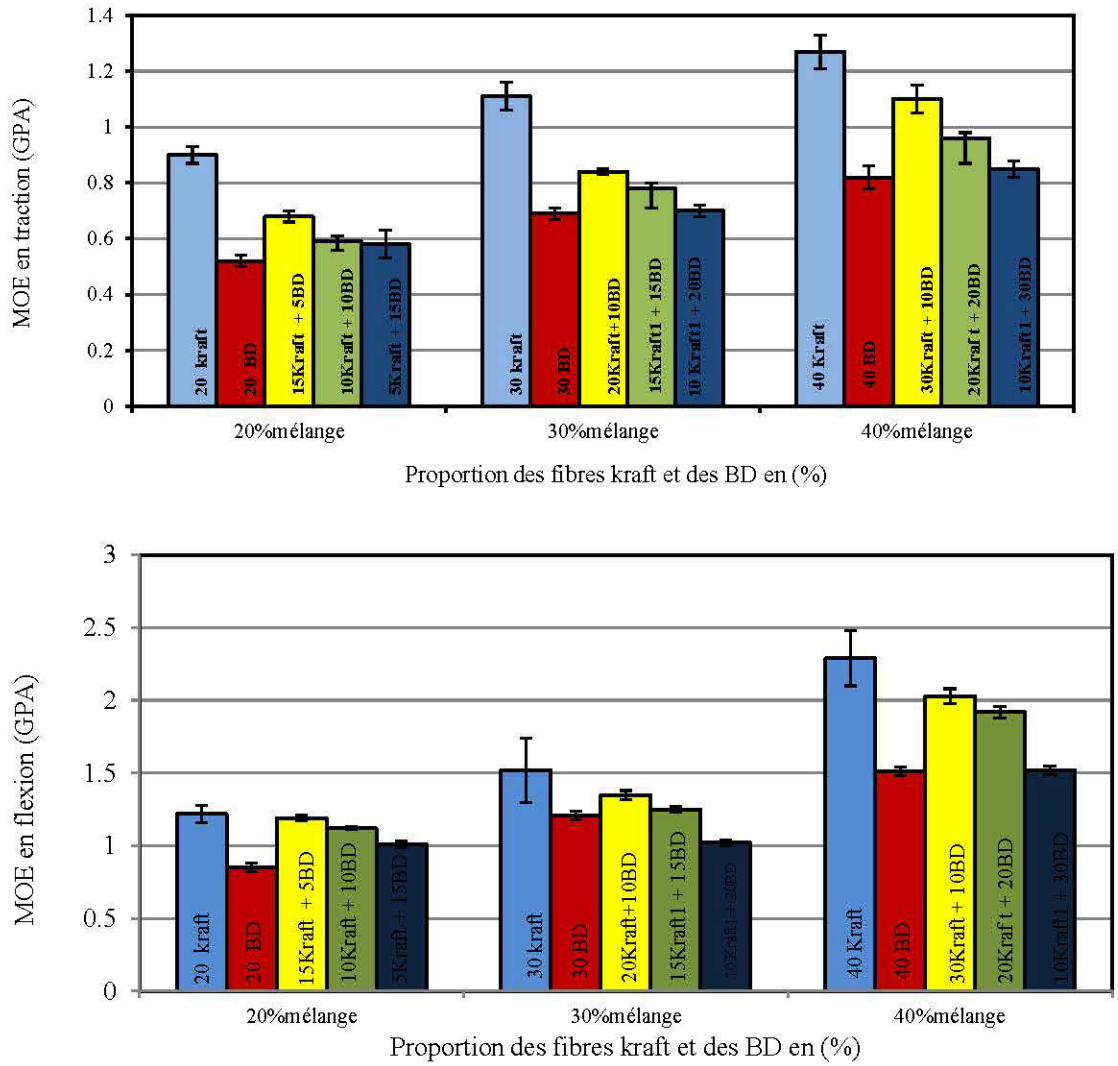


Figure II. 6: Comparaison des modules d'élasticité (MOE) en traction et en flexion en fonction des composites fabrique au laboratoire, avec des fibres kraft et des BD.

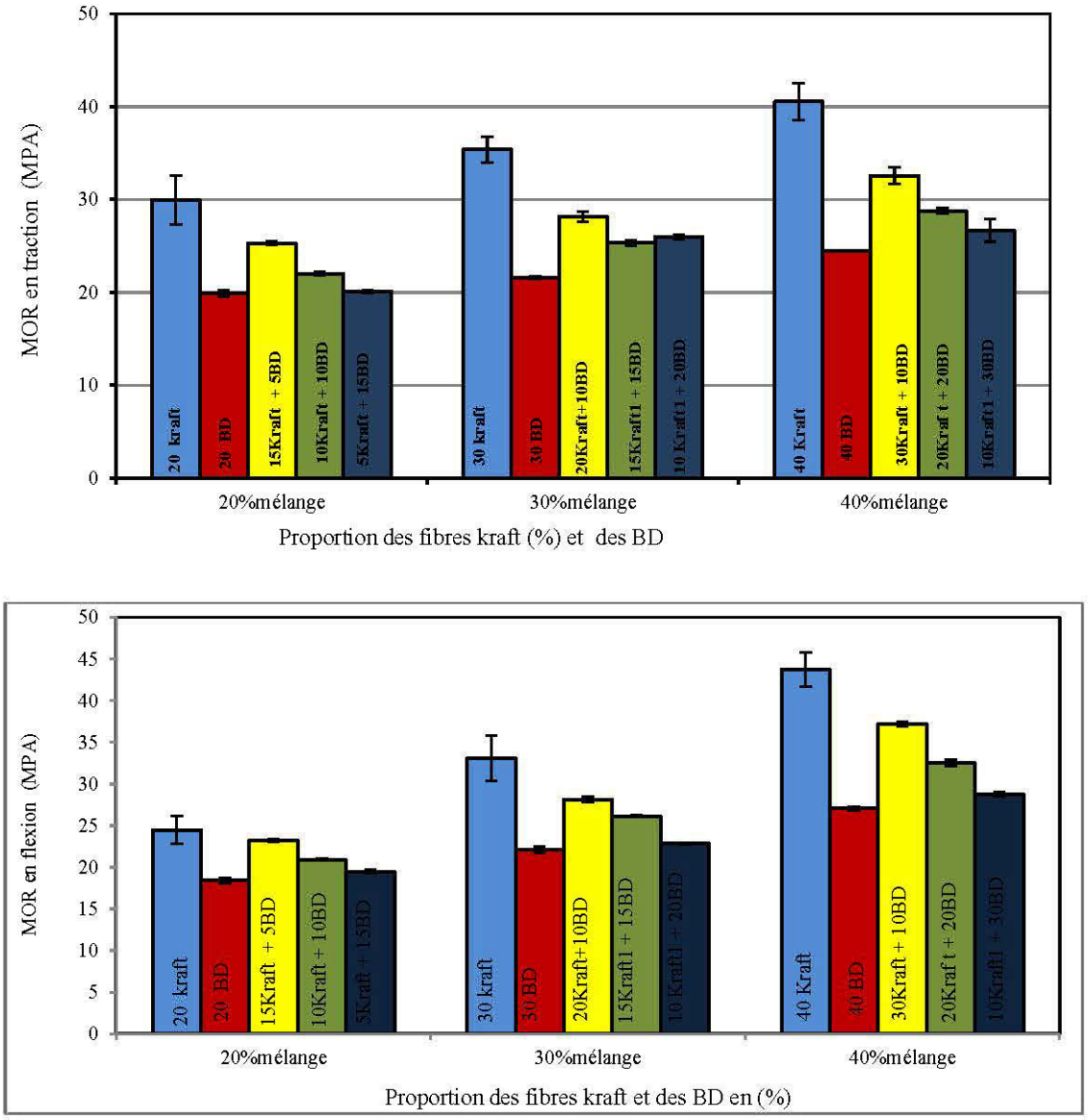


Figure II. 7: Comparaison des modules de rupture en traction des CBP en fonction des composites fabrique au laboratoire, avec des fibres kraft et des BD.

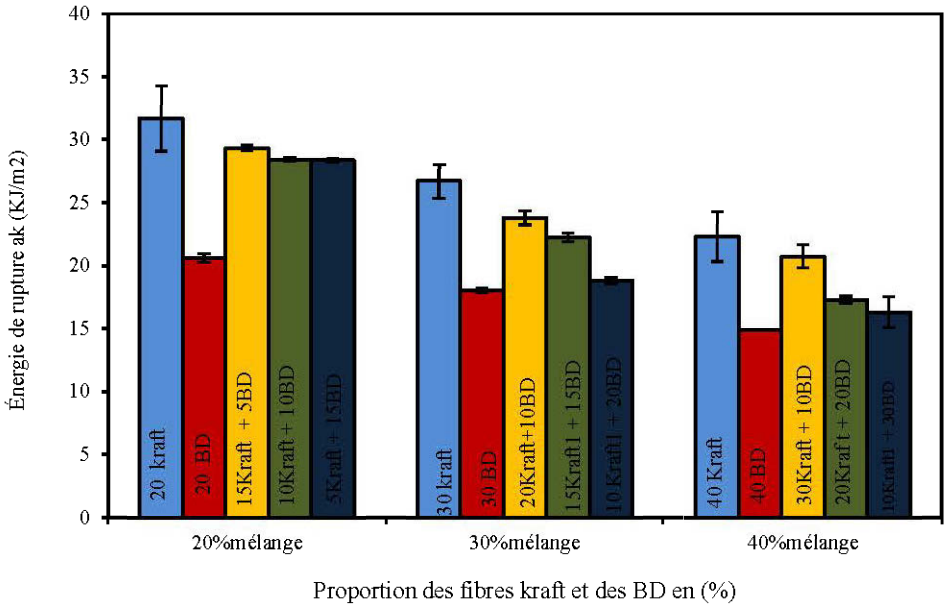
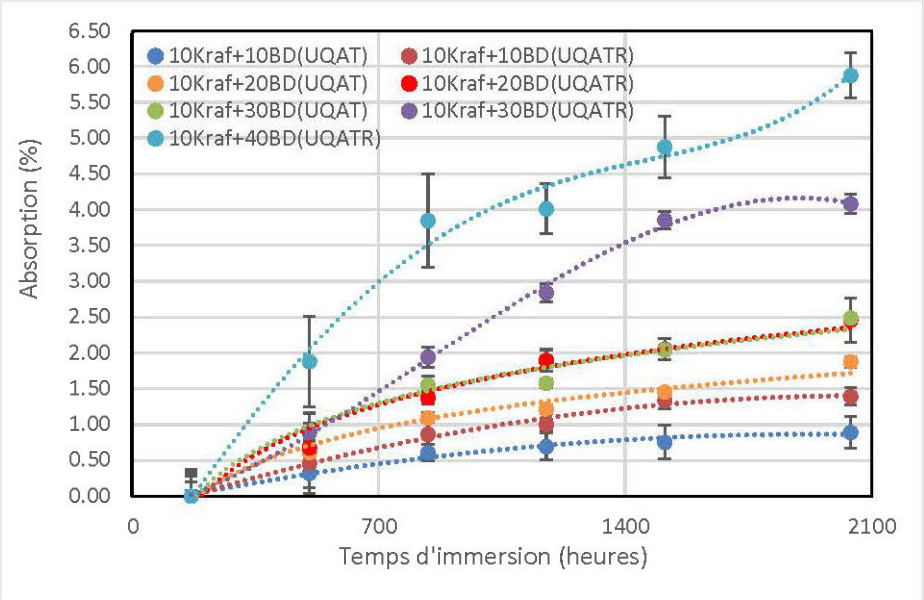


Figure II. 8: Énergie de rupture en fonction des composites obtenus avec des fibres kraft et des BD.

La figure II.9 et II.10, montre l'effet de de l'absorption et de gonflement d'eau en fonction du temps d'immersion, des BD et de la proportion des fibres.



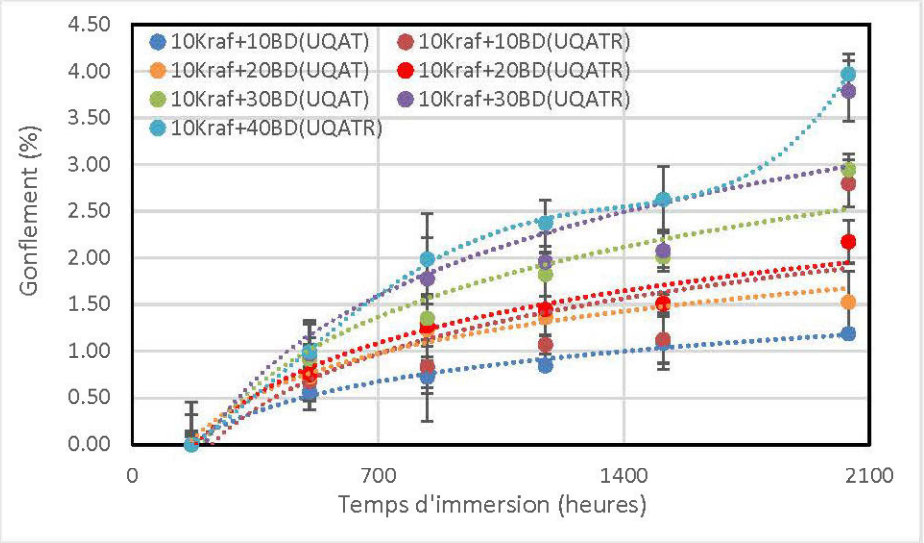
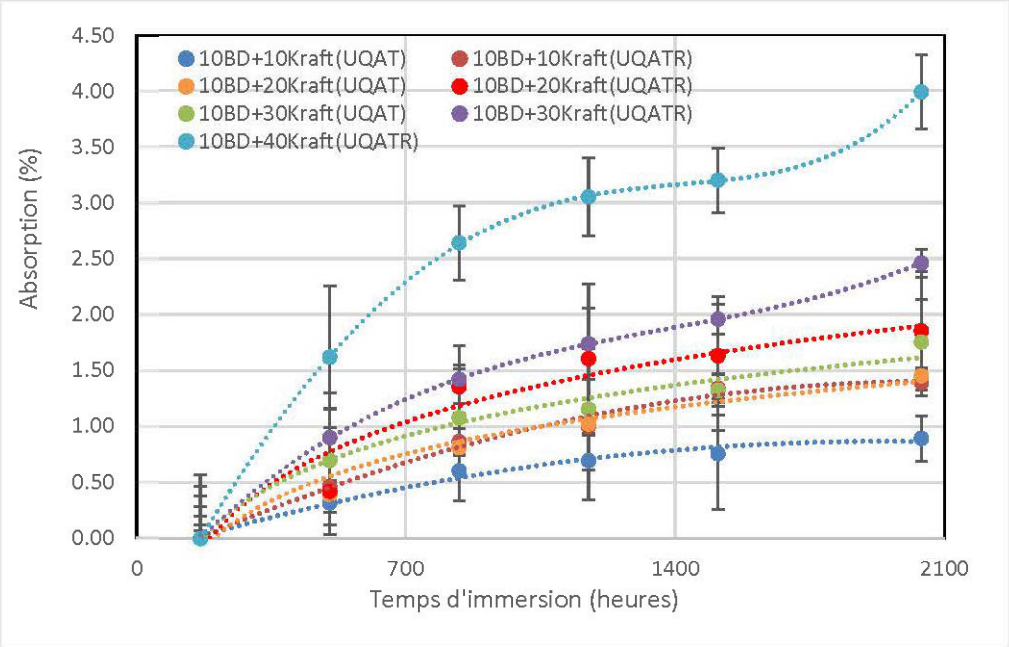


Figure II. 9: Variation de l'absorption et de gonflement d'eau en fonction du temps d'immersion, des BD avec 10% des fibres Kraft.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES



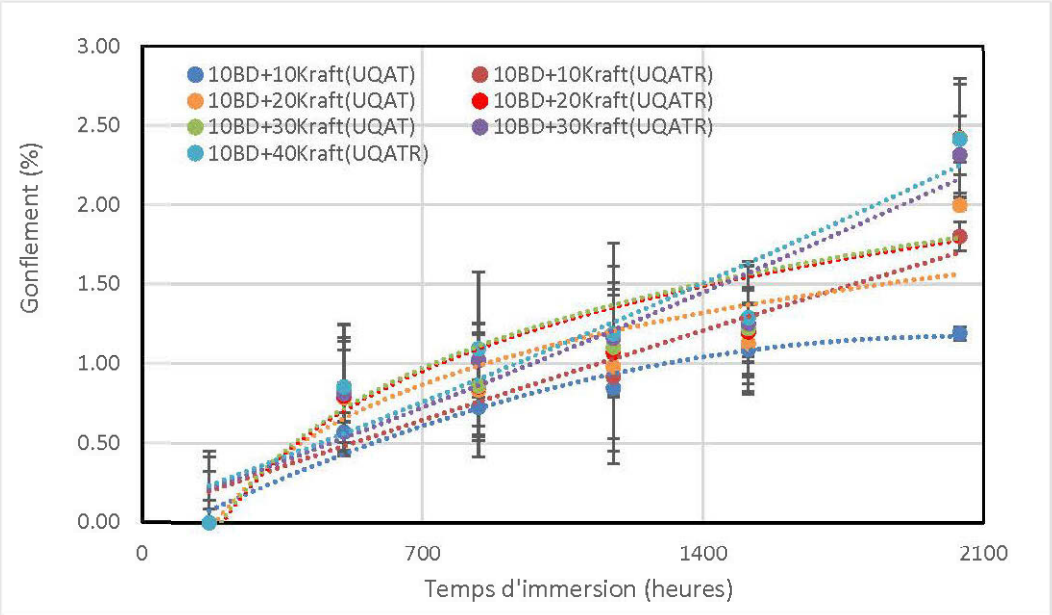


Figure II. 10: Variation de l'absorption et de gonflement d'eau en fonction du temps d'immersion, des fibres kraft avec 10% des BD.