

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

ÉCOLE DE GÉNIE

**VALORISATION DE LA BOUE DE DÉSENCRAGE POUR LA FABRICATION DES  
PANNEAUX DE FIBRES À BASSE DENSITÉ.**

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

MAHDI KECHAOU

OCTOBRE 2019



# BIBLIOTHÈQUE

Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue  
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

## **Mise en garde**

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous.

L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

## **Warning**

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue obtained the permission of the author to use a copy of this document for non-profit purposes in order to put it in the open archives Depositum, which is free and accessible to all.

The author retains ownership of the copyright on this document. Neither the whole document, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.



## AVANT-PROPOS

Ce projet est une réalisation conjointe du laboratoire biomatériaux de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), de la Chaire de recherche en valorisation, caractérisation et transformation du bois de l'UQAT, l'Institut de Recherche sur les Forêts (IRF) à l'UQAT et la compagnie tunisienne *TUNISIE OUATE*. Les travaux furent réalisés dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie de l'UQAT et les résultats sont présentés sous forme d'un mémoire de maîtrise.

Une partie des essais préliminaires de cette étude a été présentée sous forme de rapport d'un projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur à l'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax en septembre 2017. Une partie des résultats finaux a été présentée oralement sous forme d'une présentation au 87<sup>ème</sup> Congrès de l'Association Francophone pour le savoir (ACFAS), Colloque 216 « Le bois : la science d'aujourd'hui pour les matériaux de demain », Université du Québec en Outaouais, Québec, Canada le 30 mai 2019.

Je remercie *Uniboard Canada Inc.* - division Mont-Laurier et *Rayonier Advanced Materials* – division *Témiscamingue* qui ont fourni les matières premières nécessaires à la réalisation de ce projet. Je remercie également la compagnie Matériaux Spécialisés Louiseville Inc. (MSL) pour m'avoir fourni gratuitement des échantillons commerciaux.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance envers M. Marc Paré de la compagnie Rayonier Advanced Materials, M. Mahdi Ben Slimene de la compagnie Tunisie Ouate, M. Aziz Alija de la compagnie Norbord et Mme Sameh Hannachi et M. Nejib Albouchi du Centre Technique de l'Industrie du Bois et de l'Ameublement (CETIBA) associé au ministère de l'industrie de la Tunisie, pour leur support matériel et financier contribuant à la réussite de ce projet.

Je voudrais aussi mentionner la contribution financière du consortium de recherche et innovations en bioprocédés industriels au Québec (CRIBIQ) et de l'organisme canadien MITACS.

Le manuscrit est divisé en 3 chapitres : le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique présentant les différentes thématiques de cette étude. La méthodologie expérimentale fait l'objet du deuxième chapitre. Les résultats obtenus et leurs interprétations sont présentés dans le troisième chapitre. Nous clôturons ce manuscrit par une conclusion générale avec des perspectives de recherche.

*« Un homme qui a du génie, du courage, une volonté ferme et de la persévérance doit toujours réussir ; il est dans sa destinée de triompher de tout. »*

*Félicité de Genlis*

## DÉDICACE

*À mes très chers parents :  
Aucune dédicace ne pourrait exprimer  
à sa juste valeur tout l'amour,  
toute la gratitude,  
et toute la reconnaissance que je vous porte!*

*À ma chère sœur,  
en témoignage des liens solides et intimes qui nous unissent,  
pour ton encouragement et ton soutien malgré une distance amère,*

*À tous mes amis et collègues,  
pour les bons moments,  
et pour donner un goût spécial à ma vie,*

*Je vous dédie ce travail.*

*Mahdi Kechaou*

## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude et mes profonds remerciements à mon directeur de recherche, Monsieur Ahmed KOUBAA, professeur titulaire à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue et directeur scientifique du laboratoire de biomatériaux, qui par sa collaboration et son soutien constant a permis l'existence de ce projet. Ses compétences furent un des atouts majeurs de cette étude et je lui sais gré de la confiance qu'il m'a accordée.

Je tiens à exprimer, également, mes vifs remerciements à Monsieur Sébastien MIGNEAULT, anciennement professeur-chercheur sous octroi au Laboratoire de biomatériaux, qui nous a malheureusement quitté pour des nouveaux défis et objectifs dans la vie, pour toute l'aide qu'il m'a apportée et pour son encadrement.

Je tiens à exprimer aussi ma profonde gratitude à monsieur Williams BELHADEF, l'ancien technicien au Laboratoire de biomatériaux, qui nous a quitté pour des nouvelles réalisations, pour toute l'aide qu'il m'a apportée pour me familiariser avec les équipements du laboratoire et pour ses conseils pertinents.

Je suis très reconnaissant également aux M. Gilles VILLENEUVE, technicien au laboratoire biomatériaux et Jessé AUMOND-BEAUPRÉ, responsable des laboratoires de l'école de génie et auxiliaire d'enseignement, qui m'ont permis d'utiliser leurs équipements et offert tout le soutien technique nécessaire à cette étude.

J'aimerais remercier aussi l'ensemble du personnel de l'UQAT et en particulier de l'IRF qui m'ont aidé tout au long de mon séjour à Rouyn-Noranda.



## TABLE DES MATIÈRES

Liste des figures .....	xii
Liste des tableaux.....	xviii
Liste des acronymes .....	xx
Résumé .....	xxi
Abstract .....	xxii
Introduction .....	1
Chapitre I.....	4
Revue de littérature .....	4
1.1. Les panneaux à base de bois .....	4
1.2. Les panneaux de fibres.....	7
1.2.1. Généralités .....	7
1.2.2. L'industrie des panneaux de fibres .....	9
1.2.3. Les panneaux de fibres isolants.....	11
1.2.4. Le procédé de fabrication des panneaux de fibres.....	16
1.3. Les procédés de mise en pâte .....	19
1.3.1. Procédé de mise en pâte mécanique de la meule.....	20
1.3.2. Procédé de mise en pâte thermomécanique (TMP).....	20
1.3.3. Procédé de mise en pâte chimico-thermomécanique (CTMP).....	20
1.3.4. Procédé de mise en pâte chimique.....	21

1.4.	Liants utilisés dans l'industrie des panneaux .....	21
1.4.1.	Liants aminoplastes .....	21
1.4.2.	Liants phénoplastes.....	22
1.4.3.	Les colles isocyanates.....	23
1.4.4.	D'autres alternatives : l'amidon .....	23
1.5.	Mécanismes d'adhésion pour les panneaux de fibres fabriqués sans liants .....	24
1.6.	L'industrie papetière .....	27
1.7.	Les boues papetières .....	28
1.7.1.	Définition .....	28
1.7.2.	Les traitements des effluents .....	28
1.7.3.	Réglementations sur les effluents .....	33
1.7.4.	Caractérisation physico-chimique des boues .....	34
1.8.	Valorisation des boues .....	41
1.8.1.	Enfouissement .....	41
1.8.2.	Les traitements thermiques .....	42
1.8.3.	Biocarburants .....	43
1.8.4.	Valorisation agricole.....	43
1.8.5.	Réinjection de la boue.....	44
1.8.6.	Potentiel des boues pour la fabrication des panneaux .....	45
Chapitre II.....		46
Matériel et méthodes .....		46
2.1. Matières premières .....		46

2.1.1. Les fibres de bois.....	46
2.1.2. Les boues de désencrage.....	48
2.1.3. Les boues secondaires.....	49
2.1.4. L'amidon.....	50
2.2. Méthodes.....	50
2.2.1. Fabrication des panneaux.....	50
2.2.2. Plan des formulations.....	55
2.2.3. Spectroscopie FTIR.....	58
2.2.4. Analyse thermogravimétrique (ATG).....	58
2.2.5. Analyseur de la qualité des fibres METSO.....	59
2.2.6. Les tests mécaniques.....	60
2.2.7. Les profils de densité.....	62
2.2.8. Analyses microscopiques.....	63
2.2.9. Stabilité dimensionnelle.....	64
2.2.10. Analyse statistique des résultats.....	64
Chapitre III.....	66
Résultats et discussions.....	66
3.1. Essais préliminaires.....	67
3.2. Caractérisation des matières premières.....	71
3.2.1. Spectroscopie infrarouge (FTIR).....	71
3.2.2. Analyse thermogravimétrique (ATG).....	75
3.2.3. Analyse de la qualité des fibres.....	78
3.3. Effet des différents facteurs sur les propriétés mécaniques et physiques des panneaux par analyse de variances ANOVA.....	80

3.4. Caractérisation mécanique des panneaux .....	82
3.4.1. Résistance à la flexion trois points .....	84
3.4.2. La cohésion interne .....	94
3.5. Propriétés physiques des panneaux .....	96
3.5.1. Les profils de densité .....	96
3.5.2. Stabilité dimensionnelle .....	98
3.5.3. Analyse microscopique .....	107
Conclusions générales .....	109
Références .....	115

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Classification des différents panneaux à base de bois selon la grosseur des éléments de reconstitution, la masse volumique et le procédé de fabrication (Suchsland et al., 1987) ..... 6
Figure 1.2	La répartition de la production mondiale de panneaux à base du bois entre 2010 et 2017 (D'après les données de FAOSTAT, 2019)..... 6
Figure 1.3	La contribution canadienne en pourcentage à la production mondiale des panneaux à base de bois et des panneaux de fibres entre 1961 et 2017 (D'après les données de FAOSTAT, 2019)..... 10
Figure 1.4	La répartition de la production de panneaux de fibres dans le monde pour les dernières années (2010 - 2017) (D'après les données de FAOSTAT, 2019)..... 10
Figure 1.5	Procédé de fabrication des panneaux de fibres isolants par voie sèche, proposé par l'industrie française Gutex (Delisée, 2016)..... 19
Figure 1.6	Matériaux impliqués et matières rejetées dans la fabrication du papier (Lacorte et al., 2003)..... 29
Figure 2.1	Les fibres TMP utilisées pour le procédé sec de fabrication des panneaux ..... 46
Figure 2.2	Les fibres TMP utilisées pour le procédé humide de fabrication des panneaux ..... 47
Figure 2.3	HB43-S Analyseur d'humidité à halogène pour évaluer l'humidité des matières premières ..... 47

Figure 2.4	Les boues de désencrage déshydratées .....	49
Figure 2.5	Les boues secondaires utilisées comme liant .....	49
Figure 2.6	Le moule utilisé pour la préparation des ébauches.....	51
Figure 2.7	La presse chaude LabEcon 300 utilisée pour la fabrication des panneaux .....	52
Figure 2.8	Équipements utilisés pour la fabrication des panneaux de fibres par voie humide : a) Séparateur de fibres METSO; b) Moule pour la préparation des ébauches par la voie humide; c) ébauche préparée par voie humide; d) Montage de compression ZWICK pour le pressage à froid.....	54
Figure 2.9	Panneaux fabriqués par voie humide après pressage à chaud.....	54
Figure 2.10	Disposition des échantillons pour les essais de cohésion interne (IB), de flexion et de la stabilité dimensionnelle (ABS). .....	55
Figure 2.11	IRTracer-100 de la compagnie Shimadzu pour caractériser la chimie de surface des échantillons .....	58
Figure 2.12	Appareil d'analyse thermogravimétrique, modèle Q50, TA Instrument .....	59
Figure 2.13	Analyseur de la qualité des fibres Metso FS300 .....	60
Figure 2.14	Équipements pour effectuer les tests mécaniques : a) Machine d'essais Universelle Zwick/Roell Z020; b) Le montage pour les essais de la flexion trois points; c) Le montage pour les essais de la cohésion interne.....	62

Figure 2.15	Machine de mesure de densité QMS .....	63
Figure 2.16	Microscope à LASER Keyence VK-X150.....	63
Figure 2.17	Bain d'immersion dans l'eau pour les essais de la stabilité dimensionnelle.....	64
Figure 3.1	L'apparence des panneaux fabriqués à partir des différentes formulations.....	67
Figure 3.2	Spectroscopie FTIR des boues de désencrage.....	72
Figure 3.3	Spectroscopie FTIR des fibres utilisées (TMP, CTMP) .....	74
Figure 3.4	Thermogramme ATG et la courbe dérivée des boues de désencrage	76
Figure 3.5	Thermogramme ATG et la courbe dérivée des fibres TMP.....	78
Figure 3.6	Distribution morphologique des fibres de bois (TMP et CTMP) et des boues de désencrage (BDD).....	80
Figure 3.7	L'effet de l'augmentation de la teneur des boues de désencrage sur les résultats de (a) MOE et (b) MOR des échantillons.....	85
Figure 3.8	L'effet de l'incorporation des différents pourcentages des boues de désencrage (0, 20 et 40%) sur les modules d'élasticité MOE des panneaux de fibres sans additifs (F), avec 10% de boues secondaires (B) et avec 10% d'amidon (A).....	86
Figure 3.9	L'effet de l'incorporation des différents pourcentages des boues de désencrage (0, 20 et 40%) sur les modules de rupture MOR des panneaux de fibres sans additifs (F), avec 10% de boues secondaires (B) et avec 10% d'amidon (A).....	87

Figure 3.10	L'effet des cendres sur les modules d'élasticité (MOE) (a) et de rupture (MOR) (b) en flexion des panneaux de fibres fabriqués (sans additifs (F), avec 10% de boues secondaires (B) et avec 10% d'amidon (A)). .....	88
Figure 3.11	L'effet des polysaccharides sur les modules d'élasticité (MOE) (a) et de rupture (MOR) (b) en flexion des panneaux de fibres fabriqués (sans additifs (F), avec 10% de boues secondaires (B) et avec 10% d'amidon (A)). .....	90
Figure 3.12	L'effet de la lignine provenant des boues secondaires sur les modules d'élasticité (MOE) (a) et de rupture (MOR) (b) en flexion des panneaux de fibres fabriqués (sans additifs (F), avec 10% de boues secondaires (B) et avec 10% d'amidon (A)). .....	92
Figure 3.13	L'effet de la longueur moyenne des fibres sur les propriétés mécaniques des panneaux (module d'élasticité MOE en flexion, module de rupture MOR en flexion et la cohésion interne CI) .....	93
Figure 3.14	L'effet de l'incorporation des différents pourcentages des boues de désencrage (0, 20 et 40%) sur la cohésion interne CI des panneaux de fibres fabriqués (sans additifs (F), avec 10% de boues secondaires (B) et avec 10% d'amidon (A)). .....	95
Figure 3.15	La cohésion interne en fonction du pourcentage (a) en boues de désencrage, (b) en cellulose, (c) en polysaccharides, (d) en cendres, et (e) en lignines .....	96
Figure 3.16	L'effet du pourcentage des boues de désencrage (0, 20 et 40%) sur les profils de densité des panneaux de fibres fabriqués par un procédé humide.....	98



Figure 3.17	L'effet de l'augmentation du pourcentage des boues de désencrage sur (a) l'absorption d'eau et (b) le gonflement en épaisseur.....	100
Figure 3.18	Effet de l'ajout des boues de désencrage (0, 20 et 40 %) sur le gonflement en épaisseur des panneaux fabriqués par un procédé humide.....	101
Figure 3.19	Effet de l'ajout des boues de désencrage (0, 20, 40%) sur l'absorption d'eau des panneaux fabriqués par un procédé humide .....	102
Figure 3.20	L'effet de la longueur moyenne des fibres sur l'absorption d'eau et le gonflement en épaisseur des panneaux de fibres.....	102
Figure 3.21	L'effet du pourcentage des cendres sur a) l'absorption d'eau; b) le gonflement en épaisseur des panneaux de fibres de fibres fabriqués (sans additifs (F), avec 10% de boues secondaires (B) et avec 10% d'amidon (A)).....	105
Figure 3.22	L'effet de la cellulose sur l'absorption d'eau (a) et le gonflement en épaisseur (b) des panneaux de fibres de fibres fabriqués (sans additifs (F), avec 10% de boues secondaires (B) et avec 10% d'amidon (A)). .....	106
Figure 3.23	Images de microscopie confocale de quelques échantillons : a) Échantillon commercial C1 (grossissement x 20); b) Échantillon commercial C2 (grossissement x 20); c) Échantillon fabriqué avec 100% fibres par procédé sec (grossissement x 10); d) Échantillon fabriqué avec 100% fibres par procédé humide .....	108

Figure 3.24	Défauts observés par microscopie confocale de quelques échantillons fabriqués par les deux procédés sec et humide et incorporés par les boues de désencrage (grossissements x 10 et x 20).....	108
-------------	--	-----

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Les limites de quelques propriétés mécaniques, physiques et thermiques des panneaux de fibres (Lewis et al., 1965). ....	8
Tableau 1.2	Comparaison thermique entre les panneaux de fibres isolants et les isolants habituels.....	14
Tableau 1.3	Proportions (%) des oxydes dans les boues de désencrage et l'argile pure (Davis et al, 2003).....	36
Tableau 1.4	Les caractéristiques des boues de désencrages et des boues secondaires utilisées (% , base anhydre).....	38
Tableau 1.5	Caractérisation chimique des boues de désencrage étudiées par Trépanier et al. (1996) et des boues primaires et secondaires par Rashid et al. (2006).....	40
Tableau 2.1	La composition chimique des fibres de bois utilisées (Kocaeffe et al. 2008) .....	48
Tableau 2.2	La nomenclature pour la désignation des formulations .....	56
Tableau 2.3	Dispositif expérimental utilisé pour la fabrication des panneaux ....	57
Tableau 2.4	Essais réalisés sur les panneaux de fibres, normes utilisées et nombre de répétitions .....	57
Tableau 3.1	Identification des bandes caractéristiques du spectre FTIR des boues (Haddar et al., 2016) .....	73

Tableau 3.2	Identification des bandes caractéristiques du spectre FTIR des fibres TMP et CTMP (Faix, 1991; Fengel et al., 2011; Pandey et al., 1997; Usmanov et al., 1972).....	75
Tableau 3.3	Analyses de variance (ANOVA) avec les valeurs de F et leur signification pour chaque source de variation.....	82
Tableau 3.4	Propriétés mécaniques des panneaux de fibres fabriqués et commerciaux .....	83
Tableau 3.5	Propriétés physiques des panneaux de fibres fabriqués et commerciaux .....	99

## LISTE DES ACRONYMES

ANOVA	Analyse de variance
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
BDD	Boues de désencrage
BP	Boues primaires
BS	Boues secondaires
CI	Cohésion interne
CTMP	Pâte chimico-thermomécanique
DBO	La demande biochimique en oxygène
DCO	La demande chimique en oxygène
d.d.l.	Degré de liberté
F	Test statistique suivant la loi Fischer
FTIR	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier
GE	Gonflement en épaisseur
MDF	Panneaux de Fibres à densité moyenne
MDI	Monomère diphényle-méthyl-diisocyanate
MES	Matières en suspension
MOE	Module d'élasticité
MOR	Module de rupture, contrainte maximale
MP	Pâte mécanique
MUF	Colle mélamine-urée-formol
PF	Phénoplastes
ppm	Parties par million
TMP	Pâte thermomécanique
UF	Résine Urée- formaldéhyde

## RÉSUMÉ

La boue de désencrage est un résidu récupéré suite aux traitements des eaux usées provenant des usines de recyclage du papier. Cette boue représente une source d'impact environnemental et économique pour l'ensemble de l'industrie papetière. Les lois environnementales concernant la disposition des boues papetières et l'utilisation des liants synthétiques sont devenues de plus en plus rigoureuses et strictes donc il est indispensable de trouver des pistes de valorisations de ces résidus. Ainsi, l'objectif du projet est d'évaluer le potentiel de la boue de désencrage mélangée à des fibres pour la fabrication de panneaux de fibres isolants en utilisant des liants biosourcés (amidon, boue secondaire). L'isolation murale thermique et acoustique et les faux-plafonds sont les deux applications les plus communes pour ce type de panneau. Afin de bien évaluer l'effet des fibres de bois utilisées ainsi que l'effet de l'incorporation de ces résidus sur la fabrication des panneaux, des caractérisations chimiques, thermiques et morphologiques ont été effectuées sur ces matières premières. Les paramètres de mise en forme par les deux procédés sec et humide ont été optimisés en fonction de la teneur en boue de désencrage allant jusqu'à 40%. Les panneaux ont été caractérisés en termes de propriétés physiques et mécaniques selon les normes en vigueur (ASTM D1037 et ANSI A208). En comparant avec les produits disponibles sur marché, le procédé humide présente un véritable potentiel pour valoriser les boues de désencrage. En effet, les propriétés mécaniques des panneaux fabriqués selon ce procédé ont des modules de rupture comparables à ceux des panneaux commerciaux. L'ajout de l'amidon a contribué à une amélioration notable de ces propriétés. Par ailleurs, l'ajout des boues de désencrage améliore remarquablement la stabilité dimensionnelle des échantillons (gonflement en épaisseur et sorption d'eau).

## ABSTRACT

Deinking sludge is a residue recovered from the treatment of wastewater from paper recycling plants. This sludge represents a source of environmental and economic impact for the entire paper industry. Environmental laws concerning the disposal of paper sludge and the use of synthetic binders have become increasingly rigorous and strict, so it is essential to find ways of recycling these residues. Thus, the objective of the project is to evaluate the potential of deinking sludge mixed with fibres for the manufacture of insulating fibre boards using bio-based binders (starch, secondary sludge). Thermal and acoustic wall insulation and false ceilings are the two most common applications for this type of panel. In order to properly evaluate the effect of the wood fibres used and the effect of the incorporation of these residues on the manufacture of panels, chemical, thermal and morphological characterizations were carried out on these raw materials. The shaping parameters of both dry and wet processes have been optimized according to the deinking sludge content up to 40%. The panels have been characterized in terms of physical and mechanical properties according to current standards (ASTM D1037 and ANSI A208). By comparing with the products available on the market, the wet process has a real potential to be a new valorization alternative for deinking sludges. Indeed, the mechanical properties of panels manufactured by this process have modulus of rupture comparable to those of commercial panels. The addition of starch has contributed to a significant improvement in these properties. In addition, the addition of deinking sludge significantly improves the dimensional stability of the samples (thickness swelling and water sorption).

## INTRODUCTION

De nos jours, la consommation des différents panneaux agglomérés de fibres (basse densité ou d'isolation, panneaux de fibres à moyenne densité (MDF) et à haute densité (HDF) a connu une grande croissance à l'échelle mondiale. La production mondiale de ce type de panneaux a été multipliée 25 fois durant les 60 dernières années pour atteindre 119 millions de m<sup>3</sup> en 2017 (FAO, 2019). Cette augmentation peut être expliquée par la variété des domaines d'application de ces panneaux comme les bâtiments (planchers, faux plafond) et l'ameublement et par leurs performances en isolation thermique et acoustique. D'autre part, depuis le milieu du siècle dernier le bois est devenu la matière première principale pour la préparation des pâtes à papier. Depuis 2005, la production mondiale des papiers journaux est en chute. Elle a passé de 39 à 22 millions de tonnes en 2017. Malgré cette diminution, la production mondiale totale des papiers et cartons ne cesse d'augmenter pour atteindre 413 millions de tonnes en 2017 (FAO, 2019). Aussi, l'industrie chimique de la cellulose (textiles, matières plastiques, vernies, explosives) absorbe des quantités croissantes de bois. Ainsi, les augmentations du taux de bois utilisé vont causer des réductions importantes des approvisionnements en fibres au sein des industries et vont augmenter la demande de la matière première naturelle issue des forêts d'où une récolte excessive qui menace le bon déroulement de la préservation des zones forestières. Afin d'optimiser l'utilisation des ressources forestières et de réduire la charge environnementale, la valorisation des résidus industriels pour la production de produits commerciaux devient une alternative intéressante. Elle présente aussi un moyen efficace pour se débarrasser de ces déchets nuisibles à l'environnement. Dans ce contexte, cette étude tend à traiter le cas des boues de désencrage issues des traitements des eaux usées comme étant les déchets à valoriser pour la production des panneaux de fibres isolants. L'utilisation des papiers recyclés a des effets économiques et environnementaux très importants. En effet, l'utilisation de ces papiers comme source pour la production des pâtes réduit significativement la consommation de l'eau et la demande en énergie. Lors du processus, les papiers



recyclés vont générer des quantités importantes de résidus qu'on appelle les boues papetières. En 2015, plus de 2,1 millions de tonnes de matières résiduelles issues des papetières québécoises ont été générées avec une diminution de 4 % par rapport à 2012 (RECYC-QUÉBEC, 2015). Par contre, les quantités recyclées entre 2012 et 2015 ont augmenté de 8 % pour atteindre 640 000 tonnes. Les activités des 41 papetières actives au Québec en 2015 sont régies par un règlement sévère et ont des exigences particulières à respecter pour le traitement des résidus des usines. Ainsi, plusieurs papetières ont recours à leur propre lieu d'enfouissement ou installation de combustion dans le même site de production pour le traitement de leurs matières résiduelles. Ces sites d'enfouissement privés ont éliminé 23% de la matière résiduelle contre 2% pour les lieux d'enfouissement technique (LET) autorisés (RECYC-QUÉBEC, 2015). En plus de l'impact environnemental, le stockage de ces boues présente un grand problème aux industriels, car il entraîne des charges et des coûts supplémentaires pour s'en débarrasser. Pour cela, il est impératif de trouver des pistes pour valoriser ces déchets en évitant les effets indésirables sur l'environnement.

Les réglementations et les législations concernant la valorisation de ces boues diffèrent d'un pays à un autre. La politique québécoise restreint fortement l'enfouissement et l'élimination de ce résidu au profit de sa valorisation. Ainsi, de nouvelles pistes doivent être suggérées pour l'utilisation de cette matière résiduelle. À cause de sa teneur élevée en matières inorganiques, les boues de désencrage ne peuvent pas être valorisées par les bioprocédés de digestion bactérienne. Par contre, la présence des fibres de bois dans la composition des boues nous a fait penser de les incorporer dans les panneaux de fibres isolants. Une telle incorporation peut diminuer significativement la demande en matière première purement naturelle comme le bois d'où la contribution dans la préservation des forêts et de la richesse naturelle. Dans ce cadre, ce projet consiste à évaluer le potentiel des boues de désencrage pour la fabrication des panneaux de fibres à basse densité qui répondent aux exigences du marché. L'objectif général de cette

étude est d'évaluer le potentiel des boues de désencrage pour la fabrication des panneaux de fibres isolants. Les objectifs spécifiques sont :

- Caractériser les propriétés chimiques, thermiques et morphologiques des boues de désencrage et des fibres pour bien comprendre leurs effets sur les propriétés des panneaux;
- Optimiser les paramètres de mise en forme des panneaux isolants pour les deux procédés humide et sec;
- Évaluer l'effet de la teneur en boue de désencrage sur les propriétés des panneaux fabriqués;
- Évaluer l'effet de l'ajout des liants biosourcés (amidon et boues secondaires) sur les propriétés des panneaux;
- Comparer les propriétés des panneaux obtenus aux exigences minimales des normes et à celles des panneaux commerciaux.

Afin d'atteindre l'objectif souhaité, on s'est basé sur l'hypothèse que les composantes du bois ayant des liaisons hydroxyles plus ou moins libres peuvent former des liaisons hydrogènes suffisantes entre les fibres. Ceci prévoit que, contrairement au procédé sec, la présence de l'eau dans le procédé humide sert à favoriser la création de ces liaisons. Ceci résulte que le procédé humide est le plus adéquat pour une la fabrication des panneaux de fibres en respectant un minimum d'exigences commerciales mécaniques et physiques. On s'est basé aussi sur l'hypothèse que les quantités de cendres dans les boues de désencrage incorporées nuiront aux liaisons créées entre les fibres, réduiront ainsi les propriétés mécaniques des échantillons. Cependant, vu l'hydrophobicité de ces cendres, une amélioration de la stabilité dimensionnelle est attendue.

## CHAPITRE I

### REVUE DE LITTÉRATURE

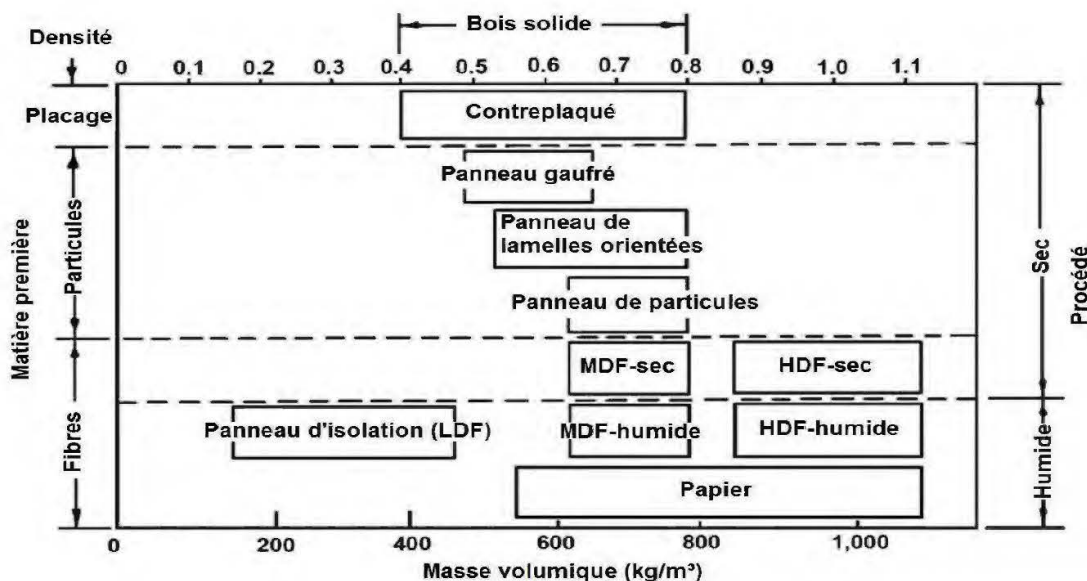
#### **1.1. Les panneaux à base de bois**

Les panneaux à base de bois sont des produits obtenus par reconstitution à partir d'éléments de bois de différentes dimensions. Les produits obtenus par une reconstitution à partir d'éléments de bois de dimensions importantes ont, généralement, des caractéristiques mécaniques plus importantes. Ces caractéristiques sont même meilleures à celles des bois dont ils sont issus (Berglund et al., 2005; FAO, 1993). Généralement, ces panneaux sont obtenus par un cycle de cinq opérations, à savoir, le débitage, le séchage, l'encollage, le pressage et la finition. Le processus de fabrication peut être continu ou discontinu. Parmi ces produits, les bois lamellés collés, les bois de placages lamellés (ou stratifié) (laminated veneer lumber) et les panneaux contreplaqués sont les plus connus. Selon l'usage de ces produits, différents types de colle peuvent être utilisés pour la fabrication. Par exemple, pour l'usage extérieur ou pour un usage dans des lieux à risques importants d'humidité, les colles de type résorcine, des aminoplastes (MUF ou UF) ou vinyliques renforcées sont les mieux adaptées. Pour des usages internes et les meubles, les colles de types urée-formol ou vinyliques sont plutôt utilisées (Marchal, 1995; Wieland, 2007).

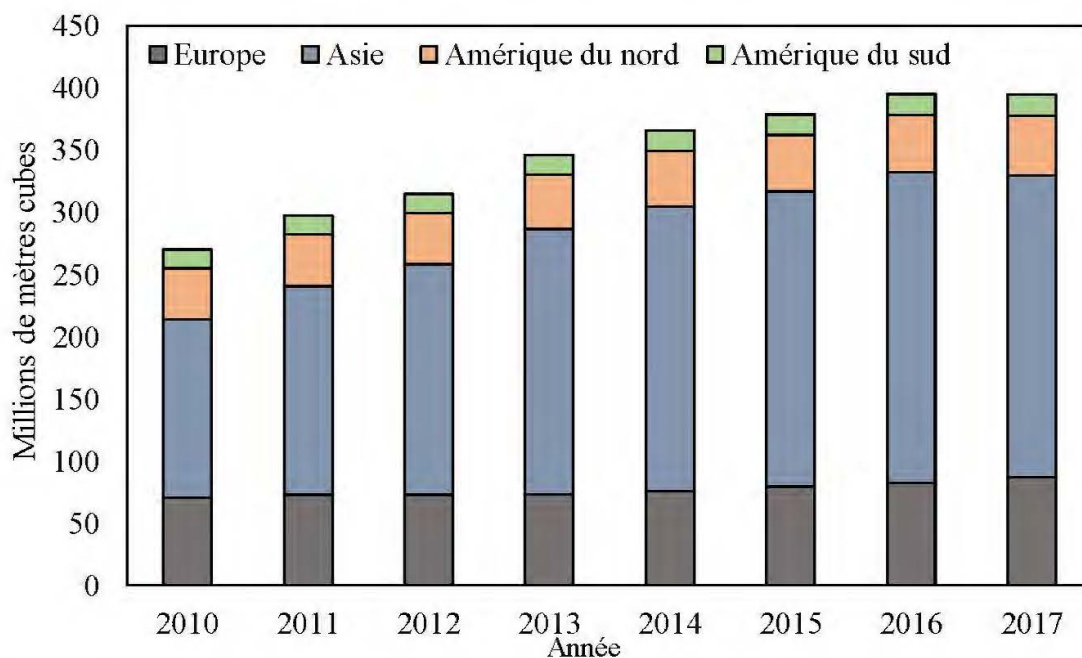
Les produits obtenus par une reconstitution à partir d'éléments de bois de petites dimensions sont fabriqués à partir d'un processus en continu plus ou moins automatisé et informatisé. Cette fabrication est contrôlée par quatre phases principales; la mise en copeaux ou en fibres, la préparation du matelas, la phase de cuisson sous presse chaude et la finition. Ces derniers sont répartis en deux grandes catégories; les panneaux de particules et les panneaux de fibres. Cette classification se fait en fonction de l'élément de base constitutif, du liant utilisé et le procédé de fabrication. Généralement, ces

produits ont des caractéristiques mécaniques inférieures à celles des bois dont ils sont issus (FAO, 1993). Pour les panneaux de particules, les copeaux issus de la découpe du bois ou provenant des déchets d'autres industries comme les scieries sont assemblés avec un liant polymérisé sous presse chauffante. Les liants souvent utilisés sont les liants aminoplastes (UF ou MUF), phénoplastes (PF) ou des isocyanates. En fonction du positionnement des particules par rapport aux autres, de la taille des copeaux utilisés, la quantité et le type du liant, la masse volumique et le revêtement, il existe plusieurs sous-types de ce produit (les panneaux de particules classiques, les panneaux à particules orientées, les panneaux gaufrés et les panneaux extrudés). La masse volumique de ces panneaux se situe entre 650 et 780 kg/m<sup>3</sup> (Girods, 2008; Nenonene, 2009). Les panneaux de fibres, qui sont l'intérêt de ce projet, seront élaborés en détail dans les prochaines parties de ce document.

La figure 1.1 montre la classification des panneaux à base de bois selon la grosseur des éléments de reconstitution, la masse volumique et le procédé de fabrication. La figure 1.2 illustre la répartition de la production des panneaux à base de bois dans le monde pour les dernières années (2010 - 2017). Une augmentation de la production mondiale totale de 69% a été notée. En 2017, l'Asie est le producteur principal de ces panneaux avec 243 millions de m<sup>3</sup> dont 82% produits en Chine. La contribution à la production mondiale du nord Amérique n'a pas dépassé les 48 millions de m<sup>3</sup> en 2017 (seulement 26% pour le Canada) (FAO, 2019)



**Figure 1.1** Classification des différents panneaux à base de bois selon la grosseur des éléments de reconstitution, la masse volumique et le procédé de fabrication (Suchsland et al., 1987)



**Figure 1.2** La répartition de la production mondiale de panneaux à base du bois entre 2010 et 2017 (D'après les données de FAOSTAT, 2019)

## 1.2. Les panneaux de fibres

### 1.2.1. Généralités

Les panneaux de fibres sont la combinaison des fibres lignocellulosiques avec des liants comme les colles UF, MUF, PF et MDI ou des minéraux comme le ciment ou sans liant à partir d'un procédé sec ou humide. Cette fibre est obtenue par déstructuration du bois par différents procédés mécaniques, thermomécaniques, chimiques ou chimico-thermomécaniques. Sous l'action de la pression et la chaleur, des matelas de fibres sont comprimés jusqu'à une densité définie. Ces panneaux présentent une structure beaucoup plus homogène que les panneaux de particules et ceux de type contreplaqué, car les éléments de base qui sont les fibres seront totalement réarrangés au hasard sans direction privilégiée (FAO, 1993). Le produit obtenu est défini selon la densité finale du panneau : panneau de fibres à basse, moyenne ou haute densité. Les panneaux à basse densité sont appelés souvent les panneaux de fibres isolants et ceux de haute densité sont appelés les panneaux de fibres durs. Ces panneaux agissent différemment mécaniquement et physiquement en fonction du type et de l'épaisseur de produit. La Norme ANSI A208 liée aux panneaux de fibres d'utilisation intérieure (surtout les panneaux MDF) a défini une classification en fonction des valeurs du module de rupture, du module d'élasticité, de traction, de résistance à l'arrachement des vis et de gonflement. La norme ASTM D 1554 a précisé aussi les sous-niveaux du MDF selon les intervalles de densité : faible en deçà de  $640 \text{ kg/m}^3$ , moyenne entre  $640$  et  $800 \text{ kg/m}^3$ , et élevée au-delà de  $800 \text{ kg/m}^3$ . Les panneaux de fibres sont beaucoup demandés grâce à l'usinabilité de leurs chants et à leur surface exceptionnellement lisse. La plus grande part de la production de panneaux MDF aux États-Unis est destinée au marché des meubles. Pour ce secteur d'activité, il y a eu une augmentation de la consommation de 42% au cours des années 80 et de 56% au cours des années 90. Cependant, depuis 2002, l'utilisation du panneau MDF pour les meubles a connu une chute de 10% entre 2002 et 2005 (Belley, 2009). Les panneaux de fibres

MDF ayant des faibles épaisseurs sont utilisés pour les parties inférieures des tiroirs, de meubles et l’emballage. Pour des épaisseurs plus grandes (4-8mm), ces panneaux sont utiles pour les revêtements des murs, les meubles et les planchers stratifiés. Les panneaux ayant des épaisseurs élevées (8-80mm) peuvent servir comme des armatures et supports. Ils sont aussi utiles pour les composants des fenêtres et la fabrication des armoires et d’autres meubles. Ils peuvent aussi servir pour fabriquer les cœurs des portes (Vidal Bastias, 2006). Les panneaux de fibres durs (haute densité) sont utilisés surtout pour les meubles (les fonds et les dos des tiroirs) et dans les constructions. Les panneaux de fibres isolants (à basse densité) sont utilisés soit pour les faux-plafonds soit pour l’isolation thermique et acoustique. Le tableau 1.1 illustre les différences au niveau de quelques propriétés des différents panneaux de fibres.

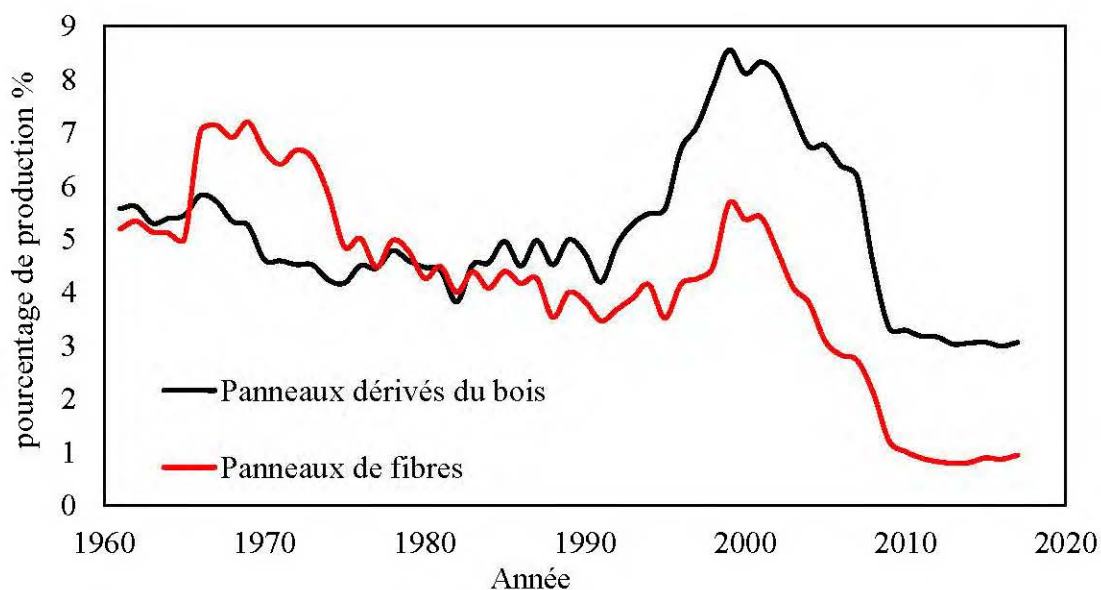
**Tableau 1.1** Les limites de quelques propriétés mécaniques, physiques et thermiques des panneaux de fibres (Lewis et al., 1965).

<b>Propriété</b>	<b>Type de panneau</b>	<b>Valeur</b>
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Panneau isolant	160- 400
	MDF	400-800
	Panneau dur	>800
Module de rupture (MPa)	Panneau isolant	1,4 – 5,5
	MDF	6,2 – 15,8
	Panneau dur	20 - 70
Absorption d’eau 24h (%)	Panneau isolant	1 – 10
	MDF	5 – 7
	Panneau dur	3 – 20
Conductivité thermique (W/m. K)	Panneau isolant	0,039 – 0,065
	MDF	0,07 – 0,086
	Panneau dur	0,115 – 0,2

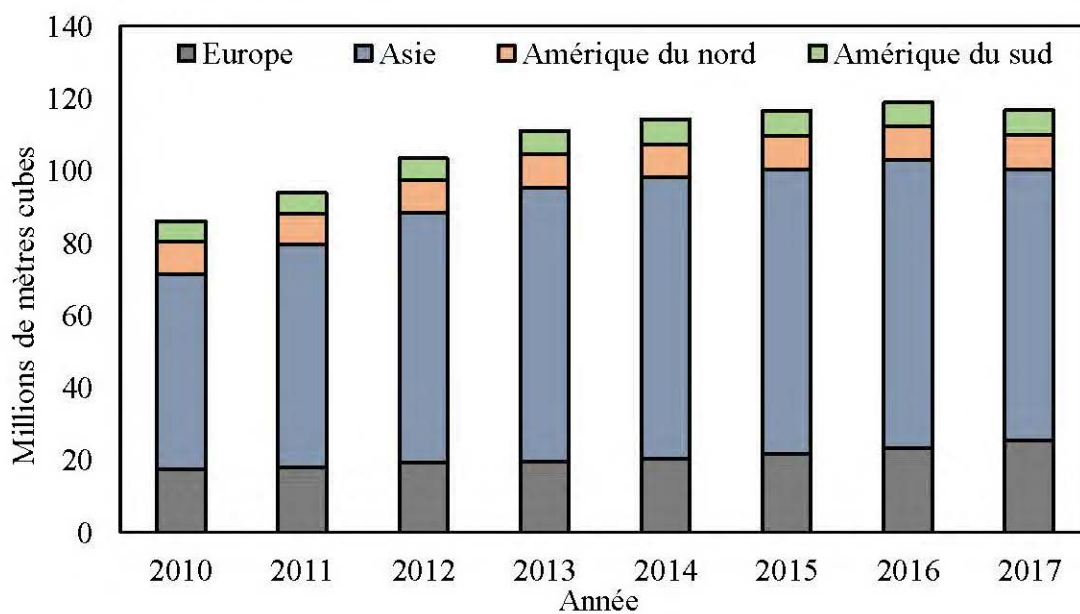
### 1.2.2. L'industrie des panneaux de fibres

Il y a plusieurs siècles, les Égyptiens et les Japonais fabriquaient des produits à l'aide de fibres de bois et de colle naturelle. Ce produit a été fabriqué industriellement en Angleterre vers la fin du dix-huitième siècle. Cette technique de fabrication a traversé l'Atlantique pour rejoindre l'Amérique où une première usine des panneaux de fibres a été bâtie (Belley, 2009). Cette usine spécialisée en panneaux de fibres à moyenne densité (MDF) a été construite à Deposit, New York en 1965 et depuis ce temps l'industrie du MDF a connu le taux de croissance le plus élevé dans l'industrie des panneaux agglomérés à base de bois à l'échelle mondiale. Entre 1965 et 1966, la production de l'industrie canadienne des panneaux de fibres est passée de 318 400 m<sup>3</sup> à 865 600 m<sup>3</sup>. Entre 1995 et 2004, la production a triplé pour atteindre une production de 2 130 000 m<sup>3</sup>. Ces deux augmentations remarquables ont été suivies par une énorme chute de 60% qui a coïncidé avec la crise économique mondiale entre 2007 et 2012. Depuis 2012, la production canadienne des panneaux de fibres a augmenté pour atteindre 1,12 million de m<sup>3</sup> en 2017 représentant ainsi, 1% de la production mondiale (Figure 1.3). De nos jours, les usines nord-américaines font face à la concurrence asiatique. Depuis quelques années, l'importation de panneaux de fibres provenant de l'Asie a connu une forte augmentation aux États-Unis (Belley, 2009). La figure 1.4 confirme la dominance de l'Asie dans la production des panneaux de fibres dans ces dernières années. En 2017, elle a contribué de 63% de la production mondiale pour atteindre 75 millions de m<sup>3</sup>. L'industrie chinoise a clôturé l'année 2017 avec une production de 60 millions de m<sup>3</sup>, multipliant ainsi, par 12 le chiffre réalisé en 2000.





**Figure 1.3** La contribution canadienne en pourcentage à la production mondiale des panneaux à base de bois et des panneaux de fibres entre 1961 et 2017 (D'après les données de FAOSTAT, 2019)



**Figure 1.4** La répartition de la production de panneaux de fibres dans le monde pour les dernières années (2010 - 2017) (D'après les données de FAOSTAT, 2019)

### 1.2.3. Les panneaux de fibres isolants

En 1909, Un panneau rigide fabriqué dans un moule et séché au soleil à partir de pâte à papier à base de fibres de bois fut le premier panneau isolant au Canada. En 1914, une usine de fabrication commerciale de panneaux isolants a été lancée par la compagnie Minnesota and Ontario Paper Co. aux États-Unis (Lewis et al., 1965). Ces panneaux isolants sont fabriqués pour des utilisations dans la construction de bâtiments qui exigent des panneaux légers, rigides et ayant des bonnes propriétés d'isolation thermique. Dans les développements ultérieurs, les panneaux isolants ont été utilisés non seulement pour l'isolation thermique, mais aussi pour la résistance structurelle ou pour la suppression de la réflectance acoustique. Dans la pratique, on distingue deux types de panneaux isolants : Ceux pour des usages internes ayant une couleur claire uniforme et généralement peint en usine et d'autres pour des usages externes. Ces derniers sont imprégnés et enduits d'asphalte pour améliorer leur résistance à l'eau. Les fibres de bois sont enlacées et fusionnées avec de la cire naturelle grâce à la chaleur et à la pression et les colles synthétiques ne sont pas nécessaires.

Contrairement aux panneaux de fibres isolants, les panneaux de fibres à densité moyenne nécessitent une adhérence supérieure à celle fournie par les liaisons naturelles. Pour cela, une résine thermoplastique est utilisée pour produire des liens plus forts. Pour les panneaux de fibres durs, les fabricants utilisent des résines phénoliques comme liants. Ces résines augmentent la résistance à l'eau ainsi que la force d'adhérence. L'humidification des panneaux isolants n'est pas une pratique courante car la teneur finale en humidité à la sortie des séchoirs est inférieure à l'équilibre cible pour la plupart des utilisations. Cependant, la porosité de ces panneaux peut causer des changements d'humidité lors de leur exposition à des changements climatiques. Pour remédier à ces changements, les fabricants recommandent un conditionnement en milieu de travail avant la mise en service (Lewis et al., 1965).

Chen et al. (2015) ont fabriqué des panneaux de fibres isolants à partir de fibres végétales seulement selon un procédé humide sans chauffage, pressage et adhésifs courants. Ils ont suggéré que ces panneaux sont économiques et sans danger pour la santé humaine. Ils ont confirmé aussi leurs excellentes propriétés telles que la basse densité par rapport aux autres panneaux de fibres et une faible conductivité thermique. Cependant, cette faible densité a causé des faiblesses au niveau des propriétés mécaniques qui ont limité leur application. Pour remédier à ces limites, Chen et al. (2015), se sont intéressés à l'amélioration des propriétés mécaniques des panneaux de fibres isolants par l'incorporation des composés inorganiques tels que le Silicium (Si) et l'aluminium (Al). Les résultats ont indiqué que les propriétés mécaniques et ignifuges ont été améliorées. Des résultats spectroscopiques FTIR ont révélé que des liaisons covalentes ont été formées entre les charges inorganiques de Si-Al et les fibres de bois. De plus, d'autres études antérieures ont confirmé que les conditions de traitement des charges inorganiques et leur incorporation affectent de manière significative les propriétés des panneaux isolants. Par exemple, l'étude de Fu et al. (2011) qui ont confirmé des améliorations au niveau des propriétés mécaniques en ajoutant le dioxyde de silicium  $\text{SiO}_2$  et l'étude de Mahr et al. (2012) qui a évalué l'effet du dioxyde de titane  $\text{TiO}_2$  sur ces mêmes propriétés. Müller et al. (2008) ont fabriqué des panneaux de fibres isolants produits par voie humide en ajoutant des quantités croissantes de liant contenant 10, 20 et 30 % d'amidon de pomme de terre. L'objectif de leur travail était d'étudier les changements des propriétés chimiques des fibres de bois pendant le processus de fabrication des panneaux isolants et d'identifier les altérations chimiques causées par l'ajout de différents liants biosourcés et par les différentes méthodes de séchage (La méthode industrielle qui est l'utilisation des séchoirs à tapis dans la gamme de  $160^\circ$ -  $220^\circ\text{C}$  et le séchage par micro-ondes). Les analyses spectrales de l'FTIR ont révélé des modifications chimiques au niveau de la bande d'association O-H des glucides qui distinguent les deux différentes méthodes de séchage. Aussi, ils ont remarqué que l'ajout de l'amidon a diminué l'absorbance des spectres FTIR des produits obtenus et que ces diminutions sont étroitement liées à la

quantité de liant ajouté. Hansson et al. (2003) ont essayé le séchage par micro-ondes. Ils ont observé qu'il est beaucoup plus rapide et conserve une meilleure qualité des produits séchés. Des panneaux de fibres d'isolation thermique à partir d'un gâteau généré lors de la bioraffinerie de tournesol dans une extrudeuse à deux vis ont été fabriqués par Evon et al. (2014) à l'aide d'une presse hydraulique chauffée. Les protéines ont servi comme étant un liant interne, et l'enchevêtrement des fibres lignocellulosiques ont également servi de renfort. Ils ont prouvé que les conditions de thermo-pressage ont une influence importante sur la densité et sur les propriétés mécaniques et thermiques des panneaux. Ils ont aussi confirmé que l'isolation thermique s'améliore en diminuant la densité du panneau. D'autres recherches ont été élaborées afin d'améliorer la stabilité dimensionnelle des panneaux de fibres isolants. Rowell et al. (2007), par exemple, ont travaillé sur la fabrication des panneaux de fibres isolants en utilisant deux types de traitements, un traitement d'acétylation et un traitement à la vapeur. Ils ont prouvé que les panneaux de fibres acétylés étaient plus stables dimensionnellement que les panneaux de fibres traitées à la vapeur indépendamment de la densité du panneau. Aussi, ils ont observé que la stabilité dimensionnelle augmente avec la diminution de la densité de l'échantillon et que l'adhésion entre les fibres diminuent proportionnellement avec la densité du panneau. En effet, lors de la formation des panneaux à très faibles densité, la pression appliquée n'est pas assez suffisante pour faire rapprocher et unir l'ensemble des fibres. Ceci était probablement dû à un gonflement interne et à une très faible compression des fibres pendant le pressage. Le gonflement interstitiel permet un gonflement sans agrandissement de l'échantillon, et un faible niveau de compression des fibres signifie qu'il n'y a pratiquement pas de contrainte sur les fibres pendant l'immersion dans l'eau. Le tableau 1.2 montre des exemples concrets de quelques recherches antérieures qui ont montré que la conductivité thermique des panneaux isolants est influencée par leur densité et que les matériaux à basse densité sont les moins conducteurs. Ce tableau présente aussi des comparaisons avec les matériaux isolants conventionnels comme le polystyrène, la mousse polyuréthane, la laine de roche, la laine de verre et le liège

**Tableau 1.2** Comparaison thermique entre les panneaux de fibres isolants et les isolants habituels

<b>Matériau</b>	<b>Densité (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Conductivité thermique à 25°C (mW / m. K)</b>	<b>Référence</b>
Panneau isolant (moelle du tournesol)	36	38,5	Vandenbossche et al. (2012)
Panneau isolant (coque de coco)	250-350	46-68	Panyakaew et al. (2011)
Panneau isolant (fibres de coton)	450	81,5	Zhou et al. (2010)
Panneau isolant (fibres de chanvre)	369-475	89,9-107,9	Benfratello et al. (2013)
Panneau isolant (coque de coco)	540	103,6	Khedari et al. (2003)
Panneau isolant (palmier dattier)	754	150	Chikhi et al. (2013)
Mousse de polyuréthane	30	29	
Laine de roche	20	50	
Laine de verre	18	44	
Laine de cellulose	20 - 30	43	Conteville et al. (2009)
Polystyrène extrudé	25 - 40	35	
Polystyrène expansé	7 - 300	38 - 50	
Liège expansé	17 - 21	34-42	

Kawasaki et al. (1998) ont étudié des panneaux de fibres isolants avec des densités allant de 50 à 500 kg/m<sup>3</sup>. Ces panneaux ont été fabriqués par pressage par injection de vapeur en ajoutant 10% et 30% d'un composé d'isocyanate jouant le rôle d'un adhésif et en utilisant deux longueurs de fibres différentes (une fibre longue et une fibre courte). Ils ont trouvé que les panneaux produits à partir de courtes fibres ont de meilleures propriétés mécaniques et dimensionnelles que ceux fabriqués à partir des fibres longues. Aussi, ils ont remarqué que la conductivité thermique des panneaux isolants dépend plus de la densité du panneau que du type de liant ou de la dimension de la fibre. Pour une densité inférieure à 200, la conductivité thermique calculée est équivalente à celle des matériaux d'isolation thermique habituels tels que la mousse polystyrène et la laine de roche. Généralement, la conductivité thermique d'un matériau bois-composite est inférieur à celle du bois à la même densité. En particulier, dans les panneaux de fibres, les pores ont un profil de distribution plus constant que celui du bois, de sorte que la conductivité thermique est moins affecté par la circulation d'air. Ceci a été confirmé par Xie et al. (2011) qui ont aussi travaillé sur des panneaux de fibres isolants à très basse densité (55 kg/m<sup>3</sup>) et qui ont rapporté une valeur de conductivité thermique de 0,035 W/m.K, légèrement inférieur à celle rapportée par Kawasaki et al. (1998) (0,039 W/m.K). En effet, ils ont confirmé que la conductivité thermique est principalement déterminée par la taille des vides et la nature inhérente de l'air et que pour une même densité, plus la taille du vide est petite, plus le flux d'air est difficile à circuler, donc plus la conductivité thermique est faible. Le panneau isolant fabriqué par Xie et al. (2011) avait une densité beaucoup plus faible que le panneau de fibres de la définition classique et avait des surfaces lisses avec des fibres éparpillées au hasard sur la surface, présentant ainsi une structure poreuse. Contrairement au MDF conventionnel dans lequel les fibres sont réparties uniformément sur l'épaisseur, les fibres dans le panneau isolant à très faible densité ont tendance à former des couches enchevêtrées et désordonnées. Ils ont trouvé que les

propriétés mécaniques des panneaux isolants fabriqués étaient très faibles en raison de leur densité extrêmement faible, comparativement au MDF. Afin d'améliorer ces propriétés mécaniques, il faut soit améliorer la performance de la fibre de bois, en la rendant plus rigide et plus résistante, soit d'améliorer l'adhésion entre les fibres. Ils ont suggéré que l'augmentation de la teneur en résine peut être une approche simple pour améliorer à la fois la rigidité des fibres et l'adhésion entre elles.

#### 1.2.4. Le procédé de fabrication des panneaux de fibres

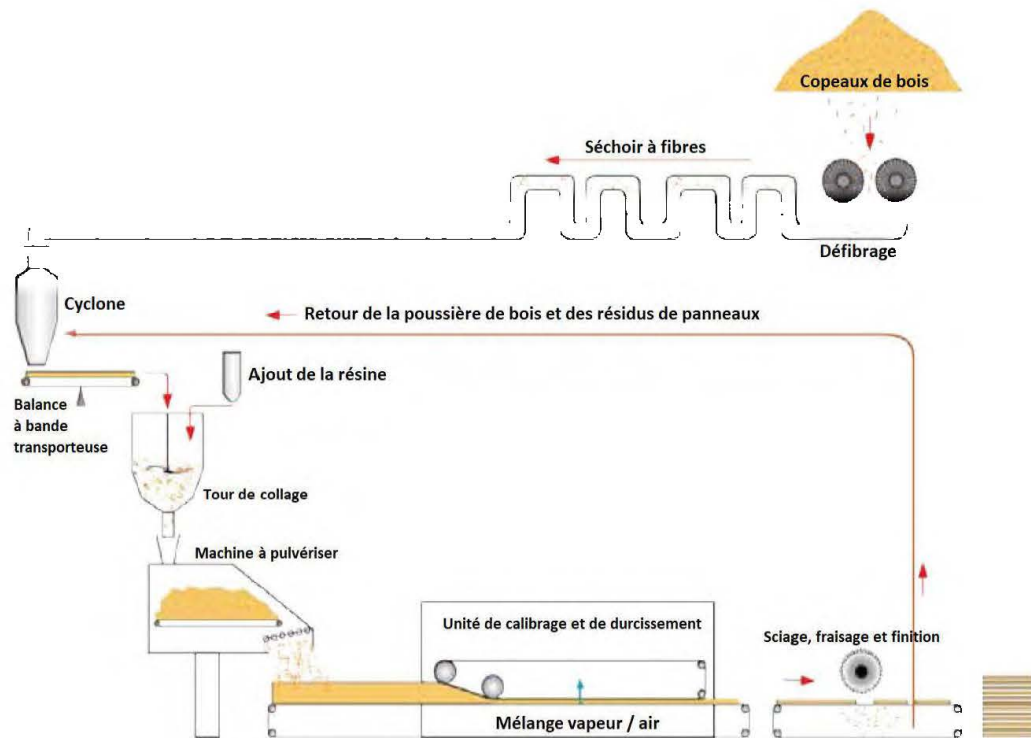
La fabrication des panneaux de fibres peut se faire par deux méthodes différentes : par voie humide et par voie sèche. Pour le procédé humide, lors du pressage, une mauvaise cuisson de la résine a été notée car la résine formaldéhyde (UF) se dégrade par une hydrolyse acide lorsqu'elle est chauffée en présence de la vapeur d'eau (Fleischer et al., 2000). Donc, la fracture des panneaux de fibres issus d'un procédé humide est liée à la rupture du joint de colle et non pas au bris de la fibre de bois. Aussi, le procédé humide nécessite beaucoup d'eau. Pour ces raisons, le procédé humide est rarement utilisé. Les panneaux issus du procédé sec ont des propriétés mécaniques meilleures et les équipements pour ce procédé sec évoluent rapidement (Vidal Bastias, 2006). Pour les procédés industriels de la fabrication des panneaux de fibres par voie sèche, la matière première est soit des fibres lignocellulosiques, soit d'agglomérats de fibres des feuillus et/ou des résineux. Les fibres sont traitées à la vapeur pour ramollir la lignine (l'étuvage), puis elles subissent l'opération de défibrage ou raffinage (fragmentation); la résine est ensuite incorporée pour maximiser l'adhésion entre les fibres (collage). Ensuite, le séchage des fibres est effectué pour diminuer leur teneur en humidité, puis celles-ci sont déposées en un matelas homogène (feutrage) qui est premièrement prépressé à froid pour diminuer l'énergie durant l'opération suivante. L'ébauche est fortement pressée à chaud (pressage). Cette étape a pour but de consolider l'ébauche en vue d'obtenir l'épaisseur et la densité du panneau désirées, de polymériser le liant et de stabiliser le panneau. Enfin, il faut poncer la surface (finition) pour donner ainsi

un panneau prêt à l'emploi (Vidal Bastias, 2006). Cette démarche constitue un aperçu général sur les fabrications typiques des panneaux par le procédé sec. Cependant, des modifications peuvent être faites à une ou plusieurs étapes surtout lors d'une fabrication à l'échelle du laboratoire. Dans le cas d'absence de liants, la cohésion des fibres est assurée par la lignine réactivée par la température et d'autres liants naturels présents dans les fibres de bois. La fabrication des panneaux sans ajout de liant est considérée comme étant une piste importante pour diminuer l'impact négatif sur l'environnement. Les liants les plus utilisés pour la fabrication des panneaux sont les formaldéhydes. Ces résines formaldéhydes contiennent des composés organiques volatils nuisibles pour l'être humain et l'environnement (Li, 2009). Le formaldéhyde est maintenant considéré comme un produit cancérigène. Donc, il est plus tolérable de produire des résines très réactives avec cette substance. Le pressage est une étape très importante pour l'industrie puisqu'elle influence significativement les produits finis. En effet, cette étape consomme beaucoup d'énergie et le temps de pressage affecte la productivité. Aussi, les mécanismes de transfert de chaleur et de masse qui se produisent influencent la qualité des produits finis. Wolcott (1989) explique dans ses travaux que les étapes principales qui caractérisent le cycle de pressage sont les suivantes : la première étape est la consolidation dans laquelle le plateau supérieur de la presse entre en contact avec la surface supérieure de l'ébauche et l'élimination des espaces vides commence jusqu'à ce que l'épaisseur finale soit atteinte, en même temps que la pression évolue dans le temps. Cette étape est équivalente à la fermeture de la presse désignée par le temps de fermeture de la presse. La deuxième étape est une relaxation transitive. Elle commence après avoir obtenu le maximum de pression sur l'ébauche. La diminution de la pression durant cette étape est graduelle et donne du temps pour la polymérisation du liant. Une deuxième relaxation asymptotique se produit avec une diminution plus constante de la pression. Finalement, la décompression ou dégazage se produit quand les plateaux s'ouvrent et se dégagent de l'ébauche.



Dans l'industrie, il existe différentes méthodes pour effectuer le pressage comme le pressage par presse multi-étages qui est la méthode la plus vieille et la moins coûteuse. La presse multi-étage permet une meilleure flexibilité pour changer les caractéristiques du panneau (épaisseur et taille). L'industrie des panneaux de fibres est dominée par la presse continue qui est constituée d'un système de pressage formé de deux rubans en acier. Les rubans en acier sont pilotés par des tambours et ils tiennent un tapis roulant à tiges (Figure 1.5). En comparaison à la presse multi-étages, la presse continue permet un temps de pressage plus court et une production de panneaux ayant des propriétés plus homogènes. Il existe une autre méthode pour produire les panneaux homogènes, c'est le système à injection de vapeur. Son système de chauffage est très rapide et entraîne des temps de pressage courts et une bonne plastification du bois. Les capacités productives sont supérieures à 1100 m<sup>3</sup>/jour (Wieland, 2007).

Les panneaux de fibres durs sont généralement fabriqués par voie humide et sans incorporation des liants avec une température de pressage entre 180 et 200 °C. Le mat pour ce type de panneau est formé sur une toile métallique. Un pré-pressage à froid est nécessaire pour diminuer la quantité d'eau du mat. Vu l'instabilité dimensionnelle de ces panneaux, des résines phénoliques peuvent être incorporées dans la pâte pour améliorer cette caractéristique. Les panneaux de fibres isolants sont aussi fabriqués par un procédé humide et peuvent être imprégnés avec des additifs pour augmenter leur résistance à l'humidité. Ces panneaux ont un coefficient de conduction thermique inférieur ou égal à 0,055 W/(m. K). Ce type de panneau peut aussi être fabriqué par un procédé à sec (FAO, 1993; Wieland, 2007).



**Figure 1.5** Procédé de fabrication des panneaux de fibres isolants par voie sèche, proposé par l'industrie française Gutex (Delisée, 2016)

### 1.3. Les procédés de mise en pâte

Dans l'industrie des panneaux à base de bois, l'élément de base qui est le bois est réduit éventuellement en lamelles, copeaux ou fibres dépendamment du type de produit envisagé. La réduction en fibres est appelée réduction en pâte ou la mise en pâte. Il s'agit de la même pâte utilisée pour les industries papetières. Plusieurs procédés ont été élaborés pour obtenir cette pâte. Les procédés les plus importants sont : mécanique MP, thermomécanique TMP, chimique ou kraft et chimico-thermomécanique CTMP (Chen et al., 1989).

### 1.3.1. Procédé de mise en pâte mécanique de la meule

Un procédé de défibrage classique est utilisé pour l'obtention de cette pâte. En effet, les billes sont placées parallèlement à la rotation de la meule abrasive sous pression ou à une pression atmosphérique. Un rendement de 95% est confirmé par Chen et al. (1989) pour ce type de procédé purement mécanique.

### 1.3.2. Procédé de mise en pâte thermomécanique (TMP)

Pour ce type de pâte, les liaisons entre les fibres sont brisées par des raffineurs appelés aussi défibreurs. Un ramollissement des fibres est effectué pour faciliter le déroulement de ce procédé. Pour cela, les copeaux de bois sont placés dans la vapeur à une température supérieure à 100°C avant de commencer le défibrage. Ce dernier s'effectue généralement sous pression dans un raffineur à deux disques rotatifs qui tournent à une grande vitesse. Dans certains cas, afin d'augmenter la proportion des fibres longues et d'améliorer les caractéristiques de la pâte, un autre raffineur monté en série avec le premier est ajouté. Pour ce type de procédé, la pâte est produite grâce aux cycles successifs de compression et de décompression que subit la matière première. Le rendement pour le procédé TMP est estimé à 90% (Chen et al., 1989).

### 1.3.3. Procédé de mise en pâte chimico-thermomécanique (CTMP)

Ce procédé est généralement similaire au procédé TMP sauf qu'il est précédé par un traitement chimique de sulfonation. En effet, la première étape de ce procédé de mise en pâte alcaline consiste à mélanger les copeaux avec le sulfite de sodium concentré de 4 à 12% à une température qui varie entre 120 et 160°C pendant 15 à 110 minutes selon l'essence de bois utilisée. Un rendement de 80% est constaté pour ce type de procédé (Chen et al., 1989).

#### 1.3.4. Procédé de mise en pâte chimique

La première étape pour ce procédé est la cuisson. Cette étape se déroule dans de grands lessiveurs cylindriques verticaux et nécessite une solution de soude caustique avec des carbonates de calcium et de sulfate de sodium comme agent de cuisson. Selon l'essence de bois utilisée, la température de cuisson est généralement comprise entre 170 et 175°C et cette période de cuisson peut durer de deux à cinq heures. Le but de cette étape est de dissoudre la lignine qui lie les fibres afin de les séparer les unes des autres. Chevalier-Billosta (2008) a bien détaillé le mécanisme de cette dissolution. En effet, ça se résume en trois étapes : 1) adsorption des hydroxydes et hydrosulfures sur la lignine, 2) réaction de dégradation en surface de la lignine et 3) désorption du produit dégradé. Un lavage avec l'eau est exigé après cuisson pour éliminer les réactifs chimiques de cuisson. Le rendement de ce procédé est le plus faible et il ne dépasse pas 55%. Le blanchiment de cette pâte est la plutôt difficile (Chen et al., 1989).

### 1.4. Liants utilisés dans l'industrie des panneaux

Avant 1800, l'homme a eu recours à des produits naturels comme les colles à base de protéines d'origine animale (les extraits de poisson et le blanc d'œuf) pour coller les produits issus de bois. En 1930, il y a eu l'apparition des adhésifs synthétiques industriels qui vont remplacer les colles de fabrication artisanale. Les liants les plus utilisés de nos jours sont les aminoplastes avec un pourcentage d'à peu près 90%, les phénoplastes avec environ 5% et les isocyanates qui sont les moins utilisés avec 2% (Wieland, 2007).

#### 1.4.1. Liants aminoplastes

Ces liants sont basés sur la condensation de l'urée  $\text{CO}-(\text{NH}_2)_2$  et les formaldéhydes  $\text{O}=\text{C}-(\text{H})_2$  pour obtenir l'urée-formol. Ces colles sont faciles à hydrolyser, en effet, le départ d'une molécule d'eau lors de la condensation a généré une sensibilité à l'eau. Cette sensibilité vis-à-vis l'eau va causer le retour de ces liants à leur état initial d'où

le dégagement de formaldéhyde (Wieland, 2007). Afin de remédier à ce dégagement, les fabricants de colles ajoutent de la mélamine qui rend ces colles beaucoup moins sensibles à l'eau d'où un dégagement moins important de formaldéhyde. Cette colle est appelée colle mélamine-urée-formol (MUF). Ces derniers sont les liants les plus utilisés dans le domaine des panneaux de fibres et de particules. Le pouvoir irritant du gaz formaldéhyde dégagé après la fabrication des panneaux est très important. Ce gaz a des propriétés allergènes et il est également cancérigène. Ça dépend des personnes, le seuil de détection de ce gaz se situe entre 0,2 et 0,6 ppm. Lors de la combustion de ces liants aminoplastes, il y a dégagement des gaz avec un degré de toxicité très important comme le CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et le cyanogène.

#### 1.4.2. Liants phénoplastes

Ces liants sont basés sur la condensation du phénol C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>OH et du formol O=C-(H)<sub>2</sub>. Contrairement à l'urée-formol, ce liant est très peu sensible à l'eau. En fonction du milieu de préparation, il existe plusieurs types de phénoplastes qui ont des usages différents. Les résols qui utilisent un catalyseur basique sont utilisés surtout pour la fabrication des panneaux contreplaqués. Les liants phénoliques très réactifs sont appelés les résorcines. Ils ont des qualités de résistance structurelle importantes destinées surtout pour la fabrication des panneaux de structure comme les lamellés-collés (Chanda et al., 2006). Le point fort des liants phénoplastes est la résistance face aux agents externes surtout les milieux aqueux. Grâce à cette résistance, ces liants ne relâchent pas les formaldéhydes donc les panneaux obtenus ne dégagent pas ce gaz toxique. Par contre, lors de pressage, il y a dégagement des composés aromatiques comme le phénol qui est un produit à risque cancérigène et des benzéno-x. La combustion des produits ayant les phénoplastes comme agents de liant va engendrer des composés à risques comme les benzonitriles et les olyphloro-dibenzo-dioxines (Wieland, 2007).

#### 1.4.3. Les colles isocyanates

Sous l'action de l'eau le monomère diphényl-méthyl-diisocyanate [ $\text{O}=\text{C}=\text{N}-\text{R}-\text{N}=\text{C}=\text{O}$ ] appelé souvent MDI se condense pour donner des polymères appelés les colles isocyanates. Contrairement aux liants aminoplastes et phénoplastes, ces liants développent avec le bois des liaisons chimiques et sont utilisés surtout pour la fabrication des panneaux de particules bien spécifiques. En effet, vu le coût élevé de ces liants par rapport aux autres liants, leur utilisation est limitée pour les panneaux ayant des qualités de résistance accrue à l'humidité. Le dégagement des composés volatils est inexistant pour les panneaux fabriqués avec les isocyanates. Par contre, lors de la fabrication de ces panneaux, ces MDI sont sous forme de poussières encollées et présentent un véritable poison par ingestion et inhalation. La combustion de ces produits va engendrer les mêmes produits observés avec les liants phénoliques (Wieland, 2007).

À cause de ces nombreux inconvénients environnementaux causés par ces liants synthétiques, et avec des lois de plus en plus strictes exigées par les pays, les industriels ont intérêt de trouver des solutions pour remédier à l'utilisation de ces colles en les substituant par d'autres adhésifs plus au moins écologiques et naturels. Pour cette étude, aucun adhésif synthétique ne sera utilisé pour la fabrication des panneaux, par contre, d'autres alternatives comme les boues secondaires et l'amidon modifié seront testés.

#### 1.4.4. D'autres alternatives : l'amidon

L'amidon est un sucre complexe composé de chaînes de molécules de sucres simples. Dans la nature, l'amidon se trouve dans les plantes et il se présente sous forme de granules de différentes tailles et formes selon l'espèce de la plante. Par exemple, les granules du maïs sont polygonaux et ronds de 5 à 25 $\mu\text{m}$  de diamètre, par contre, les granules des pommes de terre sont souvent ovales avec un diamètre entre 15 et 100 $\mu\text{m}$ .

Les deux constituants majeurs de l'amidon sont : l'amylose et l'amylopectine qui sont en quantités variables dépendamment de l'espèce de la plante (Elchinger, 2013). L'extraction de l'amidon des plantes se fait à partir deux procédés sec et humide pour obtenir de l'amidon natif. Le procédé sec consiste à broyer les graines et les parties de la plante riche en amidon et les séparer avec des tamis. Les industriels ne préfèrent pas cette méthode à cause des impuretés qui persistent avec le produit final et le coût énergétique élevé de ce procédé. Pour cela, un procédé humide est mis en place pour éviter ces inconvénients. Ce dernier se déroule en plusieurs étapes (Rivard et al., 1995; Whistler et al., 1943) : 1) nettoyer les pommes de terre ou les semences de maïs pour éliminer les indésirables tels que poussières, sables et débris. 2) Réhydrater et ramollir la matrice protéine-amidon par un trempage maintenu à 51-52°C dans une solution sulfatique à 0,2% pendant environ 40 heures. 3) Broyer et séparer les différentes phases obtenues (l'amidon, le gluten et les germes) par filtration et centrifugation. 4) purifier la solution d'amidon obtenue. Durant ces deux procédés, l'amidon n'a subi aucune transformation chimique ou physique. Le gonflement de l'amidon ou la gélatinisation et la formation du gel ou gélification sont les caractéristiques physiques les plus recherchées de l'amidon (Muhrebeck et al., 1991). Généralement, les industriels utilisent les amidons modifiés qui sont plus performant ayant des caractéristiques plus importantes. Les premières modifications chimiques de l'amidon ont conduit à la fabrication d'esters d'amidons ayant des différentes tailles des degrés de substitutions. Ces degrés de substitution influencent directement la qualité des esters obtenus. En effet, Sagar et al. (1995) ont tous confirmé que les matériaux ayant des degrés de substitution plus faibles se dégradent plus vite que les autres.

### **1.5. Mécanismes d'adhésion pour les panneaux de fibres fabriqués sans liant**

Contrairement au procédé sec où la présence des liants est nécessaire, la fabrication des panneaux de fibres par voie humide est comparable à la fabrication des papiers. Selon

Koubaa (1996), la qualité du papier fabriqué (les panneaux de fibres dans notre cas) est influencée directement par l'adhésion des fibres qui est considérée comme l'une des plus importantes caractéristiques des pâtes. La distribution de la longueur des fibres, leur état de surface, la flexibilité et le poids linéique des fibres sont aussi des facteurs qui influencent l'adhésion des fibres cellulosiques. La composition chimique à la surface de la fibre joue également un rôle important dans le pouvoir adhésif des fibres (Nissan et al., 1964). Nissan et al. (1964) ont aussi énuméré les paramètres qui influencent les types de liaisons existantes à l'interface des fibres cellulosiques et qui expliquent le pouvoir adhésif de ces fibres. Parmi ces paramètres, il y a le degré de polymérisation, le degré d'ordre et désordre, la taille absolue des régions ordonnées, l'orientation des macromolécules, la structure morphologique et la présence d'autres substances chimiques comme les hémicelluloses, la lignine et les matières extractibles. Étant donné l'implication de tous ces facteurs, ces auteurs ont conclu qu'il est pratiquement impossible de donner une définition exacte de l'adhésion entre les fibres du bois. Cependant, Wu (1982), en tenant compte des différents aspects thermodynamiques, chimiques et mécaniques, a pu définir l'adhésion comme étant l'état dans lequel deux corps distincts peuvent transférer une force ou un travail mécanique à travers un contact interfacial intime. La nature de cette force est déterminée par les propriétés mécaniques de la zone interfaciale qui maintient les deux phases ensemble. Wu (1982) a distingué quatre types de forces : Les forces de Keeson qui présentent des forces d'attraction électrostatique entre deux molécules polaires, les forces de Debye qui présentent l'attraction entre une molécule polaire et une autre non-polaire, les forces de dispersion (de London) qui résultent de l'interaction mécanique des oscillations électroniques autour les molécules et les liaisons hydrogènes qui se forment quand un atome d'hydrogène sert de pont entre deux atomes généralement électronégatifs. La réaction de deux groupements fonctionnels à l'interface provoque une adhésion chimique formant ainsi des liaisons covalentes, ionique ou métalliques. L'énergie d'attraction de ces liaisons est supérieure à celle des forces de van der Waals découvertes par Diderik van der Waals en 1879 (Wu, 1982).



Il a aussi expliqué l'adhésion mécanique par des accrochages mécaniques entre les fibres traitées à la surface. L'augmentation de la rugosité des surfaces provoque l'augmentation de la surface de contact, favorise le mouillage et fournit des sites d'accrochage mécanique supplémentaires améliorant ainsi les liaisons entre les fibres. Le mécanisme de la formation des liaisons dans le panneau de fibres passe par trois étapes nécessaires, à savoir, le couchage de la pâte, le pressage et le séchage. Au cours de la première étape, un contact direct se forme avec le rapprochement des fibres et par l'action de la tension superficielle de l'eau, les fines s'amènent vers la surface des fibres (Nanko et al., 1989). Un deuxième contact plus intime est provoqué par le pressage humide mais l'écoulement d'eau du matelas fibreux peut séparer et changer la position des particules (Szikla, 1986; Szikla et al., 1989). La densification des panneaux se fait durant la troisième étape. En effet, la structure des liaisons et la surface de contact entre les fibres sont développées grâce à la tendance des fibres à se comprimer, se retirer et former des rides à leurs surfaces (Nanko et al., 1989; Szikla et al., 1989). Pour bien comprendre les mécanismes de formation des liaisons, plusieurs théories ont été élaborées afin d'expliquer par quel moyen les molécules sur la surface des fibres entrent en contact. Par exemple, Campbell et al. (1930) ont proposé une théorie de la solubilité partielle dans laquelle les cristallites partiellement dissoutes dans l'eau de la cellulose des fibres vont s'attacher à des cristallites similaires des fibres adjacentes. Une autre théorie a été proposée par Urquhart (1929) qui propose que la cellulose soit soluble dans l'eau à certains stades donc il s'agit d'une diffusion. Ces deux phénomènes vont résulter des liaisons qui dépendent de la chimie des macromolécules. En effet, selon Casey (1980), les liaisons du type hydrogène forment les liaisons entre les fibres cellulosiques car les liaisons entre ces fibres se font principalement entre les groupements hydroxyles. La théorie de la liaison hydrogène a été bien élaborée par Nissan et al. (1959). Ils ont expliqué que le rapprochement à une distance de 2,5 à 3,5 Å engendre des fortes attractions entre les groupements hydroxyles adjacents qui vont créer les liaisons hydrogène. Selon cette théorie, la liaison hydrogène est le principal responsable de l'adhésion des fibres dans le papier (les panneaux de fibres dans notre

cas) malgré l'existence d'autres types de liaisons. Cette théorie a été confirmée par Marrinan (1959) qui a démontré l'absence des groupements hydroxyles libres dans la cellulose solide par des observations spectroscopiques infrarouges. Lyne et al. (1954) ont évalué les effets de la tension superficielle sur les liaisons entre fibres. Ils ont prouvé que la tension superficielle de l'eau est aussi un principal responsable de la liaison. En effet, pendant l'étape de l'enlèvement d'eau, une force créée par la tension superficielle comprime et amène les fibres pour entrer en contact plus intime. Ce contact va engendrer la formation des liaisons hydrogènes par les groupements hydroxyles de deux fibres distinctes (Casey, 1980; Clark, 1978; A. Nissan, 1961).

## **1.6. L'industrie papetière**

Inventé en Chine au premier siècle de notre ère, le papier est composé essentiellement des éléments de fibres d'origine végétale. Actuellement, la matière fibreuse la plus utilisée pour une telle fabrication est le bois. Après la mise en pâte, les fibres sont dispersées dans l'eau avec des ajouts chimiques bien déterminés comme le carbonate de calcium, le dioxyde de titane et des éclaircissants pour obtenir des caractéristiques papetières désirées. Ces fibres sont déposées sur une toile pour former un matelas fibreux. Le rôle de cette toile est d'évacuer une quantité importante d'eau libre sous l'effet de la pesanteur et par des aspirations mécaniques. Malgré cette évacuation, une quantité importante d'eau persiste dans le matelas (Bassompierre, 2007). Pour cela, un pressage à froid est nécessaire pour éliminer le maximum de cette quantité. Finalement, ce matelas est prêt pour l'étape de séchage sur des cylindres chauffés à la vapeur pour obtenir un produit presque fini. En effet, la dernière étape est la finition qui dépend des objectifs d'utilisation du papier (Valetie et al., 1992).

## 1.7. Les boues papetières

### 1.7.1. Définition

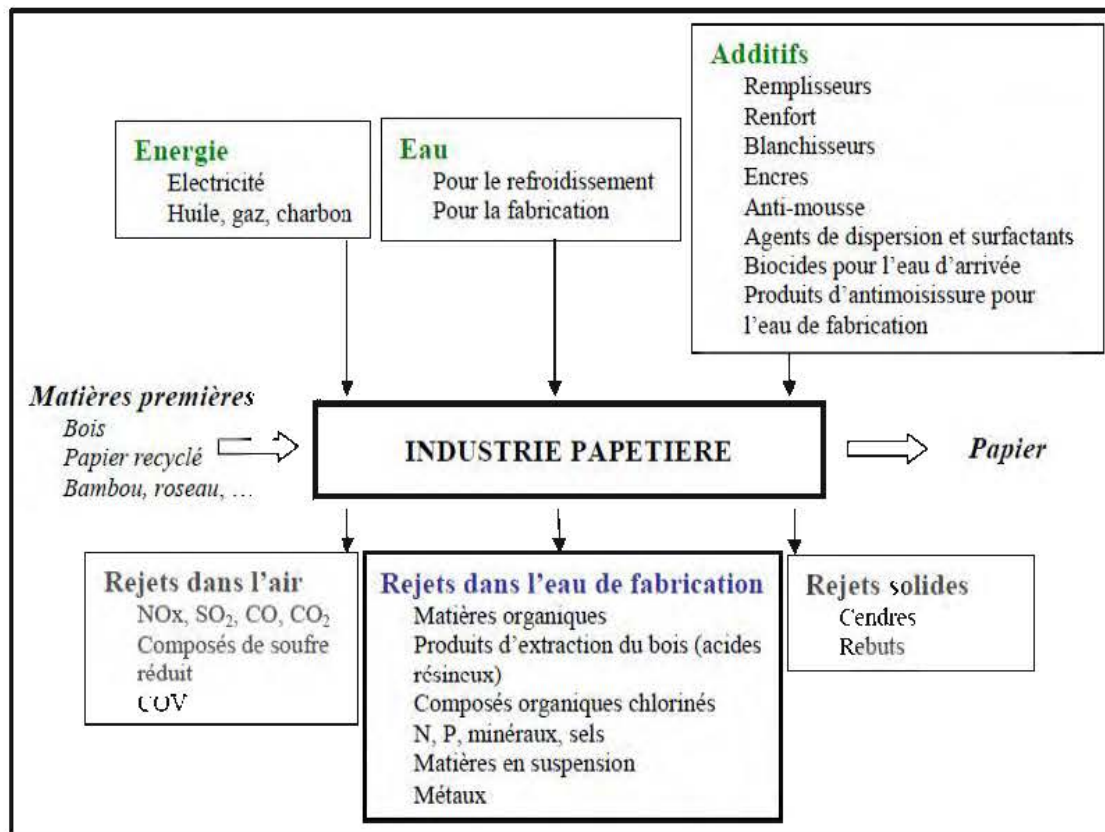
Les boues papetières sont les résidus des traitements des effluents papetiers durant le processus de fabrication et de recyclage des papiers. Il existe trois types de boues: les boues primaires, les boues secondaires et les boues de désencrage. Chaque type de traitement va engendrer un type spécifique de boue associé. Lorsqu'elles sortent des systèmes de traitement des effluents, les boues possèdent généralement un pourcentage massique de l'ordre de 95% d'eau. Un pressage mécanique est utilisé pour réduire au maximum cette quantité d'eau pour bien pouvoir valoriser ces boues.

### 1.7.2. Les traitements des effluents

La fabrication des pâtes et papiers génère une quantité importante d'eaux usées. Le schéma illustré dans la figure 1.6 présente les entrées et les sorties de l'industrie papetière. Cette illustration met en évidence la grande variabilité des compositions issues des effluents d'eaux récupérés qui dépendent fortement des matières premières, du procédé de fabrication et des additifs mis en jeu.

Généralement lors des traitements des eaux usées, le rejet industriel de l'industrie de la pâte et papier passe par un double système de traitement : dans un premier temps, les matières solides sont concentrées dans un décanteur pour former une boue appelée 'boue primaire'. Ensuite les eaux contenant encore des matières en suspension vont alimenter un bassin d'aération dans lequel des micro-organismes se nourrissent des matières organiques dissoutes (Gavala et al., 2003). À la sortie des bassins d'aération, l'effluent est dirigé vers un ou deux décanteurs secondaires qui captent et retiennent les micro-organismes. La boue ainsi formée s'appelle boue secondaire. Les boues primaires et les boues secondaires sont ensuite mélangées et déshydratées à l'aide d'une presse en continu. Ce mélange est appelé souvent biosolides. Avant l'étape de pressage mécanique, les floccs de boues ont généralement une concentration comprise entre 7 et

15% de matières solides. Les presses à vis sont les plus utilisées et permettent d'atteindre des siccités allant de 20 à 50% de matières solides en fonction du type de boues. Les centrifugeuses sont aussi utilisées pour concentrer les boues secondaires. À cause de la teneur élevée en eaux liées, ces boues secondaires affectent les performances des presses mécaniques (Soucy, 2015). Dans la plupart des cas, un prétraitement précède le traitement primaire. En effet, cette étape consiste à extraire les éléments qui peuvent gêner ce traitement comme les matières grossières qu'on élimine avec un dégrillage. Un dessablage est aussi effectué afin de protéger les organes mécaniques (les pompes) contre l'abrasion.



**Figure 1.6** Matériaux impliqués et matières rejetées dans la fabrication du papier (Lacorte et al., 2003)

➤ Traitement primaire

Le traitement primaire est un traitement physico-chimique qui est effectué soit par décantation sous l'effet de la gravité ou par l'ajout d'un coagulant-floculant, soit par la flottation. Le but de ce traitement est d'extraire le maximum de matières en suspension (MES) organiques ou inorganiques. Les MES et la demande biochimique en oxygène (DBO) sont les deux paramètres qui influencent le plus ce traitement. La DBO<sub>5</sub>, qui correspond à la consommation d'oxygène par les microorganismes en cinq jours, est souvent utilisée. Les matières solides issues de ce traitement représentent les boues primaires.

➤ Traitement secondaire

Ce traitement consiste à éliminer les composés organiques existants dans les eaux usées par des micro-organismes comme les bactéries qui vont assimiler la matière organique pour leurs propres développements (Bassompierre, 2007). Il existe deux types de procédés pour ce traitement : les procédés à cultures fixes et ceux à cultures libres. Le lit bactérien et les biodisques sont deux procédés à cultures fixes. Le premier traite le ruissellement de l'eau sur le support et ne nécessite pas un clarificateur. Pour le deuxième, la biomasse est fixée sur des disques tournants dans le mélange à traiter. Lorsque de grands espaces sont disponibles, les lagunages qui sont un procédé à cultures libres avec des faibles concentrations d'organismes épurateurs sont utilisés (Pokhrel et al., 2004). Le processus d'épuration par les boues activées, qui est également un procédé à cultures libres, est le plus utilisé vu ses excellentes performances de dépollution avec un rendement supérieur à 95% (Cardot, 1999). Selon Thompson et al. (2001), le traitement secondaire biologique permet d'éliminer la majorité des composés organiques biodégradables (jusqu'à 90% de la demande chimique en oxygène (DCO) et 99% de la DBO). Ce processus consiste à mettre en contact la biomasse et l'eau usée dans un réacteur et de séparer ensuite les solides de la phase liquide épurée par décantation.

➤ Traitement tertiaire

Le traitement secondaire ne permet pas d'éliminer les composés métalliques Na, K et Ca et il diminue légèrement les concentrations en Fe, Mn, Zn et Cu (Yon et al., 2000). Les composés qui persistent après traitement secondaire peuvent être des métaux et des composés organiques non biodégradables (Kwon et al., 2004; Temmink et al., 2005). Puisque les législations sur les rejets industriels dans les milieux naturels sont devenues de plus en plus strictes (RECYC-QUÉBEC, 2015), de nombreuses études ont été élaborées afin de proposer des traitements supplémentaires appelés les traitements tertiaires permettant d'éliminer tout ce qui reste. Généralement, les procédés par ozonation, la coagulation/floculation, la filtration et l'adsorption (carbone activé ou échange d'ions) sont les plus utilisés. Selon des études, ces traitements peuvent éliminer jusqu'à 97% des composés aromatiques (Bassompierre, 2007).

➤ Traitement de désencrage :

Les boues de désencrage sont obtenues par les procédés de désencrage des papiers recyclés. L'avantage principal de l'utilisation des cartons et papiers récupérés est la diminution des coûts de fabrication des pâtes. Durant les cycles de recyclage, une dégradation des propriétés mécaniques des fibres peut avoir lieu ainsi que l'existence des impuretés physiques comme l'encre, chimiques et toxiques (composés chlorés et métaux lourds) d'où la nécessité des traitements de décontamination. Le désencrage des papiers de récupération est un traitement indispensable afin d'éliminer les particules d'encre. Les fibres encrées sont nettoyées et traitées avec la soude dans des colonnes de bullage. Des peroxydes et des surfactants sont utilisés pour blanchir les fibres et disperser les particules d'encre. Selon le type de papiers récupérés et l'utilisation future de la pâte désencrée récupérée, certaines modifications peuvent être apportées au traitement. Brouillette (1996) a bien détaillé le procédé de désencrage. Premièrement, les vieux journaux et magazines sont bien mélangés avec l'eau, de la vapeur et des produits chimiques dans un palpeur pour décomposer le papier et faire

gonfler les fibres. Durant cette étape, l'hydroxyde de sodium (NaOH) est ajouté pour maintenir un pH alcalin et pour augmenter l'efficacité du peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) qui sont ajoutés pour le blanchiment. Un tamisage ou une centrifugation sont suggérés aussi pour éliminer des éléments indésirables comme les agrafes et les trombones. Cette première étape est appelée trituration. Après cette étape, les fibres sont retirées de la phase liquide et transférées sur des cellules de flottation pour commencer l'étape de flottation en ajoutant un agent tensio-actif sous forme de savon d'acide gras. Le but de cet ajout est de créer des bulles d'air dans la pâte pour remonter les particules d'encre à la surface. Cette mousse créée à la surface sera évacuée par débordement ou aspiration, pressée et déshydratée pour obtenir les boues de désencrage. La masse solide humide formée par les particules d'encre, les rejets et les additifs va être récupérée pour constituer les boues de désencrage. Klungness (1974) a montré qu'un tel traitement peut donner une résistance égale à la feuille originale en comparant la feuille produite à partir des fibres vierges et celle produite avec les fibres de recyclage. Cependant, Klofta et al. (1994) ont montré que la feuille fabriquée à partir d'une pâte recyclée désencrée est plus fragile qu'une feuille issue d'une pâte recyclée non désencrée. Les courbes des analyses thermiques élaborées par Latva-Somppi et al. (1994) ont montré que pour des faibles températures, les boues de désencrages brûlent rapidement vu l'existence des volatils. Par contre, les composés chimiques existants dans la partie inorganique peuvent rester en forme solide jusqu'à  $1300^{\circ}C$ . Après un pressage mécanique, les boues sont déchiquetées, cette opération va causer une distribution de taille de particule extrêmement vaste. La marge des diamètres peut s'étendre de quelques microns à plusieurs centimètres. Pour cette étude, cette distribution aléatoire est remédiée avec un tamisage de la matière première pour obtenir une seule classe bien déterminée pour éviter les confusions des résultats. Dans les années 80, les industriels ont commencé à éviter le procédé de blanchiment au chlore. Ceci a engendré des diminutions remarquables dans les concentrations de dioxines et de furanes dans les boues qui ont présenté un danger pour l'environnement et la population (Thiel et al., 1989).

### 1.7.3. Réglementations sur les effluents

Le gouvernement du Québec a adopté en 1988 une stratégie d'intervention qui vise à limiter les rejets industriels dans les milieux naturels. En effet, dans le cadre du programme de réduction des rejets industriels (PRRI), le gouvernement délivre aux industries des attestations équivalentes à des permis environnementaux d'exploitation. Ces attestations expliquent les conditions environnementales à respecter lors de la phase de l'exploitation et elles touchent tous les types de rejets (eaux usées, émissions atmosphériques, bruit, odeurs et matières résiduelles) et les différents milieux récepteurs (eaux de surface, eaux souterraines, sols et milieu ambiant). Tous les cinq ans, cette attestation doit être renouvelée par le ministère du développement durable de l'environnement et des parcs du Québec avec des exigences de plus en plus strictes en fonction des connaissances déjà acquises et les progrès technologiques et économiques des industries (MDDEP, 2008). Le premier règlement sur les fabriques de pâtes et papiers a été instauré par le Bureau d'audiences publiques sur l'environnement du Québec en 1979. Cette loi a exigé des normes sur les MES et les DBO<sub>5</sub> issus des effluents. Des délais ont été accordés aux industries : jusqu'à décembre 1983 pour les MES et décembre 1988 pour la DBO<sub>5</sub>. Entre 1992 et 1995, un deuxième règlement a été instauré pour les fabriques des pâtes et papiers. Cette fois, d'autres paramètres comme les composés organiques absorbables, le pH, les hydrocarbures, les dioxines et furannes chlorés et les biphényles polychlorés ont été mis en contexte. En 1996, la quantité de la DBO<sub>5</sub> a diminué de 95% par rapport à 1981 suite à l'installation des équipements de traitements secondaires (MDDEP, 1999).

Malgré toutes ces restrictions et exigences, un rapport publié en 2003 par Environnement Canada confirme que les effluents issus des industries papetières ont toujours des effets sur les milieux récepteurs. Ces confirmations ont été basées sur des études faites sur les habitats marins et estuariens. En effet, les chercheurs ont remarqué une certaine forme de perturbation métabolique chez les poissons causés par



l'enrichissement en éléments nutritifs du milieu. Selon eux, l'exposition des poissons aux effluents riches en éléments nutritifs et en matières organiques a causé des affaiblissements de la fonction endocrinienne qui peut engendrer des insuffisances de la capacité de reproduction d'où l'extinction d'espèces de poissons (MDDEP, 2003).

En 2008, un rapport d'orientation et de références techniques a été publié par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. Ce document vise à contrôler les dépassements des objectifs environnementaux de rejet par les industries et propose des critères de sélection pour classer les usines afin de reformuler les attestations d'assainissement adéquates à chaque type d'usines (MDDEP, 2008)

#### 1.7.4. Caractérisation physico-chimique des boues

Les caractéristiques des boues dépendent du procédé de fabrication du papier (thermomécanique TMP, chimico-thermomécanique CTMP ou KRAFT) et de la nature de traitement (primaire, secondaire, désencrage) (Migneault, 2011; Zerhouni, 2010). Selon la littérature, la composition des boues est quantifiée selon les normes TAPPI. Les boues primaires ont des fibres plus longues ayant un taux de polysaccharides plus élevé que celles des boues secondaires qui ont un taux plus élevé en fines et en lignines. La boue secondaire est caractérisée par une faible teneur en celluloses, quel que soit le procédé papetier effectué. L'augmentation de cette boue secondaire va engendrer des améliorations au niveau de la résistance des liaisons dans les panneaux de fibres. Cette amélioration peut être utile pour diminuer le besoin des adhésifs dans les panneaux. Selon MDDEPQ (2007), les effluents papetiers peuvent contenir plusieurs constituants tels que : les matières en suspension comme les fibres, les copeaux de bois, les écorces, les cendres et les additifs comme l'argile et le carbonate de calcium, des matières inorganiques (les sels et les métaux), matières organiques, les hydrocarbures, des composés phénoliques provenant de la lignine du bois, des acides gras, des composés organiques volatils ou semi-volatils (formaldéhyde, hydrocarbures aromatiques

polycycliques et l'acétaldéhyde) et des composés organochlorés (les dioxines et les furanes chlorés) qui proviennent des produits chlorés utilisés pour le blanchiment des pâtes. Les boues dépendent énormément de la matière première, des processus de fabrication des pâtes et papiers ainsi que les traitements des effluents (Rashid et al., 2006). Pour cette raison, il est difficile d'évaluer correctement sa composition. Selon la littérature, les facteurs les plus importants pour bien caractériser la boue sont les teneurs en éléments nutritifs, le potentiel toxique des effluents après traitement et l'accumulation des éléments toxiques dans la boue (Warren, 2001). Généralement les boues papetières se caractérisent par un pH proche de la neutralité (entre 5 et 8), une teneur en matières sèches qui se situe entre 28 et 41 %, ainsi qu'une teneur en carbone organique se situant entre 347 à 530 g/kg sec (Zerhouni, 2010). Les boues papetières contiennent beaucoup d'éléments tels que ; l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), le calcium (Ca) et le magnésium (Mg) (Rashid et al., 2006). Les boues primaires sont constituées principalement des matières organiques sous forme de la matière cellulosique (Jackson et al., 1997) ou de fibres de bois. Elles contiennent généralement de 0,3% ou moins d'azote en poids sec (Bellamy et al., 1995). Pour les traitements secondaires des boues, l'activité microbienne est assurée par l'ajout de l'azote, le phosphore et le potassium. Ce qui explique les taux élevés en azote (3,0-4,0%) et en phosphore (0,1-0,3%) dans les boues secondaires (Bellamy et al., 1995; Zibilske, 1987). Les teneurs des composés polymériques (cellulose, hémicelluloses et lignines) sont des caractéristiques chimiques importantes des boues papetières. Ces teneurs qui sont quasiment indépendantes de l'origine de la boue traitée (TMP, CTMP et Kraft) sont légèrement inférieures à celles des fibres du bois. La teneur en extractibles obtenue par le procédé CTMP et Kraft est inférieure à celle obtenue par le procédé TMP (Migneault et al., 2010). Les métaux lourds présents dans les boues sont soit absorbés à partir du sol par les arbres, soit issus par les produits chimiques ajoutés au cours de la fabrication des pâtes (Warren, 2001). Généralement, la teneur des métaux lourds est faible mais une teneur élevée de ces métaux peut affecter négativement la santé des plantes et des animaux. Genthe et al. (1993) montrent que les traces de titane (Ti) dans

la boue primaire proviennent de l'utilisation de l'oxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ) dans les opérations de mise en pâtes. Selon Raitio (1992), les traces de plomb (Pb), de chrome (Cr), de nickel (Ni) et de cuivre (Cu) sont des composantes des matériaux de remplissage lors de la fabrication des papiers. Il a ajouté que les encres d'impression contiennent du zinc, du plomb, du cuivre et du chrome avec l'élimination des chromates de la production à cause de leurs risques cancérigènes. Les quantités des oxydes dans les cendres des boues de désencrage ont été bien évaluées par plusieurs chercheurs (Davis et al., 2003; Latva-Somppi et al., 1994; Nadelman et al., 1960). Dans le tableau 1.3, Davis et al. (2003) ont regroupé des oxydes ferreux retrouvés dans les boues de désencrage et ils ont comparé ces résultats à l'argile pure de type Kaolinite.

**Tableau 1.3** Proportions (%) des oxydes dans les boues de désencrage et l'argile pure (Davis et al, 2003).

Oxydes ferreux	BDD	Argile (Kaolinite)
$\text{SiO}_2$	46,08	46,3
$\text{Al}_2\text{O}_3$	33,34	39,8
CaO	9,01	0,04
$\text{TiO}_2$	5,8	1,55
MgO	1,71	0,1
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,88	0,41
$\text{Na}_2\text{O}$	0,63	-
$\text{K}_2\text{O}$	0,34	0,7
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,32	0,1
$\text{SO}_2$	0,59	-
MO	0,06	14

Plusieurs autres chercheurs ont caractérisé les boues de désencrage afin de les valoriser. Par exemple, Haddar et al. (2016), ont incorporé ces boues pour la fabrication des composites à base de polyéthylène haute densité (PEHD) avec et sans agent de

couplage (3 % de polyéthylène malaté (MAPE)). Trois pourcentages d'incorporation ont été testés (20, 30 et 40 %). Les effets de la teneur des BDD et en MAPE sur les propriétés mécaniques, thermiques et morphologiques des composites BDD/PEHD ont été étudiés. Ils ont confirmé que l'augmentation de la teneur en BDD dans les composites améliore les modules d'élasticité et de rupture tout en diminuant l'allongement à la rupture et la résistance aux chocs. L'ajout de BDD améliore également la stabilité thermique et augmente la cristallinité des composites. Une meilleure adhérence entre les BDD et le PEHD a été observée avec l'ajout du MAPE et confirmée par l'apparition d'un groupement ester dans le spectre FTIR du composite. Yin et al. (2016) ont travaillé sur le développement d'une approche de réutilisation des boues de désencrage pour la fabrication du papier ondulé. Cette recherche a montré que l'obtention des produits qui respectent les normes et les standards est limité à 40% d'ajout. La répartition des longueurs de fibres des boues de désencrage utilisées par Yin et al. (2016) est classée en fibres longues (plus de 1,0 mm), fibres courtes (entre 0,2 et 1,0 mm) et fines (moins de 0,2 mm). La proportion de fines était de 76,1 %, tandis que les fibres courtes étaient de 21,1 % et les fibres longues de 1,4 %. Par rapport aux échantillons témoins fabriqués sans ajout, les propriétés du papier ondulé fabriqué (la longueur de rupture et la résistance à l'écrasement du papier) avaient diminué de 30% en ajoutant les boues de désencrage. Bien que les boues ne puissent pas être utilisées pour former des feuilles aussi résistantes que celles des pâtes chimiques, les boues pourraient quand même être utilisées comme additifs. Le tableau 1.4 illustre les différentes caractéristiques chimiques des BDD utilisées par Yin et al. (2016) et Haddar et al. (2016) et les BS par Migneault (2011). Les boues de désencrage utilisées par Haddar et al. (2016) et les boues secondaires utilisées par Migneault et al. (2011) sont les mêmes boues utilisées tout au long de ce projet.

**Tableau 1.4** Les caractéristiques des boues de désencrages et des boues secondaires utilisées (% , base anhydre)

Paramètres	Boues de désencrage		Boues secondaires
	(Haddar et al., 2016)	(Yin et al., 2016)	(Migneault, 2011)
pH (extrait d'eau 1:5)	6,61	7,99	-
Cendres (%)	64	22,44	12
Matières organiques (%)	36	77,56	65
Cellulose (%)	23	43,26	19,7
Lignine (%)	8	-	50,2
Hémicellulose (%)	5	-	3

Lou et al. (2012) ont étudié la pyrolyse des boues de désencrage comme étant une technique de conversion thermo-chimique pour évaluer l'utilisation de ces boues en énergie. Les résultats ont révélé que le processus est composé de quatre étapes, soit l'étape de déshydratation, l'étape de libération volatile, l'étape d'épuisement du carbone et une certaine décomposition du carbonate de calcium. Les produits pyrolytiques provenant des boues de désencrage étaient composés de résidus gazeux (29,78 %), liquides condensés (biohuile, 24,41 %) et solides (45,81 %). Les substances volatiles provenant de la pyrolyse des boues de désencrage étaient des hydrocarbures presque aromatiques (du styrène, du toluène et du benzène) et quelques acides et le solide était du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) qui peut être réutilisé comme charge dans l'industrie papetière. La teneur des cendres présentes dans les boues de désencrage utilisées par Lou et al. (2012) est de 50 à 70 %. En analysant des échantillons de boues de désencrage, Lähdeniemi et al. (2013) ont confirmé qu'elles se composent principalement de Ca et d'Al, suivis respectivement de Mg, Fe, Na et K. Selon ces auteurs, le calcium provient très probablement du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). Dans la production de pâte à papier et de papier, le calcium provient de la matière première

fibreuse elle-même ainsi que de l'hydroxyde de calcium, utilisé comme agent régénérant dans la récupération chimique de la pâte à papier (Nurmesniemi et al., 2006), et du carbonate de calcium, utilisé comme additif pour la fabrication du papier (Kuokkanen et al., 2008). Les sources d'Al et de Mg sont probablement les autres pigments de charge typiques kaolin et talc. Le gypse, l'argile calcinée, les silicates synthétiques, l'hydroxyde d'aluminium et les autres charges et pigments minéraux pour la fabrication du papier, plus rarement utilisés, sont d'autres sources possibles des éléments calcium et aluminium. Lähdeniemi et al. (2013) ont travaillé avec un séchoir cyclone pilote à grande vitesse pour évaluer son potentiel de séchage et la possibilité de séparer les fibres et les particules minérales de la boue de désencrage. La teneur totale en solides des échantillons a passé de 67,9 à 96,3-98,9 %, ce qui indique une très forte efficacité face à l'humidité. Par contre, les images ont montré que le processus n'a pas été suffisamment efficace pour permettre de séparer convenablement les fibres et les particules minérales de la boue.

Une étude comparative sur la qualité des boues de désencrage provenant de cinq usines de transformation du bois dans quatre pays européens a été réalisée par Ettala (1993). Les métaux lourds et les polychlorobiphényles ont été l'objectif principal de cette étude et leurs concentrations se sont avérées faibles avec des coefficients de variation des concentrations inférieures à 30%. Une autre étude de caractérisation chimique organique et inorganique a été élaborée par Trépanier et al. (1996). Ces résultats sont présentés dans le tableau 1.5

**Tableau 1.5** Caractérisation chimique des boues de désencrage étudiées par Trépanier et al. (1996) et des boues primaires et secondaires par Rashid et al. (2006)

Contaminants	Valeur moyenne (ppm)		
	Inorganiques		
	BDD	BP	BS
Argent (Ag)	< 5	-	-
Arsenic (As)	< 10	0,09 à 1,7	0,2 à 0,98
Chrome (Cr)	4,7	8 à 73	20 à 46
Cuivre (Cu)	111	11 à 46	12 à 65
Mercure (Hg)	0,29	0,02 à 0,19	0,1 à 1
Nickel (Ni)	< 10	7 à 56	< 2 à 38
Plomb (Pb)	< 20	< 1 à 92	< 4 à 37
Sélénium (Se)	< 10	0,05 à 2,7	< 0,5 à < 2
Zinc (Zn)	38,9	26 à 94	30 à 475
Aluminium (Al)	2725	-	-
Baryum (Ba)	48	-	-
Fer (Fe)	428	-	-
Manganèse (Mn)	19,6	-	-
Sodium (Na)	974	-	-
Organiques			
Hydrocarbures halogénés	0,82	-	-
Hydrocarbures aromatiques mononucléaires	0,2	-	-
Phénols	0,19	-	-
Polychlorobiphényles	0,11	-	-
Hydrocarbures aromatiques polynucléaires	2,63	-	-
Huiles minérales et graisses	15838	-	-
Résines et acides gras	2145	-	-

## 1.8. Valorisation des boues

Généralement, les voies de la gestion des boues sont soit l'enfouissement, soit l'incinération, qui constituent deux pratiques polluantes. Les législations environnementales progressent en éliminant peu à peu l'incinération et en imposant des règles d'enfouissement très strictes. Selon Scott et al. (1995), l'utilisation des boues pour l'enfouissement était à 69%, 21% pour l'incinération, 8% pour le compostage et 8% pour les autres pistes de valorisation. En 2015, la quantité des matières résiduelles des papetières québécoises a diminué de 4% par rapport à la quantité enregistrée en 2012 pour atteindre 2,1 millions de tonnes humides. Seulement 25% de ces résidus ont été enfouis (94% de l'enfouissement se fait dans des zones privées appartenant aux usines). 45% des boues papetières ont été éliminés pour la combustion et le reste sert pour l'épandage et le compostage (RECYC-QUÉBEC, 2015).

### 1.8.1. Enfouissement

L'enfouissement est une pratique qui consiste à enfouir des résidus dans un site spécialement préparé. Au Québec, l'enfouissement des boues à des concentrations inférieures à 25 % de matières solides est interdit (MDDEP, 2008). L'enfouissement des boues est en train de perdre son ampleur à cause des diminutions des sites et les normes environnementales imposées par les gouvernements. Par exemple, aux États-Unis, les sites d'enfouissement ont été diminués de 15 000 à 6 000 en quelques années d'où l'augmentation des coûts de transport car les sites sont loin des usines (Simons, 1994). Les sites d'enfouissement présentent une véritable source d'émission des gaz à effet de serre comme le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et le méthane (CH<sub>4</sub>) essentiellement causés par la dégradation aérobie et anaérobie des matières organiques par les bactéries (Krigstin, 2008). Makansi (1984) a ajouté que l'enfouissement présente un danger pour la réserve souterraine des eaux d'où l'implantation des nouvelles lois.



### 1.8.2. Les traitements thermiques

Plusieurs traitements thermiques ont été utilisés par les industriels afin de valoriser les boues. Dans cette partie, trois pratiques seront détaillées : l'incinération, l'oxydation humide et la gazéification.

#### 1.8.2.1. Incinération

L'incinération est la combustion des résidus pour obtenir de l'énergie sous forme de vapeur. Cette méthode énergétique permet de réduire le volume à disposer jusqu'à 95%. Présentement, l'incinération est le traitement thermique le plus utilisé par les industriels malgré les produits secondaires issus de cette pratique (les cendres et les émissions plus au moins toxiques comme  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ , les dioxines et les furanes). La fournaise et le lit fluidisé sont les deux principales méthodes pour assurer l'incinération (Simons, 1994). Ce chercheur a décrit la fournaise comme étant l'appareil qui permet de mettre en contact les particules à incinérer avec l'air de combustion à l'aide d'une grille qui déplace les résidus de l'entrée vers la sortie. Il a aussi expliqué le traitement avec le lit fluidisé qui consiste à faire reposer un lit de particules sur un air injecté afin de générer l'expansion des particules et faciliter la combustion. Afin d'avoir une valeur calorifique adéquate pour brûler les boues, la teneur en humidité des boues primaires doit être au maximum entre 60 et 70% et entre 45 et 55% pour les boues secondaires et de désencrage. D'après Carroll et al. (1990), une combustion des boues à une teneur en solides de 40 à 50% permet de récupérer jusqu'à 7000kJ/kg.

#### 1.8.2.2. L'oxydation humide

L'oxydation humide est une technique énergétique qui consiste à réduire les volumes des boues par une oxydation et de récupérer les composantes inorganiques dans la boue. Elle peut être utilisée sur toutes sortes de boues même à des teneurs d'humidité qui dépassent les 90%. Boiselle (1999) explique ce traitement qui consiste à chauffer les

boues en solution au-dessus des conditions critiques de l'eau (374°C et 22x10<sup>3</sup> kPa) avec l'injection de l'air et il a confirmé que cette méthode ne résulte pas des émissions atmosphériques nocives (comme NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> et CO) (Boiselle, 1999; Makansi, 1984; Simons, 1994). À cause de son coût élevé et les risques qu'elle peut causer (l'unité est opérée à haute pression), cette technique est moins populaire chez les industriels.

#### 1.8.2.3. La gazéification

Grâce à leur pouvoir calorifique élevé, les boues sont converties en gaz et en huile suite à des réactions chimiques en présence de chaleur. Cette technique est appelée la gazéification et elle se produit dans un environnement faible en oxygène. Le gaz généré est composé principalement de CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub>. Ces produits obtenus peuvent être utilisés comme étant des combustibles ou directement dans les turbines à gaz pour la production de l'électricité et dans la production des composés chimiques (Boiselle, 1999). Actuellement cette technique est rarement utilisée par les industriels à cause des produits secondaires qu'elle génère comme les cendres et le goudron.

#### 1.8.3. Biocarburants

La digestion anaérobie des boues va générer du biométhane. Cette biométhanisation a un coût d'investissement très élevé et elle nécessite un temps très long de séjour dans les bioréacteurs (entre 30 et 40 jours) (Zerhouni, 2010). Les boues sont aussi utilisées pour la production du bioéthanol soit par l'hydrolyse acide ou enzymatique, soit par la fermentation. Lors de l'hydrolyse, des pertes de rendement seront causées par la teneur des polysaccharides et des charges minérales dans les boues (Brouillette, 1996).

#### 1.8.4. Valorisation agricole

Les boues papetières peuvent être utiles pour l'épandage agricole grâce à leur nature non toxique (Phillips et al., 1997) et à leurs propriétés agronomiques (Beauchamp et al., 2002; Gea et al., 2005). Le but est de profiter des propriétés fertilisantes et des capacités biologiques des boues pour les cultures agricoles. Les fortes teneurs en

charges minérales (talc, kaolin, carbonate de calcium) et en matières organiques des boues primaires en font des amendements minéraux intéressants. Cette piste de valorisation est limitée par les frais élevés de transport (longs trajets entre les usines et les sites agricoles), par la dépendance de la saison adéquate pour chaque site, par la limite de la quantité à disposer par hectare et par le risque d'affecter les chaînes alimentaires par les matières inorganiques (métaux lourds), organiques et pathogènes (Krigstin, 2008). Le compostage est considéré aussi comme une piste de valorisation, en effet, l'humus généré par la dégradation aérobie des boues papetières possède des qualités fertilisantes importantes. Les composts à base de boues ont bien rempli les exigences commerciales tels que le degré de maturité et l'aptitude à la croissance des plantes (Zerhouni, 2010). Cette piste de valorisation est peu utilisée par les industriels car cette technique nécessite une nombreuse main-d'œuvre qualifiée et spécialisée et nécessite aussi un grand espace avec l'ajout des nutriments d'amendement. Les boues sont utilisées aussi pour la réhabilitation des terrains des mines, des carrières et des sols sableux. En effet, le contenu inorganique favorise la rétention d'eau tandis que la partie organique va permettre une fertilisation du sol (Srinivasan et al., 1995). Les pratiques pour la valorisation agricole dépendent toujours de la période et ne peuvent pas être appliquées tout le long de l'année.

#### 1.8.5. Réinjection de la boue

Les boues sont utilisées directement comme étant des matériaux de remplissage en les injectant dans le procédé de fabrication des cartons. Cette réinjection va améliorer la stabilité et la résistance du produit fini mais cette incorporation va entraîner une augmentation de la teneur en cendres dans le carton ce qui va influencer la recyclabilité du nouveau produit (Miner, 1991). La réinjection des boues pour la fabrication des ciments est aussi une autre piste de valorisation. En effet, les matières inorganiques présentes dans les boues sont des matières nécessaires pour une telle pratique et les cendres sont utilisées pour l'élaboration du béton (Ahmadi et al., 2001; Amrouz, 1996). Wiegand et al. (1994) ont également constaté que les boues ayant une teneur de cendres

comprise entre 20 et 30% peuvent être utiles pour la fabrication des briques de construction. Ils ont aussi valorisé ces boues pour la fabrication de la nourriture des animaux domestiques grâce aux protéines présentes dans ces résidus.

#### 1.8.6. Potentiel des boues pour la fabrication des panneaux

La boue est une matière riche en fibres, donc son utilisation pour des produits à base de fibres comme les panneaux à base de bois peut être très utile. Selon Geng et al. (2007), les boues sont des matières premières riches en fibres et ils procurent une bonne adhésion avec les fibres de bois donc peuvent remplacer les besoins en adhésifs. Des études financières ont montré que la production des panneaux incorporés par les boues est la voie la plus recommandée économiquement (Zerhouni, 2010). L'augmentation de la teneur des boues dans la composition des panneaux de fibres va entraîner des dégradations au niveau de la majorité des propriétés des panneaux. Une limite de 25% estimée par Migneault et al. (2010) peut être utile pour fabriquer des panneaux qui respectent les exigences des normes ANSI pour les panneaux de fibres. Le pouvoir adhésif des boues secondaires qui sont riches en polysaccharides extracellulaires microbiens (PEM) est expliqué par Cetin et al. (2004) et Haag et al. (2006) qui ont constaté que les cellules bactériennes contenues dans ces polysaccharides extracellulaires microbiens sont responsables de cette adhésion. La lignine, les protéines et les polysaccharides présents dans les boues sont utilisés pour la fabrication des adhésifs pour le bois. Geng et al. (2007) et Zerhouni (2010) ont confirmé le potentiel des boues comme étant des agents de remplissage pour la résine formaldéhyde. Selon Davis et al. (2003), les boues primaires sont les meilleurs produits de base comparant aux boues de désencrages pour la fabrication des panneaux car la teneur élevée d'argile dans les boues de désencrage affecte négativement les propriétés mécaniques et la stabilité dimensionnelle des panneaux de fibres. Cette teneur va aussi nuire au pressage des panneaux et des brevets américains ont été faits pour retirer cette argile (Scott et al., 1995).

## CHAPITRE II

### MATÉRIEL ET MÉTHODES

#### 2.1. Matières premières

Les deux constituants principaux des panneaux fabriqués sont les fibres de bois et les boues de désencrage. Les liants et les additifs synthétiques utilisés dans l'industrie des panneaux de fibre ne feront pas partie de la composition des panneaux dédiés pour ce projet. Pour ce dernier, les boues secondaires et l'amidon sont utilisés pour remplacer les liants pour quelques formulations.

##### 2.1.1. Les fibres de bois

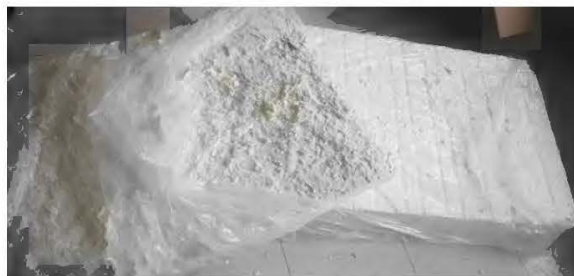
Deux types de fibres ont été utilisées dans cette étude :

- Des échantillons de fibres TMP (appelées aussi fibres à MDF) de l'industrie Uniboard située à Mont-Laurier au Québec sont présentées dans la figure 2.1. Ces fibres sont défibrées et traitées pour la fabrication des panneaux MDF. L'origine de ces fibres est un mélange de 60% résineux et 40% feuillus. Ces fibres seront utilisées pour fabriquer les panneaux isolants selon le procédé sec.



**Figure 2.1** Les fibres TMP utilisées pour le procédé sec de fabrication des panneaux

- Des échantillons de fibres BCTMP de la compagnie *Rayonier Advanced Materials* située au Témiscamingue au Québec illustrées par la figure 2.2. Ce sont des fibres CTMP blanchies composées de 100% tremble. Ces fibres sont pressées mécaniquement et à froid sans aucun ajout juste pour minimiser les espaces de stockage. L'industrie utilise ces fibres pour la fabrication des papiers. Dans cette étude, ces fibres sont utilisées pour fabriquer les panneaux de fibres isolants par procédé humide.



**Figure 2.2** Les fibres TMP utilisées pour le procédé humide de fabrication des panneaux

Le tableau 2.1 montre la composition chimique des fibres de bois utilisées. La figure 2.3 illustre l'appareil « *HB43-S halogen moisture analyzer* » qui évalue les teneurs d'humidité des matières premières. Les propriétés morphologiques et thermiques de ces fibres ont été aussi étudiées pour avoir une idée sur leur comportement et pour pouvoir expliquer quelques résultats.



**Figure 2.3** HB43-S Analyseur d'humidité à halogène pour évaluer l'humidité des matières premières

**Tableau 2.1** La composition chimique des fibres de bois utilisées (Kocafe et al. 2008)

	Fibres TMP	Fibres CTMP
Cellulose (%)	50	49
Hémicellulose (%)	15	19
Lignine (%)	25	19
Cendres	0,3	0,4

#### 2.1.2. Les boues de désencrage

Les boues de désencrage (BDD) employées dans ce travail ont été prélevées du processus de désencrage des papiers recyclés de l'usine de traitement des déchets *TUNISIE OUATE* localisée en Tunisie et sont présentées dans la figure 2.4. Selon Haddar et al. (2016), qui ont travaillé sur les mêmes boues, cette matière première est très sensible aux attaques fongiques ; donc, elle a été immédiatement séchée au four à 105°C durant 24h pour stabiliser l'humidité. Pour calculer cette teneur, l'analyseur d'humidité « *HB43-S halogen moisture analyzer* » a été utilisé. La quantité de boues reçue n'est pas dans une seule classe de granulométrie. Pour cela, au laboratoire, la matière première est tamisée et broyée afin d'avoir une marge granulométrique bien définie (1-4mm) pour homogénéiser les échantillons obtenus. Pour protéger les boues de désencrages séchées contre l'humidité, ils ont été stockés dans des sacs en plastique étanches et bien fermés.



**Figure 2.4** Les boues de désencrage déshydratées

### 2.1.3. Les boues secondaires

Le but de l'ajout de ces boues est d'évaluer leur potentiel à remplacer les liants habituels utilisés dans l'industrie des panneaux de fibres. Les boues utilisées pour ce projet sont issues des traitements des effluents de l'industrie papetière *Résolu* installée à Amos au Québec. Le traitement utilisé pour avoir ces boues est le traitement biologique des boues activées. Cette matière a été récupérée avec une humidité assez élevée dans des seaux de récupération bien fermés pour éviter le dégagement des mauvaises odeurs de ces boues. La figure 2.5 illustre ces boues secondaires.



**Figure 2.5** Les boues secondaires utilisées comme liant



#### 2.1.4. L'amidon

L'amidon présente également une alternative pour remplacer les liants habituels. Dans ce travail, un type précis d'un amidon modifié commandé chez *Thermo Fisher Scientific* est utilisé. La formule moléculaire de cet amidon est :  $C_{12}H_{22}O_{11}$  avec un poids moléculaire de 342,297g/mol.

## 2.2. Méthodes

### 2.2.1. Fabrication des panneaux

Afin d'atteindre les objectifs de cette étude, des échantillons ont été élaborés en changeant quelques paramètres comme les proportions fibres-boues dans le mélange, le type de liants naturels utilisé (amidon ou boue secondaire) et le procédé de fabrication (sec ou humide). Les autres paramètres comme la pression, la température et le maintien sous la presse sont fixés. La température a été fixée en se référant à la littérature et aux travaux précédents à 180°C (Migneault, 2011). La pression a été fixée selon la capacité de la presse ayant une force maximale de 300 kN. Pour la durée de maintien sous la presse, quelques essais en le faisant varier ont été effectués pour choisir l'optimum. Tous les panneaux élaborés sont de forme carrée d'arrêtes 250 mm avec une épaisseur de 10 mm. Cette épaisseur est la plus utilisée dans l'industrie des panneaux de fibres. Les quantités de matières premières sont calculées en tenant compte des densités cibles en produits finis. En effet, pour bien comparer les panneaux fabriqués avec ceux proposés sur le marché, une densité entre 320-350 kg/m<sup>3</sup> a été fixée. Cette marge sera fixée comme cible pour la fabrication des panneaux dédiés pour cette étude.

#### ➤ Fabrication des panneaux par voie sèche

Les étapes de fabrication des panneaux par voie sèche à l'échelle laboratoire sont les suivantes :

- Calculer les masses nécessaires de chaque constituant afin d'obtenir un panneau ayant la densité cible (320-350 kg/m<sup>3</sup>).
- Bien mélanger les quantités de fibres et de boues en assurant une bonne homogénéisation pour tous les constituants.
- Déposer une feuille de papier ciré sur une plaque métallique.
- Verser le mélange dans le moule en assurant une bonne répartition de la masse versée (Figure 2.6)



**Figure 2.6** Le moule utilisé pour la préparation des ébauches

- Effectuer un pré-pressage à froid. Cette étape consiste à diminuer l'épaisseur du matelas et le rend plus compact. Ce pressage a été effectué avec un montage de compression à l'aide d'une presse d'essai universelle Zwick Roell Z020 installée au laboratoire biomatériaux de l'UQAT à Rouyn-Noranda.
- Enlever le moule soigneusement et placer une autre feuille de papier ciré au-dessus du matelas puis une plaque de métal similaire à la première.
- Placer l'ensemble dans une presse chaude LabEcon 300 de la compagnie hollandaise « *Fontijne Presses* » installée au laboratoire biomatériaux de La Sarre (Figure 2.7) pour consolider les fibres et avoir le produit fini.
- Programmer la presse avec les paramètres adéquats (température, temps, pression) et exécuter le programme.



**Figure 2.7** La presse chaude LabEcon 300 utilisée pour la fabrication des panneaux

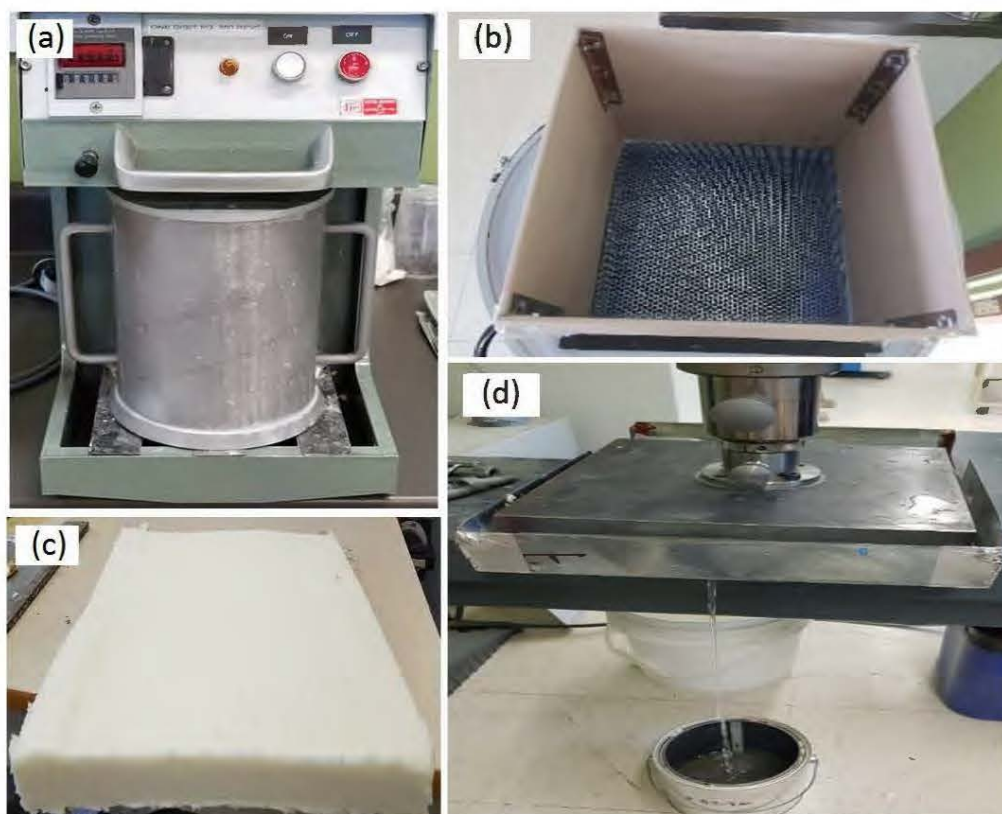
- Fabrication des panneaux par voie humide

Les étapes de fabrication des panneaux par voie humide à l'échelle laboratoire sont les suivantes :

- Calculer les masses nécessaires de chaque constituant afin d'obtenir un panneau ayant la densité cible ( $320\text{-}350\text{ kg/m}^3$ ).
- Mélanger les quantités avec l'eau en utilisant un séparateur de fibres METSO pour assurer l'homogénéisation et la bonne dispersion des différentes matières premières (Figure 2.8a).
- Verser ce mélange dans le dispositif présenté dans la figure 2.8b servant à la préparation de l'ébauche en éliminant le maximum de la quantité d'eau libre. Ce dispositif est constitué d'une grille qui sépare le moule qui va donner la forme de l'ébauche et la chaudière qui va contenir la quantité d'eau libre évacuée du mélange.

- Malgré l'efficacité de ce dispositif, un pré-pressage mécanique à froid est nécessaire afin d'éliminer la quantité d'eau libre restante dans l'ébauche (Figure 2.8c). Le pressage a été effectué avec un montage de compression de la machine Zwick comme le cas précédent. Cette étape est un peu délicate car elle va causer un écoulement d'eau au sein du montage et ses circuits électriques et peut endommager l'équipement. Pour remédier à ce problème, un dispositif de récupération a été conçu pour contenir l'eau échappée lors du pressage et l'évacuer proprement à l'extérieur du système de pressage (Figure 2.8d).
- Déposer l'ébauche obtenue sur deux couches de papiers buvards pour absorber l'humidité résiduelle et laisser cette ébauche à l'air ambiant pour la faire sécher pendant une semaine. Cette étape est très importante dans le procédé humide. En effet, l'humidité du panneau cause une augmentation de la tension de vapeur lors du pressage à chaud d'où l'éclatement de l'échantillon.
- Après cette période, deux feuilles de papier ciré et deux plaques métalliques sont placées sur les deux surfaces de l'échantillon.
- Placer l'ensemble dans la presse pour consolider les fibres et avoir le produit fini.
- Programmer la presse avec les paramètres adéquats (température, temps, pression) et exécuter le programme pour avoir le panneau final (Figure 2.9).

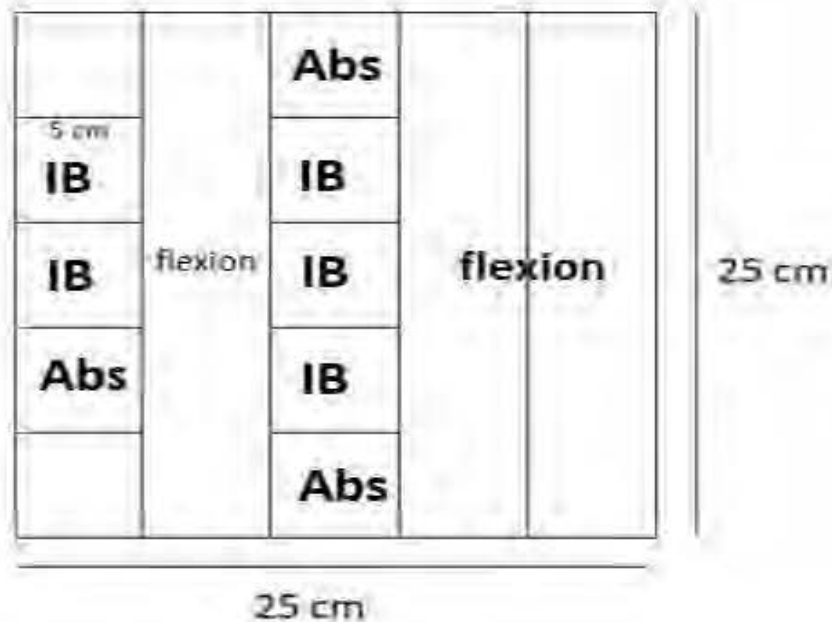
Après la fabrication par les deux procédés, les panneaux seront découpés en éprouvettes pour les différents essais à réaliser comme le montre la figure 2.10. Ces échantillons seront entreposés dans la chambre de conditionnement selon les conditions exigées par la norme ASTM D1037 (65% RH et  $20^{\circ}\text{C} \pm 3$ ) pour les utiliser lors des analyses. Également, des échantillons commerciaux seront découpés et mis dans les mêmes conditions afin de réaliser les comparaisons nécessaires avec les panneaux fabriqués.



**Figure 2.8** Équipements utilisés pour la fabrication des panneaux de fibres par voie humide : a) Séparateur de fibres METSO; b) Moule pour la préparation des ébauches par la voie humide; c) ébauche préparée par voie humide; d) Montage de compression ZWICK pour le pressage à froid.



**Figure 2.9** Panneaux fabriqués par voie humide après pressage à chaud



**Figure 2.10** Disposition des échantillons pour les essais de cohésion interne (IB), de flexion et de la stabilité dimensionnelle (ABS).

### 2.2.2. Plan des formulations

Vu le nombre important des formulations et des échantillons élaborés, un code de la forme XYZ sera assigné à chaque formulation désignant ainsi, une combinaison bien particulière. La partie X sert à indiquer les ajouts biosourcés (F : Aucun ajout, B : l'ajout de 10% des boues secondaires et A : ajout de 10% d'amidon). La partie Y sert à indiquer le ratio R entre les fibres de bois et les boues de désencrage dans le mélange (0 : 100% fibres, 20 : R=1/4 et 40 : R= 2/3). La partie Z désigne le procédé (S pour procédé sec et H pour le procédé humide). C1 et C2 désignent les échantillons commerciaux utilisés dans ce projet. Le tableau 2.2 résume ces désignations et le tableau 2.3 montre le dispositif expérimental utilisé pour la fabrication des panneaux.

**Tableau 2.2** La nomenclature pour la désignation des formulations

X \ Y	Y		
	0	20	40
<b>F</b>	100 % fibres	R = 1/4	R = 2/3
	BS = 0%	BS = 0%	BS = 0%
	Amidon = 0%	Amidon = 0%	Amidon = 0%
<b>B</b>	90 % fibres	R = 1/4	R = 2/3
	BS = 10%	BS = 10%	BS = 10%
	Amidon = 0%	Amidon = 0%	Amidon = 0%
<b>A</b>	90 % fibres	R = 1/4	R = 2/3
	Amidon = 10%	Amidon = 10%	Amidon = 10%
	BS = 0%	BS = 0%	BS = 0%

BDD : Les boues de désencrage    BS : Les boues secondaires     $R = \frac{\text{Quantité des BDD}}{\text{Quantité des fibres}}$

➤ Exemples :

- F0 est la formulation ayant 100 % de fibres sans amidon, ni boues secondaires.
- A40 est la formulation qui désigne l'ajout de 10% d'amidon avec un rapport

$$R = \frac{\text{Quantité des BDD}}{\text{Quantité des fibres}} = \frac{2}{3}$$

- B20H est la formulation qui désigne l'ajout de 10% de boues secondaires avec

un rapport  $R = \frac{\text{Quantité des BDD}}{\text{Quantité des fibres}} = \frac{1}{4}$

**Tableau 2.3** Dispositif expérimental utilisé pour la fabrication des panneaux

Proportion		Type et proportion du liant		Procédé et Code d'identification	
Fibres	Boues désencrage	Amidon	Boues secondaires	Sec	Humide
100%	0 %	0 %	0 %	F0S	F0H
80%	20%	0 %	0 %	F20S	F20H
60%	40%	0 %	0 %	F40S	F40H
90 %	0 %	0 %	10%	B0S	B0H
72 %	18 %	0 %	10%	B20S	B20H
54%	36%	0 %	10%	B40S	B40H
90 %	0 %	10%	0 %	A0S	A0H
72 %	18 %	10%	0 %	A20S	A20H
54%	36%	10%	0 %	A40S	A40H

Le tableau 2.4 illustre le nombre de répétitions ainsi que la norme appropriée pour chaque essai.

**Tableau 2.4** Essais réalisés sur les panneaux de fibres, normes utilisées et nombre de répétitions

Test	Norme	Répétition
Flexion à 3 points (MOE et MOR)	ASTM D1037	9
Cohésion interne (CI)	ASTM D1037	10
Profil de densité	Densitométrie à rayon X	3
Gonflement en épaisseur	ASTM D1037 /ANSI A208	3
Absorption d'eau	ASTM D1037 /ANSIA 208	3



### 2.2.3. Spectroscopie FTIR

La figure 2.11 montre le spectromètre de la société *SHIMADZU* de type : « Tracer-100 FTIR Spectrophotometer ». La spectrométrie IR permet d'analyser les matériaux organiques et inorganiques indépendamment de leur état physique ou de surface grâce à la diversité des montages expérimentaux. Un montage de réflexion/transmission (DRIFT) est appliqué pour cette étude. Précisément, 10 mg d'un échantillon sec (fibres TMP, BCTMP ou boues de désencrages) ont été mélangés avec 240 mg de KBr anhydre et ont été pressés manuellement pour former des pastilles. L'échantillon a été scanné 64 fois en transmittance avec un nombre d'onde qui varie de 4500 à 500  $\text{cm}^{-1}$ .



**Figure 2.11** IRTracer-100 de la compagnie Shimadzu pour caractériser la chimie de surface des échantillons

### 2.2.4. Analyse thermogravimétrique (ATG)

La fabrication des panneaux de fibres est basée sur un pressage à haute température des constituants mis en jeu. Les augmentations excessives des températures peuvent engendrer des dégradations des matières premières. Pour cela, la température de pressage est un paramètre indispensable à contrôler. L'analyse thermogravimétrique TGA est l'une des techniques les plus appropriées pour ce type d'analyses. Le principe de cette technique est de mesurer la masse de l'échantillon subissant un profil ascendant de température au cours du temps sous atmosphère contrôlée. Cette technique joue un

rôle important en fournissant les détails sur les températures de décomposition des échantillons et sur la stabilité thermique de ces derniers. L'appareil Q50-TG COMPACT fabriqué par TA Instruments, NewCastle, États-Unis, présenté dans la figure 2.12 est utilisé pour effectuer ces analyses. Cet appareil est équipé d'un creuset en platine et d'une balance de très haute précision. L'environnement doit être neutre, pour cela les analyses ATG ont été effectuées sous azote. Le traçage des courbes issues des analyses ATG des boues de désencrage et des fibres de bois a été effectué avec le logiciel *TA Universal Analysis*



**Figure 2.12** Appareil d'analyse thermogravimétrique, modèle Q50, TA Instrument

#### 2.2.5. Analyseur de la qualité des fibres METSO

Cet essai est assuré par l'analyseur de la qualité des fibres Metso FS300 illustré à la figure 2.13. Le but de cet essai est de caractériser morphologiquement les fibres de bois et les fibres des boues de désencrages mises en jeu. Cet essai a fourni des détails sur les dimensions des fibres et sur leur distribution. La solution préparée dans laquelle baignent les fibres est aspirée et une caméra qui mesure dans le domaine « proche rouge » (entre le rouge visible et l'infrarouge) capte les différentes fibres aspirées. Il faut bien

dispenser les fibres pour avoir une bonne évaluation de leur morphologie. Pour cela, il est nécessaire de les macérer selon la méthode détaillée par Franklin (1945) avant de lancer l'essai : les fibres, mises dans des fioles de macération, sont immergées dans une solution de 50% d'acide acétique glacial ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) et de 50% du peroxyde d'hydrogène à 30% ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) à une température de  $90^\circ\text{C}$  dans un bain-marie (eau distillée) jusqu'à ce que les échantillons deviennent blancs (4 à 10 heures selon le matériel utilisé) et ensuite rincées avec de l'eau distillée. La matière cristalline des échantillons va absorber les faisceaux dans le domaine du proche rouge émis par l'appareil. Le rayon transmis va être capté par un écran et en analysant les images projetées, la morphologie des fibres mises en jeu sera évaluée.



**Figure 2.13** Analyseur de la qualité des fibres Metso FS300

#### 2.2.6. Les tests mécaniques

##### ➤ Résistance à la flexion trois points

Cet essai sert à évaluer les modules d'élasticité et de rupture des échantillons. Les essais de flexion 3 points ont été effectués sur une machine d'essais universelle de type *ZWICK/Roell Z020* (Figure 2.14a) équipé d'une cellule de charge de 20 kN. L'acquisition des données est réalisée par un logiciel *TestXpert Machine V12.0* qui

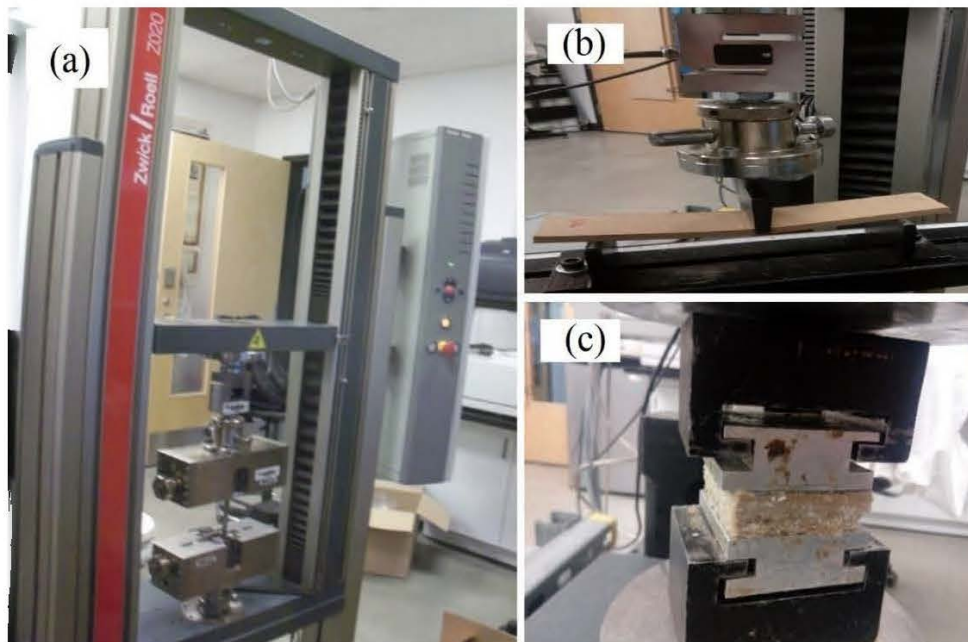
enregistre le déplacement en fonction de la force appliquée. La figure 2.14b représente le montage de l'essai de flexion trois points. Le module de rupture est en fonction de la charge maximale P (N) obtenue au moment de la rupture de l'échantillon, tandis que le module d'élasticité dépend de la pente b (N/mm) associée à la courbe charge = f (déformation). Cette pente est mesurée dans la partie rectiligne de la courbe uniquement, pour ne tenir compte que de la déformation élastique et non de la déformation plastique. Si L (mm) la portée de l'échantillon, l (mm) sa largeur et e (mm) son épaisseur, alors le module de rupture MOR se calcule suivant l'équation [1] proposée par la norme ASTM D1037.

$$MOR = \frac{1,5*PL}{l*e^2} (MPa) \quad [1]$$

➤ La cohésion interne

Selon les normes exigées sur les panneaux de fibres, nos échantillons sont appelés à subir les tests mécaniques de cohésion interne appelée aussi la traction perpendiculaire à la surface du panneau. La norme ANSI A208 exige l'utilisation d'un minimum de 5 échantillons par panneau. En accord avec la norme ASTM D 1037-99, les échantillons de 50 x 50 mm ont été collés avec une résine thermofusible entre deux pièces du même métal en aluminium appelés fers. Ces essais ont été effectués avec la machine d'essais universelle ZWICK/Roell Z020 (Figure 2.14a) utilisée précédemment pour les essais de flexion avec des changements au niveau du montage comme le montre la figure 2.14c.

$$CI = \frac{P}{l^2} (MPa) \quad [2]$$



**Figure 2.14** Équipements pour effectuer les tests mécaniques : a) Machine d'essais Universelle Zwick/Roell Z200; b) Le montage pour les essais de la flexion trois points; c) Le montage pour les essais de la cohésion interne

#### 2.2.7. Les profils de densité

Le test de profil de la densité consiste à balayer un échantillon du panneau par un faisceau de rayon X dans le sens de l'épaisseur. La différence d'intensité entre le rayon incident et le rayon sortant a permis de déterminer la densité du matériau. Cette caractérisation des profils de densité est non destructive, donc les échantillons analysés sont les mêmes destinés aux essais de cohésion interne. Chaque échantillon mesure 50 mm par 50 mm de côté. Le dispositif d'acquisition est composé d'un appareil à rayons X (modèle QMS) (Figure 2.15) et du logiciel *QMS Tree Rising System*. La densité de l'échantillon est calculée en comparant l'intensité de rayon transmis et émis. Cette méthode de mesure de profils de densité a fourni une mesure sur la variation de la densité et non pas la densité apparente de l'échantillon qui est calculée par la méthode

conventionnelle qui consiste à évaluer le rapport entre la masse et le volume de l'échantillon.



**Figure 2.15** Machine de mesure de densité QMS

#### 2.2.8. Analyses microscopiques

Afin de bien comprendre le comportement des échantillons vis-à-vis les différentes caractérisations effectuées, ces échantillons sont caractérisés aussi microscopiquement pour évaluer les liaisons entre les différents constituants. Le microscope *VK-X100* de l'entreprise japonaise *Keyence* (Figure 2.16) est utilisé.



**Figure 2.16** Microscope à LASER Keyence VK-X150

### 2.2.9. Stabilité dimensionnelle

La stabilité dimensionnelle consiste à évaluer le gonflement en épaisseur ainsi que l'absorption d'eau des échantillons fabriqués. Donc cet essai consiste à mettre les échantillons dans un bain d'eau (Figure 2.17) et de mesurer au cours du temps le changement au niveau de l'épaisseur et la masse. Pour effectuer ces essais, un échantillon de dimension 50 mm par 50 mm est découpé par panneau, comme l'indique les normes *ANSI A208* et *ASTM D 1037*.



**Figure 2.17** Bain d'immersion dans l'eau pour les essais de la stabilité dimensionnelle

### 2.2.10. Analyse statistique des résultats

Des analyses de variance (ANOVA) ont été réalisées pour interpréter les effets des variables (la proportion des boues de désencrage incorporées, le type du liant biosourcé et le procédé de fabrication) et leurs interactions sur les réponses, soient les propriétés mécaniques (modules d'élasticité MOE, modules de rupture MOR et la cohésion interne CI) et physiques (gonflement en épaisseur GE et absorption d'eau). Ces analyses ont été effectuées au moyen du logiciel *R version 3.5.0-2018* avec un niveau de signification fixé à un seuil de 0,05. Le modèle utilisé est présenté dans l'équation [2].

$$Y = \mu + A + B + C + AxB + AxC + BxC + AxBxC + \varepsilon \quad [3]$$

Avec :

Y : MOE, MOR, CI, Gonflement en épaisseur et Absorption d'eau

$\mu$  : L'effet général (intercepte)

A : La proportion des boues de désencrage incorporées

B : Le type du liant biosourcé

C : Le procédé de fabrication

$\varepsilon$  : L'erreur résiduelle



## CHAPITRE III

### RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus dans cette étude. Il sera divisé en trois parties :

- La première partie résume les essais préliminaires qui ont permis de fixer quelques variables expérimentales afin d'atteindre les objectifs de cette étude.
- La deuxième partie est dédiée pour les résultats obtenus sur l'analyse des différentes matières premières utilisées ainsi que les résultats de l'analyse statistique ANOVA.
- La troisième partie traite les propriétés mécaniques (module d'élasticité MOE, module de rupture MOR et la cohésion interne CI), physiques (profil de densité, absorption d'eau et gonflement en épaisseur) et microscopiques des panneaux fabriqués et ceux commerciaux.

La figure 3.1 montre l'apparence des panneaux fabriqués avec les différentes formulations. La variation de la couleur des différents panneaux dépend de la couleur des fibres vierges utilisées et le pourcentage des boues de désencrage dans les échantillons. Une couleur grise, remarquée surtout dans les échantillons du procédé humide, caractérise les panneaux ayant des teneurs plus ou moins élevées en boues. Cette couleur devient de plus en plus foncée en augmentant la teneur des boues de désencrage.



**Figure 3.1** L'apparence des panneaux fabriqués à partir des différentes formulations

### 3.1. Essais préliminaires

Les relations entre la méthode d'obtention des fibres (mise en pâte et conditions de défibrage), les caractéristiques des fibres obtenues, les paramètres de pressage et les propriétés des panneaux de fibres sont trop complexes. Plusieurs travaux de recherche ont contribué à la compréhension de ces relations. Les résultats de Geng et al. (2007) ont montré que le temps de pressage n'a pas un effet considérable sur la cohésion interne, alors que la température de pressage est un facteur important pour évaluer cette propriété. Aussi, ils ont montré que les résistances à la flexion (MOR et MOE) ont été affectées par la température de pressage et la durée du maintien sous la presse. Evon et al. (2010) et Evon et al. (2012) ont confirmé que les propriétés mécaniques des panneaux de fibres augmentent avec l'élévation de la température, la pression et la

durée du thermo-pressage. La température de pressage ainsi que la pression ont été fixées tout le long de ce projet. En se référant aux travaux de recherche de Migneault (2011) et Wieland (2007), la température est fixée à 180°C. Alors que la pression a été fixée en se basant sur les limites techniques de la presse disponible au laboratoire ayant une force de pression de 300 kN. Cependant, d'autres paramètres comme la densité et la durée de maintien sous la presse ont été testés afin de confirmer leurs effets sur les propriétés des panneaux fabriqués et pour fixer les paramètres de pressage finaux. Une première série d'essais préliminaires a été élaborée dans les conditions suivantes : un procédé sec, 100% fibres de bois et sans aucun ajout. Une durée de maintien sous la presse de 5 min s'avère insuffisante pour consolider les fibres entre elles et obtenir des panneaux évaluables. Deux autres choix de durée ont été testés, à savoir, 10 min et 20 min. Pour la même densité cible du panneau et moyennant ces deux variables, nous avons remarqué des augmentations de 55%, 12% et 11% sur les modules d'élasticité, modules de rupture et la cohésion interne, respectivement. La stabilité dimensionnelle a été aussi améliorée en passant de 10 à 20 min. En effet, des diminutions de 30% et 40% ont été remarquées pour les tests de gonflement en épaisseur et d'absorption d'eau respectivement. Une deuxième série de panneaux incorporés par 40% de boues de désencrage a été élaborée pour évaluer l'effet du maintien sous la presse toujours en fixant la même densité. Une amélioration de 25% pour la stabilité dimensionnelle a été notée. En élaborant ces essais, un temps de maintien de 20 min est avéré le plus avantageux donc il sera fixé pour le reste de cette étude.

Les recherches ont montré que la densité des panneaux de fibres influence énormément les résistances à la flexion (MOR et MOE), la cohésion interne et la stabilité dimensionnelle (Geng et al., 2007). Il s'est avéré que l'augmentation de la densité apparente du panneau signifie une augmentation des liaisons entre les fibres donc une amélioration de la rigidité et de la résistance (Hunt et al., 2005). Afin de confirmer l'effet de la variation de la densité sur les propriétés des panneaux de fibres fabriqués, une nouvelle série de panneaux a été élaborée en fixant le temps de maintien sous la

presse à 20 min. Une augmentation de 33% de la densité a engendré des augmentations de 85%, 75% et 23% sur les modules d'élasticité, les modules de rupture et la cohésion interne respectivement. Des constatations plus significatives ont été notées pour des augmentations de densité plus importantes. En effet, pour 66% d'augmentation, le module d'élasticité, le module de rupture et la cohésion interne sont multipliés respectivement de 7 fois, 6 fois et 1,5 fois. Physiquement, l'augmentation de la densité a influencé négativement la stabilité dimensionnelle en augmentant le gonflement en épaisseur. Des augmentations en épaisseur de 35%, 80% et 145% ont été notées pour des augmentations de densité de 33%, 66% et 150%, respectivement. Pour la suite de cette étude, une marge cible entre 320 et 350 kg/m<sup>3</sup> comparable à celle disponible sur le marché a été optée.

D'autres paramètres aussi importants que les paramètres de pressage peuvent avoir des influences directes ou indirectes sur les panneaux de fibres fabriqués. En général, la densité de l'essence utilisée est considérée comme une caractéristique très importante pour évaluer les propriétés du panneau final (Hunt et al., 2008; Xu et al., 1998). Une densité relativement faible est l'exigence de base pour l'obtention de panneaux avec des caractéristiques acceptables (Hsu, 1997; Maloney, 1993; Woodson, 1976). Ils ont confirmé que pour une même densité de panneaux, le rapport de compactage des panneaux en bois à faible densité est toujours plus élevé que celui des panneaux fabriqués avec du bois plus dense (Suchsland, 1990; Suchsland et al., 1987). À titre d'exemples, Chow et al. (1992) ont suggéré que le bouleau, frêne, douglas-sapin, l'épinette et le mélèze sont des essences de haute qualité pour la fabrication des panneaux de fibres. Mäbert (2009), qui a étudié la possibilité d'utiliser les bois feuillus comme matière première alternative pour la fabrication des panneaux de fibres, a remarqué que la variation des essences de bois entraîne une modification de la taille des fibres, ce qui affecte les propriétés des panneaux. Pour cette étude, l'effet de l'essence de bois sur les propriétés des panneaux ne fait pas partie des objectifs visés.

Pour cette raison, des fibres issues de la même essence ont été utilisées pour chaque procédé comme l'indique la section 2.1.1 du chapitre II.

Les conditions de défibrage affectent aussi les caractéristiques des fibres de bois et, par conséquent, les propriétés des panneaux à base de ces fibres (Benthien et al., 2017). En effet, les paramètres du processus de défibrage déterminent la qualité de la fibre obtenue (Deppe et al., 1996). Cette qualité des fibres (taille et morphologie des fibres, caractéristiques de surface, propriétés chimiques, comportements mécaniques) est une variable importante affectant le processus de fabrication et les propriétés des panneaux. Il a été constaté que la distance entre les disques de meulage et les essences de bois sont les paramètres qui influencent le plus la longueur des fibres. Ohlmeyer et al. (2006) ont caractérisé la morphologie (longueur et largeur des fibres) des fibres TMP de la même essence de plusieurs usines différentes. Ils ont remarqué que les fibres de différents fabricants sont clairement distinguées les unes des autres. L'augmentation de la température de défibrage et la pression dans les raffineurs vont engendrer une dégradation de l'hémicellulose. Cette diminution des composants hydrophiles dans les fibres de bois engendre une augmentation de la rugosité surfacique des fibres et une amélioration de la stabilité dimensionnelle (Groom et al., 2000; Roffael et al., 2001).

Il a été bien établi par Page et al. (1972) que les propriétés mécaniques des fibres individuelles augmentent avec la diminution de l'âge cambial. Ainsi, les performances mécaniques ont été améliorées en augmentant la proportion des fibres juvéniles dans les ébauches (Panshin et de Zeuw., 1980). Aussi, Shi et al. (2005) ont signalé que les propriétés des panneaux de fibres fabriqués par du bois juvénile d'épinette noire étaient significativement supérieures à celles des panneaux de fibres en bois mature. Ils ont expliqué ceci par la faible densité du bois juvénile par rapport au bois mature.

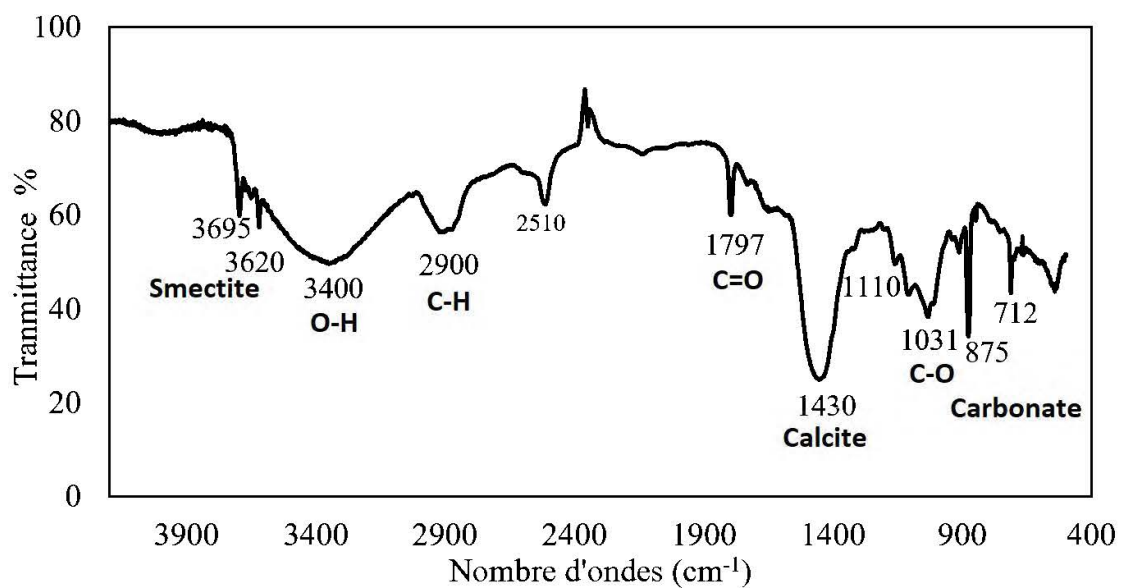
## 3.2. Caractérisation des matières premières

### 3.2.1. Spectroscopie infrarouge (FTIR)

La figure 3.2 illustre le spectre FTIR relatif aux boues de désencrage. Malgré l'existence des bandes similaires à celui des fibres de bois (Edalatmanesh et al., 2010; Méndez et al., 2009), ce spectre a montré des bandes supplémentaires qui n'ont pas été attribuées aux fibres de bois. Ces bandes sont principalement la calcite, la kaolinite et le talc. En se basant sur la littérature et en se référant à Haddar et al. (2016) qui ont travaillé avec les mêmes boues, les différentes bandes caractéristiques de ce spectre peuvent être identifiées. Le tableau 3.1 résume les pics les plus importants de ce spectre. La boue utilisée est hétérogène et les informations exactes sur l'origine du papier recyclé n'ont pas été fournies, mais en se référant à la littérature, l'existence des pics de lignine ( $1734$ ,  $1607$ ,  $1454$  et  $1267$   $\text{cm}^{-1}$ ) a été confirmée. Ceci élimine le fait d'être des boues purement KRAFT et confirme la présence des boues de types TMP ou CTMP (Migneault et al., 2010). Les pics observés à  $3350$   $\text{cm}^{-1}$  (groupes OH),  $2920$  et  $2850$   $\text{cm}^{-1}$  (étirement aliphatique C-H),  $1790$   $\text{cm}^{-1}$  (vibration C=O),  $1650$   $\text{cm}^{-1}$  (aromatique C=C),  $1460$   $\text{cm}^{-1}$  (déformation asymétrique C-H),  $1158$   $\text{cm}^{-1}$  (vibration C-O-C asymétrique des polysaccharides) et  $1030$   $\text{cm}^{-1}$  (étirement C-O) indiquent que les boues de désencrage sont riches en structure aromatique, phénolique, aliphatique et polysaccharide.

Selon Chen et al. (1998), la région  $3000$ - $3600$   $\text{cm}^{-1}$  du spectre IR dépend fortement de l'eau absorbée qui apparaît comme une bande forte centrée à  $3400$   $\text{cm}^{-1}$ . Les bandes à  $600$  et  $1618$   $\text{cm}^{-1}$  ont été attribuées pour le sulfate de calcium qui est une charge courante dans la production de pâtes et papiers. On observe aussi les bandes inorganiques telles que le quartz ( $800$ - $770$   $\text{cm}^{-1}$ ), la kaolinite  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  ( $3343$  et  $2927$   $\text{cm}^{-1}$ ), la smectite ( $3620$ ,  $3650$ , et  $3690$   $\text{cm}^{-1}$ ), la calcite ( $1426$   $\text{cm}^{-1}$ ) et le carbonate ( $875$  et  $2520$   $\text{cm}^{-1}$ ) (Cetin et al., 2004; Davis et al., 2003; Geng et al., 2007; Jackson et

al., 1997; Krigstin et al., 2006; Mabee, 2001; Zerhouni, 2010). Après combustion à une température supérieure à 525°C, le pourcentage des matières récupérées qui représentent la partie inorganique (suite à la décomposition des éléments carbonés lors de la combustion) varie de 10 à 70% (Ochoa de Alda, 2008; Geng et al., 2007; Krigstin et al., 2006; Méndez et al., 2009; Xing et al., 2012; Zerhouni, 2010). Les valeurs les plus élevées sont observées pour les boues de désencrage. Aussi (Davis et al., 2003; Edalatmanesh et al., 2010; A. Méndez et al., 2009; Zerhouni, 2010) ont confirmé que les boues contiennent plusieurs métaux en faibles concentrations. Des bandes typiques de cellulose d'environ 1315  $\text{cm}^{-1}$  due à l'étirement C-OH et à 1370  $\text{cm}^{-1}$  affectée à la déformation C-H n'ont pas été observées dans les boues de désencrage à cause de la présence d'une large bande de 1400 à 1500  $\text{cm}^{-1}$  liée à la présence de carbonates. Les bandes à 1110 et 1160  $\text{cm}^{-1}$  sont attribuées aux liaisons C-O-C alors que les absorptions à 1055 et 1026  $\text{cm}^{-1}$  pourraient être attribuées à la vibration de glucose impliquant l'étirement du C-O et du O-H. La bande d'absorption à 870  $\text{cm}^{-1}$  correspond à la liaison glucose C-O-C (Méndez et al., 2014).



**Figure 3.2** Spectroscopie FTIR des boues de désencrage

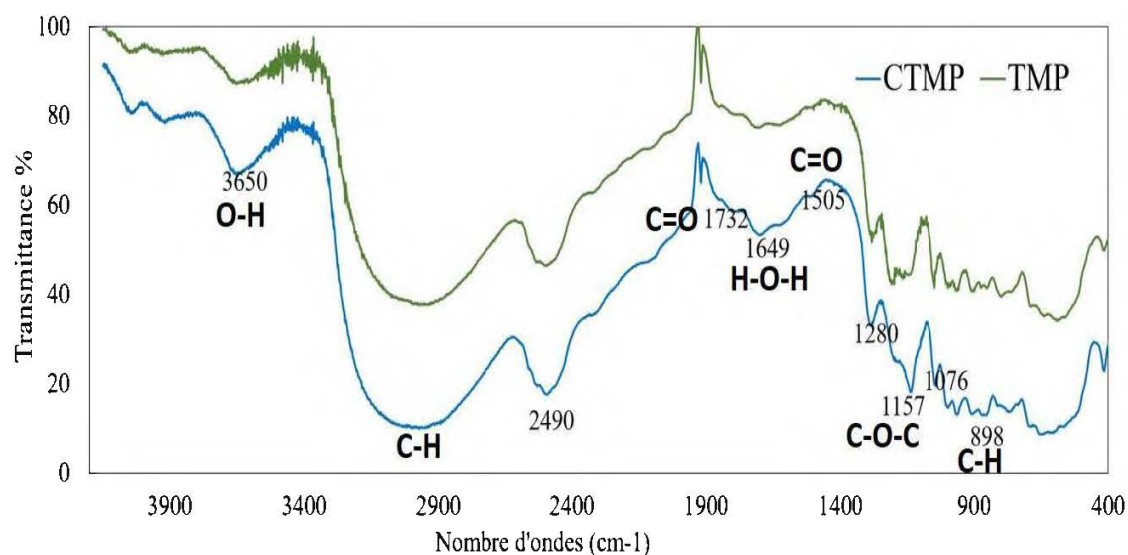
**Tableau 3.1** Identification des bandes caractéristiques du spectre FTIR des boues (Haddar et al., 2016)

Constituant	Nombre d'onde associé (cm <sup>-1</sup> )	Références
Calcite	1797; 1426; 875; 712	Kumar et al. (2014), Méndez et al. (2009), Tatzber et al. (2007)
Talc	3695; 1009; 669	Bich et al. (2009)
Kaolinite	3695; 3620; 1113; 1031; 938; 912; 789; 755; 698; 467	Tatzber et al. (2007)
Matériaux lignocellulosiques	3400; 2900; 1430; 1110	Soucy et al. (2015)

Les spectres FTIR des fibres de bois utilisées dans cette étude sont représentés dans la figure 3.3. La large bande centrée à 3344 cm<sup>-1</sup> a été attribuée aux vibrations d'étirement de la bande O-H et N-H et caractérise les liaisons des groupes hydroxyles. Les groupes de OH peuvent survenir de l'eau absorbée, des alcools aliphatiques primaires et secondaires dans les carbohydrates et dans la lignine, des alcools aromatiques primaires et secondaires dans la lignine, des extractibles et des acides carboxyliques (Bouafif et al., 2008; Faix et al., 1992; Kazayawoko et al., 1997; Pandey et al., 1997). La vibration d'étirement méthyl/méthylène des liaisons C-H est apparue à 2900 cm<sup>-1</sup>. La bande d'absorption à 1734 cm<sup>-1</sup> illustre la vibration d'étirement des groupes carbonyles non conjugués (C=O) de lignine de bois et de matières extractibles. Les bandes à 1510 cm<sup>-1</sup>, 1607 cm<sup>-1</sup> et 1454 cm sont reliées respectivement aux vibrations du squelette aromatique du groupe C=O dans la lignine et la déformation asymétrique C-H. La bande à 1653 cm<sup>-1</sup> émane de l'angle de liaison H-O-H (Olsson et al., 2004). La région de 1500 à 1000 cm<sup>-1</sup> des spectres infrarouges est appelée "empreinte digitale" (Pavia et al., 2008) et les bandes de cette région ont été assignées à différents modes de



vibration complexes dans les glucides du bois et la lignine. À  $2927\text{ cm}^{-1}$ , une bande importante de méthylène-méthyle est notée. Une vibration d'intensité moyenne associée à une liaison ester-carbonyle a été remarquée à  $1729\text{ cm}^{-1}$ . L'origine de cette liaison est la vibration d'élongation de la double liaison C=O des groupes acétyles dans les hémicelluloses et des groupes carbonyles dans la lignine (Pandey, 1999; Pandey et al., 1997; 2004; Silverstein et al., 2005). Les deux bandes aux alentours de  $1600$  et  $1510\text{ cm}^{-1}$  peuvent aussi être attribuées à la liaison aromatique C=C liée à la lignine (Barker et al., 1999; Ferraz et al., 2000; Marcovich et al., 1996; Moore et al., 2001). Dans le domaine  $[400,1600\text{ cm}^{-1}]$ , plusieurs bandes de vibration ont été détectées (Tableau 3.2). L'origine de ces bandes est les groupements fonctionnels présents dans les différents constituants du bois. Les bandes  $1464$ ,  $1423$  et  $1366\text{ cm}^{-1}$  sont associées aux vibrations des déformations du méthylène et les vibrations symétriques et asymétriques du méthyle (Ajuong et al., 1998; Faix et al., 1992; Kazayawoko et al., 1997; Pandey et al., 1997). La bande à  $894\text{ cm}^{-1}$  est attribuée à la vibration d'élongation et déformation de la liaison simple CH de la cellulose (Ajuong et al., 1998).



**Figure 3.3** Spectroscopie FTIR des fibres utilisées (TMP, CTMP)

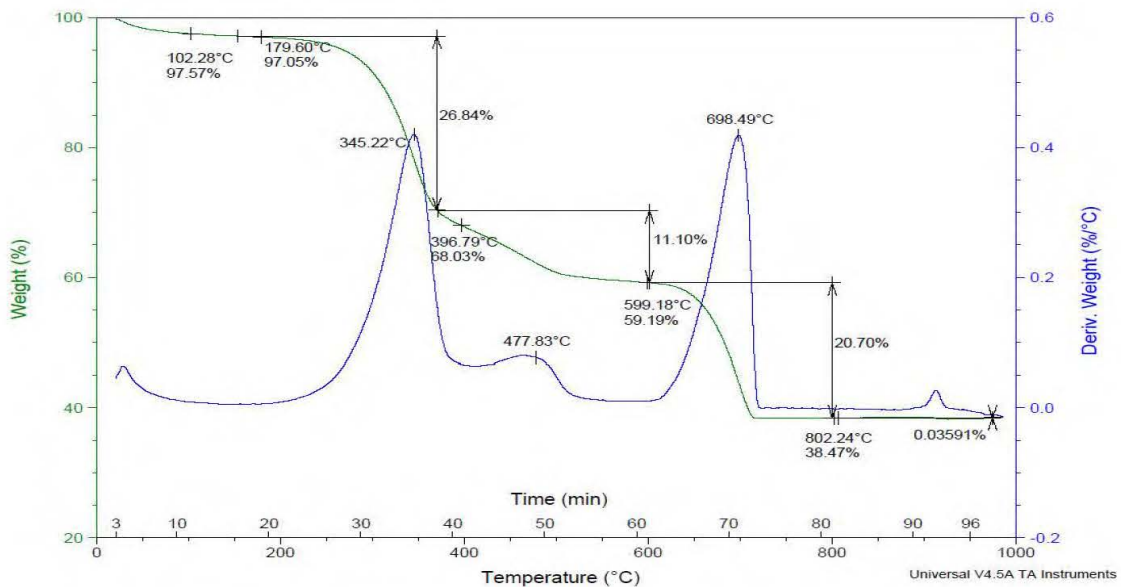
**Tableau 3.2** Identification des bandes caractéristiques du spectre FTIR des fibres TMP et CTMP (Faix, 1991; Fengel et al., 2011; Pandey et al., 1997; Usmanov et al., 1972)

Nombre d'onde (cm <sup>-1</sup> )	Désignations
1732	Étirement du C=O dans les groupements carbonyles et esters non conjugués (des groupes d'origine glucidique) et de dans les hémicelluloses
1649	O-H absorbée et conjuguée C-O
1593 ; 1505	Vibrations squelettiques aromatiques plus CO stretch
1460	Déformation asymétrique en -CH3- et -CH2
1424	Vibration aromatique combinée avec une déformation des liaisons C-H
1372	Déformation du C-H dans la cellulose et les hémicelluloses
1157	Vibrations C-O-C dans la cellulose et les hémicelluloses
1076	Déformations C-H, C-O
998	L'étirement C-O dans la cellulose et les hémicelluloses
897	Déformation C-H dans la cellulose

### 3.2.2. Analyse thermogravimétrique (ATG)

La figure 3.4 montre l'analyse thermogravimétrique (ATG) et la dérivée de ce thermographe (DTG) des boues de désencrage. La dégradation thermique des boues de désencrage s'est produite en trois étapes, comme le confirme la présence de trois pics exothermiques sur la courbe DTG. La première étape de dégradation est située entre 200 et 350°C. Elle peut être attribuée à la décomposition des matières lignocellulosiques (l'hémicellulose et de la cellulose) existantes dans les boues de désencrage (Bodîrlău et al., 2007), aux glucides et aux composés aliphatiques (Sidhu et al., 1995). Cette première étape est caractérisée par un pic de dégradation à 345°C et un pourcentage de perte de poids de 26,84%. Wolcott et al. (1999) ont noté que les

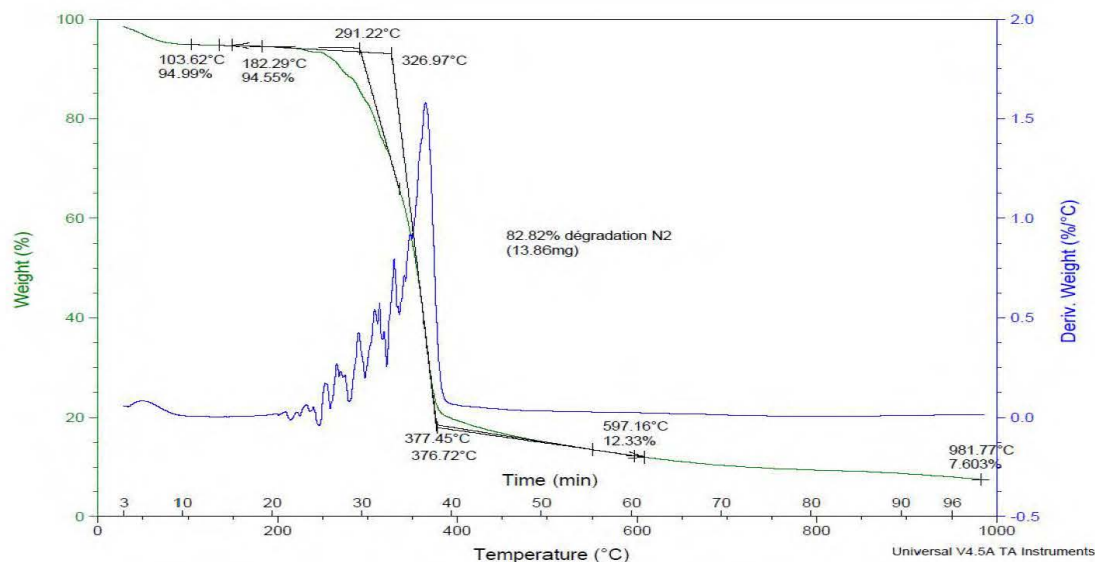
hémicelluloses se décomposent de 200 à 380°C avec un pic exothermique à environ 295°C. L'absence de ce dernier dans notre cas est expliquée par Migneault et al. (2014). Ils ont suggéré que les hémicelluloses, à cause de leurs faibles poids moléculaires, ont été enlevées au cours du processus de désencrage. La deuxième étape de dégradation est située entre 350 et 500°C et caractérisée par un pic de dégradation à 478°C. Une perte de 11% a été constatée pour cette étape. Cette dégradation est liée à des structures aromatiques facilement biodégradables et la cellulose. La troisième étape de dégradation est située entre 600 et 750°C. Elle peut être attribuée à la calcination des carbonates résiduels présents dans les cendres (Yan et al., 2011) et des structures aromatiques telles que la lignine (Sidhu et al., 1995). Le pic associé à cette dégradation est observé à 700°C et dû à la combustion des carbones fixés et la décomposition des carbonates de calcium (Lou et al., 2012). Au-dessus de 700°C, il convient de noter qu'une masse résiduelle de 40% persiste, ce qui est principalement dû à la présence des cendres.



**Figure 3.4** Thermogramme ATG et la courbe dérivée des boues de désencrage

La stabilité thermique des fibres de bois est difficile à maîtriser à cause de la structure complexe de ces fibres qui est composée par la cellulose, l'hémicellulose et la lignine.

La dégradation thermique des fibres de bois peut être décrite en deux étapes : la première étape est dans un intervalle de température de 200-280°C et la deuxième dans un intervalle de 280 - 400°C. La dégradation des hémicelluloses se fait à des faibles températures contrairement aux celluloses (Müller-Hagedorn et al., 2003; Ramiah, 1970; Rath et al., 2003). Une perte de masse importante a été enregistrée : l'hémicellulose part en premier lieu car il est de petite masse molaire, la température est estimée à 250°C. La cellulose et les particules ayant des grandes chaînes vont disparaître à 370°C. La lignine commence à se décomposer à 200°C, mais elle est beaucoup plus stable à la dégradation thermique par rapport aux autres polymères polysaccharides (Rowell et al., 2005). La dégradation thermique du bois commence à environ 250°C. Entre 300 et 375°C, la majorité des polysaccharides seront dégradés. Pour des températures élevées, il y a des changements qui se produisent au niveau de la structure chimique des fibres de bois. La température, la durée et les conditions d'expositions à la chaleur influencent l'ampleur des changements chimiques. Pour des températures supérieures à 65°C, il y aura des réactions de polymérisation qui vont provoquer une réduction permanente de la force des liaisons inter et intramoléculaires (Méziane, 2011). La rupture des liaisons chimiques commence à une température supérieure à 100°C (Agblevor et al., 1996; Peng, 2008). La figure 3.5 illustre le thermogramme ATG des fibres de bois TMP. En comparant les deux courbes TGA, une première perte de masse est enregistrée sur les deux thermogrammes (entre 3 et 6%) est due à l'humidité absorbée par les échantillons. Ces résultats suggèrent que les boues de désencrage peuvent favoriser l'augmentation de la stabilité thermique des panneaux incorporés puisque les boues ont une stabilité thermique bien supérieure à celle des fibres de bois. Cette augmentation de la stabilité thermique peut être confirmée par la diminution du pourcentage de perte de poids total de 82,82% pour les fibres de bois à 58,64 % pour les boues de désencrage. L'existence des cendres dans les boues est l'explication la plus probable pour interpréter cette stabilité.



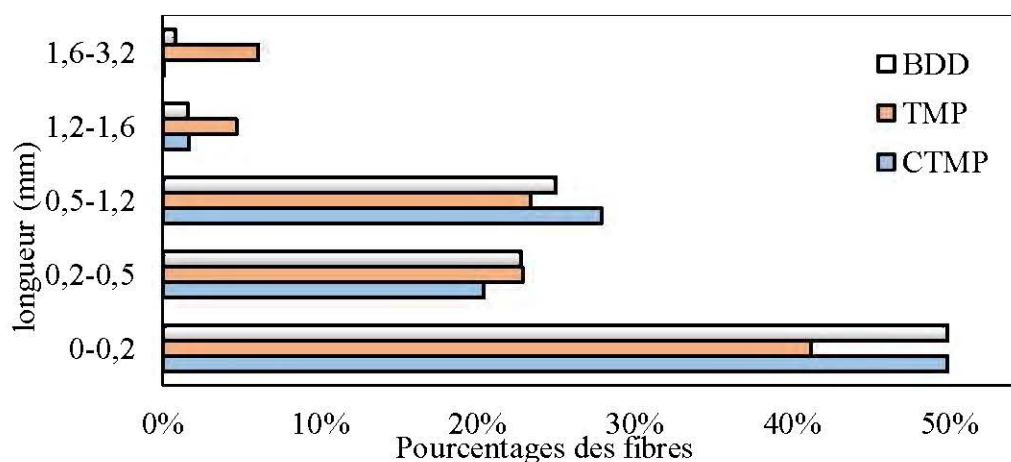
**Figure 3.5** Thermogramme ATG et la courbe dérivée des fibres TMP

### 3.2.3. Analyse de la qualité des fibres

La morphologie des fibres, leurs dimensions et leurs surfaces spécifiques influencent les propriétés physiques et mécaniques des panneaux de fibres (Moslemi, 1974). Les relations entre ces caractéristiques des fibres et les panneaux de fibres sont complexes (Shi, 2006). Cependant, selon la littérature, les fibres longues ont un effet positif sur la plupart des propriétés des panneaux (Maloney, 1993; Moslemi, 1974; Suchsland, 1990). Selon Shi (2006), les fibres fines ayant des longueurs inférieures à 0,2 mm ont un effet négatif sur ces propriétés. En effet, ces fines ne permettent pas un transfert de charge efficace au sein du panneau. Elles diminuent aussi la rigidité et la force et la cohésion interne des panneaux (Groom et al., 1999; Li et al., 2006). D'un autre côté, les fibres courtes augmentent la densité apparente du matériel car elles peuvent s'intercaler dans la structure lacunaire formée par les fibres longues, bouchant ainsi les espaces vides. Cette densité apparente est positivement liée aux propriétés mécaniques des panneaux. (Li et al., 2006; Xing et al., 2006). Ces caractéristiques affectent aussi la stabilité dimensionnelle. En effet, Halligan (1970), affirme que le gonflement en épaisseur est affecté par la géométrie des fibres mises en jeu et les longues fibres

réduisent le gonflement (Nelson, 1973). Les dimensions des fibres, par exemple la longueur, ont aussi un impact sur le ratio de compression. Les fibres plus longues ont tendance à s'aligner favorablement dans la direction horizontale lors de la formation de l'ébauche, ce qui favorise son ratio de compression et par conséquent améliore la stabilité dimensionnelle (Suchsland, 1990). En vue de toutes ces considérations plus ou moins contradictoires, il paraît difficile de définir une distribution optimale de la longueur des fibres. Il ressort toutefois que les fines particules ne sont pas souhaitables. Barnes (2002) a constaté que la teneur élevée en fibres fines dans les panneaux réduit les propriétés en flexion des panneaux. Groom et al. (1999) ont prouvé que la rigidité, la résistance, et la force de la cohésion interne diminuent avec l'inclusion des fines dans le mélange. La figure 3.6 montre la distribution morphologique des boues de désencrage et les fibres de bois utilisées dans ce projet pour les deux procédés sec et humide. Pour les fibres TMP utilisées pour le procédé sec, un pourcentage de 41,2% des fines ayant des longueurs inférieures à 0,2 mm a été mesuré. Selon la littérature cette longueur de 0,2 mm est considérée comme étant une limite de faiblesse. Cependant, un pourcentage important de 10,8% a été affiché pour les longueurs de fibres supérieures ou égales à 1,2 mm. Ces fibres longues peuvent contribuer à l'amélioration des propriétés de flexion testées sur les échantillons issus du procédé sec. Le reste des fibres qui représente 46,3% représente des fibres ayant des longueurs comprises entre 0,2 et 1,2 mm. Ce pourcentage présente, selon la limite fixée par la littérature, un avantage. Pour ce même intervalle, des pourcentages presque similaires à celui des fibres TMP ont été notés pour les fibres CTMP et les boues de désencrages. Précisément, le pourcentage est de 48,3% pour les fibres CTMP et de 47,8% pour les boues de désencrages. Par contre, pour ces derniers, les fibres longues (supérieur à 1,2 mm) sont négligeables par rapport aux fibres longues présentes dans les fibres TMP. En effet, ce pourcentage présente seulement 1,8% pour les fibres CTMP et 2,4% pour les boues de désencrage. Une même quantité de fines (inférieur à 0,2 mm) de 49,9% dans les boues de désencrage et les fibres CTMP a été notée. Ce pourcentage présente un véritable inconvénient et peut expliquer les faibles propriétés mécaniques constatées

sur les échantillons. Par contre le pourcentage des fibres entre 0,2 et 1,2 mm de longueur peut faire un équilibre et éviter les effets négatifs des fines. Le pourcentage élevé des fines dans les boues de désencrage peut être expliqué par la présence des particules qui représentent la partie non fibreuse des boues qui est constituée par des cendres, des minéraux et des métaux. Ceci s'accorde bien avec la caractérisation chimique des boues. Cette quantité importante peut causer des faiblesses au niveau des propriétés mécaniques des panneaux, mais assure une meilleure stabilité dimensionnelle.



**Figure 3.6** Distribution morphologique des fibres de bois (TMP et CTMP) et des boues de désencrage (BDD)

### 3.3. Effet des différents facteurs sur les propriétés mécaniques et physiques des panneaux par analyse de variances ANOVA

Le tableau 3.3 présente les valeurs du test F qui est le résultat du rapport des deux variances factorielle et résiduelle. Ces deux variances sont la somme des carrés divisée par le nombre de degrés de liberté (d.d.l) du modèle statistique appliqué. L'analyse de variance montre que les variations de toutes les propriétés testées, physiques (gonflement en épaisseur GE et Absorption d'eau) et mécaniques (MOE, MOR et CI), en fonction de tous les facteurs individuels (A), (B) et (C) sont significatives avec  $\alpha$  égal à 0,01 et 0,001. Les résultats obtenus montrent que les comportements physiques

et mécaniques dépendent du pourcentage des BDD (A). En effet, l'incorporation des boues de désencrage a favorisé la présence des cendres dans les échantillons qui minimisent les liaisons entre les fibres et créent des inclusions dans la structure. Cependant, cette augmentation a amélioré significativement la stabilité dimensionnelle des échantillons grâce à l'hydrophobicité des cendres. Cette analyse de variance a aussi prouvé que le choix de procédé de fabrication (B) est très important et influence le comportement mécanique étudié. En effet, un procédé humide est plus approprié puisqu'il favorise les liaisons hydrogènes grâce à la présence d'eau. Les résultats ont aussi confirmé que le type de liant (C) influence les propriétés mécaniques des échantillons. Ce résultat est significativement remarquable avec l'amidon qui a amélioré le comportement mécanique des échantillons malgré la présence des boues de désencrage en favorisant les liaisons hydrogènes et le pourcentage des polysaccharides dans les échantillons. Cependant, l'effet des boues secondaires n'a pas été suffisamment remarquable. Les interactions entre le type de liant (C) et le pourcentage des boues de désencrage incorporées (A) sont significatives pour toutes les variables de réponses étudiées. Ce résultat s'explique par le fait que l'effet de la teneur des boues de désencrage varie selon le type de liant ajouté (amidon ou boues secondaires). En effet, le comportement mécanique observé en augmentant la teneur des BDD n'est pas le même pour les deux types de liants. Les interactions statistiques entre le procédé de fabrication des panneaux (B) et la teneur en boues de désencrage (A) révèlent que l'effet de la teneur en boues varie selon le procédé de fabrication. Ainsi, la quantité de fibres de bois qui peut être remplacée par de la boue varie selon le procédé de mise en pâte. En effet, avec un procédé humide, un pourcentage plus élevé de boues de désencrage est toléré pour avoir de bonnes propriétés mécaniques et physiques. Les interactions statistiques entre le procédé de fabrication des panneaux (B) et le type de liant (C) ont aussi prouvé que l'effet de type de liant ajouté varie selon le procédé de fabrication. En effet, les résultats obtenus ont confirmé que l'ajout de l'amidon a un effet significativement positif sur le comportement mécanique des échantillons fabriqués selon un procédé humide. Cependant, l'ajout d'amidon n'a pas amélioré ce même



comportement avec le procédé sec. L'ANOVA a montré aussi que l'interaction triple entre tous les facteurs est significative. Ceci s'explique par l'effet de chaque facteur sur l'interaction double des deux autres facteurs. En effet, toutes les interactions doubles sont significatives et dans tous les cas d'interactions, l'effet des facteurs sur les réponses varie selon les uns des autres.

**Tableau 3.3** Analyses de variance (ANOVA) avec les valeurs de F et leur signification pour chaque source de variation

Source	d.d.l	Propriétés mécaniques			Propriétés physiques	
		MOE	MOR	CI	GE	Absorption
<b>Pourcentage des BDD</b>						
(A)	2	33,6 ***	6,3 **	20,4 ****	184,4 ****	991 ***
<b>Procédé (B)</b>	1	134,5 ***	162,3 ***	708,9 ***	55,76 ***	569,7 ***
<b>Type de liant (C)</b>	2	16,5 ****	17,7 ****	47,7 ****	112,1 ****	33,9 ****
(A) x (B)	2	1,5 NS	4,3 *	17,6 ****	14,3 ****	195,2 ****
(A) x (C)	4	2,7 *	9,6 ****	21 ****	7,9 ****	77,3 ****
(B) x (C)	2	47,6 ****	15,1 ****	53,2 ****	72 ****	74,7 ****
(A) x (B) x (C)	4	1,7 NS	6,9 ****	27 ****	0,8 NS	57,8 ****
<b>Coefficient de corrélation R<sup>2</sup></b>		0,9068	0,8975	0,9704	0,9597	0,9804
<b>Erreur résiduelle</b>		0,8629	0,8492	0,9564	0,9406	0,9858

\* : significatif à 0,05 ; \*\* : significatif à 0,01 ; \*\*\* : significatif à 0,001; NS : non significatif ; d.d.l : Degré de liberté

### 3.4. Caractérisation mécanique des panneaux

Dans cette section, les résultats des essais mécaniques représentés dans le tableau 3.4 ont été analysés afin d'évaluer l'effet de l'ajout des boues de désencrage ainsi que

l'ajout des boues secondaires et l'amidon sur les modules d'élasticité et de rupture en flexion 3 points et sur la cohésion interne.

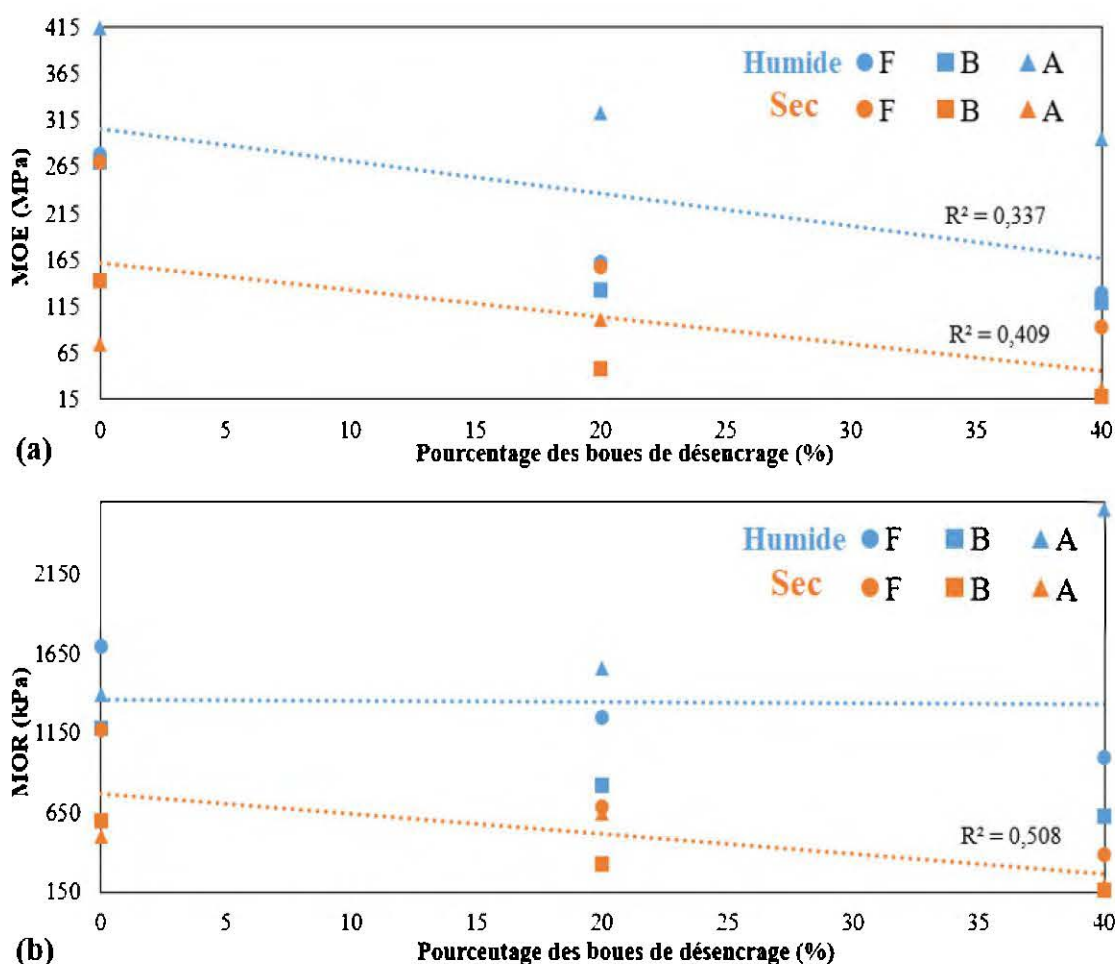
**Tableau 3. 4** Propriétés mécaniques des panneaux de fibres fabriqués et commerciaux

<b>Code</b>	<b>MOE (MPa)</b>	<b>MOR (kPa)</b>	<b>Cohésion interne (kPa)</b>	<b>Masse volumique (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Panneaux commerciaux				
<b>C1</b>	397 ± 16	2404 ± 194	50 ± 7	300
<b>C2</b>	221 ± 17	2391 ± 177	29 ± 5	300
Panneaux de fibres fabriqués par un procédé humide				
<b>F0H</b>	278 ± 28	1689 ± 248	19 ± 4	332 ± 15
<b>F20H</b>	163 ± 40	1242 ± 70	20 ± 2	348 ± 19
<b>F40H</b>	130 ± 40	997 ± 301	19 ± 3	354 ± 23
<b>B0H</b>	271 ± 67	1182 ± 681	20 ± 3	352 ± 9
<b>B20H</b>	132 ± 30	822 ± 119	15 ± 3	337 ± 3
<b>B40H</b>	119 ± 16	622 ± 43	18 ± 3	339 ± 12
<b>A0H</b>	415 ± 48	1392 ± 162	54 ± 4	342 ± 5
<b>A20H</b>	323 ± 66	1557 ± 335	26 ± 3	346 ± 7
<b>A40H</b>	295 ± 39	2557 ± 296	21 ± 5	344 ± 5
Panneaux de fibres fabriqués par un procédé sec				
<b>F0S</b>	270 ± 38	1166 ± 143	7 ± 0,9	335 ± 13
<b>F20S</b>	158 ± 24	680 ± 60	6 ± 1,4	341 ± 18
<b>F40S</b>	93 ± 13	387 ± 55	3 ± 0,8	350 ± 27
<b>B0S</b>	142 ± 25	598 ± 52	3 ± 0,2	347 ± 8
<b>B20S</b>	48 ± 5	321 ± 63	2 ± 0,3	340 ± 11
<b>B40S</b>	18 ± 5	159 ± 28	3 ± 0,1	352 ± 13
<b>A0S</b>	74 ± 22	497 ± 46	2 ± 0,8	347 ± 6
<b>A20S</b>	101 ± 29	646 ± 99	4 ± 1,9	338 ± 9
<b>A40S</b>	27 ± 8	194 ± 65	3 ± 0,4	350 ± 11

### 3.4.1. Résistance à la flexion trois points

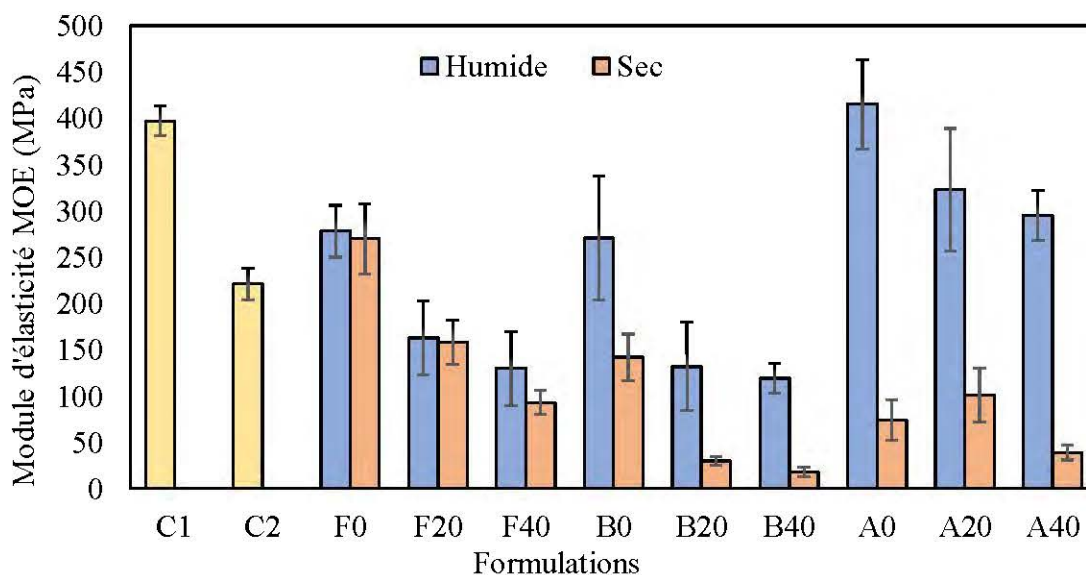
Comme discuté précédemment, la densité des panneaux est un facteur primordial qui influence directement les performances mécaniques des panneaux de fibres. Pour cela, et afin d'évaluer réellement l'effet des boues de désencrage sur ces performances, une seule densité cible comparable aux échantillons commerciaux a été fixée. La densité apparente diminue avec l'augmentation de la teneur des fibres longues car la présence de ces fibres augmente le volume des vides au sein de l'ébauche (Clark, 1978). Durant les manipulations, une augmentation de la proportion des boues engendre une augmentation de la densité apparente de l'ébauche. Ceci est expliqué par les particules non fibreuses et la teneur élevée des fines dans les boues de désencrage. Xing et al. (2006) explique que l'abondance de fibres courtes rend les structures plus denses entre les fibres donc la densité apparente de l'ébauche augmente. Pour remédier à ce problème et afin d'unifier tous les panneaux à une seule densité cible, la quantité totale des matières premières est contrôlée en gardant un ratio constant entre les fibres de bois et les boues de désencrage. L'ajout des boues a influencé aussi les épaisseurs des matelas préparés, en effet, en augmentant les pourcentages de ces boues, un matelas d'épaisseur inférieure est observé. Xing et al. (2006) ont suggéré que l'épaisseur des matelas avant pressage peut avoir des conséquences sur les propriétés mécaniques des panneaux de fibres. Hunt et al. (2008) ont confirmé que l'épaisseur finale du panneau a aussi un effet significatif sur les propriétés des panneaux de fibres. Ils ont remarqué que les panneaux les plus minces avaient des valeurs MOE plus faibles à celles des panneaux plus épais. Pour toutes les formulations élaborées, les résultats ont montré une différence au niveau des performances entre les deux procédés. En effet, le procédé humide est de loin meilleur que le procédé sec. Ce résultat s'explique par le fait que le procédé sec prévient la formation de liaisons hydrogène contrairement au procédé humide qui forme davantage ces liens. Cette différence devient de plus en plus flagrante en ajoutant les boues secondaires ou l'amidon. Ceci explique l'importance de l'eau dans la création des liaisons qui permet une bonne adhérence entre les différents constituants du panneau en favorisant les groupement hydroxyles formant ainsi les

liaisons hydrogènes. Ainsi, il est essentiel d'utiliser un adhésif thermodurcissable pour la fabrication à sec pour que ces panneaux rencontrent les exigences en termes de propriétés mécaniques. Par conséquent, les panneaux fabriqués par le procédé humide sont plus ou moins comparables aux panneaux commerciaux tandis que ceux issus du procédé sec sont loin d'être compétitifs. La figure 3.7 montre l'effet de l'ajout des boues de désencrage sur les MOE et MOR des échantillons. Les droites de tendance obtenues confirment l'effet négatif des boues de désencrage sur les propriétés mécaniques.

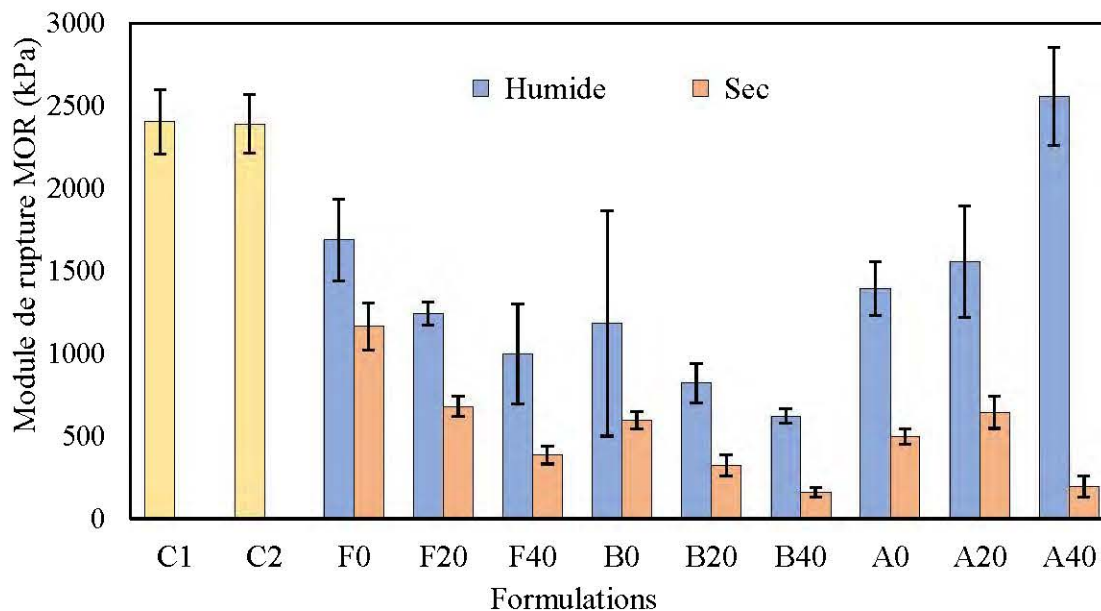


**Figure 3.7** L'effet de l'augmentation de la teneur des boues de désencrage sur les résultats de (a) MOE et (b) MOR des échantillons

Les figures 3.8 et 3.9 illustrent respectivement les résultats des MOE et MOR sous forme des histogrammes afin de bien évaluer l'effet de l'ajout des boues de désencrage ainsi que les liants biosourcés ajoutés aux mélanges et pour bien comparer les panneaux fabriqués entre eux et avec les échantillons commerciaux. Pour toutes les formulations, même avec les ajouts des boues secondaires et l'amidon, l'augmentation de la teneur des boues de désencrage engendre des diminutions des modules d'élasticité MOE. Les mêmes constatations ont été notées pour les modules de rupture MOR sauf avec l'ajout de l'amidon. En effet, les ajouts de 20% et 40% de boues de désencrages BDD combinés avec l'ajout de 10% d'amidon ont amélioré les MOR des échantillons respectivement de 11 et 40%. Les deux échantillons commerciaux ont quasiment la même valeur de MOR. Cette valeur nous donne une idée sur le besoin du marché. Dans toutes les formulations élaborées, une seule formulation a pu atteindre cette valeur.



**Figure 3.8** L'effet de l'incorporation des différents pourcentages des boues de désencrage (0, 20 et 40%) sur les modules d'élasticité MOE des panneaux de fibres sans additifs (F), avec 10% de boues secondaires (B) et avec 10% d'amidon (A).

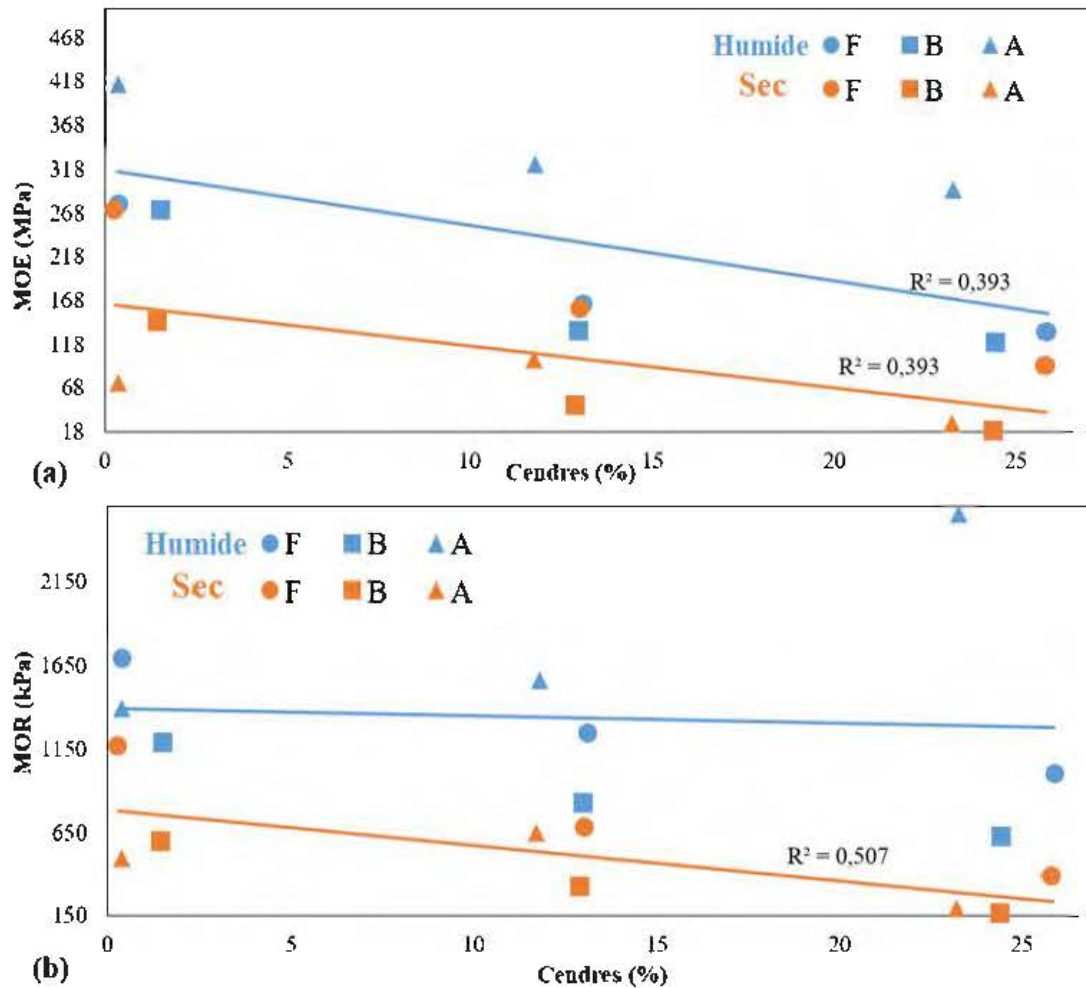


**Figure 3.9** L'effet de l'incorporation des différents pourcentages des boues de désencrage (0, 20 et 40%) sur les modules de rupture MOR des panneaux de fibres sans additifs (F), avec 10% de boues secondaires (B) et avec 10% d'amidon (A).

➤ L'effet de la nature chimique des BDD sur les MOE et MOR

La figure 3.10 montre l'effet des cendres sur les MOE et MOR des échantillons. La nature chimique variable et non homogène des BDD empêche la formation des liens entre eux et entre les fibres de bois. En effet, le pourcentage élevé de la partie inorganique des BDD et surtout les cendres explique cette diminution dans les propriétés mécaniques (Davis et al., 2003). Les boues de désencrage utilisées dans ce projet contiennent 64 % de cendres et 36 % de matière organique (Haddar et al., 2016). La forte teneur en cendres peut s'expliquer par les produits chimiques ajoutés pendant le procédé de mise en pâte ainsi que par les métaux présents dans les papiers recyclés (Edalatmanesh et al., 2010). En effet, la plus grande partie des cendres dans les BDD provient des matières non lignocellulosiques rejetées dans les eaux usées à toute étape du traitement de la pâte et papier comme l'argile et la bentonite, des solides inertes

rejetés lors de la récupération chimique et les processus de recyclage (Ochoa de Alda, 2008; Smook, 2002).



**Figure 3.10** L'effet des cendres sur les modules d'élasticité (MOE) (a) et de rupture (MOR) (b) en flexion des panneaux de fibres fabriqués (sans additifs (F), avec 10% de boues secondaires (B) et avec 10% d'amidon (A)).

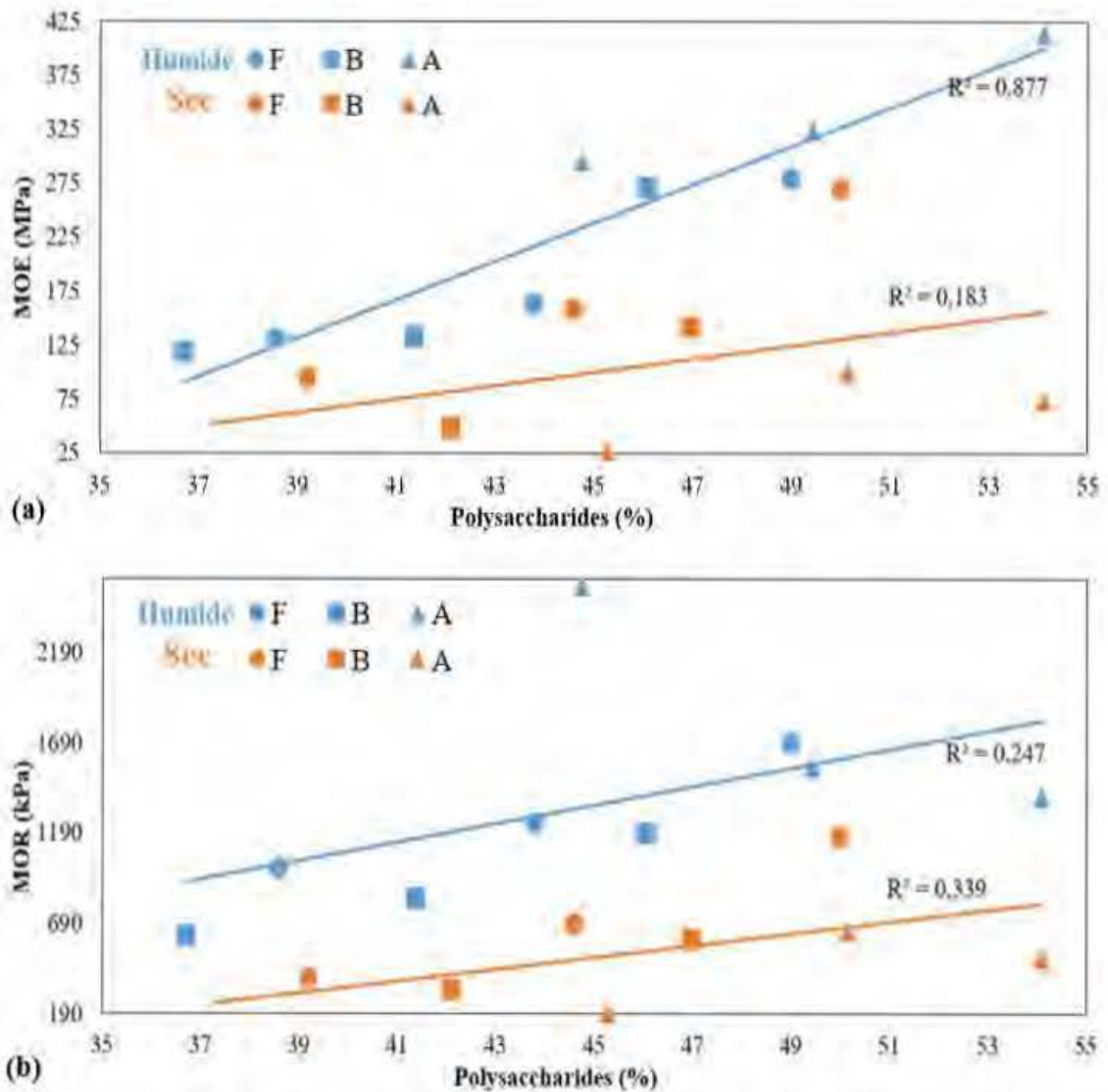
Latva-Somppi et al. (1994) ont confirmé l'existence des fibres dégradées dans les boues de désencrages et ils ont constaté que la partie inorganique est constituée principalement de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  et  $\text{TiO}_2$ . Ces matériaux sont engendrés par les

traitements de revêtement et de finition appliqués dans l'industrie des pâtes et papiers pour améliorer les propriétés optiques et physiques de la feuille (Elloumi et al., 2016; Smook, 2002). Il a été confirmé que le procédé de mis en pâte utilisé (TMP, CTMP, KRAFT) influence ces caractéristiques physiques, chimiques et morphologiques des boues et par conséquent, les propriétés des panneaux de fibres incorporés par ces boues seront influencées (Clark, 1978; Migneault, 2011; Smook, 2002; Zerhouni, 2010). Dans la présente étude, les boues utilisées sont issues d'un recyclage hétérogène de plusieurs types de papiers. Pour cette raison, l'origine des boues n'est pas considérée comme un facteur pour évaluer la qualité des boues utilisées. D'ailleurs, Migneault et al. (2010) ont ajouté que les boues, indépendamment de leurs origines, contiennent de grandes proportions de matière non fibreuse qui ont un effet négatif sur les propriétés des panneaux. Ils ont trouvé que les boues TMP et CTMP sont les plus favorisées pour obtenir des propriétés mécaniques plus élevées. Cependant, en termes de longueur de fibre, les boues issues du procédé kraft possèdent un haut taux des fibres longues et une faible proportion de fibres fines par rapport les autres procédés. Ceci est expliqué par la tendance du procédé mécanique à endommager les fibres qui va engendrer une teneur élevée en fines (Migneault, 2011).

➤ L'effet des polysaccharides sur les MOE et MOR

La figure 3.11 illustre l'effet des polysaccharides sur les modules d'élasticité et de rupture des échantillons. La teneur en polysaccharides est augmentée généralement avec l'ajout de 10% d'amidon. Les résultats ont montré des améliorations remarquables avec cet ajout seulement pour un procédé humide. Les tendances observées dans la figure 3.11 confirment ces résultats. L'absence des liaisons hydrogènes dans les échantillons fabriqués avec un procédé sec a influencé négativement les résultats obtenus.



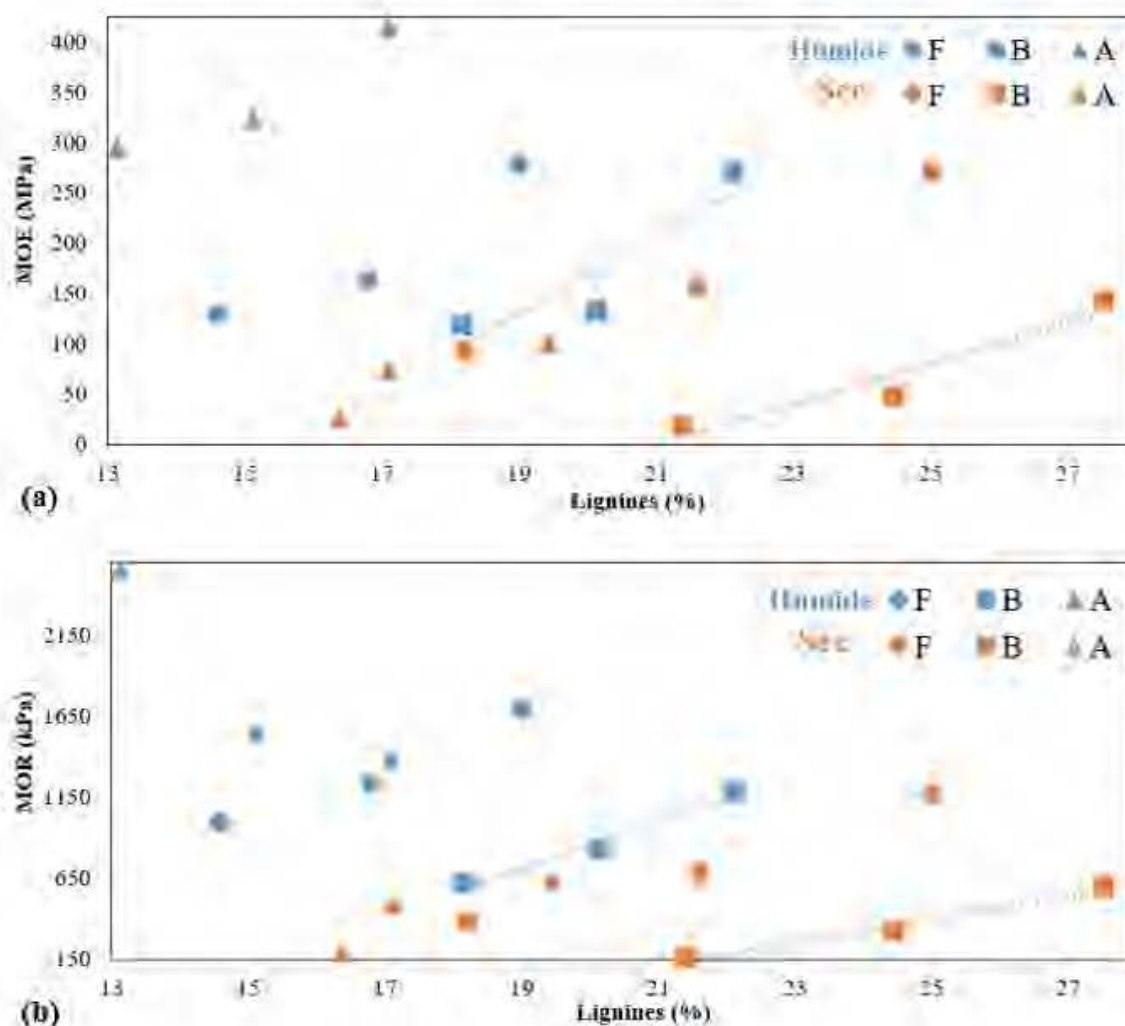


**Figure 3.11** L'effet des polysaccharides sur les modules d'élasticité (MOE) (a) et de rupture (MOR) (b) en flexion des panneaux de fibres fabriqués (sans additifs (F), avec 10% de boues secondaires (B) et avec 10% d'amidon (A)).

➤ L'effet de la lignine provenant des boues secondaires sur les MOE et MOR. La figure 3.12 montre l'effet de la lignine sur les modules de flexion MOE et MOR. Grâce à la présence des protéines, des glucides et surtout de la lignine (Tab 2.1), les boues secondaires peuvent présenter une alternative pour remplacer les adhésifs

synthétiques. Des essais élaborés par Geng et al. (2007) ont montré que ces boues présentent de bonnes propriétés de liaison. En effet, les groupes polaires des protéines et des polysaccharides peuvent se lier entre eux et éventuellement se lier à l'énergie de surface élevée des fibres de bois. Cependant, pour une adhésion efficace, la structure de la protéine native doit généralement être traitée pour exposer les groupements polaires. Ainsi, le rôle des boues secondaires utilisées dans ce projet est d'améliorer la liaison des fibres au sein des panneaux. Selon Soucy et al. (2015), la boue secondaire contient des teneurs en lignines élevées par rapport aux boues de désencrage pour les trois types de pâtes (CTMP, TMP, KRAFT). Celles issues du procédé Kraft contiennent une teneur en lignine (36%) moins importante que celle obtenue par les deux autres procédés TMP et CTMP qui peut atteindre les 50% qui est notre cas d'étude. Nadji et al. (2010) ont suggéré qu'une teneur élevée en lignine insoluble dans les boues secondaires pourrait être surestimée en raison de l'existence de la matière protéique dans ces boues. Lors du procédé chimique KRAFT, la quantité de lignine existante dans les fibres de bois est généralement éliminée, c'est pour cette raison qu'une faible teneur en lignine est attendue dans les boues issues des procédés KRAFT. Cependant, un cas contraire a été noté par ces chercheurs. Soucy et al. (2015) a ajouté que les opérations de précuisson comme l'écorçage, les étapes de lavage de la pâte à papier et la mauvaise digestion par les microorganismes peuvent être aussi des explications à cette contradiction. Ils ont confirmé aussi l'existence d'un pourcentage de cendres dans cette même boue entre 12 et 18% pour les procédés TMP et CTMP et un pourcentage plus élevé (41,3%) pour le procédé Kraft. Dans cette présente étude, l'ajout de 10% de boues secondaires n'a pas pu améliorer les MOE et MOR des panneaux. En effet, malgré l'existence des teneurs plus ou moins importantes de lignine qui servent à améliorer les liaisons des fibres lignocellulosiques, les teneurs en cendre présentent des inconvénients similaires à ceux retrouvés dans les boues de désencrage. Cet ajout a engendré une augmentation du pourcentage total des contaminants comme les cendres, les métaux et des impuretés dans les échantillons. Migneault et al. (2011) a remarqué que le module d'élasticité en flexion (MOE) et le module de rupture (MOR) n'ont pas

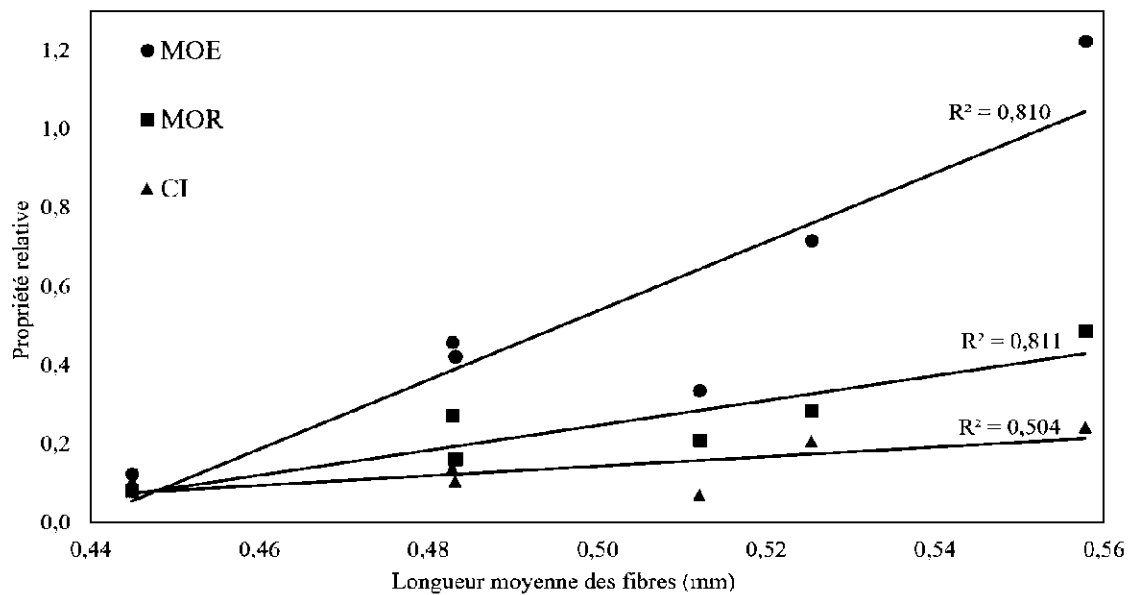
été significativement affectés par l'augmentation de la teneur des boues secondaires dans les échantillons. Il a expliqué ceci en se référant à Maloney (1993) qui a confirmé que les propriétés en flexion sont moins affectées par la performance de l'adhésif que la cohésion interne ou le gonflement en épaisseur (GE).



**Figure 3.12** L'effet de la lignine provenant des boues secondaires sur les modules d'élasticité (MOE) (a) et de rupture (MOR) (b) en flexion des panneaux de fibres fabriqués (sans additifs (F), avec 10% de boues secondaires (B) et avec 10% d'amidon (A)).

➤ L'effet des longueurs de fibres sur les propriétés mécaniques des panneaux

La figure 3.13 montre l'effet de la longueur moyenne des fibres sur les propriétés mécaniques des panneaux. La propriété relative est calculée en se basant sur l'échantillon commercial C2.



**Figure 3.13** L'effet de la longueur moyenne des fibres sur les propriétés mécaniques des panneaux (module d'élasticité MOE en flexion, module de rupture MOR en flexion et la cohésion interne CI)

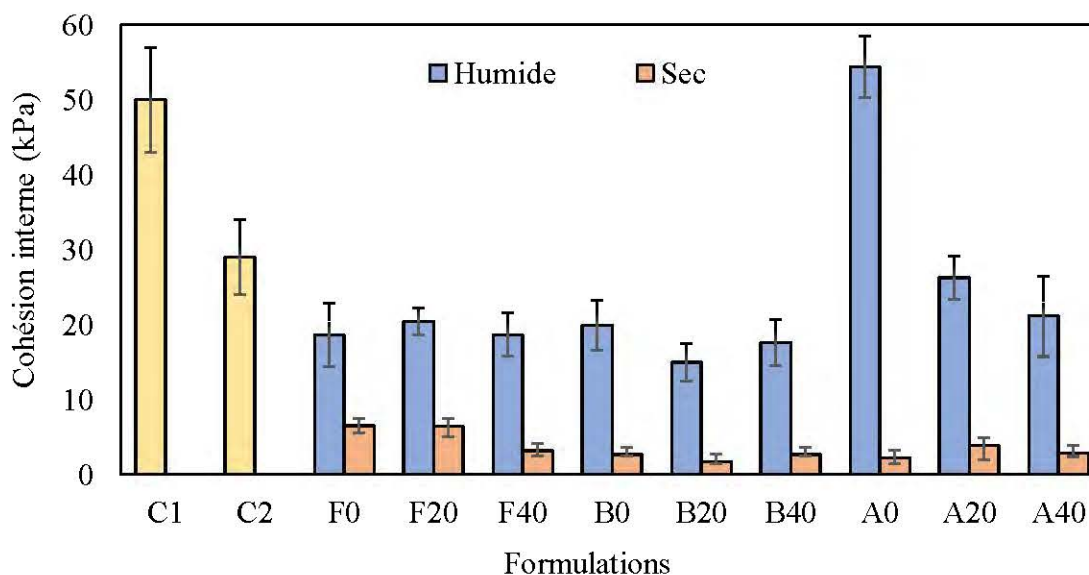
La taille des fibres utilisées influence aussi les propriétés des panneaux élaborés. Des fibres plus longues dans l'ébauche peuvent augmenter les valeurs d'élasticité en développant de la résistance à la flexion (Suchsland et al., 1987). Les fibres plus longues s'enchevêtrent aussi plus que les fibres courtes, ce qui permet d'obtenir un mode de rupture plus élevé (Hunt et al., 2005). Takahashi et al. (1974) ont suggéré que la morphologie des fibres est la caractéristique principale qui affecte les propriétés mécaniques des panneaux de fibres fabriqués sans résine. L'incorporation des boues a augmenté la teneur des fines dans les panneaux qui a affecté négativement la distribution des tailles des fibres dans les panneaux (Groom et al., 1999).

L'hétérogénéité de la répartition de la matière causée par les boues de désencrages dans le panneau a été confirmée par les profils de densité. Ce résultat confirme l'importance du plan de découpage des échantillons et son influence sur les résultats obtenus. Pour remédier à ce problème, un plan de découpage optimal illustré dans la figure 2.10 est bien choisi afin de donner une idée assez globale et significative.

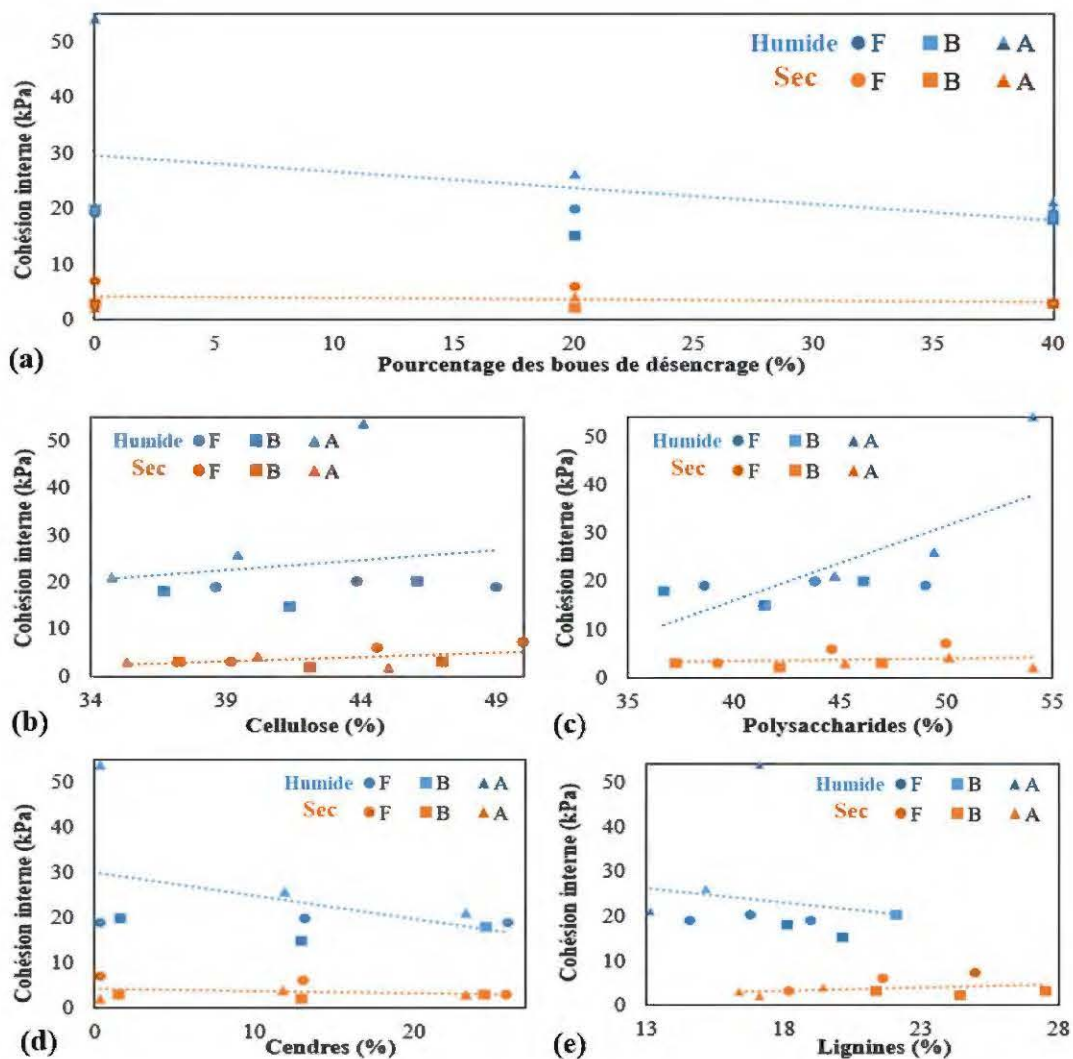
#### 3.4.2. La cohésion interne

Les figures 3.14 et 3.15 illustrent respectivement les résultats de la cohésion interne pour toutes les formulations et les résultats de la cohésion interne en fonction du pourcentage en boues de désencrage, en cellulose, en polysaccharides, en cendres, et en lignines. Des constatations semblables aux essais de flexion ont été trouvées. En effet, une amélioration de 65% allant jusqu'à 85% a été notée pour les échantillons fabriqués par procédé humide. Ceci confirme l'importance des groupements hydroxyyles qui sont absents dans le procédé sec. L'utilisation d'une résine est considérée comme une solution pour améliorer les résultats du procédé sec. Aussi, en ajoutant des boues de désencrage, la cohésion interne diminue substantiellement. Cette diminution n'est pas aussi claire que celle constatée avec les résultats des MOE à l'exception des échantillons fabriqués avec l'ajout de l'amidon. Comparant aux échantillons commerciaux C1 et C2, des diminutions aux alentours de 30 et 60% ont été respectivement notées pour les échantillons du procédé humide. Par contre, avec l'ajout de l'amidon, la cohésion interne a atteint 54 kPa, ce qui est 8% supérieur à celle des panneaux commerciaux C1 et de 90% supérieurs à celle des panneaux commerciaux C2. L'incorporation de 20% et 40% de BDD aux panneaux fabriqués avec 10% d'amidon a diminué la CI de 50%. Cependant, ces valeurs retrouvées sont proches à l'échantillon C2. Contrairement aux MOE et MOR, les effets de l'ajout des boues de désencrage, de l'augmentation des teneurs de polysaccharides, de la lignine, de la cellulose et du pourcentage en cendres n'ont pas été remarqués dans les courbes de tendances (Figure. 3.15) surtout pour le procédé sec. Ce résultat est dû à l'absence

des liaisons hydrogènes nécessaires pour former les ponts de liaison. Aussi, l'accrochage mécanique entre les fibres qui provoque le chevauchement n'a pas contribué à la formation de fortes liaisons car les fibres n'étaient traitées et raffinées. Par contre, la longueur des fibres et le pourcentage en fines ont influencé cette propriété mécanique (Figure 3.13). Compte tenu de la faiblesse de la cohésion interne, il est prévisible que les propriétés mécaniques en flexion des panneaux contenant des boues de désencrage seront plus faibles que celles des panneaux commerciaux. Les fibres utilisées n'ont pas été raffinées, un raffinage peut améliorer les propriétés en flexion et en cohésion interne des panneaux. En effet, avec un processus de raffinage, les fibres seront suffisamment séparées ce qui va activer et exposer davantage les groupements hydroxyles (Xie et al., 2011). Les propriétés MOR, MOE et CI peuvent être améliorées en optimisant les paramètres de raffinage (le temps, la température et la pression) qui améliore la rugosité et l'énergie de surface des fibres pour une meilleure adhérence (Hunt et al., 2006; Xing et al., 2006)



**Figure 3.14** L'effet de l'incorporation des différents pourcentages des boues de désencrage (0, 20 et 40%) sur la cohésion interne CI des panneaux de fibres fabriqués (sans additifs (F), avec 10% de boues secondaires (B) et avec 10% d'amidon (A)).



**Figure 3. 15** La cohésion interne en fonction du pourcentage (a) en boues de désencrage, (b) en cellulose, (c) en polysaccharides, (d) en cendres, et (e) en lignines

### 3.5. Propriétés physiques des panneaux

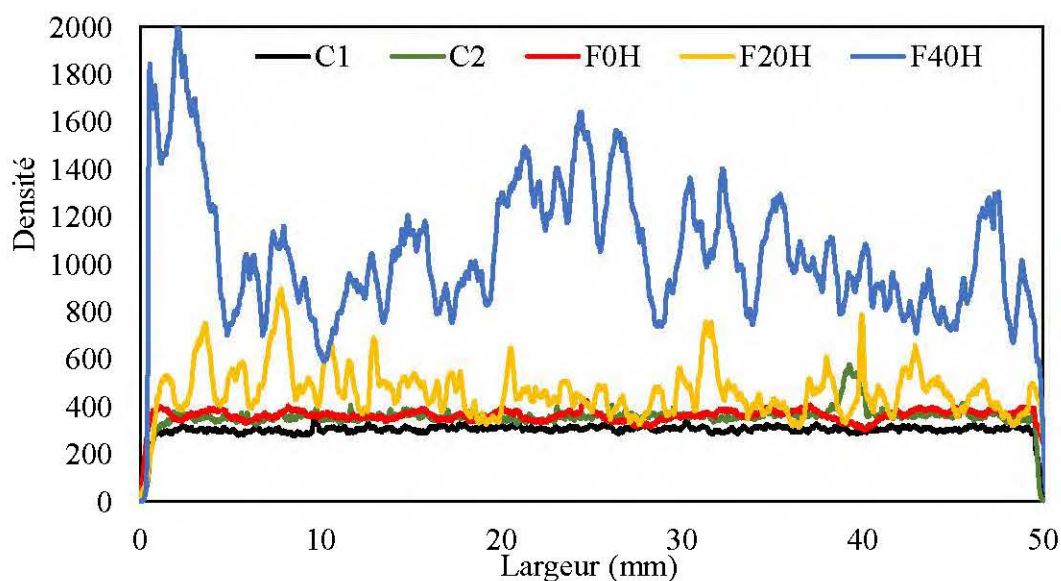
#### 3.5.1. Les profils de densité

Les différents résultats mécaniques et physiques dépendent énormément de la masse volumique des panneaux. Comme il a été précisé précédemment dans le chapitre 2 qui traite la méthodologie de cette étude, la densité cible des panneaux fabriqués est entre

320 et 350 kg/m<sup>3</sup>. Il est impossible de montrer tous les profils effectués dans ce document. Pour se faire une idée générale, la figure 3.16 illustre les profils de densité des deux échantillons commerciaux C1 et C2 et trois échantillons F0H, F20H et F40H fabriqués avec aucun ajout biosourcé (ni boue secondaire, ni amidon) et issus d'un procédé humide. Les paramètres de pressage ne sont pas aussi l'objet de cette présente étude, donc le programme de pressage est fixé pour toutes les formulations. Cependant, lors du pressage, la variation des proportions des différents éléments qui constituent le matelas entraîne des réactions différentes qui influencent l'aspect final du panneau comme l'épaisseur finale et la répartition des constituants. Ces deux paramètres peuvent influencer nos résultats, pour cela, il est important d'évaluer les masses volumiques et la répartition du matériel au sein des panneaux. La température de la presse, sa vitesse de fermeture et la distribution des teneurs en humidité dans l'ébauche sont aussi des paramètres très importants qui influencent l'aspect de ces profils (Dai et al., 2007; Kamke et al., 1988). Moslemi (1974) a montré que le temps de fermeture de la presse a un effet sur le profil de masse volumique du panneau; en fait, un temps de fermeture de presse court entraîne un profil de masse volumique accentué. Wolcott et al. (2007) ont expliqué que ce profil est affecté par la viscoélasticité du bois lors du pressage. Le profil de densité est l'information la plus importante pour les panneaux de fibres. Ce profil doit être le plus uniforme possible au centre du panneau avec une densité élevée en surface pour permettre une utilisation saine dans plusieurs applications (Dai et al., 2007; Harless et al., 2007; Park et al., 1999; Wang et al., 2007; Wolcott et al., 2007). Lors de l'expérimentation, un grand nombre d'échantillons avec 40% de boues de désencrage n'ont pas pu être scanné par les rayons X à cause de la forte teneur en cendre des boues de désencrages. Cette matière inorganique étant beaucoup trop dense pour la machine, le faisceau est complètement arrêté et l'essai s'interrompt automatiquement en indiquant un message d'erreur. Ce problème ne peut pas être contourné en augmentant le voltage de l'appareil, auquel cas les résultats ne seraient plus comparables. Pour la majorité de ces cas, des densités extrêmement loin de la réalité (très supérieures aux densités prévues) ont été obtenues. Les panneaux



ayant de fortes teneurs en boues n'ont pas des distributions symétriques au niveau des faces ce qui contredit le cas idéal. Cela peut être expliqué par la présence excessive des cendres qui tombent probablement au fond du matelas lors de sa formation engendrant ainsi un déséquilibre de masse entre les deux faces du panneau. Les profils deviennent de plus en plus dentelés et asymétriques à mesure que le pourcentage de boue augmente.



**Figure 3.16** L'effet du pourcentage des boues de désencrage (0, 20 et 40%) sur les profils de densité des panneaux de fibres fabriqués par un procédé humide

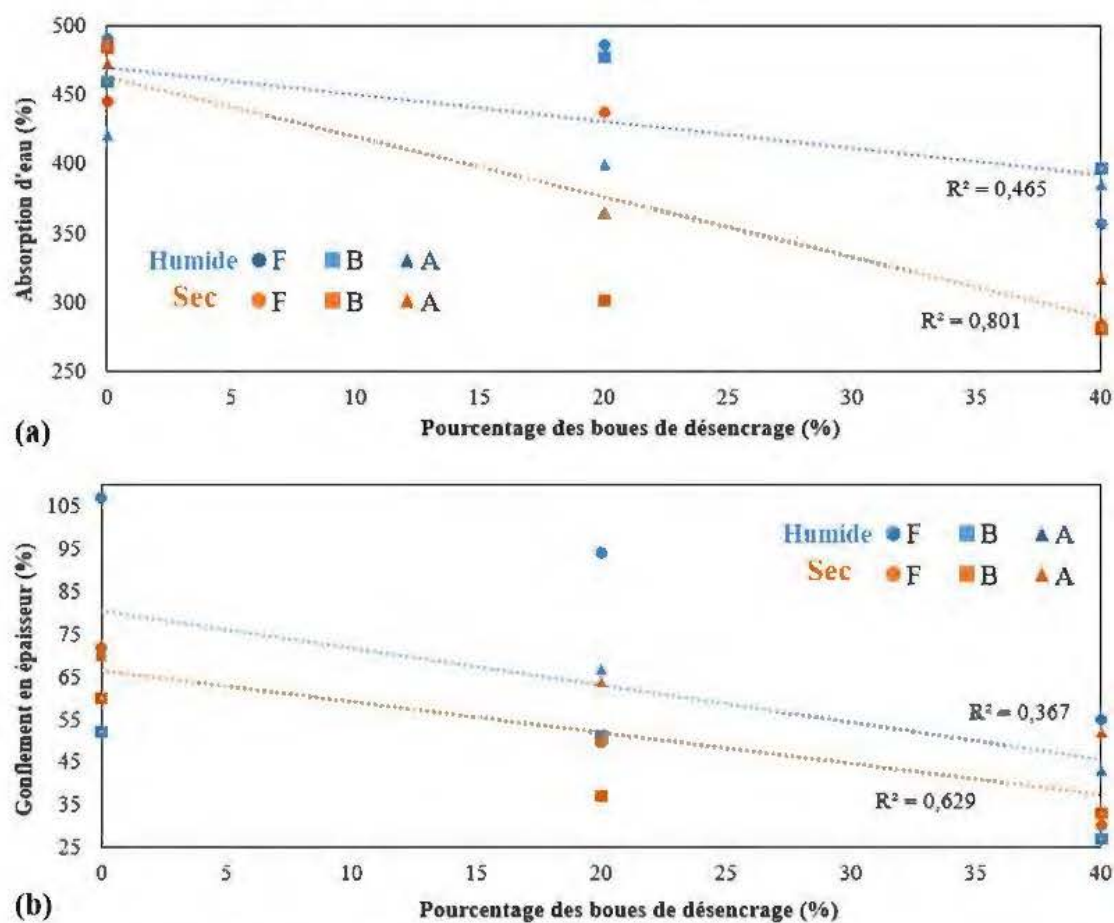
### 3.5.2. Stabilité dimensionnelle

Les résultats obtenus après immersion de 24h dans l'eau sont représentés dans le tableau 3.5. Ces résultats déterminent l'absorption dans l'eau et le gonflement en épaisseur et par conséquent la stabilité dimensionnelle des panneaux fabriqués. Pour bien évaluer l'effet des boues de désencrage sur la stabilité dimensionnelle des panneaux fabriqués, des courbes de progression de la stabilité en fonction de temps de quelques échantillons ont été effectuées.

**Tableau 3.5** Propriétés physiques des panneaux de fibres fabriqués et commerciaux

<b>Code</b>	<b>Absorption d'eau après 24h (%)</b>	<b>Gonflement en épaisseur après 24h (%)</b>	<b>Masse volumique (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Panneaux commerciaux			
<b>C1</b>	213	12	300
<b>C2</b>	136	12	300
Panneaux de fibres fabriqués par un procédé humide			
<i>F0H</i>	490	107	332 ± 15
<b>F20H</b>	486	94	348 ± 19
<b>F40H</b>	357	55	354 ± 23
<b>B0H</b>	459	52	352 ± 9
<b>B20H</b>	477	51	337 ± 3
<b>B40H</b>	396	27	339 ± 12
<i>A0H</i>	421	71	342 ± 5
<b>A20H</b>	400	67	346 ± 7
<b>A40H</b>	385	43	344 ± 5
Panneaux de fibres fabriqués par un procédé sec			
<b>F0S</b>	445	72	335 ± 13
<b>F20S</b>	437	50	341 ± 18
<b>F40S</b>	284	30	350 ± 27
<b>B0S</b>	483	60	347 ± 8
<b>B20S</b>	301	37	340 ± 11
<b>B40S</b>	280	33	352 ± 13
<b>A0S</b>	472	70	347 ± 6
<b>A20S</b>	364	64	338 ± 9
<b>A40S</b>	317	52	350 ± 11

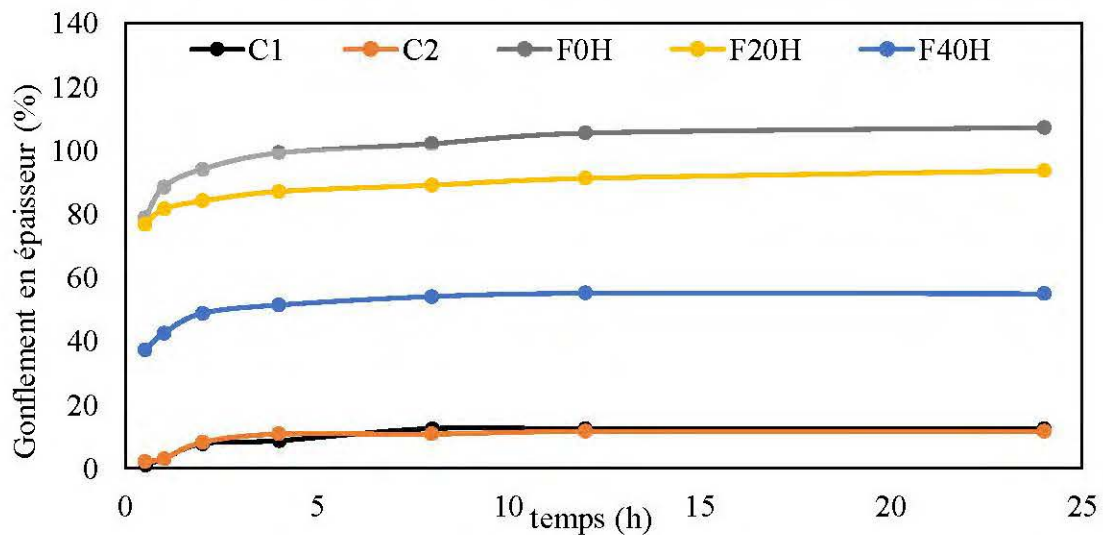
La figure 3.17 illustre des droites de tendance des résultats de l'absorption d'eau et du gonflement en épaisseur en fonction du pourcentage des boues de désencrage. Les tendances obtenues confirment l'amélioration de la stabilité dimensionnelle des échantillons avec l'augmentation de la teneur des BDD.



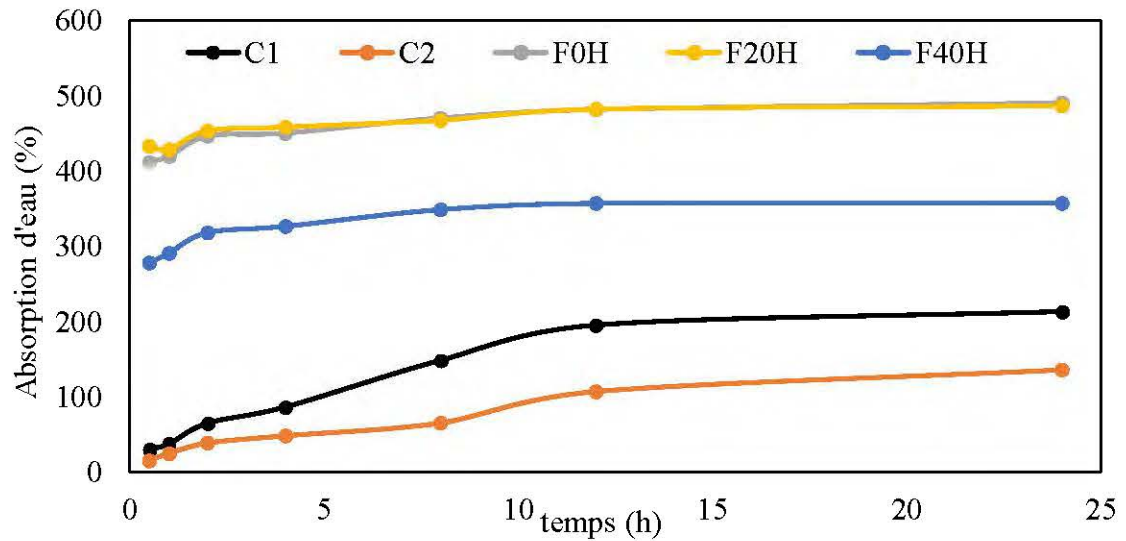
**Figure 3.17** L'effet de l'augmentation du pourcentage des boues de désencrage sur (a) l'absorption d'eau et (b) le gonflement en épaisseur

Les deux figures 3.18 et 3.19 illustrent respectivement le gonflement en épaisseur et l'absorption d'eau en fonction du temps des échantillons choisis. Selon les résultats présentés dans le tableau 3.5, un comportement similaire est noté pour toutes les formulations. Donc, les échantillons choisis sont considérés comme une représentation significative pour tous les résultats obtenus. Aussi, les courbes illustrent des

comparaisons avec les échantillons commerciaux. Les panneaux fabriqués selon les deux procédés (sec et humide) montrent également des valeurs d'absorption d'eau et de gonflement d'eau très élevées comparativement aux panneaux commerciaux. Ce résultat est prévu compte tenu de la nature hydrophile des fibres de bois. En effet, contrairement à l'industrie, les panneaux fabriqués à l'échelle laboratoire n'ont pas subi les traitements d'amélioration de l'hydrophobicité comme l'addition de la cire et la résine qui forment un film pour empêcher l'eau à atteindre la fibre. La norme ANSI A.208 indique un seuil d'acceptabilité du gonflement de 1,65 mm pour les panneaux de fibres d'épaisseur inférieure à 15 mm après 24h. Sachant que l'épaisseur des panneaux fabriqués pour ce projet est de 10 mm, un gonflement de 1,65 mm correspond à une augmentation de 16,5 %. Seulement les deux échantillons commerciaux C1 et C2 répondent à cette exigence. Les courbes ont montré que la première heure est considérée comme un temps seuil pour atteindre une quasi stabilité. En effet, les premières minutes sont suffisantes pour conférer un gonflement en épaisseur supérieur à 70% (Figure 3.18) et un gain massique supérieur à 400% (figure 3.19) pour l'échantillon F0H. À partir de 5h d'immersion, seulement des légères variations plus ou moins négligeables ont été constatées.



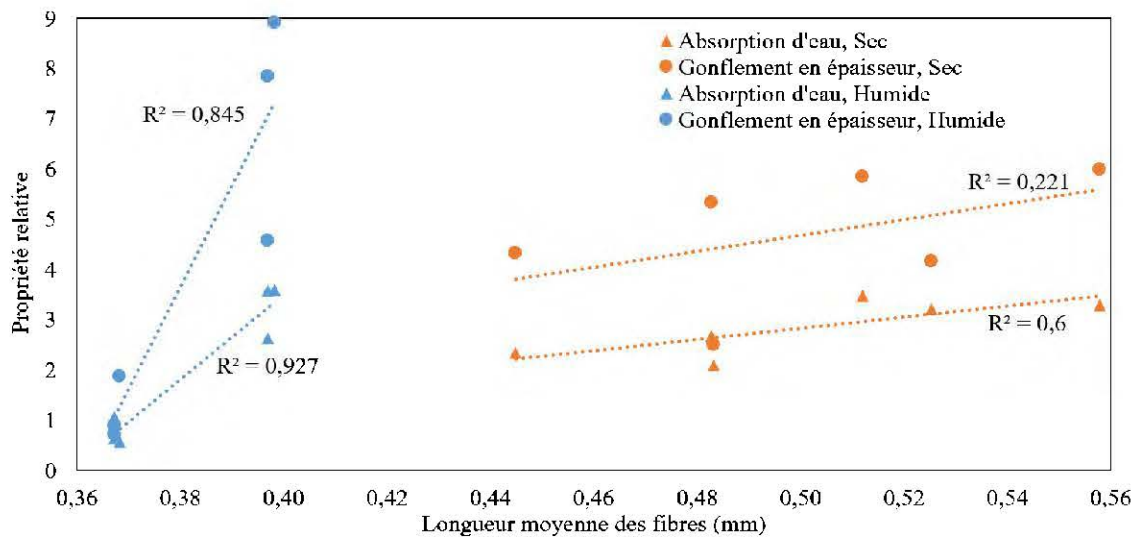
**Figure 3.18** Effet de l'ajout des boues de désencrage (0, 20 et 40 %) sur le gonflement en épaisseur des panneaux fabriqués par un procédé humide



**Figure 3.19** Effet de l'ajout des boues de désencrage (0, 20, 40%) sur l'absorption d'eau des panneaux fabriqués par un procédé humide

➤ L'effet de la morphologie des fibres sur la stabilité dimensionnelle

La figure 3.20 montre l'influence de la morphologie des fibres sur la stabilité dimensionnelle des panneaux. La propriété relative est calculée en se basant sur l'échantillon commercial C2.



**Figure 3.20** L'effet de la longueur moyenne des fibres sur l'absorption d'eau et le gonflement en épaisseur des panneaux de fibres

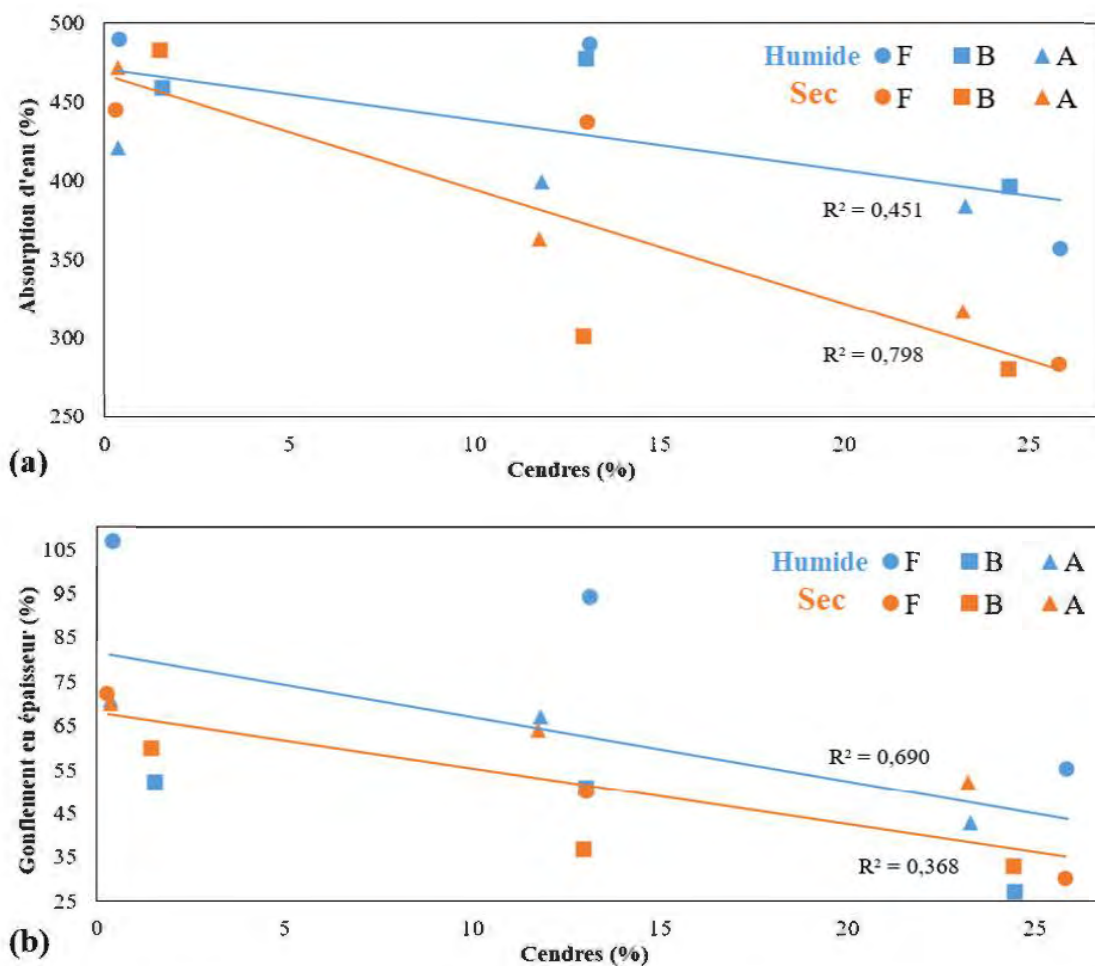
Après 24h d'immersion, les résultats de la série des panneaux F (sans aucun ajout des liants biosourcés) montrent que l'absorption d'eau et le gonflement en épaisseur des échantillons fabriqués par le procédé sec sont moins importants. Donc le procédé sec est plus stable dimensionnellement que le procédé humide. Cette différence est expliquée par la nature chimique et les caractéristiques morphologiques des fibres utilisées. Kawasaki et al. (1998) ont confirmé que la morphologie des fibres influence la stabilité dimensionnelle et ils ont suggéré que les panneaux de fibres fabriqués à partir des fibres longues sont plus susceptibles de gonfler dans l'eau. Un cas contraire est noté dans cette étude. En effet, l'analyse morphologique des fibres a confirmé la présence d'un taux élevé des fibres longues dans les échantillons TMP utilisés dans le procédé sec par rapport aux échantillons BCTMP utilisés dans le procédé humide. La nature chimique de la fibre de bois est aussi une caractéristique très importante car elle est responsable de sa mouillabilité à l'eau (Benthien et al., 2017) et donc affecte le comportement des fibres vis-à-vis l'eau. Pour le procédé sec, les fibres utilisées issues du procédé TMP constituées de 60% résineux et 40% feuillus, en revanche, les fibres utilisées pour le procédé humide sont issues du procédé CTMP et sont composées de 100% peuplier faux-tremble. Ces constatations peuvent confirmer que la différence de la stabilité dimensionnelle observée entre les deux procédés est engendrée par la qualité de la fibre qui constitue le panneau et non le procédé en soit. Vun (2003) a confirmé que la stabilité dimensionnelle des panneaux à base de bois dépend des facteurs tels que le taux de compactage et le gonflement ou le retrait du bois lui-même. Un taux de compactage élevé peut entraîner un gonflement d'épaisseur élevé dû au retour élastique. Ceci confirme l'importance de la qualité des fibres pour la compréhension des phénomènes de la stabilité dimensionnelle.

- L'effet de la nature chimique des BDD sur la stabilité dimensionnelle des panneaux

La figure 3.21 illustre l'effet des cendres provenant des boues de désencrage sur le gonflement d'eau et l'absorption d'eau des échantillons. L'augmentation de ce

pourcentage dans toutes les formulations améliore la stabilité dimensionnelle. L'incorporation d'un pourcentage de 20% de BDD n'a pas une influence significative sur cette stabilité dimensionnelle et les panneaux incorporés par 20% ont un comportement physique similaire aux panneaux fabriqués avec 100% fibres. Par contre, l'ajout de 40% de BDD a amélioré remarquablement ces propriétés physiques. Cette amélioration est expliquée par la diminution du pourcentage total des fibres de bois de nature hydrophile, en effet, la caractérisation physico-chimique des boues de désencrage a confirmé l'existence d'un pourcentage important des éléments non lignocellulosiques comme les cendres, les minéraux et les métaux. Nous avons obtenu des valeurs d'absorption de l'ordre de 280% après 24h d'immersion continue dans l'eau pour les échantillons contenant 40% boues de désencrage. Cette valeur est plus au moins comparable à celle trouvée avec l'échantillon commercial C1. Bien que la stabilité dimensionnelle soit probablement améliorée par la partie non fibreuse des boues, Davis et al. (2003) ont confirmé que les fibres dégradées dans les boues de désencrage ont contribué à réduire l'absorption d'eau et le gonflement en épaisseur en diminuant le volume de vide disponible pour l'infiltration d'eau. Il suggère la possibilité de la formation d'une liaison entre les fibres dégradées et les autres constituants des boues de désencrage pendant leur suspension dans l'eau au cours du processus de désencrage. L'effet de la partie fibreuse (cellulose) sur la stabilité dimensionnelle des échantillons est présenté dans la figure 3.22. Les résultats confirment ce qui précède. La partie non fibreuse des boues contribue à l'amélioration de la stabilité dimensionnelle car les cendres contiennent des atomes ayant une forte affinité avec l'eau tels que  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  (Davis et al., 2003). Migneault et al. (2010) ont montré que l'origine des boues a un effet très important sur le gonflement en épaisseur. En termes de stabilité dimensionnelle, il a trouvé que les panneaux incorporés par les boues TMP et CTMP sont similaires et que les panneaux avec les boues kraft sont les moins performants. En effet, les boues kraft sont plus hydrophiles, car la mise en pâte kraft et le processus de blanchiment éliminent les lignines qui sont moins hydrophiles

des autres composants de la fibre (cellulose et hémicelluloses) (Clark, 1985; Rowell et al., 2005).

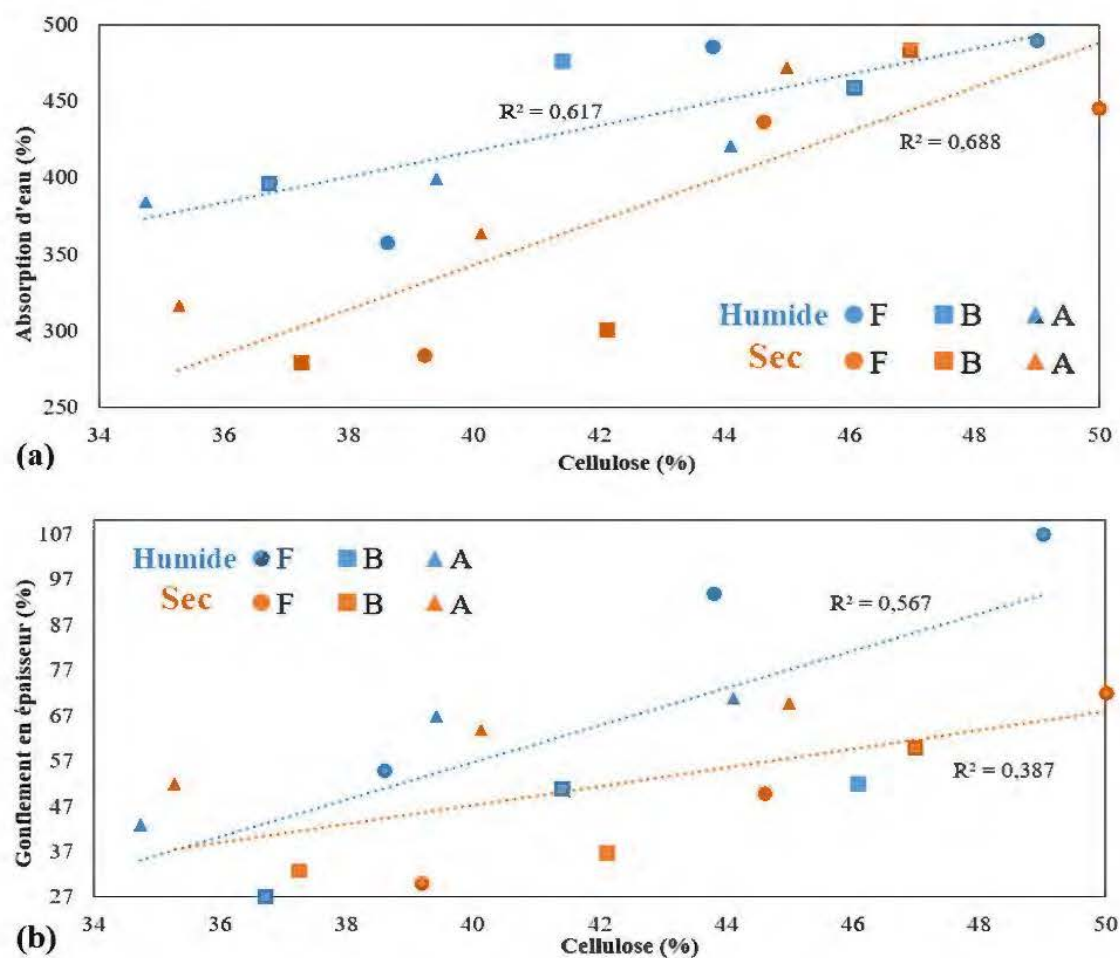


**Figure 3.21** L'effet du pourcentage des cendres sur a) l'absorption d'eau; b) le gonflement en épaisseur des panneaux de fibres de fibres fabriqués (sans additifs (F), avec 10% de boues secondaires (B) et avec 10% d'amidon (A)).

Les résultats de l'immersion dans l'eau montrent que l'ajout des liants biosourcés (amidon et boues secondaires) n'a pas contribué à l'amélioration de la stabilité dimensionnelle des panneaux fabriqués par la voie sèche. Les boues secondaires stabilisent dimensionnellement les échantillons mieux que l'amidon pour un tel



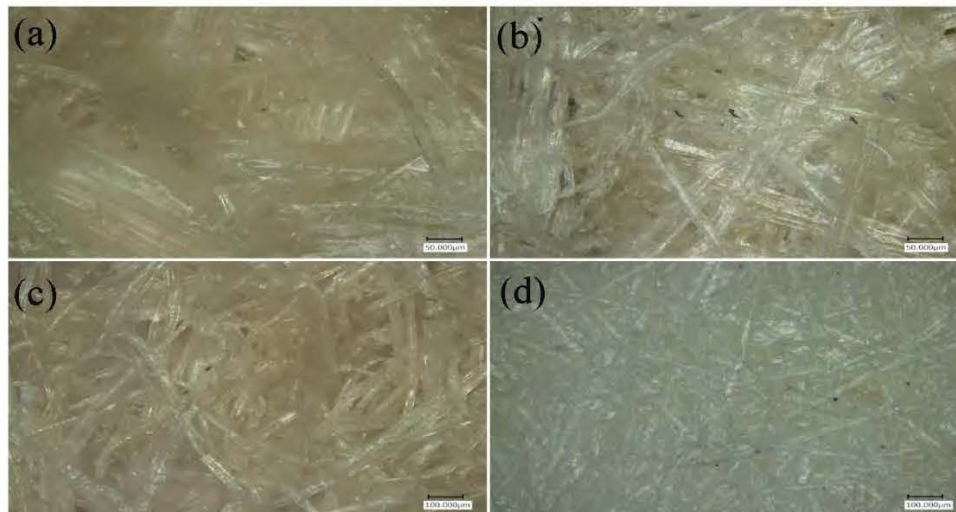
procédé. Ceci est expliqué par la différence des compositions chimiques des deux liants. Selon Rowell et al. (2005), les adhésifs naturels ne sont pas supposés d'être résistants à l'eau, par contre, nos résultats ont montré que les liants biosourcés utilisés (les boues secondaires et l'amidon) ont amélioré la stabilité dimensionnelle des panneaux fabriqués par voie humide. L'ajout des boues secondaires a assuré une meilleure stabilité dimensionnelle que l'amidon. Les mêmes constatations ont été obtenues par Migneault et al. (2011) qui a expliqué ceci par le pouvoir adhésif dans les boues secondaires.



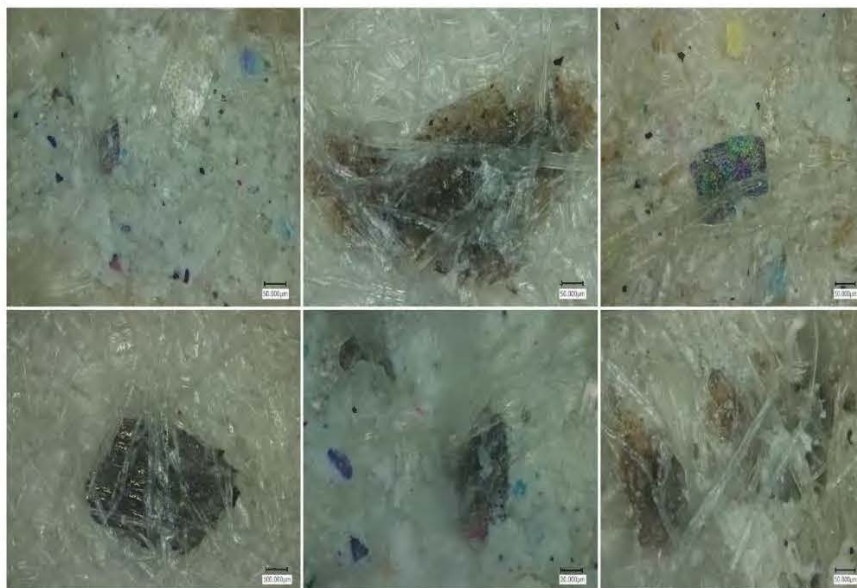
**Figure 3.22** L'effet de la cellulose sur l'absorption d'eau (a) et le gonflement en épaisseur (b) des panneaux de fibres de fibres fabriqués (sans additifs (F), avec 10% de boues secondaires (B) et avec 10% d'amidon (A)).

### 3.5.3. Analyse microscopique

Dans cette partie, des photos microscopiques sont illustrées afin de confirmer des notions expliquées précédemment pour comprendre l'effet des liaisons entre les différentes matières premières sur les propriétés mécaniques et physiques des panneaux. Vu l'absence de la résine et les additifs synthétiques dans la fabrication de nos échantillons, une analyse pareille est importante pour comprendre le comportement des fibres entre elles et entre les différentes incorporations. En effet, les fibres utilisées sont consolidées seulement par l'effet combiné de la température et de la pression. Ceci peut expliquer les faibles caractéristiques notées, particulièrement pour le procédé sec. La figures 3.23 montre les différentes images microscopiques des échantillons commerciaux ainsi que deux échantillons fabriqués à 100% fibres avec les deux procédés sec et humide. Pour les deux échantillons commerciaux C1 et C2 (Figure 3.23a et 3.23b), les fibres observées sont liées et superposées parfaitement entre elles grâce à la matrice qui les englobe. Cette matrice n'est que la résine ajoutée à l'industrie pour coller et favoriser la consolidation des panneaux lors de pressage à chaud. La liaison entre des fibres de l'échantillon fabriqué avec un procédé sec (Figure 3.23c) et leur distribution ne se manifestent pas de la même manière que celles observées dans les échantillons commerciaux. En effet, elles sont plus dispersées et il y a moins de contacts entre les fibres avec l'absence d'une matrice jouant le rôle du récipient. Cependant, les observations de l'échantillon issu du procédé humide (Figure 3.23d) ont montré des résultats meilleurs. Ceci est expliqué par l'effet de l'eau, qui a joué un rôle important en favorisant un réseau de contacts entre les fibres et en favorisant les groupements hydroxyles. Ces observations peuvent expliquer les différences retrouvées entre les propriétés de nos échantillons et celles des échantillons commerciaux. Les impuretés et les inclusions dans les panneaux incorporés par les boues de désencrage observées dans la figure 3.24 confirment les explications citées précédemment. En effet, le réseau de fibres est interrompu par ces inclusions ce qui engendre des faiblesses au sein des panneaux affectant ainsi les propriétés testées.



**Figure 3.23** Images de microscopie confocale de quelques échantillons : a) Échantillon commercial C1 (grossissement x 20); b) Échantillon commercial C2 (grossissement x 20); c) Échantillon fabriqué avec 100% fibres par procédé sec (grossissement x 10); d) Échantillon fabriqué avec 100% fibres par procédé humide



**Figure 3.24** Défauts observés par microscopie confocale de quelques échantillons fabriqués par les deux procédés sec et humide et incorporés par les boues de désencrage (grossissements x 10 et x 20)

## CONCLUSIONS GÉNÉRALES

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le potentiel des boues de désencrage pour leur incorporation dans les panneaux de fibres isolants. Au terme de cette étude, les résultats permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Les boues de désencrage peuvent être utilisées dans la fabrication de panneaux de fibres en utilisant un procédé humide. Cependant, il est nécessaire de raffiner davantage les fibres de bois pour améliorer la cohésion interne dans le panneau et par conséquent, améliorer ses propriétés mécaniques. Aussi, nous avons pu confirmer l'influence des paramètres de pressage sur les propriétés des panneaux fabriqués.
- La stabilité dimensionnelle des panneaux fabriqués est loin d'être comparable aux panneaux de fibres commerciaux. Ainsi, il est nécessaire d'améliorer l'hydrophobicité des fibres du bois. Diverses alternatives sont possibles pour améliorer la stabilité dimensionnelle des panneaux de fibres dont les traitements des fibres et l'ajout de composantes hydrophobes.
- Les propriétés les plus affectées négativement par la présence de boue dans les panneaux sont certaines propriétés mécaniques telles que la cohésion interne, le module de rupture et le module d'élasticité en flexion. La stabilité dimensionnelle montre des résultats contraires, en effet, un pourcentage élevé des boues favorise la stabilité dimensionnelle des échantillons en diminuant le gonflement en épaisseur et l'absorption d'eau car ces derniers sont plus hydrophobes que les fibres de bois.
- Les propriétés des panneaux sont fortement liées aux teneurs des matières non fibreuses comme les cendres et les métaux lourds existants dans les boues de

désencrage. La caractérisation chimique des boues de désencrage a montré un taux important de ces contaminants dans leur composition. Ceci explique la dégradation des propriétés mécaniques et l'amélioration de la stabilité dimensionnelle des panneaux ayant des pourcentages élevés de boues. En effet, pour le premier cas, ces cendres sont considérées comme des inclusions qui affectent négativement les liaisons entre les fibres, par contre, pour le deuxième cas, les cendres diminuent la quantité de la matière hydrophile (les fibres de bois) diminuant ainsi, l'absorption d'eau et le gonflement en épaisseur.

- La masse volumique des panneaux a une influence importante sur les résultats des essais mécaniques et sur les résultats des essais de stabilité dimensionnelle. La variation des proportions des différents composants de chaque panneau entraîne des réactions différentes au moment du pressage qui va engendrer une distribution non similaire pour tous les panneaux.
- L'augmentation de la teneur des boues de désencrage affecte aussi négativement les profils de densité au sein du panneau. Cette distribution hétérogène explique les diminutions des propriétés mécaniques.
- L'ajout de l'amidon a donné d'excellents résultats pour les panneaux fabriqués selon un procédé humide même avec l'incorporation de 40% de boues de désencrage. Cependant, l'ajout des boues secondaires n'a pas contribué aux améliorations attendues.

À la lumière des résultats obtenus, les recommandations suivantes peuvent être formulées :

- Il fut conclu dans la présente étude que la teneur en cendre est une caractéristique dominante de la boue et affecte de manière importante le comportement des panneaux. Ainsi, il serait pertinent de déterminer la composition chimique des cendres afin de comprendre et de limiter l'effet néfaste des cendres sur la qualité des panneaux MDF.

- Une étude sur l'effet de la taille des fibres des boues ainsi que les fibres de bois dans la fabrication des panneaux de fibres est suggérée. En effet, selon la littérature, la taille des fibres est un facteur important influençant les propriétés mécaniques des panneaux.
- Pour des études à venir, il est préférable d'utiliser un liant dans la composition du panneau. Généralement, les fabricants utilisent le formaldéhyde comme étant un agent adhésif. Les émissions de formaldéhyde resteront l'une des principales préoccupations des usines de fabrication de panneaux car les normes continueront probablement de se resserrer. Par conséquent, le prochain défi serait de démontrer que l'usage combiné des boues et de colles sans formaldéhyde est techniquement et économiquement faisable.
- Ces résultats suggèrent que le développement des connaissances sur l'adhésion entre les boues de désencrage et les fibres de bois est nécessaire pour mieux comprendre les phénomènes qui peuvent prendre place et identifier les liants adéquats

Des retombées environnementales, économiques et scientifiques peuvent être considérées suite à cette étude :

- Valorisation des résidus nuisibles à l'environnement en produits écologique.
- Augmenter le cycle de vie de déchets papetiers tout en éliminant des produits polluants pour les transformer en produits valorisables et utiles et diminuer leur toxicité vis-à-vis des composantes de l'environnement.
- Au niveau des industries de récupération de papiers usagés, création d'une nouvelle filière de sous-produits de leur industrie.
- Réduire les coûts de production des panneaux de fibres substituant une partie des fibres par des boues de désencrage, un produit à coût très faible comparativement aux fibres de bois.
-

- Mieux comprendre le rôle des caractéristiques intrinsèques des fibres issues des résidus du bois et des boues de désencrage dans la mise en forme et le développement des propriétés des panneaux de fibres.

## RÉFÉRENCES

- Agblevor, F., & Besler, S. (1996). Inorganic compounds in biomass feedstocks. 1. Effect on the quality of fast pyrolysis oils. *Energy & Fuels*, 10(2), 293-298.
- Ahmadi, B., & Al-Khaja, W. (2001). Utilization of paper waste sludge in the building construction industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 32(2), 105-113.
- Ajuong, E.-M., & Breese, M. C. (1998). Fourier transform infrared characterization of Pai wood (*Azelia africana* Smith) extractives. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 56(2), 139.
- Amrouz, A. (1996). *Transformation des boues de papeteries en pouzzolanes artificielles*. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, Lyon, 176 pp.
- Barker, B., & Owen, N. L. (1999). Identifying softwoods and hardwoods by infrared spectroscopy. *J. Chem. Educ*, 76(12), 1706.
- Barnes, D. (2002). A model of the effect of fines content on the strength properties of oriented strand wood composites. *Forest products journal*, 52(5), 55.
- Bassompierre, C. (2007). *Procédé à boues activées pour le traitement d'effluents papetiers: de la conception d'un pilote à la validation de modèles*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 231 pp.
- Beauchamp, C. J., Charest, M.-H., & Gosselin, A. (2002). Examination of environmental quality of raw and composting de-inking paper sludge. *Chemosphere*, 46(6), 887-895.
- Bellamy, K., Chong, C., & Cline, R. (1995). Paper sludge utilization in agriculture and container nursery culture. *Journal of Environmental Quality*, 24(6), 1074-1082.



- Belley, D. (2009). *Détermination des propriétés de transfert de chaleur et de masse des panneaux de fibres de bois*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, 80 pp.
- Benfratello, S., Capitano, C., Peri, G., Rizzo, G., Scaccianoce, G., & Sorrentino, G. (2013). Thermal and structural properties of a hemp–lime biocomposite. *Construction and Building Materials*, 48, 745-754.
- Benthien, J. T., Heldner, S., & Ohlmeyer, M. (2017). Investigation of the interrelations between defibration conditions, fiber size and medium-density fiberboard (MDF) properties. *European Journal of Wood and Wood Products*, 75(2), 215-232.
- Berglund, L., & Rowell, R. M. (2005). Wood composites. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 279-301.
- Bich, C., Ambroise, J., & Péra, J. (2009). Influence of degree of dehydroxylation on the pozzolanic activity of metakaolin. *Applied Clay Science*, 44(3-4), 194-200.
- Bodîrlău, R., Teacă, C.-A., & Spiridon, I. (2007). Thermal investigation upon various composite materials. *Rev. Roum. Chim*, 52(1-2), 153-158.
- Boiselle, F. (1999). *Évaluation des performances de l'incinération de boues de désencrage dans un lit fluidisé circulant interne*. Thèse de doctorat : École polytechnique de Montréal, Département de génie chimique, Canad, 144p.
- Bouafif, H. (2009). *Effets des caractéristiques intrinsèques des fibres de bois et des procédés de mise en forme sur la performance des matériaux composites bois/thermoplastique*. Thèse de doctorat : Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, 253p.

- 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(4), 296-315.
- Brouillette, F. (1996). *Valorisation des boues de désencrage par combustion*. Mémoire de maîtrise : Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, 81p.
- Campbell, W., & Pidgeon, L. (1930). Hydration of cellulose by beating. *Pulp and Paper Res. Mag. Can*, 29(6), 185-190.
- Cardot, C. (1999). *Les traitements de l'eau pour l'ingénieur - Procédés physico-chimiques et biologiques - Cours et problèmes résolus* ; Ellipses Edition Marketing SA. ISBN : 9782729861872, 320 pp.
- Carroll, R. C., & Gajda, T. P. (1990). Mills considering new deinking line must answer environmental questions. *Environmental Solutions Pulp and paper (USA)*. Miller Freeman, San Francisco CA, USA, 18-22.
- Casey, J.P (1980). *Pulp and Paper, Chemistry and Chemical Technology*. 3e édition, Vol II, John Wiley & Sons. Inc, New Jersey.
- Cetin, S., & Erdinçler, A. (2004). The role of carbohydrate and protein parts of extracellular polymeric substances on the dewaterability of biological sludges. *Water Science and Technology*, 50(9), 49-56.
- Chanda, M., & Roy, S. K. (2006). *Plastics technology handbook* ; CRC press. ISBN : 9780429124020, Boca Raton, 896p.
- Chen, C., Gao, J., & Yan, Y. (1998). Observation of the type of hydrogen bonds in coal by FTIR. *Energy & Fuels*, 12(3), 446-449.

- Chen, R., & Garceau, J. J. (1989). *Pâtes mécaniques et chimico-mécaniques*. Association canadienne des producteurs de pâtes et papiers ACPP, Section technique: Montréal.
- Chen, T., Niu, M., & Xie, Y. (2015). Optimizing preparation conditions of ultralow-density fiberboard by response surface methodology. *Wood Fiber Sci*, 47(3), 240-248.
- Chevalier-Billosta, V. (2008). *Influence des procédés papetiers et des variations saisonnières sur la structure des fibres—relation avec les propriétés mécaniques des papiers*. Thèse de doctorat : Université Joseph-Fourier, École doctorale de chimie et sciences du vivant, Grenoble, 350p.
- Chikhi, M., Agoudjil, B., Boudenne, A., & Gherabli, A. (2013). Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation. *Energy and Buildings*, 66, 267-273.
- Chow, P., & Zhao, L. (1992). Medium density fiberboard made from phenolic resin and wood residues of mixed species. *Forest products journal (USA)*, 42(10), 7-65.
- Clark, J. d. A. (1978). *Pulp technology and treatment for paper* ; Miller Freeman Publications, Inc. ISBN : 19800665281, San Francisco, CA, USA, 752 pp.
- Clark, J. d. A. (1985). *Pulp technology and treatment for paper, 2nd edn*. Miller Freeman Publ. Inc., San Francisco, 878p.
- Conteville, L., & den Hartigh, C. (2009). Les écomatériaux en France. État des lieux et enjeux dans la rénovation thermique des logements. *Les Amis de la Terre*, 14.
- Dai, C., & Steiner, P. R. (2007). Compression behavior of randomly formed wood flake mats. *Wood and Fiber Science*, 25(4), 349-358.

- Davis, E., Shaler, S. M., & Goodell, B. (2003). The incorporation of paper deinking sludge into fiberboard. *Forest products journal*, 53(11-12), 46.
- Delisée, C. (2016). *De la fibre à l'usage de produits à base de fibres de bois dans les parois de bâtiments en Europe*. Conférence présentée dans le cadre des Ateliers de recherche et de mobilisation des connaissances sur l'utilisation de la fibre de bois dans l'enveloppe du bâtiment Rimouski, 23 Novembre 2016.
- Deppe, H., & Ernst, K. (1996). MDF–Mitteldichte Faserplatten [Medium density fiberboards]. *DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., Leinfelden-Echterdingen*.
- Edalatmanesh, M., Sain, M., & Liss, S. N. (2010). Cellular biopolymers and molecular structure of a secondary pulp and paper mill sludge verified by spectroscopy and chemical extraction techniques. *Water Science and Technology*, 62(12), 2846-2853.
- Elchinger, P.-H. (2013). *Réticulation de fibres lignocellulosiques et d'amidon: vers de nouveaux matériaux pour l'industrie papetière*. Thèse de doctorat : Université du Québec à Trois-Rivières, Faculté des sciences et techniques, 162p.
- Elloumi, A., Makhlouf, M., Elleuchi, A., & Bradai, C. (2016). Deinking Sludge: A New Biofiller for HDPE Composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 55(10), 1012-1020.
- Elloumi, A., Makhlouf, M., Elleuchi, A., & Bradai, C. (2018). The potential of deinking paper sludge for recycled HDPE reinforcement. *Polymer Composites*, 39(3), 616-623.
- Ettala, M. (1993). Quality of deinking sludge. *Journal of Environmental Science & Health Part A*, 28(4), 923-932.

- Evon, P., Vandenbossche, V., Pontalier, P.-Y., & Rigal, L. (2010). Thermo-mechanical behaviour of the raffinate resulting from the aqueous extraction of sunflower whole plant in twin-screw extruder: manufacturing of biodegradable agromaterials by thermo-pressing. *Advanced Materials Research*, 112, 63-72.
- Evon, P., Vandenbossche, V., Pontalier, P.-Y., & Rigal, L. (2012). *Thermo-pressing of cake meal from sunflower whole plant, one only operation for two actions: expression of residual oil and molding of biodegradable agromaterials*. In: Proceedings of the 18th International Sunflower Conference, Mar del Plata, Argentina, pp. 937-942.
- Evon, P., Vandenbossche, V., Pontalier, P.-Y., & Rigal, L. (2014). New thermal insulation fiberboards from cake generated during biorefinery of sunflower whole plant in a twin-screw extruder. *Industrial Crops and Products*, 52, 354-362.
- Faix, O. (1991). Classification of lignins from different botanical origins by FT-IR spectroscopy. *Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*, 45(1), 21-28.
- Faix, O., & Böttcher, J. (1992). The influence of particle size and concentration in transmission and diffuse reflectance spectroscopy of wood. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 50(6), 221-226.
- FAO. (2019). Available from Food and Agriculture Organizations of the United Nations Statistical databases/Forestry (FAOSTAT/ForesSTAT), Retrieved 04-16-2019 <http://www.fao.org/forestry/statistics/80938/fr/>
- FAO. (1993). Yearbook of Forest Products: *Les panneaux à base de bois (Collection Food and Agriculture Organization of the United Nations: Forêts N° 28 ed.)*, Vol 116, Rome, 61p.

- Fengel, D., & Wegener, G. (2011). *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*; Walter de Gruyter, Berlin – New York, 617p.
- Ferraz, A., Baeza, J., Rodriguez, J., & Freer, J. (2000). Estimating the chemical composition of biodegraded pine and eucalyptus wood by DRIFT spectroscopy and multivariate analysis. *Bioresource Technology*, 74(3), 201-212.
- Fleischer, O., & Marutzky, R. (2000). Hydrolysis of urea-formaldehyde resins: disintegration of wood-based panels due to hydrolytic degradation of the glue-joint. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 58(5), 0295-0300.
- Franklin, G. (1945). Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin composites, and a new macerating method for wood. *Nature*, 155(3924), 51.
- Fu, Y., Mo, Y., Liu, Y., Qiao, M., & Chen, W. (2011). Application of nanometer silicon dioxide in coating and idea of strengthening wood surface properties with nanometer silicon dioxide. *Journal of Zhejiang A&F University*, 28(4), 644-652.
- Gavala, H. N., Yenal, U., Skiadas, I. V., Westermann, P., & Ahring, B. K. (2003). Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature. *Water research*, 37(19), 4561-4572.
- Gea, T., Artola, A., & Sánchez, A. (2005). Composting of de-inking sludge from the recycled paper manufacturing industry. *Bioresource Technology*, 96(10), 1161-1167.
- Geng, X., Deng, J., & Zhang, S. (2007a). Effects of hot-pressing parameters and wax content on the properties of fiberboard made from paper mill sludge. *Wood and Fiber Science*, 38(4), 736-741.

- Geng, X., Deng, J., & Zhang, S. Y. (2007b). Paper mill sludge as a component of wood adhesive formulation. *Holzforschung*, 61(6), 688-692.
- Geng, X., Zhang, S., & Deng, J. (2007). Characteristics of paper mill sludge and its utilization for the manufacture of medium density fiberboard. *Wood and Fiber Science*, 39(2), 345-351.
- Genthe, D., Cutbirth, J., & Weber, R. (1993). *Strength evaluation of low solids content pulp and paper mill sludge by factorial design*. Paper presented at the tappi environmental conference, Boston, MA: March 28-31. Atlanta, GA: Tappi Press, 77-84.
- Girods, P. (2008). *Procédé multi-étagé de valorisation de déchets bois type panneaux de particules*. Thèse de doctorat : Université Henri Poincaré-Nancy 1, Nancy, 279p.
- Groom, L., Rials, T., & Snell, R. (2000). *Effects of varying refiner pressure on the mechanical properties of loblolly pine fibres*. Paper presented at the Proceedings of the Fourth Panel Products Symposium, Llandudno, Wales UK, October 11-13, Hague; Griffiths; McLauchlin; Mayhead; Skinner; Tomkinson, eds.
- Groom, L. H., Mott, L., & Shaler, S. (1999). Relationship between Fiber Furnish and the Structural Performance of MDF. Proc. 33rd International Particleboard/ Composite Materials Symposium April 13 – 15, Washington State University, Pullman, WA.
- Haag, A. P., Geesey, G. G., & Mittleman, M. W. (2006). Bacterially derived wood adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26(3), 177-183.

- Haddar, M., Elloumi, A., Koubaa, A., Bradai, C., Migneault, S., & Elhalouani, F. (2016). Effect of High Content of Deinking Paper Sludge (DPS) on the Reinforcement of HDPE. *Journal of Polymers and the Environment*, 1-11.
- Halligan, A. (1970). A review of thickness swelling in particleboard. *Wood Science and Technology*, 4(4), 301-312.
- Hansson, L., & Antti, L. (2003). Design and performance of an industrial microwave drier for on-line drying of wood components. Paper presented at the International IUFRO Wood Drying Conference: 25/08/2003-29/08/2003.
- Harless, T. E., Wagner, F. G., Short, P. H., Seale, R. D., Mitchell, P. H., & Ladd, D. S. (2007). A model to predict the density profile of particleboard. *Wood and Fiber Science*, 19(1), 81-92.
- Hsu, W. E. (1997). *Wood quality requirements for panel products*. Paper presented at the CTIA/IUFRO International Wood Quality Workshop 1997, Forintek Canada Corp. Québec City, Août 18-22. pp. 1-10.
- Hunt, J. F., O'Dell, J., & Turk, C. (2008). Fiberboard bending properties as a function of density, thickness, resin, and moisture content. *Holzforschung*, 62(5), 569-576.
- Hunt, J. F., O'Dell, J., & Turk, C. (2008). Fiberboard bending properties as a function of density, thickness, resin, and moisture content. *Holzforschung*, 62(5). doi:10.1515/hf.2008.083
- Hunt, J. F., & Supan, K. (2005). Mechanical properties for a wet-processed fiberboard made from small-diameter lodgepole pine treetop material. *Forest products journal*. 55(5),82-87.



- Hunt, J. F., & Supan, K. (2006). Binderless fiberboard: Comparison of fiber from recycled corrugated containers and refined small-diameter whole treetops. *Forest products journal*. 56(7-8),69-74.
- Jackson, M. J., & Line, M. A. (1997). Organic composition of a pulp and paper mill sludge determined by FTIR, <sup>13</sup>C CP MAS NMR, and chemical extraction techniques. *Journal of agricultural and food chemistry*, 45(6), 2354-2358.
- Kamke, F. A., & Casey, L. J. (1988). Gas pressure and temperature in the mat during flakeboard manufacture. *Forest products journal*. 38(3),41–43.
- Kawasaki, T., Zhang, M., & Kawai, S. (1998). Manufacture and properties of ultra-low-density fiberboard. *Journal of Wood Science*, 44(5), 354-360.
- Kazayawoko, M., Balatinez, J., & Woodhams, R. (1997). Diffuse reflectance Fourier transform infrared spectra of wood fibers treated with maleated polypropylenes. *Journal of Applied Polymer Science*, 66(6), 1163-1173.
- Khedari, J., Charoenvai, S., & Hirunlabh, J. (2003). New insulating particleboards from durian peel and coconut coir. *Building and Environment*, 38(3), 435-441.
- Klofta, J., & Miller, M. (1994). On the recycle potential of papermaking fibres. *Pulp & Paper Canada*, 95(8), 41.
- Klungness, J. H. (1974). *Recycled Fiber Properties as Affected by Contaminants and Removal Processes*. 57 (11),71-75.
- Kocaefe, D., et al. (2008). Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch and aspen. *BioResources* 3(2), 517-537.

- 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 : Université du Québec à Trois-Rivières, 301p.
- Krigstin, S., & Sain, M. (2006). Characterization and potential utilization of recycled paper mill sludge. *Pulp Paper Canada*, 107(5), 29-32.
- Krigstin, S. G. (2008). *Characterization of recycled paper mill sludge and evaluation of potential applications*. Thèse de doctorat : Université de Toronto, Ontario, Canada, 250p.
- Kumar, R. S., & Rajkumar, P. (2014). Characterization of minerals in air dust particles in the state of Tamilnadu, India through FTIR, XRD and SEM analyses. *Infrared Physics & Technology*, 67, 30-41.
- Kuokkanen, T., Nurmesniemi, H., Pöykiö, R., Kujala, K., Kaakinen, J., & Kuokkanen, M. (2008). Chemical and leaching properties of paper mill sludge. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 20(2), 111-122.
- Kwon, J.-Y., Chung, P.-G., & Lim, I.-H. (2004). Removal of residual COD in biologically treated paper-mill effluent and degradation of lignin using nonthermal plasma unit. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 39(7), 1853-1865.
- Latva-Somppi, J., Tran, H., Barham, D., & Douglas, M. (1994). Characterization of deinking sludge and its ashed residue. *Pulp and paper Canada*. 95(10),31–35.
- Lähdeniemi, A., Mäkelä, M., & Dahl, O. (2013). Drying/fractionation of deinking sludge with a high-velocity cyclone. *Drying Technology*, 31(4), 378-384.

- Leclerc, J., Liard, A., Villeneuve, F., & Desilets, L. (1999). Beneficial use of pulp and paper residues for soil amendment in the province of Quebec. *Pulp & Paper Canada*, 100(7), 68-70.
- Lewis, W. C., & Schwartz, S. (1965). Insulating board, hardboard, and other structural fiberboards. Research note FPL no. 077. Madison, WI: USDA, Forest Service, *Forest Products Laboratory*. 13,(6),77p.
- Li Shi, J., Zhang, S., & Riedl, B. (2006). Multivariate modeling of MDF panel properties in relation to wood fiber characteristics. *Holzforschung*, 60(3), 285-293.
- Li, X. (2009). *Mechanical properties and water resistance of cellulosic fiberboards with soybean protein based adhesives*. Thèse de doctorat: Kansas State University, Department of Grain Science and Industry, Manhattan, Kansas, 72p.
- Liu, Q., Singh, J. M., Wang, S., Ban, W., & Lucia, L. A. (2005). Influence of green liquor and AQ-modified kraft pulping on fiber hexenuronic acid and carboxyl group content for linerboard grade pulp. *Cellulose chemistry and technology*, 39(5-6), 483-497.
- Lou, R., Wu, S., Lv, G., & Yang, Q. (2012). Energy and resource utilization of deinking sludge pyrolysis. *Applied Energy*, 90(1), 46-50.
- Lyne, L., & Gallay, W. (1954). Studies in the fundamentals of wet web strength. *Tappi*, 37(12), 698-704.
- Mabee, W. E. (2001). *Study of woody fibre in papermill sludge*. Thèse de doctorat : Université de Toronto, Ontario, Canada, 190p.

- Mäbert, M. (2009). *Fibre characterization in the wood-based materials industry— theory and reality. The PTS Pulp Symposium, 24-25.*
- Mahr, M. S., Hübert, T., Schartel, B., Bahr, H., Sabel, M., & Militz, H. (2012). Fire retardancy effects in single and double layered sol–gel derived TiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub>-wood composites. *Journal of Sol-Gel Science and Technology, 64(2)*, 452-464.
- Makansi, J. (1984). Custom-designed burners are key to packaged-boiler upgrade. *Power, 128(1)*, 82-83.
- Maloney, T. (1993). *Modern particleboard & dry-process fiberboard manufacturing ;* Miller Freeman Publications. San Francisco, Californie, USA, 681p.
- Marchal, R. (1995). Une alternative pour les bois feuillus de qualité secondaire: *les LVL (Laminated Veneer Lumber), lamellés-collés de placages. Revue Forestière Française Vol 4, 1995 ;* AgroParisTech, Nancy, France, 375 – 382.
- Marcovich, N. E., Reboredo, M. M., & Aranguren, M. I. (1996). Composites from sawdust and unsaturated polyester. *Journal of Applied Polymer Science, 61(1)*, 119-124.
- Marrinan, H. J. (1959). Recent Advances in the Chemistry of Cellulose and Starch., Ed. J.Honeyman, Interscience Publishers, Inc., New York pp. 147-187.
- MDDEP. (1999). Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs du Québec. Valorisation des boues papetiere Bureau d'audiences publiques sur l'environnement : Consultation publique sur la gestion de l'eau au Québec et l'assainissement des eaux usées industrielles.

- MDDEP. (2003). Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs du Québec. Rapport de l'évaluation nationale des données des études de suivi des fabriques de pâtes et papiers.
- MDDEP. (2007). Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs du Québec. Bilan annuel de conformité environnementale, secteur des pâtes et papiers, 2006.
- MDDEP. (2008). Ministère du développement durable de l'environnement et des parcs du Québec. Orientations et références techniques pour la deuxième attestation d'assainissement, secteur des pâtes et papiers.
- Méndez, A., Barriga, S., Fidalgo, J., & Gascó, G. (2009). Adsorbent materials from paper industry waste materials and their use in Cu (II) removal from water. *Journal of hazardous materials*, 165(1-3), 736-743.
- Méndez, A., Fidalgo, J., Guerrero, F., & Gascó, G. (2009). Characterization and pyrolysis behaviour of different paper mill waste materials. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 86(1), 66-73.
- Méndez, A., Fidalgo, J. M., Guerrero, F., & Gascó, G. (2009). Characterization and pyrolysis behaviour of different paper mill waste materials. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 86(1), 66-73. doi:10.1016/j.jaap.2009.04.004
- Méndez, A., Paz-Ferreiro, J., Araujo, F., & Gascó, G. (2014). Biochar from pyrolysis of deinking paper sludge and its use in the treatment of a nickel polluted soil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 107, 46-52. doi:10.1016/j.jaap.2014.02.001

- Méziane, F. (2011). *Propriétés thermiques des lamelles de bois traitées par des agents de retardement de feu*. Mémoire de maîtrise : Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, 112 p.
- Migneault, S. (2011). *Recyclage des résidus papetiers pour la production de panneaux de fibres*. Thèse de doctorat : Université Laval, Québec city, 128p.
- Migneault, S., Koubaa, A., Nadji, H., Riedl, B., Zhang, S. T., & Deng, J. (2010). Medium-density fiberboard produced using pulp and paper sludge from different pulping processes. *Wood and Fiber Science*, 42(3), 292-303.
- Migneault, S., Koubaa, A., & 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(4), 241-261. doi:10.1080/02773813.2013.869604
- Migneault, S., Koubaa, A., Riedl, B., Nadji, H., Deng, J., & Zhang, S. T. (2011). Binderless fiberboard made from primary and secondary pulp and paper sludge. *Wood and Fiber Science*, 43(2), 180-193.
- Miner, R. (1991). Environmental considerations and information needs associated with an increased reliance on recycled fiber. *Focus 95+ Proceedings, TAPPI PRESS, Atlanta*, 343-362.
- Moore, A. K., & Owen, N. L. (2001). Infrared spectroscopic studies of solid wood. *Applied Spectroscopy Reviews*, 36(1), 65-86.
- Moslemi, A. A. (1974). Particleboard. *Technology Southern Illinois University Press, Carbondale and Edwardville*, Volume II, 245p.

- Muhrbeck, P., & Eliasson, A. C. (1991). Influence of the naturally occurring phosphate esters on the crystallinity of potato starch. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 55(1), 13-18.
- Müller, G., Bartholme, M., Kharazipour, A., & Polle, A. (2008). FTIR-ATR spectroscopic analysis of changes in fiber properties during insulating fiberboard manufacture of beech wood. *Wood and Fiber Science*, 40(4), 532-543.
- Müller-Hagedorn, M., Bockhorn, H., Krebs, L., & Müller, U. (2003). A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 68, 231-249.
- Nadelman, A., & Newron, L. (1960). practical approach to utilization of solids from de-inking mill effluent. *TAPPI*, 43, 120-128.
- Nadji, H., Migneault, S., Xing, S., Riedl, B., Deng, J., Zhang, S., & Koubaa, A. (2010). *Physico-chemical characterization of primary and secondary sludge from three papermaking processes*. Paper presented at the Proceeding of 96th annual meeting of the pulp and paper technical association of Canada, Montréal, 2-3 février 2010.
- Nanko, H., & Ohsawa, J. (1989). Mechanisms of fibre bond formation. Transactions of the 1989 Cambridge Symposium, Mech. Eng. Publications Ltd., London, 783-829.
- Nelson, N. D. (1973). Effects of wood and pulp properties on medium-density, dry-formed hardboard. *Forest products journal*, 23(9), 72-80.

- Nenonene, A. (2009). *Élaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage*. Thèse de doctorat : Université de Toulouse, France, 217p.
- Nissan, A. H (1961). General principles of adhesion with particular reference to the hydrogen bond. In *The Formation and Structure of Paper*, Technical Section British Paper and Board Makers' Association, London, England, Vol. 1 : 119-130 (1962).
- Nissan, A., & Sternstein, S. (1964). Cellulose-fiber bonding. *Tappi* 47(1): 1-6.
- Nissan, A. H., & Higgins, H. (1959). A molecular approach to the problem of viscoelasticity. *Nature*, 184(4697), 1477-1478.
- Nurmesniemi, H., & Poykio, R. (2006). Sequential leaching of heavy metals in fibre clay from a chemical wastewater treatment plant at a paper mill. *Journal of Residuals Science & Technology*, 3(1), 25-33.
- Ochoa de Alda, J. A. (2008). *Feasibility of recycling pulp and paper mill sludge in the paper and board industries*. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(7), 965-972.
- Ohlmeyer, M., Hasener, J., & Schmid, H. (2006). *New methods to determine fibre quality for MDF-production*. Paper presented at the 10th European Panel Products Symposium (EPPS), 11–13, October 2006, Llandudno, Wales, UK.
- Olsson, A.-M., & Salmén, L. (2004). The association of water to cellulose and hemicellulose in paper examined by FTIR spectroscopy. *Carbohydrate research*, 339(4), 813-818.



- Page, D., El-Hosseiny, F., Winkler, K., & Bain, R. (1972). The mechanical properties of single wood-pulp fibres. Part I: A new approach. *Pulp and Paper Magazine of Canada*, 73(8), 72-77.
- Pandey, K. (1999). A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy. *Journal of Applied Polymer Science*, 71(12), 1969-1975.
- Pandey, K., & Pitman, A. (2004). Examination of the lignin content in a softwood and a hardwood decayed by a brown-rot fungus with the acetyl bromide method and Fourier transform infrared spectroscopy. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 42(10), 2340-2346.
- Pandey, K., & Theagarajan, K. (1997). Analysis of wood surfaces and ground wood by diffuse reflectance (DRIFT) and photoacoustic (PAS) Fourier transform infrared spectroscopic techniques. *European Journal of Wood and Wood Products*, 55(6), 383-390.
- Panshin, A. J., & Zeeuw, C. d. (1980). *Textbook of wood technology: Structure, identification, uses, and properties of the commercial woods of the United States and Canada*, 3<sup>th</sup> ed ; McGraw-Hill Book Co, 750 pp.
- Panyakaew, S., & Fotios, S. (2011). New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse. *Energy and Buildings*, 43(7), 1732-1739.
- Park, B.-D., Riedl, B., Hsu, E. W., & Shields, J. (1999). Hot-pressing process optimization by response surface methodology. *Forest products journal*, 49(5), 62.
- Pavia, D., Lampman, G., Kriz, G., & Vyvyan, J. (2008). *Introduction to Spectroscopy*; Cengage Learning. 728 pp.

- Peng, Y. (2008). *Effects of high temperatures on adhesive bond durability and toxic chemical production for engineered wood products*. Mémoire de maîtrise: Mississippi State University, Department of Forest Products, USA, 81p.
- Phillips, V., Kirkpatrick, N., Scotford, I., White, R., & Burton, R. (1997). The use of paper-mill sludges on agricultural land. *Bioresource Technology*, 60(1), 73-80.
- Pokhrel, D., & Viraraghavan, T. (2004). Treatment of pulp and paper mill wastewater—a review. *Science of the total environment*, 333(1), 37-58.
- Raitio, L. (1992). The properties of deinking sludge. *Paperi ja puu*, 74(2), 132-138.
- Ramiah, M. (1970). Thermogravimetric and differential thermal analysis of cellulose, hemicellulose, and lignin. *Journal of Applied Polymer Science*, 14(5), 1323-1337.
- Rashid, M., Barry, D., & Goss, M. (2006). Paper mill biosolids application to agricultural lands: benefits and environmental concerns with special reference to situation in Canada. *Soil Environ*, 25(2), 85-98.
- Rath, J., Wolfinger, M., Steiner, G., Krammer, G., Barontini, F., & Cozzani, V. (2003). Heat of wood pyrolysis. *Fuel*, 82(1), 81-91.
- RECYC-QUÉBEC. (2015). *Bilan de la gestion des matières résiduelles au Québec*. Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2017 & Bibliothèque et Archives Canada, 2017, 39p.
- Rivard, C., Moens, L., Roberts, K., Brigham, J., & Kelley, S. (1995). Starch esters as biodegradable plastics: Effects of ester group chain length and degree of substitution on anaerobic biodegradation. *Enzyme and Microbial Technology*, 17(9), 848-852.

- Roffael, E., Dix, B., & Schneider, T. (2001). Thermomechanical (TMP) and chemothermomechanical pulps (CTMP) for medium density fibreboards (MDF). *Holzforschung*, 55(2), 214-218.
- Rowell, R. M., Kawai, S., & Inoue, M. (2007). Dimensionally stabilized, very low density fiberboard. *Wood and Fiber Science*, 27(4), 428-436.
- Rowell, R. M., Pettersen, R., Han, J. S., Rowell, J. S., & Tshabalala, M. A. (2005). Cell wall chemistry. *Handbook of wood chemistry and wood composites, Vol 2*, Boca Raton, Florida, USA, CRC Press: 35-74
- Sagar, A. D., & Merrill, E. W. (1995). Properties of fatty-acid esters of starch. *Journal of Applied Polymer Science*, 58(9), 1647-1656.
- Scott, G. M., & Smith, A. (1995). *Sludge characteristics and disposal alternatives for the pulp and paper industry*. Paper presented at the TAPPI 1995 International Environmental Conference, May 7-10; Atlanta, GA, Tappi press: 269-279.
- Shi, J. L. (2006). *La relation entre les propriétés des panneaux de fibres de densité moyenne et les caractéristiques du bois*. Thèse de doctorat :Université Laval, Faculté de Foresterie et Géomatique, Québec city, 193p.
- Shi, J. L., Zhang, S. Y., & Riedl, B. (2005). Effect of juvenile wood on strength properties and dimensional stability of black spruce medium-density fiberboard panels. *Holzforschung*, 59(1), 1-9.
- Sidhu, S., Maqsud, L., Dellinger, B., & Mascolo, G. (1995). The homogeneous, gas-phase formation of chlorinated and brominated dibenzo-p-dioxin from 2, 4, 6-trichloro-and 2, 4, 6-tribromophenols. *Combustion and flame*, 100(1-2), 11-20.

- Silverstein, R., Webster, F., & Kiemle, D. (2005). Proton NMR spectrometry. *Spectrometric identification of organic compounds, 7th edn.* Wiley, New York, 150-155.
- Simons, H. (1994). *Méthodes de gestion des boues générées par les fabriques de pâtes et papiers:(1992)*: Ministère de l'environnement et de la faune.
- Smook, G. A. (2002). *Handbook for pulp & and paper technologists, 3rd edn.*, Vancouver, Canada: Angus Wilde Publications, 425p.
- Soucy, J. (2015). *Utilisation des résidus papetiers de diverses sources pour la production de matériaux composites bois-polymère.* Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Science de l'environnement, 268p.
- Soucy, J., Koubaa, A., Migneault, S., & Riedl, B. (2015). 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. doi:10.1080/02773813.2015.1057647
- Srinivasan, D., & Unwin, J. P. (1995). Pulp and paper effluent management. *Water environment research*, 67(4), 531-544.
- Suchsland, O. (1990). Estimating the warping of veneered furniture panels. *Forest products journal*, 40(9), 39-43.
- Suchsland, O., & Woodson, G. E. (1987). *Agriculture Handbook, Fiberboard manufacturing practices in the United States*: No.640. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 263p.
- Szikla, Z. (1986). Z-directional distribution of fines and diller material in the paper web under wet pressing conditions. *Paperi Ja Puu* 68(9): 654-664.

- Szikla, Z., & Paulapuro, H. (1989). Changes in Z-direction density distribution of paper in wet pressing. *Journal of pulp and paper science*, 15(1), J11-J17.
- Takahashi, H., Endoh, H., & Endoh, K. (1974). Effects of characteristics of the fiber ground by refiner on physical properties of fiberboard, 2: Canadian freeness and tensile strength of fiber products. *Journal of the Japan Wood Research Society* 20,430-434.
- Tatzber, M., Stemmer, M., Spiegel, H., Katzlberger, C., Haberhauer, G., & Gerzabek, M. (2007). An alternative method to measure carbonate in soils by FT-IR spectroscopy. *Environmental Chemistry Letters*, 5(1), 9-12.
- Temmink, H., & Grolle, K. (2005). Tertiary activated carbon treatment of paper and board industry wastewater. *Bioresource Technology*, 96(15), 1683-1689.
- Thiel, D., Martin, S., Duncan, J., & Lance, W. (1989). *The effects of a sludge containing dioxin on wildlife in pine plantations*. *Tappi journal* 72(1), 94-99.
- Thompson, G., Swain, J., Kay, M., & Forster, C. (2001). The treatment of pulp and paper mill effluent: a review. *Bioresource Technology*, 77(3), 275-286.
- Trépanier, L., Gallichand, J., Caron, J., & Thériault, G. (1996). Environmental impact of on-farm storage of deinking paper mill sludge. *Transactions of the ASAE*, 39(5), 1853-1859.
- Urquhart, A. R. (1929). 15—The mechanism of the adsorption of water by cotton. *Journal of the Textile Institute Transactions*, 20(6), T125-T132.
- Usmanov, K. U., Yulchibaev, A., Dordzhin, G., & Valiev, A. (1972). IR spectroscopic analysis of graft co-polymers of cellulose and its derivatives with vinyl fluoride. *Fibre Chemistry*, 3(3), 292-295.

- Valetie, P., & de Choudens, C. (1992). *Le bois, la pâte, le papier*, 3<sup>ème</sup> éd., Echirolles, Grenoble, France, Centre Technique de l'Industrie des Papiers, 1992, 199 p.
- Vandenbossche, V., Rigal, L., Saiah, R., & Perrin, B. (2012). New agro-materials with thermal insulation properties. Proceedings of the 18th International Sunflower Conference, 949-954.
- Vidal Bastias, M. (2006). *Modélisation du pressage à chaud des panneaux de fibres de bois (MDF) par la méthode des éléments finis*. Thèse de doctorat : Université Laval, Québec city, 171 p.
- Vun, R. Y. (2003). *Ultrasonic characterization of engineering performance of oriented strandboard*. Thèse de doctorat: Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Department of Forestry, wildlife and Fisheries, USA, 187p.
- Wang, S., Winistorfer, P. M., & Young, T. M. (2007). Fundamentals of vertical density profile formation in wood composites. Part III. MDF density formation during hot-pressing. *Wood and Fiber Science*, 36(1), 17-25.
- Warren, E. (2001). *Study of woody fibre in papermill sludge*. Thèse de doctorat: University of Toronto, Department of Forestry, Canada, 202p.
- Whistler, R. L., & Schieltz, N. C. (1943). Orientation in stretched films of amylose triacetate. *Journal of the American Chemical Society*, 65(7), 1436-1437.
- Wiegand, P. S., & Unwin, J. P. (1994). Alternative management of pulp and paper industry solid wastes. *Tappi journal*, 77(4), 91-97.
- Wieland, S. (2007). *Utilisation d'adhésifs respectueux de l'environnement pour la fabrication de panneaux dérivés du bois à faible émission de formaldéhyde: caractérisation des paramètres de pressage: évaluation des propriétés des*

*panneaux*. Thèse de doctorat : Université Henri Poincaré-Nancy 1, France, 195p.

Wolcott, M., Kamke, F., & Dillard, D. (2007). Fundamentals of flakeboard manufacture: viscoelastic behavior of the wood component. *Wood and Fiber Science*, 22(4), 345-361.

Wolcott, M. P. (1989). *Modeling viscoelastic cellular materials for the pressing of wood composites*. Thèse de doctorat: Virginia Polytechnic Institute and State University, Department of Wood Science and Forest Products, USA, 182 p.

Wolcott, M.P.; Englund, K. A. (1999) *Technology Review of Wood-Plastic Composites*; Proceedings of the 33rd International Particleboard/Composite Materials Symposium, Pullman, WA, USA, April 1999.

Woodson, G. E. (1976). *Properties of medium-density fiberboard related to hardwood specific gravity*. Paper presented at the In: Proc. Tenth Particleboard Symp., Wash. State Univ., Pullman, Wash. p. 175-192.

Wu, S. (1982). *Polymer interface and adhesion* (188): M. Dekker Inc., New York.

Xie, Y., Tong, Q., Chen, Y., Liu, J., & Lin, M. (2011). Manufacture and properties of ultra-low density fibreboard from wood fibre. *BioResources*, 6(4), 4055-4066.

Xing, C., Deng, J., Zhang, S., Riedl, B., & Cloutier, A. (2006). Impact of bark content on the properties of medium density fiberboard (MDF) in four species grown in eastern Canada. *Forest products journal*, 56(3).

Xing, C., Zhang, S., Deng, J., Riedl, B., & Cloutier, A. (2006). Medium-density fiberboard performance as affected by wood fiber acidity, bulk density, and size distribution. *Wood Science and Technology*, 40(8), 637-646.

- Xing, S., Ried, B., Koubaa, A., & James Deng, A. (2012). *Optimal percentage of pulp and paper mill secondary sludge incorporated in particleboard*. Paper presented at the Proceedings of the 55th international convention of Society of Wood Science and Technology August 27-31, 2012 - Beijing, CHINA.
- Xu, W., & Suchsland, O. (1998). Variability of particleboard properties from single- and mixed-species processes. *Forest products journal*, 48(9), 68.
- Yan, S., Sagoe-Crentsil, K., & Shapiro, G. (2011). Reuse of de-inking sludge from wastepaper recycling in cement mortar products. *Journal of environmental management*, 92(8), 2085-2090.
- Yin, D., Lin, Y., Chen, Z., Qiao, J., Xiao, M., & Wang, D. (2016). Production of corrugating medium paper with secondary fibers from digested deinking sludge. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 37, 168-174. doi:10.1016/j.jiec.2016.03.026
- Yon, Z., & Hynninen, P. (2000). *Metal concentrations in some pulp and paper mill effluents before and after activated sludge treatment*. *Paperi ja Puu – Paper and Timber*, 2000, 82(5), p.322-325.
- Zerhouni, A. (2010). *Caractérisation des propriétés physico-chimiques des boues issues des principaux procédés papetiers*. Mémoire de maîtrise :Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, 124p.
- Zibilske, L. M. (1987). Dynamics of nitrogen and carbon in soil during papermill sludge decomposition. *Soil Science*, 143(1), 26-33.
- Zhou, X.-Y., Zheng, F., Li, H.-g., & Lu, C.-l. (2010). An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings*, 42(7), 1070-1074.