

Titre: Développement et production d'un contenant alimentaire,
Title: recyclable et compostable à base de fibres naturelles

Auteur: Pauline Guieu
Author:

Date: 2021

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Guieu, P. (2021). Développement et production d'un contenant alimentaire,
Citation: recyclable et compostable à base de fibres naturelles [Mémoire de maîtrise,
Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/6299/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/6299/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Abdellah Ajji
Advisors:

Programme: Génie chimique
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Développement et production d'un contenant alimentaire, recyclable et
compostable à base de fibres naturelles**

PAULINE GUIEU

Département de génie chimique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès Sciences appliquées*

Génie chimique

Avril 2021

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Développement et production d'un contenant alimentaire, recyclable et compostable à base de fibres naturelles

présenté par **Pauline GUIEU**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Paul STUART, président

Abdellah AJJI, membre et directeur de recherche

Anne-Marie BOULAY, membre

DÉDICACE

À Alessio

REMERCIEMENTS

À mes parents, Cécile et Gilles, pour le soutien que vous m’apportez chaque jour, et votre amour. Merci d’être là sans cesse pour moi, même à 5 993 km.

À ma grande sœur, Camille, ton ambition est si grande. Merci d’être ma source d’inspiration.

À ma petite sœur, Justine, la femme la plus forte que je connaisse. Merci de me nourrir de ta force.

À mes belles grands-mères, vous êtes des femmes extraordinaires. Merci Mamé, de continuer à me raconter tes histoires de jeunesse par téléphone. Et merci Memeye, pour toutes tes lettres et ces beaux moments passés ensemble, tu vas me manquer. À mes grands-pères, qui m’ont tant appris.

À Alessio, tu es mon pilier, mon meilleur ami, mon amour. Merci d’être à mes côtés chaque jour et de bien vouloir me suivre dans toutes mes folies.

À ma famille canadienne, Lina et Michel, de me considérer comme votre propre fille. Sebastiano, tu es le grand frère que je n’ai jamais eu. Et Nonna pour la femme inspirante que tu es. Merci de tout l’amour que vous me portez.

À Méno, tu es toujours là pour moi. Merci de m’avoir redonné confiance dans les moments de doute.

À Matthieu Gauthier et Claire Cerclé, pour votre accompagnement durant ces deux années de maîtrise. Merci pour votre patience.

À mes collègues d’AecopaQ, Michel, Wilson et Éric, pour votre joie de vivre. Merci de me donner envie de me rendre au bureau chaque jour. Éric, ta pensée critique m’a permis de toujours aller plus loin. Merci de remettre en question les résultats de ma recherche, cela m’a permis de m’épanouir et de renforcer mes connaissances.

Merci AecopaQ et Mitacs, de financer ce beau projet. Et merci aussi à Mitacs de faire le lien entre la recherche et l’industrie.

Merci au jury, de prendre le temps de lire et d’évaluer ce mémoire de maîtrise.

Finalement, merci à mon directeur de recherche, Abdellah Ajji. Merci de m’avoir accompagnée dans ce projet ambitieux et d’avoir vu un potentiel en moi. Je vous remercie sincèrement de l’encadrement que vous m’avez apporté et de la liberté que vous m’avez offerte pour réaliser cette maîtrise.

RÉSUMÉ

La surconsommation du plastique est devenue un réel problème dans la société d'aujourd'hui. En 2015, 381 millions de tonnes de plastiques avaient été produites et 55% de cette production n'avait pas été revalorisée à sa fin de vie. De plus en plus de plastique s'accumule ainsi dans la nature. En 2010, entre 4,8 et 12,7 millions de tonnes de plastiques ont été retrouvées dans les océans. Ce matériau, ayant un faible taux de biodégradation, peut rester dans la nature des dizaines voire des centaines d'années. Cela engendre un nombre grandissant de problèmes au niveau de la qualité des écosystèmes. Pour pallier ce problème, les institutions décisionnelles du Canada ont décidé de passer à l'acte en interdisant les produits en plastique à usage unique. Les objets de plastique à usage unique sont notamment très utilisés en emballage alimentaire. Cette industrie travaille donc à trouver des solutions de remplacement de la vaisselle en polystyrène expansé (PSE). Ainsi, d'autres types de polymère sont utilisés et présentent des solutions potentielles, comme l'acide polylactique (PLA) et le poly(succinate de butyle) (PBS). Mais ces matériaux coûtent chers. Pour diminuer le coût de matière première de plus en plus de fibres naturelles sont utilisées pour la fabrication de vaisselle à usage unique. Les fibres les plus utilisées aujourd'hui sont les fibres de bagasse, majoritairement produites au Brésil et en Asie. En revanche, pour une production de vaisselle écologique à usage unique au Québec, une ressource provenant d'Amérique du Sud ou d'Asie ne semble pas un choix stratégique. Ainsi, lorsque les ressources locales sont analysées, la présence de forêts de bois de résineux nordiques présente un large potentiel.

L'objectif principal de ce projet de recherche est de développer un emballage alimentaire à faible coût et de manière locale. Pour répondre à cet objectif, 29 formulations différentes de pâte ont été expérimentées. Trois pâtes différentes ont été utilisées pour ces travaux, et des mélanges des pâtes ont aussi été faits. Les différences principales entre ces pâtes sont dans le traitement de la fibre (blanchie ou non blanchie) et la qualité (vierge ou recyclée). Une solution de perfluoroalkyles (PFAS), utilisée comme additif, a été ajoutée à la préparation de la pâte pour offrir une résistance à l'eau et à l'huile. Deux paramètres de fabrication des échantillons ont été variés indépendamment : la quantité d'additif et le taux de raffinage. La morphologie, les propriétés de résistance à l'huile et à l'eau et les propriétés mécaniques ont été testées. Les expériences ont permis de montrer que la majorité des propriétés finales des produits dépend de la capacité des fibres à faire des liaisons. Concernant la quantité d'additif, une augmentation de sa concentration dans le mélange permet une meilleure résistance à l'huile et à l'eau et engendre une diminution des

propriétés mécaniques. Aucune influence de la quantité d'additif n'a été notée sur la morphologie des échantillons. Aussi, il a été remarqué qu'en augmentant le taux de raffinage les propriétés mécaniques sont largement améliorées. Une augmentation de la densité des échantillons est aussi observée. En revanche, le raffinage n'a pas d'effet notable sur la résistance à l'huile et à l'eau. Les résultats ont aussi montré que les pâtes avec des fibres recyclées présentent de moins bonnes propriétés que les pâtes de fibres vierges. Cette caractérisation des propriétés a permis de déterminer les limites nécessaires à la commercialisation d'un emballage alimentaire. Cela a servi à éliminer les options non viables au niveau des propriétés et une analyse de coût de production a été réalisée pour déterminer l'option la moins chère respectant les critères posés. Ainsi, l'option proposée est à base de pâte Kraft de résineux nordiques blanchie (NBSK), avec une quantité d'additif moyenne et sans raffinage additionnel.

Pour les travaux futurs les principales recommandations qui ont été faites sont d'étudier les mêmes paramètres que dans cette étude mais pour un procédé de thermoformage de produit en pâte moulée et de réaliser une étude paramétrique afin de déterminer l'influence du taux de raffinage lorsque la quantité d'additif est changée. De plus, il est recommandé de réaliser des recherches en utilisant d'autres types de fibres disponibles au Québec, comme les pâtes mécaniques, le chanvre et le phragmite. Finalement, des recommandations sont faites à l'entreprise produisant la barquette de fibres de bois au Québec, afin de diminuer les impacts environnementaux de celle-ci. Notamment, en trouvant une alternative aux additifs perfluorés.

ABSTRACT

The over-consumption of plastic has become a real problem today. In 2015, 381 million tons of plastics had been produced and 55% of this production had not been revalorised at the end of its life. More and more plastics are accumulating in nature. In 2010, between 4,8 and 12,7 million tons of plastics were found in oceans. These materials have a low rate of biodegradation and can remain in nature for tens or even hundreds of years. This creates a growing number of issues in terms of ecosystem quality. To mitigate this problem, Canada's decision-making institutions have decided to act by banning single-use plastic products. Single-use plastic products, most notably expanded polystyrene (EPS), are specially used in food packaging. This industry is therefore working to find alternatives to EPS tableware. Thus, other types of polymers are used and present potential solutions, such as polylactic acid (PLA) and poly(butyl succinate) (PBS). However, these materials are expensive. To reduce the cost of raw materials, more and more natural fibers are being used for the manufacturing of single-use tableware. Today, the most used fibers are bagasse fibers, mainly produced in Brazil and Asia. However, for an ecological production of single-use tableware in Quebec, a resource from South America or Asia does not seem to be a strategic choice. Moreover, when local resources are analyzed, the presence of northern softwood forests presents a large local potential.

The main objective of this research project is to develop a food packaging at low cost and in a local way. To meet this objective, 29 formulations have been tested. Three different pulps were used for this work, and mixtures of the pulps were also prepared. The main differences between these pulps are in the previous treatments of the fiber (bleached or unbleached) and the grade or quality (virgin or recycled). A perfluoroalkyl solution (PFAS), used as an additive, was added to the pulp preparation to provide water and oil resistance. Two parameters were varied independently: the amount of additive and the refining rate. Morphology and mechanical properties as well as, oil and water resistance were then tested on the various formulations. The experiments showed that most of the final product properties depend on the chemical bonding ability of the fibers. Concerning the quantity of additive, an increase of its concentration in the pulp allows a better resistance to oil and water but leads to a decrease in the mechanical properties. No influence of the additive was noted on the morphology of the samples. Also, it was noted that by increasing the refining rate, the mechanical properties greatly improved. An increase in samples' density was also observed. On the other hand, refining has no noticeable effect on oil and water resistance. The results showed

that pulps with recycled fibers have poorer properties than those with virgin fibers. This characterization of the properties allowed to determine the limits necessary for the commercial viability of the food packaging. This was used to eliminate options that were not viable in terms of properties and a production cost analysis was performed to determine the least expensive option that met the commercial criteria. Thus, the proposed option is based on northern bleached softwood Kraft (NBSK) pulp, with an intermediate amount of additive and no additional refining.

For future work, the main recommendations that have been made are to study the same parameters as in this study, but with a thermoforming process for molded pulp product and to carry out a parametric study to determine the influence of the refining rate when the additive quantity is changed. In addition, it is recommended to make some research using other fibers available in Quebec, such as mechanical pulps, hemp and phragmite. Finally, recommendations are made to the company producing the wood fiber tray in Quebec, to reduce its environmental impacts. In particular, by finding an alternative to perfluorinated additives.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte	1
1.2 Problématique.....	3
1.3 Entreprise partenaire : AecopaQ	5
1.4 Objectif principal du projet de recherche	6
1.5 Plan du mémoire.....	6
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	8
2.1 Matière première de la pulpe : le bois	8
2.1.1 Composition biochimique	8
2.1.2 Structure de la cellule	10
2.2 De l’arbre à la pâte	11
2.2.1 Préparation des copeaux.....	11
2.2.2 Procédés chimiques de mise en pâte	15
2.3 Raffinage	20
2.3.1 Fibrillation interne.....	22

2.3.2	Fibrillation externe	23
2.3.3	Formation de fines.....	23
2.3.4	Raccourcissement des fibres	23
2.3.5	Redressage des fibres	23
2.3.6	Cristallinité de la cellulose	23
2.3.7	Redistribution des composés chimiques à la surface	24
2.4	Propriétés du papier.....	24
2.4.1	Propriétés morphologiques.....	24
2.4.2	Propriétés mécaniques.....	25
2.4.3	Propriétés barrières.....	26
2.5	Papier recyclé	27
2.5.1	Procédé de remise en pâte	27
2.5.2	Propriétés des pâtes recyclées	27
2.6	Produits en pâte moulée	28
2.6.1	Historique des produits en pâte moulée	29
2.6.2	Classification des produits en pâte moulée	30
2.6.3	Procédé de fabrication.....	30
2.6.4	Propriétés des produits en pâte moulée	33
2.7	Fluoropolymères.....	33
2.7.1	Chimie des fluoropolymères	34
2.7.2	Aspect environnemental des fluoropolymères	35
2.8	Objectifs spécifiques	36
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE.....		37
3.1	Matières premières	37

3.2	Protocole expérimental.....	37
3.2.1	Fabrication des échantillons	38
3.3	Technique de caractérisation de la pulpe	40
3.3.1	Standard canadien d'égouttage.....	40
3.4	Technique de caractérisation de l'additif	41
3.4.1	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier	41
3.5	Techniques de caractérisation des produits finis.....	42
3.5.1	Calcul du grammage.....	42
3.5.2	Calcul de la densité	42
3.5.3	Résistance à l'huile (Kit Test).....	43
3.5.4	Résistance à l'eau (Cobb Test).....	43
3.5.5	Essai de traction	44
3.6	Analyse économique	45
CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION		47
4.1	Caractérisation de l'additif.....	47
4.2	Influence de l'additif sur les propriétés.....	48
4.2.1	Grammage, épaisseur et densité	48
4.2.2	Propriétés barrières : Kit test et Cobb test.....	50
4.2.3	Propriétés mécaniques.....	53
4.3	Influence du raffinage sur les propriétés	57
4.3.1	Grammage, épaisseur et densité	58
4.3.2	Propriétés barrières : Kit test et Cobb test.....	60
4.3.3	Propriétés mécaniques.....	61
4.4	Analyse économique	65

4.5	Choix de la meilleure option	67
CHAPITRE 5	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	71
RÉFÉRENCES	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Proportions des substances macromoléculaires dans les parois cellulaires du bois [20]	8
Tableau 2-2 : Différents agents blanchissants de la pâte et type de réaction associée [20]	19
Tableau 2-3 : Grammage du papier en fonction de l'application [32].....	25
Tableau 3-1 : Classification des consistances dans le domaine des pâtes et papiers	39
Tableau 4-1: Indices d'égouttage des différentes pâtes pour l'étude du raffinage sur les propriétés	57
Tableau 4-2 : Coûts relatifs des pâtes.....	65
Tableau 4-3 : Diminution de l'indice d'égouttage par énergie spécifique pour chaque type de pâte	66
Tableau 4-4 : Pourcentage d'utilisation du raffineur	66
Tableau 4-5 : Caractéristiques de chaque option	68

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Taux de dégradation des plastiques [4]	2
Figure 1-2 : Oiseau marin ayant ingéré des déchets. Contenu de l'estomac d'un oiseau marin (en haut à gauche) [7]	3
Figure 1-3 : Quantité de carbone stockée dans les différentes parties de la forêt par région et sous-région en 2010 [18] reproduit avec permission	5
Figure 2-1 : Liaisons hydrogène intra et intermoléculaires de la cellulose [24]	9
Figure 2-2 : Schéma d'une couche de la paroi cellulaire. Schéma d'une cellule de bois (en haut à gauche) [25]	11
Figure 2-3 : Étapes de préparation des copeaux de bois	12
Figure 2-4 : Dimensions standards des copeaux de bois [20]	13
Figure 2-5 : Exemple de tamis giratoire (adapté de [20])	14
Figure 2-6 : Principe de fonctionnement du tamisage à l'air (adapté de [20])	15
Figure 2-7 : Schéma du procédé de mise en pâte Kraft	16
Figure 2-8 : Équipement de séchage de la pulpe [29]	20
Figure 2-9 : Motifs présents sur les plaques de raffineur à disques (gauche) et circulation du flux dans le raffineur (droite) [31]	21
Figure 2-10 : Géométrie des plaques de raffinage, vue transversale [31]	21
Figure 2-11 : Principe du raffinage : Étape 1 (a), étape 2 (b) et étape 3 (c) (adapté de [30])	22
Figure 2-12 : Bouteille faite à base de pâte moulée de Paper Water Bottle™ [49]	29
Figure 2-13 : Schéma simplifié de la fabrication de produits en pâte moulée	31
Figure 2-14 : Polymère à base de groupements perfluoroalkyles (adapté de [55])	34
Figure 2-15 : Schéma de la tension de surface	35
Figure 3-1 : Plan expérimental pour répondre à l'objectif spécifique 1	38

Figure 3-2 : Équipement de mesure de l'indice d'égouttage selon la méthode standard canadienne. Photo (gauche) et schéma (droite).....	41
Figure 3-3 : Exemple de Kit Test accepté (gauche) et rejeté (droite)	43
Figure 3-4 : Appareil utilisé pour le Cobb Test [69].....	44
Figure 3-5 : Équipement Instron utilisé pour la résistance à la traction.....	44
Figure 4-1 : Spectre FTIR de l'additif	47
Figure 4-2 : Influence de la quantité d'additif sur le grammage.....	48
Figure 4-3 : Influence de la quantité d'additif sur l'épaisseur des échantillons	49
Figure 4-4 : Influence de la quantité d'additif sur la densité	50
Figure 4-5 : Influence de la quantité d'additif sur la résistance à l'huile	51
Figure 4-6 : Influence de la quantité d'additif sur la quantité d'eau absorbée par les échantillons	52
Figure 4-7 : Influence de la quantité d'additif sur le module d'élasticité	53
Figure 4-8 : Influence de la quantité d'additif sur la résistance maximale à la traction	54
Figure 4-9 : Influence de la quantité d'additif sur la résistance à la rupture	55
Figure 4-10 : Influence de la quantité d'additif sur l'élongation à la résistance maximale à la traction	56
Figure 4-11 : Influence de la quantité d'additif sur l'élongation à la rupture	56
Figure 4-12 : Influence du taux de raffinage sur le grammage	58
Figure 4-13 : Influence du taux de raffinage sur l'épaisseur des échantillons.....	58
Figure 4-14 : Influence du taux de raffinage sur la densité.....	59
Figure 4-15 : Influence du taux de raffinage sur la résistance à l'huile.....	60
Figure 4-16 : Influence du taux de raffinage sur la résistance à l'eau	61
Figure 4-17 : Influence du taux de raffinage sur le module élastique.....	62
Figure 4-18 : Influence du taux de raffinage sur la résistance maximale à la traction.....	63
Figure 4-19 : Influence du taux de raffinage sur la résistance à la traction à la rupture	63

Figure 4-20 : Influence du taux de raffinage sur l'élongation à la résistance maximale à la traction	64
Figure 4-21 : Influence du taux de raffinage sur l'élongation à la rupture	64
Figure 4-22 : Coûts de production relatifs des différentes options	67
Figure 4-23 : Schéma décisionnel pour la proposition de la meilleure option.....	69

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

A	Surface
AKD	Dimères d'alkylcétène
ASA	Anhydrides alcénylsucciniques
B	Largeur de l'arrête
BW	Grammage
cons%	Consistance de la pâte
CSF	Canadian Standard Freeness
CSF _{in}	Indice d'égouttage à l'entrée du raffineur
CSF _{out}	Indice d'égouttage à la sortie du raffineur
D _{out}	Diamètre externe du disque du raffineur
e	Épaisseur
E	Module de Young
E _{spec}	Énergie spécifique
F	Force de traction
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
G	Espacement entre les plaques
IMFA	International Molded Fiber Association
l ₀	Longueur initiale
ṁ	Débit de pâte traitée
ML	Lamelle moyenne de la paroi cellulaire
NBSK	Northern Bleached Softwood Kraft
P	Couche primaire de la paroi cellulaire
PBS	Poly(succinate de butyle)

PFAs	Perfluoroalkyles
PHA	Polyhydroxyalcanoate
PLA	Acide polylactique
P_{motor}	Puissance du moteur
P_{net}	Puissance nette
$P_{\text{no load}}$	Puissance hors charge
PSE	Polystyrène expansé
S	Couche secondaire de la paroi cellulaire
T	Profondeur de la cavité
UF	Unité fonctionnelle
W	Largeur de la cavité
ΔCSF	Différence d'indice d'égouttage
Δl	Allongement
ε	Déformation
ρ	Densité
σ	Contrainte
ω	Vitesse de rotation du moteur

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

Depuis les dernières années, la préoccupation concernant la consommation des plastiques ne cesse d'augmenter, que ce soit de la part des consommateurs ou des gouvernements. Malgré cette inquiétude, la production de plastique continue d'augmenter. Les plastiques ont fait leur apparition dans les années 1950, leur facilité de production et leurs nombreux domaines d'application faits des plastiques une ressource importante dans notre société. En 1950, 2 millions de tonnes de plastiques avaient été produites, alors qu'en 2015, ce nombre s'est élevé à 381 millions de tonnes [1]. Le principal domaine d'application des plastiques est notamment l'emballage, avec 146 millions de tonnes de plastiques utilisées pour cette industrie en 2015 [1]. Le plastique est notamment très utilisé pour la fabrication d'emballage alimentaire dû à son faible coût de production et à ses propriétés diverses [2].

En revanche, la mauvaise gestion des déchets plastiques prend de plus en plus d'ampleur avec l'augmentation effrénée de leur production. Les plastiques sont revalorisés de deux manières : le recyclage et l'incinération. Malgré ces technologies de valorisation, 55% du plastique n'était pas revalorisé en 2015 [1]. Cette fraction non-revalorisée se retrouve dans les sites d'enfouissement, ou est tout simplement rejetée dans la nature et notamment de grandes quantités se retrouvent dans les océans. Il a été estimé qu'en 2010, entre 4,8 et 12,7 millions de tonnes de plastiques se retrouvaient dans les océans [3]. Les plastiques conventionnels ont des taux de dégradation faibles dans la nature et dans les espaces marins, comme le montre la Figure 1-1. En effet, une bouteille en polyéthylène haute densité (HDPE) a une durée de demi-vie estimée à environ 250 ans en milieu terrestre et 58 ans dans les milieux marins [4].

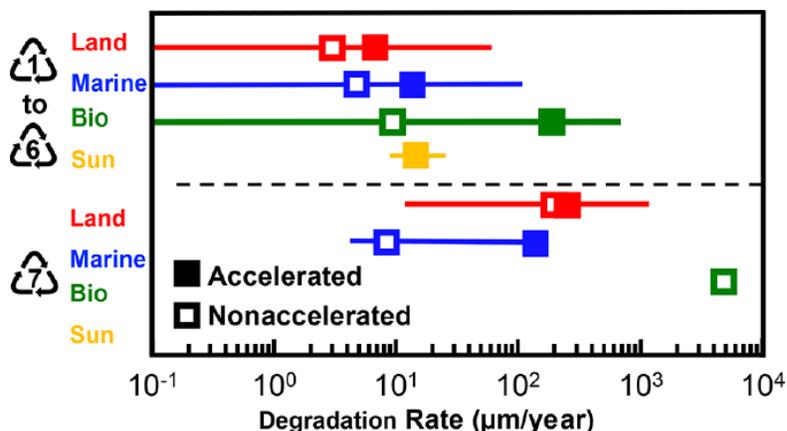


Figure 1-1 : Taux de dégradation des plastiques [4]

Ces taux de dégradation si bas engendrent de réels problèmes environnementaux sur la faune terrestre et marine. Notamment depuis plusieurs années, des problèmes d'enchevêtrement et d'ingestion du plastique par les espèces marines sont relevés par les scientifiques (Figure 1-2) [5]–[7]. Kühn, Bravo Rebolledo et van Franeker [7] ont réalisé en 2015 une étude pour mettre à jour l'impact des plastiques sur la vie marine. Ils ont relevé que 25% des oiseaux marins observés présentaient un problème d'enchevêtrement tout comme 42% des mammifères marins étudiés. Ces chiffres n'étaient que de 16% pour la première catégorie et 28% pour la deuxième en 1997 [8]. Pour ce qui est des chiffres pour l'ingestion de débris marins, ils sont encore plus élevés. En effet, l'étude de 2015 présente que 40% des oiseaux marins avaient ingéré des déchets contre 36% en 1997. Concernant les espèces de mammifères marins, plus de la moitié (50,4%) des animaux observés avaient ingéré des déchets, alors que 23% de cette même catégorie d'animaux était touchée en 1997 [7], [8].



Figure 1-2 : Oiseau marin ayant ingéré des déchets. Contenu de l'estomac d'un oiseau marin (en haut à gauche) [7]

De nombreuses initiatives avaient été prises pour lutter contre le plastique, mais la pandémie de la COVID-19 a fait renaître le débat de l'utilisation des plastiques à usage unique. En effet, de nombreux engagements ont été pris face à la surconsommation de plastique, que ce soit de la part des municipalités ou des gouvernements. La mairesse de Montréal, Valérie Plante, annonçait avec la responsable de la transition écologique et de la résilience Laurence Lavigne Lalonde, l'adoption d'un règlement pour réduire l'utilisation des produits en plastique à usage unique, à l'occasion de la journée de la Terre en 2019. Cette mesure devait prendre effet dès le printemps 2020 [9]. De même, Justin Trudeau annonçait début juin 2019 l'interdiction des articles de plastique à usage unique en 2021 [10]. Mais avec l'arrivée de la pandémie, la demande pour les objets en plastique à usage unique a augmenté. Notamment avec les plats à emporter, l'utilisation des barquettes et de la vaisselle en polystyrène expansé a refait surface. Les institutions décisionnelles ont donc dû mettre leur projet de bannissement des plastiques en pause [11]. Ainsi, le problème du plastique n'a toujours pas été solutionné.

1.2 Problématique

Face à cette réalité, il est important de trouver des solutions concrètes, et ce, rapidement. Ainsi, l'industrie des emballages alimentaires ne cesse de subventionner des recherches pour produire des emballages à base de matériaux renouvelables [12], [13]. Aujourd'hui, des polymères biosourcés et biodégradables, tels que l'acide polylactique (PLA), le poly(succinate de butyle) (PBS), le

polyhydroxyalcanoate (PHA) mais aussi des polymères d'amidon, sont développés pour répondre à ce problème [14]. Toutefois, les coûts de ces matières polymériques sont plus élevés lorsque comparés aux polymères pétrochimiques traditionnels.

Afin de minimiser les coûts de production des emballages alimentaires, de plus en plus de recherches sont réalisées dans le domaine des fibres naturelles. Ce domaine est prometteur, car il permet de revaloriser certains déchets comme la bagasse, qui est souvent brûlée dans les usines de production de sucre de canne [15]. D'ailleurs, celle-ci est maintenant transformée en produits en pâte moulée [12]. L'inconvénient de la bagasse pour une application au Québec est qu'elle est majoritairement produite au Brésil (721 millions de tonnes), en Inde (347 millions de tonnes), en Chine (123 millions de tonnes) et en Thaïlande (96 millions de tonnes) [16]. Elle ne représente donc pas une ressource locale.

Un des nombreux avantages des fibres naturelles est qu'elles proviennent le plus souvent de plantes permettant de capter du CO₂ pendant leur croissance, ce qui permet de réduire leur impact environnemental [17]. L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a réalisé en 2010 une étude pour faire l'inventaire des ressources forestières mondiales [18]. Elle relève que la quantité de carbone stockée de manière naturelle à travers de monde est de 652 371 millions de tonnes, dont 103 097 millions de tonnes stockées en Amérique du Nord (Figure 1-3) [18].

Région/sous-région	Carbone dans la biomasse		Carbone dans le bois mort et la litière		Carbone dans le sol		Stock total de carbone	
	millions de tonnes	tonnes/ha	millions de tonnes	tonnes/ha	millions de tonnes	tonnes/ha	millions de tonnes	tonnes/ha
Eastern and Southern Africa	15 762	58,9	3 894	14,6	12 298	46,0	31 955	119,4
Northern Africa	1 747	22,2	694	8,8	2 757	35,0	5 198	66,0
Western and Central Africa	38 349	116,9	3 334	10,2	19 406	59,1	61 089	186,2
Total Africa	55 859	82,8	7 922	11,7	34 461	51,1	98 242	145,7
East Asia	8 754	34,4	1 836	7,2	17 270	67,8	27 860	109,4
South and Southeast Asia	25 204	85,6	1 051	3,6	16 466	55,9	42 722	145,1
Western and Central Asia	1 731	39,8	546	12,6	1 594	36,6	3 871	89,0
Total Asia	35 689	60,2	3 434	5,8	35 330	59,6	74 453	125,7
Europe excl. Russian Federation	12 510	63,9	3 648	18,6	18 924	96,6	35 083	179,1
Total Europe	45 010	44,8	20 648	20,5	96 924	96,4	162 583	161,8
Caribbean	516	74,4	103	14,8	416	60,0	1 035	149,2
Central America	1 763	90,4	714	36,6	1 139	58,4	3 616	185,4
North America	37 315	55,0	26 139	38,5	39 643	58,4	103 097	151,8
Total North and Central America	39 594	56,1	26 956	38,2	41 198	58,4	107 747	152,7
Total Oceania	10 480	54,8	2 937	15,3	8 275	43,2	21 692	113,3
Total South America	102 190	118,2	9 990	11,6	75 473	87,3	187 654	217,1
World	288 821	71,6	71 888	17,8	291 662	72,3	652 371	161,8

Figure 1-3 : Quantité de carbone stockée dans les différentes parties de la forêt par région et sous-région en 2010 [18] reproduit avec permission

Ainsi, le bois en Amérique du Nord représente une matière première très intéressante pour répondre au problème du plastique. De plus, cette ressource offre une solution à faible coût et locale pour le Québec.

1.3 Entreprise partenaire : AecopaQ

AecopaQ est une entreprise québécoise qui produit des produits en pâte moulée. Cette entreprise a été fondée en 2013 à Montréal et possède aujourd'hui des installations à Joliette [19]. Ce projet de recherche a été réalisé en collaboration avec AecopaQ. L'ensemble des résultats sera donc exploité pour optimiser les formules utilisées actuellement ainsi que les installations.

Ce projet de recherche est effectué dans le cadre du programme Accélération du Mitacs. Ce programme permet à l'étudiant qui le suit d'accorder 50% de son temps à la recherche expérimentale, ici réalisée à Polytechnique Montréal et dont les résultats sont présentés dans ce mémoire. L'autre 50% du temps de l'étudiant est dédié à AecopaQ en tant qu'employé, il n'est donc pas dédié à la recherche mais au travail en entreprise. Lors des travaux en entreprise, les bilans

de matière et d'énergie ont été réalisés ainsi que l'installation et le lancement de la ligne de production. Ces travaux ne sont pas traités dans ce mémoire.

1.4 Objectif principal du projet de recherche

L'objectif principal de ce projet de recherche est de développer un emballage alimentaire à faible coût et de provenance locale.

Pour répondre à cet objectif, une étude approfondie des propriétés mécaniques et barrières de l'emballage en fonction de la quantité d'additif et du taux de raffinage sera faite. Cela permettra de proposer à AecopaQ des options respectant l'ensemble des limites posées par les clients en considérant le coût de production de l'emballage.

Ainsi, les objectifs spécifiques de cette recherche sont les suivants :

1. Déterminer les impacts des paramètres de fabrication sur le produit final
2. Minimiser les coûts de production en considérant les performances du produit final

1.5 Plan du mémoire

En excluant l'introduction, ce mémoire est organisé en 5 chapitres. D'abord, les concepts théoriques sont présentés au Chapitre 2 dans une revue de la littérature. Cette dernière est divisée en 7 parties. Dans un premier temps, la théorie liée au bois est exposée - cette partie discute des différents constituants du bois pour comprendre les différentes interactions que le bois et les fibres cellulosiques peuvent faire. Dans un deuxième temps, le procédé de mise en pâte du bois est expliqué. Cela permet au lecteur de comprendre étape par étape les modifications que les fibres subissent tout au long du procédé de mise en pâte. Dans un troisième temps, le principe du raffinage est expliqué. En effet, le raffinage a de nombreux effets sur les fibres, et cette partie aidera le lecteur à comprendre davantage la science derrière ces changements. Dans un quatrième temps, les propriétés typiques du papier sont énoncées ainsi que l'origine de ces dernières - les propriétés morphologiques, mécaniques et barrières y seront abordées. Dans un cinquième temps, une partie est consacrée au papier recyclé. Ce type de papier étant l'une des matières premières utilisées, il est nécessaire de mieux comprendre l'influence de l'utilisation du papier recyclé par rapport aux fibres vierges sur les propriétés finales des produits. Dans un sixième temps, une revue historique et des technologies utilisées aujourd'hui dans la fabrication des produits en pâte moulée est faite.

Dans un septième temps, les fluoropolymères sont étudiés, afin de comprendre l'origine de leurs propriétés si particulières, le lecteur verra que ces propriétés sont liées à leur composition chimique. De plus, leur impact environnemental est discuté. Finalement, les sous-objectifs du projet sont définis.

Par la suite, le Chapitre 3 présente la méthodologie qui a été utilisée afin d'atteindre l'objectif principal de ce projet. Ce chapitre étale le plan expérimental suivi. Celui-ci est donc composé d'une brève description des méthodes de caractérisation utilisées pour voir l'influence de la quantité d'additif et du taux de raffinage sur le produit final. Puis, la méthode liée au calcul du coût de production y est aussi présentée.

Dans le Chapitre 4, le lecteur pourra retrouver l'ensemble des résultats et leur interprétation concernant les deux sous-objectifs de ce projet. D'abord, l'influence des paramètres de fabrication sur les propriétés finales est présentée. Ensuite, les résultats découlant de l'analyse économique sont approfondis. Finalement, les conclusions des deux sous-objectifs permettent subséquemment de choisir la meilleure option à proposer à AecopaQ.

Le Chapitre 5 de ce mémoire fait la synthèse et présente les conclusions des travaux et des avancées qui ont été faits dans ce projet. Il présente également des recommandations pour de futurs travaux, faisant suite à ce projet. Enfin, des recommandations sont directement faites à AecopaQ afin de contribuer à l'amélioration continue du produit au niveau des impacts environnementaux.

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Matière première de la pulpe : le bois

Dans le but d'avoir une compréhension élargie du comportement des différents types de pulpe, il est primordial de s'intéresser à la matière première : le bois. Pour cela, les caractérisations du bois sont départagées en cinq catégories : au niveau de son intégralité - la structure de la tige ou du tronc ; au niveau macroscopique – la structure tissulaire ; au niveau microscopique – la structure de la cellule ; au niveau ultrastructurel – la structure de la paroi cellulaire ; au niveau biochimique – la composition biochimique de la paroi cellulaire [20].

2.1.1 Composition biochimique

Le bois est un composé organique, majoritairement composé de carbone à environ 49%, mais aussi d'oxygène à 44% et d'hydrogène à 6%. Du nitrogène et des composés inorganiques sont aussi présents dans sa composition tels que le sodium, le potassium, le calcium, le magnésium et le silicium. Ces derniers, sont utilisés pour les fonctions métaboliques des cellules et la croissance de l'arbre [20]–[22].

Ces éléments chimiques se retrouvent sous la forme de macromolécules, c'est-à-dire de polymères. Toutes les essences de bois sont constituées de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Selon le type de bois, les proportions d'hémicellulose et de lignine peuvent varier, en revanche, la proportion de cellulose reste similaire [20]–[22].

Tableau 2-1 : Proportions des substances macromoléculaires dans les parois cellulaires du bois [20]

Macromolécule	Résineux	Feuillus
Cellulose (%)	40-44	40-44
Hémicellulose (%)	30-32	15-35
Lignine (%)	25-32	18-25

La cellulose est un homopolymère linéaire constitué de molécules de glucose. Les chaînes de cellulose possèdent une polarité, car les deux extrémités de la molécule ne sont pas chimiquement équivalentes [23]. Cela lui permet de former des liaisons intramoléculaire ou intermoléculaire

comme le montre la Figure 2-1. Les liaisons hydrogène intramoléculaires permettent d'apporter une rigidité à la fibre, alors que les liaisons intermoléculaires permettent des agrégats supramoléculaires comme des fibrilles et des domaines cristallins. Ce sont les liaisons intermoléculaires de la cellulose qui sont responsables de la plupart de ses propriétés [20].

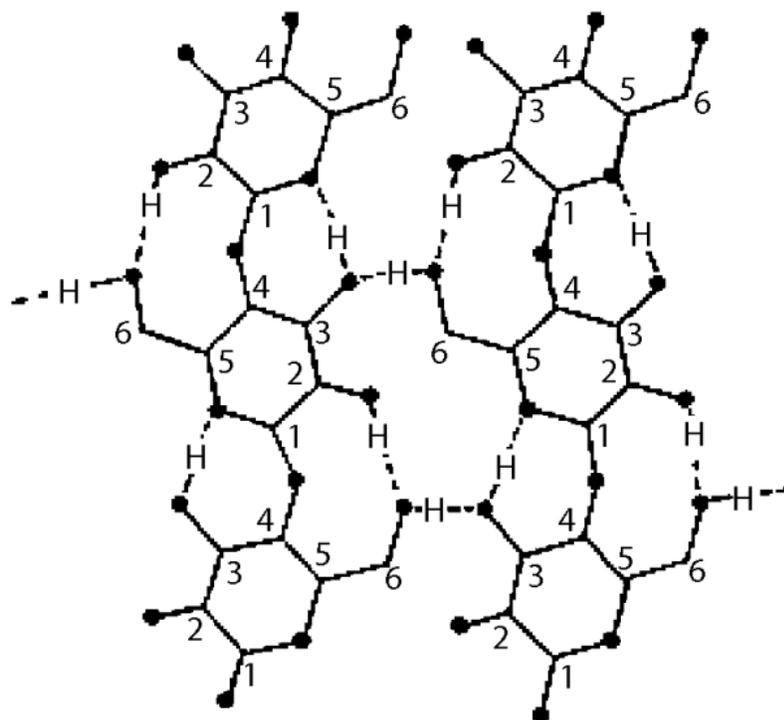


Figure 2-1 : Liaisons hydrogène intra et intermoléculaires de la cellulose [24]

Les hémicelluloses quant à elles sont des hétéropolysaccharides. Les chaînes d'hémicellulose peuvent être formées d'homopolymères (e.g. xylanes), ou d'hétéropolymères (e.g. glucomannanes). Les hémicelluloses sont différentes entre les résineux et les feuillus [20]–[22].

La lignine est le composant le plus abondant dans les parois cellulaires après la cellulose. Elle est également un polymère ayant une quantité variable d'une espèce à l'autre. Les résineux contiennent en général plus de lignine que les feuillus, (voir Tableau 2-1) ou que les plantes aquatiques [20]–[22]. Dans la plupart des utilisations, la lignine est partie intégrante du bois. En revanche, lors de la mise en pâte et du blanchiment, la lignine est libérée des parois cellulaires pour être valorisée.

De plus, le bois est composé d'extractifs, qui sont des composés organiques de masse moléculaires basses ou élevées. Ils peuvent être extraits à l'aide de solvant organiques ou d'eau chaude. Ce sont

des déchets du métabolisme végétal ne jouant aucun rôle intrinsèque dans les processus physiologiques de la plante [20]–[22]. Les extractifs ont une influence sur les propriétés physiques, chimiques, biologiques et optiques du bois.

Les inorganiques, quant à eux, représentent une minorité des composants du bois. Leur proportion dépend du type d'arbre, mais aussi de l'emplacement géographique de par les conditions du sol et climatiques. La majorité de ces composants se retrouvent dans les feuilles ou les aiguilles, puis de manière décroissante : dans l'écorce, les racines, les branches et finalement le tronc. Dans le tronc, la concentration de minéraux est plus importante au centre, appelé le bois de cœur, qu'à l'extérieur, appelé l'aubier. Les minéraux les plus présents sont le calcium, le potassium, le magnésium, le fer et le sodium. Bien qu'en faibles quantités ces composés sont importants au développement de l'arbre. Le calcium participe à la synthèse de la cellulose et des hémicelluloses et dans la lignification des parois cellulaires. Le potassium joue un rôle dans l'osmorégulation (régulation des sels) lors de la formation du xylème (canaux permettant le transport de l'eau et des nutriments du sol aux feuilles) [20].

2.1.2 Structure de la cellule

Comme vu précédemment, les principaux composés de la cellule du bois sont la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. La cellulose forme le squelette de la cellule, les hémicelluloses, la matrice et la lignine, le matériau d'enrobage. Comme le présente la Figure 2-2, la cellulose est partiellement cristalline et forme des fibrilles élémentaires grâce aux liaisons hydrogène. Les fibrilles élémentaires ont un diamètre moyen de 3,5 nm. Les microfibrilles sont, elles, formées d'agrégats de fibrilles élémentaires enveloppés de chaînes courtes d'hémicelluloses amorphes. Leur diamètre se situe entre 10 et 30 nm. Finalement, les microfibrilles sont le regroupement des microfibrilles enveloppé par la lignine et les hémicelluloses [20]–[22].

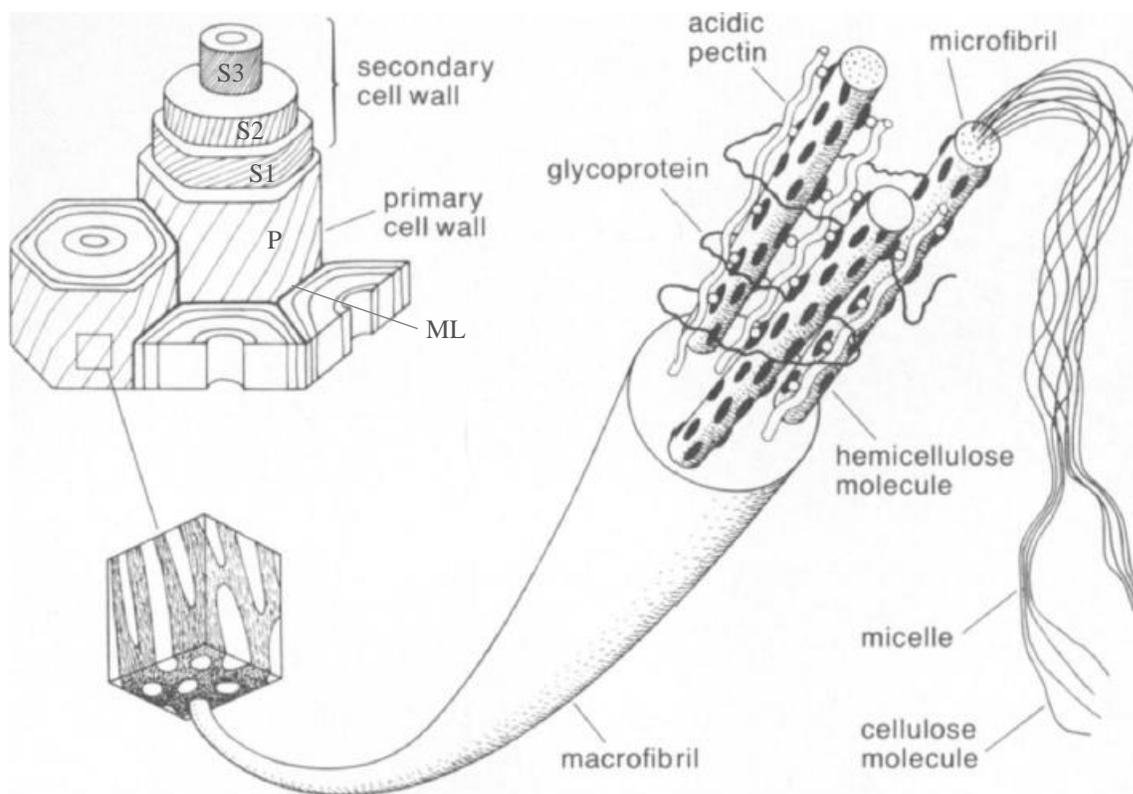


Figure 2-2 : Schéma d'une couche de la paroi cellulaire. Schéma d'une cellule de bois (en haut à gauche) [25]

La couche primaire (P) est formée lors de la croissance de surface de la cellule, alors que la couche secondaire (S) se forme lors de l'épaississement de la cellule. Les couches S1, S2 et S3 sont distinguées par l'orientation particulière des microfibrilles. La lamelle moyenne (*middle lamella*) (ML) permet de faire le lien entre les différentes cellules [20]–[22].

2.2 De l'arbre à la pâte

2.2.1 Préparation des copeaux

Avant d'être transformé en papier, l'arbre doit subir de nombreux traitements. Les premières transformations sont réalisées dans un parc à bois, où des rondins de bois, des résidus de bois et des copeaux de bois y sont stockés. La matière première en bois, arrivant sous différentes formes, doit être classée par catégories qui sont définies par la taille des morceaux.

La Figure 2-3 présente les étapes principales du prétraitement de la matière première.

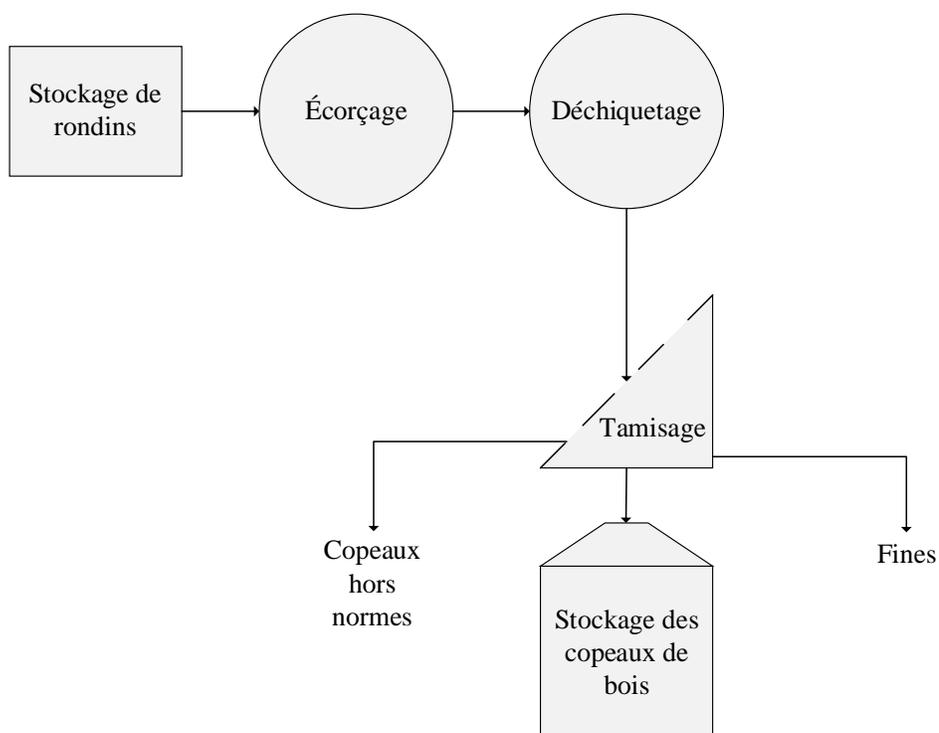


Figure 2-3 : Étapes de préparation des copeaux de bois

2.2.1.1 Écorçage

Les rondins de bois sont, dans un premier temps, démunies de leur écorce, ce qui est appelé « l'écorçage ». Cette étape est primordiale, car des taux d'écorces trop importants augmentent non seulement le temps de cuisson, ce qui réduit conséquemment l'efficacité du procédé, mais également une consommation plus importante de produits de blanchiment, causant de mauvaises propriétés de la pulpe [20]. Plusieurs technologies sont utilisées pour l'écorçage, les principales sont l'écorceuse à tambour, l'écorceuse rotative et l'écorceuse à anneau.

2.2.1.2 Déchiquetage

Une fois l'écorce ôtée des rondins, une étape de déchiquetage est nécessaire. En effet, cela s'explique par l'importance de la taille des copeaux de bois pour la préparation de la pâte chimique. Une uniformité dans la taille des copeaux va permettre aux produits chimiques utilisés de pénétrer de manière homogène dans ces derniers. Leur taille a aussi une influence sur le temps de cuisson de la pâte. La Figure 2-4 montre les dimensions standards des copeaux de bois [26], mais les dimensions peuvent varier en fonction du type de bois.

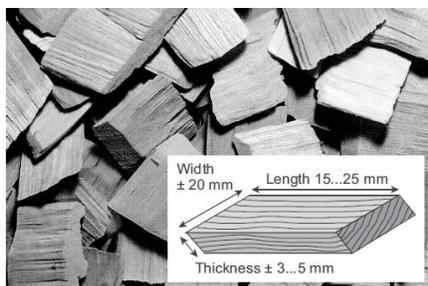


Figure 2-4 : Dimensions standards des copeaux de bois [20]

Le déchiquetage nécessite un ajustement permanent entre le dommage mécanique fait aux fibres par le procédé de coupe et l'imprégnation de la liqueur dans les copeaux. Les copeaux doivent avoir une coupe la plus nette possible afin d'éviter une surface rugueuse et des fissures. Ces défauts sont plus souvent observés lors de l'utilisation de bois jeune. Les failles dans les copeaux vont faire en sorte que les produits chimiques vont pénétrer plus en profondeur et ainsi causer un gonflement plus important des parois cellulaires, réduisant la solidité des fibres. Ces effets sont moins remarquables lors de la mise en pâte par procédé Kraft. Pour cette étape du procédé différentes technologies sont disponibles, mais la plus répandue est la déchiqueteuse à disque [20].

2.2.1.3 Tamisage

Comme expliqué précédemment, la taille des copeaux est d'une importance cruciale. Afin d'assurer une régularité dans les dimensions des copeaux de bois, des tamis sont utilisés. Il existe deux grandes familles de tamisage : le tamisage mécanique avec des tamis vibratoires, giratoires, à disques, etc. et les tamis à air. Comme l'illustre la Figure 2-5, les tamis mécaniques permettent de séparer les copeaux de taille standard, des fines et des copeaux plus gros qui vont être broyés à nouveau [20].

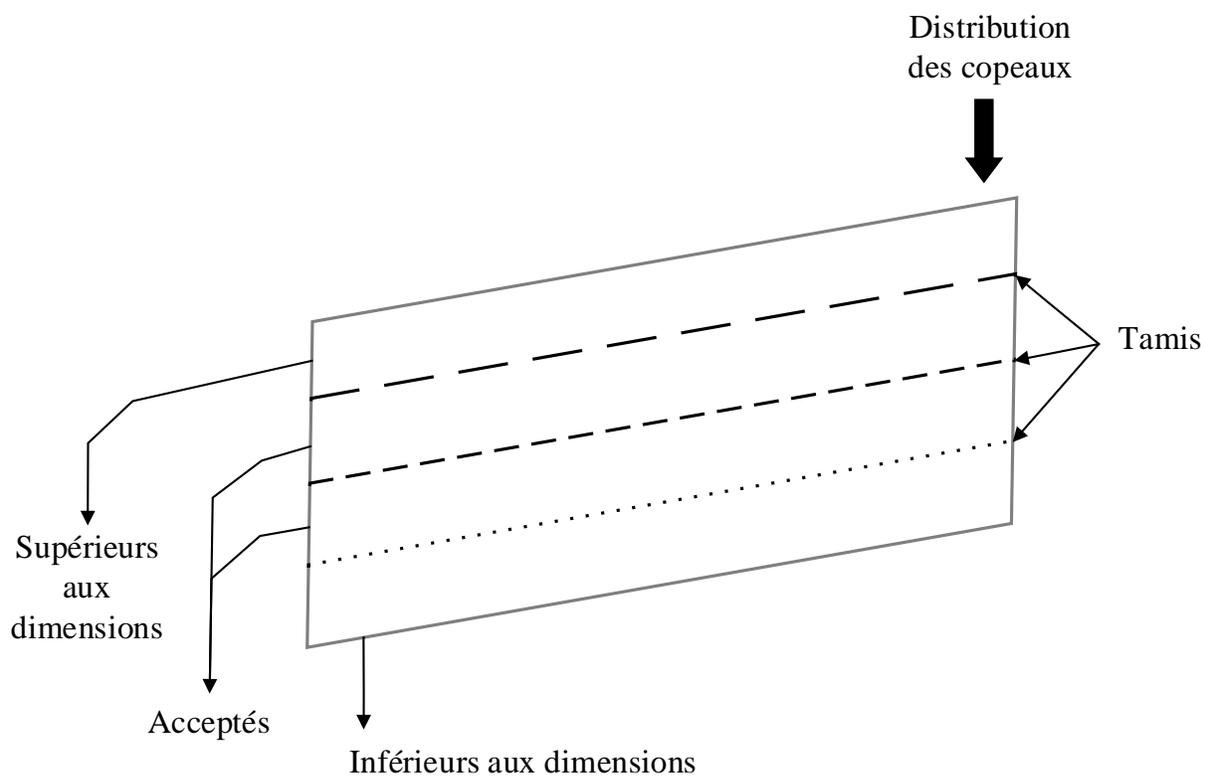


Figure 2-5 : Exemple de tamis giratoire (adapté de [20])

Le tamisage à l'air permet la même séparation des copeaux en utilisant un flux d'air, ce qui va permettre de séparer les copeaux en fonction de leur taille et de leur densité comme le montre la Figure 2-6 [20].

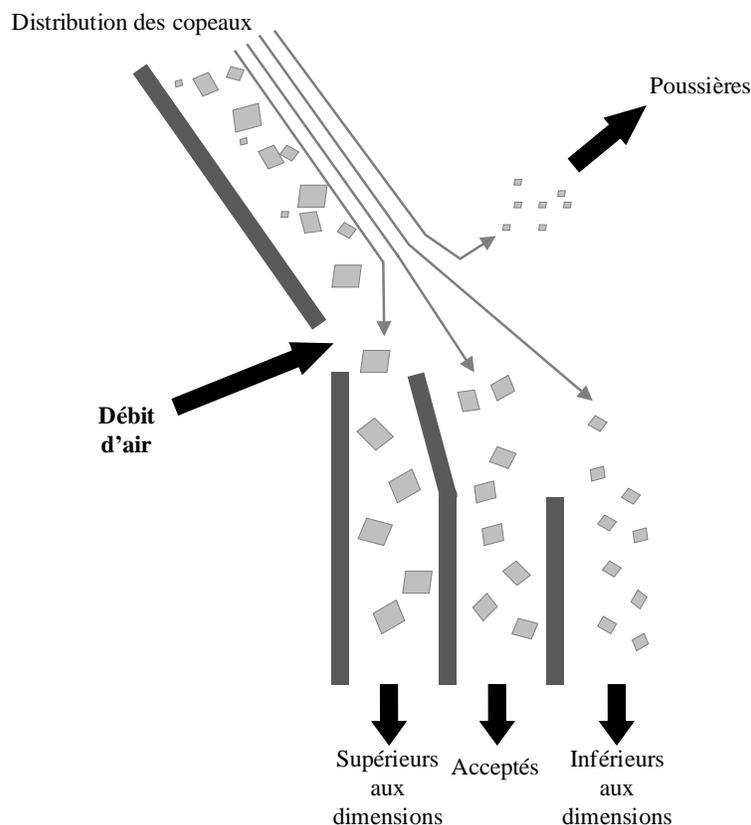


Figure 2-6 : Principe de fonctionnement du tamisage à l'air (adapté de [20])

2.2.2 Procédés chimiques de mise en pâte

Les procédés de mise en pâte peuvent être opérés de manière mécanique, chimique ou par une combinaison des deux, appelée « semi-chimique ». Le procédé de mise en pâte permet de transformer les copeaux de bois en une matière fibreuse, appelée « pâte » ou « pulpe ». Les procédés chimiques sont les plus utilisés avec plus de 77% de la totalité des procédés de mise en pâte à travers le monde. Ils permettent de dégrader et dissoudre la lignine à l'aide de réactions chimiques à des températures élevées. Malheureusement, ces réactions causent une dégradation d'une partie des hémicelluloses et de la cellulose. Pour un taux de délignification de 90%, un rendement de fibre de 45% à 55% est généralement atteint. Afin de limiter les pertes, les réactions chimiques de délignification doivent être arrêtées, mais il est possible d'atteindre des taux de délignification plus élevés en aval du procédé lors de l'étape de blanchiment [20].

Il existe trois types de procédé de mise en pâte chimique : le procédé aux sulfates, appelé procédé Kraft, celui aux sulfites et celui à la soude. Le procédé Kraft est le plus largement utilisé, il

représente presque 90% des procédés chimiques, alors que le procédé aux sulfites compte pour environ 5% et le procédé à la soude n'est que très peu utilisé, pour les plantes annuelles et les feuillus [20]. Ici, seul le procédé Kraft est à l'étude puisque les matières premières utilisées dans ces travaux sont toutes issues de ce type de procédé.

2.2.2.1 Procédé Kraft

Le procédé Kraft consiste en plusieurs étapes pour passer des copeaux de bois à la pulpe. Dans un premier temps, une étape de délignification est nécessaire, suivie par un lavage, puis le blanchiment de la pâte et le séchage. Un schéma de ce procédé est présenté à la Figure 2-7.

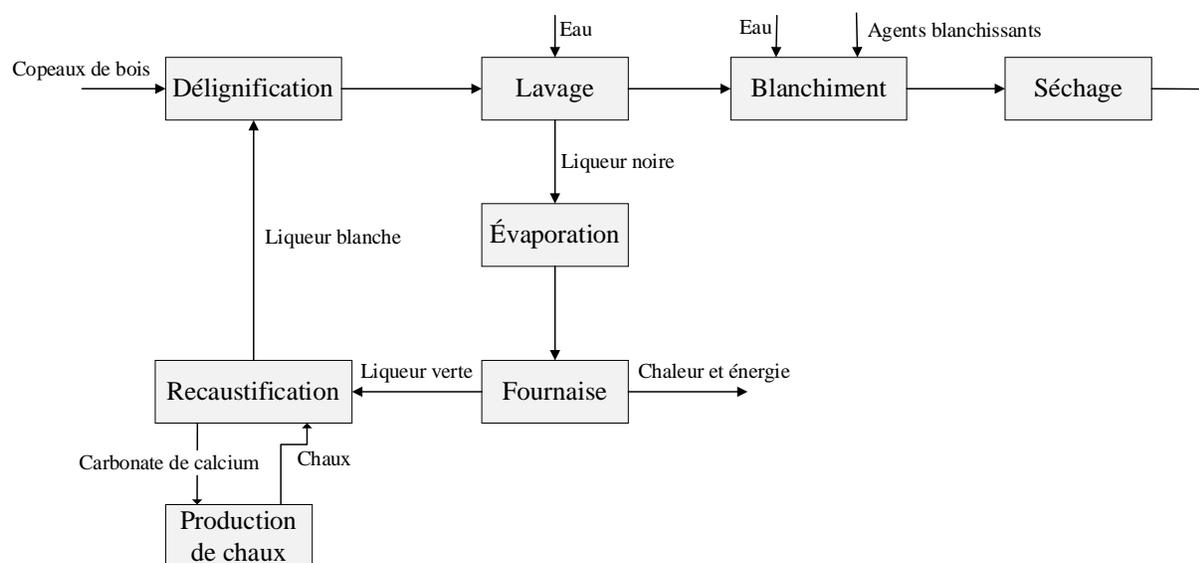


Figure 2-7 : Schéma du procédé de mise en pâte Kraft

2.2.2.1.1 Délignification

Dans l'unité de délignification, de la liqueur blanche, une solution de soude caustique, est utilisée. Ce sont grâce aux ions d'hydrosulfides qu'une meilleure délignification est possible pendant le temps de cuisson, car ils permettent une délignification sélective, alors que la cuisson caustique est non sélective. La délignification se produit en trois étapes : initiale, de masse (*bulk*) et résiduelle. Dans un premier temps, les liaisons éther des composés phénoliques de la lignine sont cassées, ce

qui permet de dissoudre environ 15% à 25% de la lignine. Par la suite, les liaisons des composés non-phénoliques sont brisées pour finalement laisser place à la délignification résiduelle permettant de dissoudre encore 10% à 15% de la lignine. Au total, un taux de délignification d'environ 90% est atteint. Lors de cette étape, la lignine va se dissoudre dans la liqueur et va ainsi être séparée. En revanche, ce procédé dégrade aussi les carbohydrates qui sont désirables (cellulose et hémicellulose), ainsi le temps et les températures de cuisson deviennent des paramètres critiques doivent être contrôlés afin de ne pas trop endommager la pâte. Il est à noter que la liqueur blanche enrichie de lignine s'appelle la liqueur noire [20].

2.2.2.1.2 Lavage

Une fois la lignine retirée, la pâte et la liqueur noire sont traitées dans une unité de lavage. Cette unité, fonctionnant le plus souvent à contre-courant, permet de séparer la liqueur noire de la pâte. Il est important de séparer la pâte des solides dissouts dans la liqueur. En effet, une grande quantité de solides dissouts dans la pâte affecte l'étape suivante de blanchiment et peut engendrer une augmentation des coûts [20].

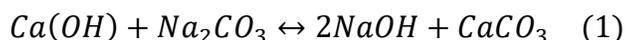
Le mélange de liqueur noire et de pâte est appelé matelas de pulpe et il est constitué de trois phases. Il y a la phase de fibres solides, qui est la phase désirée ; la phase de liqueur noire libre qui est autour des fibres et donc facile à séparer ; et la phase de liqueur piégée à l'intérieur et entre les fibres. Afin de séparer les fibres de la liqueur, le matelas de pulpe est placé dans un filtre rotatif dans lequel de l'eau est envoyée perpendiculairement. La phase de liqueur noire libre contenant les solides dissouts est récupérée avec l'eau facilement. En revanche, pour la liqueur piégée à l'intérieur et entre les fibres un différentiel de pression est nécessaire, car autrement le transfert de masse au travers des fibres se ferait par diffusion. Concernant les fibres, une petite quantité de solides dissouts peut être liée aux fibres et est donc pratiquement impossible à enlever [20].

Afin de minimiser la quantité d'eau à utiliser pour la séparation des solides dissouts dans la pâte, cette unité fonctionne à contre-courant. La quantité d'eau utilisée doit être minimisée afin d'éviter des coûts énergétiques trop importants à l'étape d'évaporation de la liqueur noire.

2.2.2.1.3 De la liqueur noire à la liqueur blanche

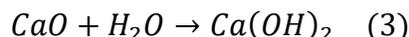
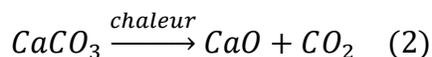
La liqueur circule en boucle fermée dans le procédé Kraft, ainsi la liqueur noire récupérée après l'unité de lavage est envoyée dans une cascade d'évaporateurs afin de la concentrer. Une fois la

liqueur noire concentrée, elle est envoyée dans une fournaise pour augmenter la concentration jusqu'à 80% de solides. Dans la fournaise, les composés organiques sont brûlés et la chaleur générée est réutilisée dans le procédé. Dans les usines de mise en pâte modernes, la totalité de l'énergie récupérée est utilisée rendant ainsi les usines auto-suffisantes en chaleur et en énergie. Finalement, la liqueur noire dépourvue de ses composés organiques, est à nouveau diluée pour obtenir la liqueur verte. Cette dernière subit une réaction de caustification, afin de convertir le carbonate de sodium (Na_2CO_3) en hydroxyde de sodium (NaOH) par une réaction avec l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)) [20]. L'équation 1 suivante décrit cette réaction.



Une solution de carbonate de calcium (CaCO_3) et d'hydroxyde de sodium est donc obtenue. Le carbonate de calcium est précipité et séparé de la liqueur, résultant en l'obtention de la liqueur blanche, qui est retournée à la première étape de délignification.

Le carbonate de calcium est lui chauffé à haute température (500°C à 1000°C) dans un four rotatif pour obtenir de la chaux (CaO), qui réagit à son tour avec de l'eau pour obtenir de l'hydroxyde de calcium [27]. Ces réactions sont décrites dans les équations 2 et 3.



2.2.2.2 Blanchiment

Le procédé de blanchiment de la pulpe est facultatif. Il est uniquement nécessaire lorsqu'une pâte blanche est souhaitée. Les pâtes de résineux non blanchies ayant subies un traitement Kraft contiennent encore entre 3% et 6% de lignine [20].

Pour obtenir une pâte blanchie, les chromophores (molécules responsables de la couleur) doivent être retirés. Pour cela, des oxydants de chlore et d'oxygène étaient habituellement utilisés. Toutefois, à la fin de années 1980, des préoccupations concernant les composés organiques de chlore ont été relevées. Ces préoccupations menèrent au développement de procédés de blanchiment sans chlore, et depuis, les principaux agents de blanchiments sont l'oxygène, le peroxyde d'hydrogène et l'ozone. Ces agents vont réagir avec le reste de lignine présente dans la

pâte par oxydation [20]. Le Tableau 2-2 présente les différents types de réaction et les sites de réaction en fonction des agents blanchissants.

Tableau 2-2 : Différents agents blanchissants de la pâte et type de réaction associée [20]

Agent blanchissant	Oxygène	Ozone	Peroxyde d'hydrogène
Formule chimique	O ₂	O ₃	H ₂ O ₂
Type de réaction	Électrophile	Électrophile	Nucléophile
Sites réactionnels sur les structures ligneuses	Groupements phénoliques libres, double liaison	Oléfiniques et aromatiques	Groupements carbonés, double liaison

Ces réactions permettent de casser des liaisons de la lignine et d'ainsi retirer les chromophores. Une pâte blanchie est donc dépourvue de la presque totalité de sa lignine.

2.2.2.3 Séchage

Finalement, la pâte est séchée et formée à l'aide de rouleaux compresseurs. Le séchage permet d'évaporer l'eau présente dans la pâte jusqu'à une humidité de 15% à 10%. Le transfert de chaleur peut être fait par un flux d'air chaud, de vapeur ou par un rayonnement infrarouge. En évaporant l'eau, les fibres vont former des liaisons hydrogène, ce qui permet de donner de la rigidité aux feuilles [28]. La Figure 2-8 montre le type de machinerie utilisée pour cette étape.



Figure 2-8 : Équipement de séchage de la pulpe [29]

Après le séchage les feuilles sont découpées et empilées pour former des ballots de pâte.

2.3 Raffinage

Le raffinage de la pâte est utilisé pour améliorer la qualité des fibres présentes dans la pulpe. C'est un traitement mécanique nécessitant un équipement spécialisé appelé un raffineur.

Il existe différents types de raffineurs industriels : raffineur à disques, conique et cylindrique. Les raffineurs sont adaptés par les manufacturiers en fonction des besoins des clients et de la capacité de production, cela permet de réduire leur consommation énergétique. Au niveau laboratoire, les raffineurs les plus utilisés sont la pile raffineuse PFI et le raffineur Valley Beater [30].

Ces équipements vont appliquer une force de compression et de cisaillement sur les fibres à l'aide de deux plaques, l'une étant un stator et l'autre un rotor. Pour les raffineurs à disques, la pulpe va rentrer dans le raffineur par le centre du stator et va être poussée vers l'extérieur des disques. La Figure 2-9 (droite) présente le système de fonctionnement d'un raffineur à disque. Les disques ont des plaques avec des motifs (*patterns*). Les Figure 2-9 (gauche) et Figure 2-10 présentent la géométrie de ces plaques.

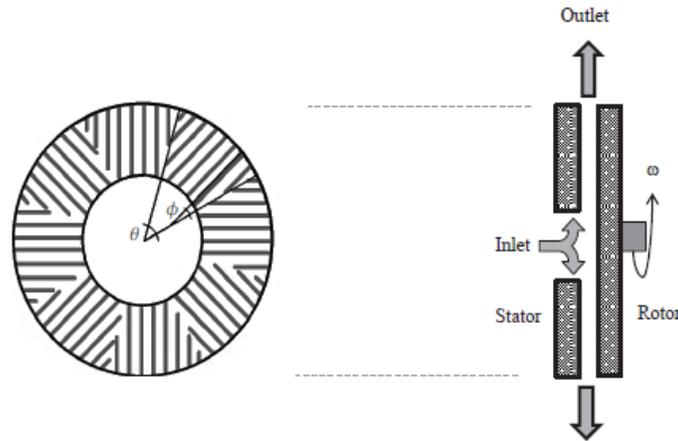


Figure 2-9 : Motifs présents sur les plaques de raffineur à disques (gauche) et circulation du flux dans le raffineur (droite) [31]

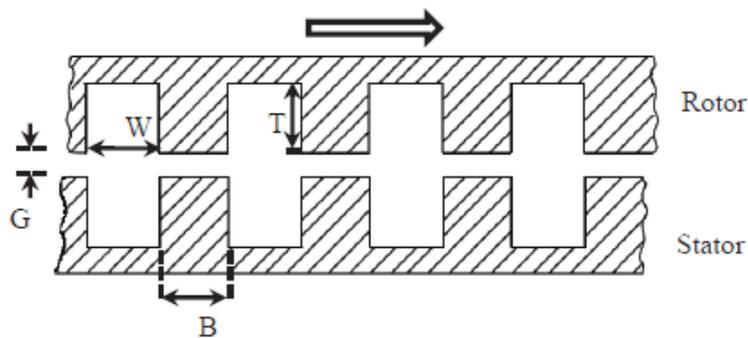


Figure 2-10 : Géométrie des plaques de raffinage, vue transversale [31]

Les paramètres de dimensionnement principaux des plaques sont la largeur de la cavité de la plaque (W) (*groove width*), la profondeur de la cavité (T) (*groove depth*), la largeur de l'arrête (B) (*bar width*), et l'espacement entre les plaques (G).

Le raffinage est séparé en trois étapes qui sont illustrées à la Figure 2-11. La première permet d'accumuler les fibres sur les barres du raffineur (a). La deuxième permet d'appliquer une force de compression sur les fibres à l'aide de l'alignement du stator et du rotor (b). La troisième va appliquer une force de cisaillement sur les fibres dû au mouvement du rotor (c) [30].

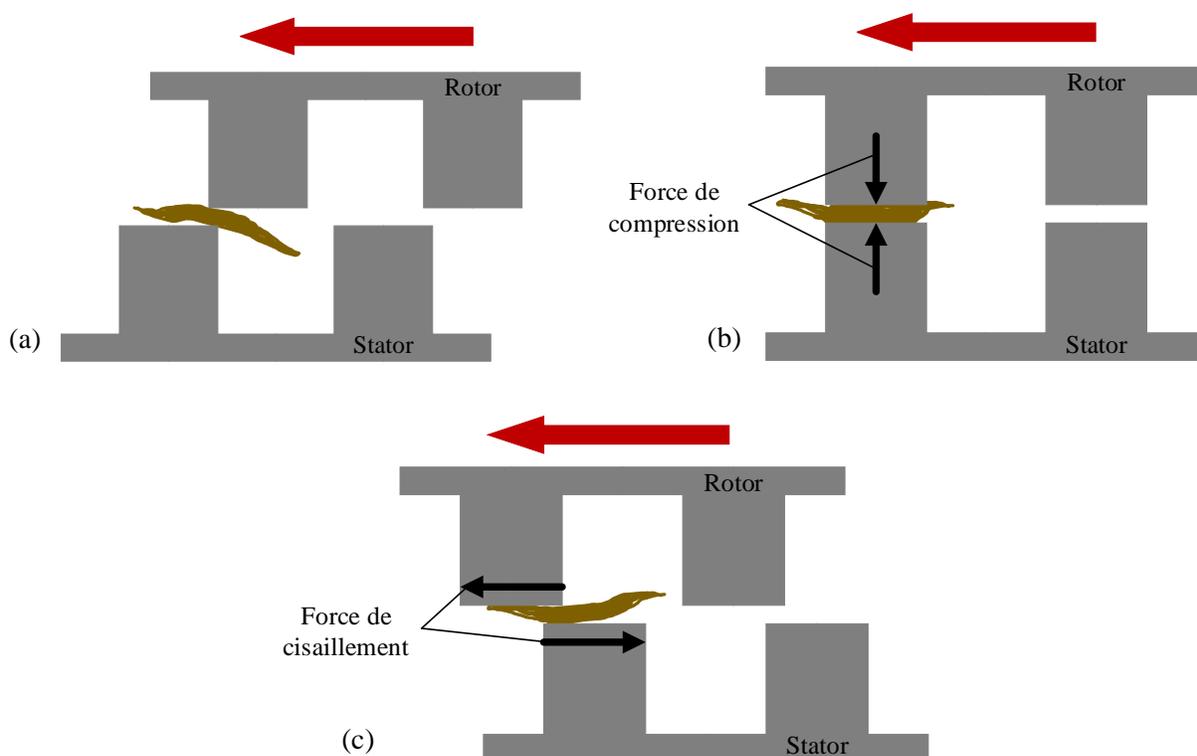


Figure 2-11 : Principe du raffinage : Étape 1 (a), étape 2 (b) et étape 3 (c) (adapté de [30])

Ce traitement mécanique apporte de nombreux changements dans la structure des fibres : au niveau structurel, tels que la fibrillation (externe et interne), le raccourcissement des fibres, le renforcement des fibres et la formation de fines ; mais aussi au niveau chimique, telles que la cristallinité de la cellulose et la redistribution chimique à la surface [30].

2.3.1 Fibrillation interne

La compression cyclique du raffinage permet la délamination des couches P et S1 de la cellule en brisant les liaisons entre les fibrilles. Cela permet un meilleur gonflement de fibres, puisque, les couches P et S1 sont de nature hydrophobique, donc lorsqu'elles sont délaminées les fibres ont une meilleure affinité avec l'eau. Cela rend la fibre plus flexible, la flexibilité jouant un rôle important dans les propriétés optiques et physiques de la pâte et du papier, notamment au niveau de la rigidité du papier. La fibrillation interne permet de rapprocher les fibres et donc de créer des liaisons entre fibres plus fortes [30].

2.3.2 Fibrillation externe

La fibrillation externe est le fait que les fibrilles se décollent de la fibre en y restant attachées. Cela permet donc une plus grande surface spécifique des fibres. Lors de la fibrillation externe, des composés hydrophiliques sont relâchés et produisent une couche gélatineuse. Cette matière gélatineuse améliore les liaisons interfibres. Il semblerait que la fibrillation externe soit la raison principale du renforcement des liaisons interfibres. Néanmoins, comme le raffinage crée plusieurs changements structurels, le rôle précis de la fibrillation externe reste un sujet controversé [30].

2.3.3 Formation de fines

Lors du raffinage, les fibres peuvent être raccourcies et ainsi former des fines. Les fines sont des morceaux de paroi P et S de moins de 0,3 mm. Elles ont tendance à avoir une capacité de gonflement supérieure à celle des fibres, ce qui affecte l'égouttage entre les fibres en augmentant le temps d'égouttage. En revanche, elles ont une grande surface de contact ce qui permet d'optimiser les liaisons des fibres [30].

2.3.4 Raccourcissement des fibres

Un des inconvénients du raffinage est le raccourcissement des fibres. Une force de cisaillement trop grande peut entraîner la rupture des fibres [30]. Cela est à éviter, car de longues fibres sont désirées pour apporter de la structure au papier.

2.3.5 Redressement des fibres

Les fibres ont tendance à avoir une courbure après les traitements de mise en pâte. La notion de courbure des fibres vient d'un ratio entre la longueur du contour de la fibre et de sa longueur projetée. Le raffinage permet le redressement des fibres, améliorant ainsi la distribution des forces dans le réseau de fibres et augmentant la capacité de charge mécanique qui peut être appliquée sur le papier. De plus, il permet d'augmenter le module élastique et la résistance à la traction du papier [30].

2.3.6 Cristallinité de la cellulose

La cristallinité de la cellulose joue un rôle important dans la résistance à la traction et la rigidité. Ainsi, une augmentation de la cristallinité engendre une augmentation de ces propriétés, diminue

les réactions chimiques et décroît la capacité des fibres au gonflement. Il a été observé que, dans un premier temps, le raffinage permet d'augmenter la cristallinité de la cellulose et qu'après un certain temps de raffinage, la cristallinité décroît. Cependant, des études supplémentaires seraient nécessaires pour déterminer l'effet réel du raffinage sur la cristallinité de la cellulose [30].

2.3.7 Redistribution des composés chimiques à la surface

Le raffinage cause la délamination des couches P et S1, ce qui permet d'exposer les composés chimiques présents dans les fibres. Il a été montré que le raffinage permet une plus grande exposition des carbohydrates, et donc, une augmentation des liaisons hydrogène [30].

2.4 Propriétés du papier

Il existe différentes qualités (*grade*) de papier en fonction de leur utilisation finale, et donc, chaque qualité de papier ne nécessite pas les mêmes propriétés du produit final. Ces qualités de papier sont séparées en quatre catégories : le papier d'écriture et d'impression ; le papier ou carton pour l'emballage et le transport ; les papiers mouchoirs, essuie-tout, toilettes et les papiers de spécialité [32].

2.4.1 Propriétés morphologiques

2.4.1.1 Grammage

Le grammage est une mesure fondamentale dans le domaine des pâtes et papiers. Elle représente la masse de papier par unité de surface et s'exprime en g/m^2 , elle est notée W dans la littérature et sera notée BW, pour *basis weight* dans ce mémoire (l'acronyme W étant déjà utilisé pour un paramètre du raffinage). Historiquement, le papier se vendant au poids, les clients voulaient savoir quelle surface de papier ils achetaient pour le poids, expliquant l'usage du grammage [33]. Depuis, la mesure de grammage est encore utilisée et permet de calculer la densité du papier, qui est un paramètre important. En fonction de l'utilisation, le grammage du papier n'est pas le même [32]. Le Tableau 2-3 présente différents grammages en fonction de l'application.

Tableau 2-3 : Grammage du papier en fonction de l'application [32]

Application	Grammage (g/m²)
Mouchoirs, essuie-tout, toilettes	< 40
Cigarette	15
Journal	40
Écriture et impression	40-120
Papier cartonné	120-200
Carton	200

2.4.1.2 Épaisseur

Lorsque le papier est utilisé, il est souvent vu comme une surface plane, mais il est important de considérer le papier comme une structure en trois dimensions. Pour cette raison, l'épaisseur est un paramètre important à considérer [32]. Elle est notée e . De plus, ce paramètre permet de faire le lien entre le grammage et la densité du papier.

2.4.1.3 Densité

La densité est un paramètre très important dans la fabrication de papier car elle a une influence sur d'autres propriétés. En effet, la densité reflète le taux de liaisons des fibres dans la feuille de papier, une densité élevée traduit une importante quantité de liaisons des fibres dans la feuille de papier. La densité permet de jouer sur les propriétés finales du produit, par exemple, une faible densité est désirable pour les papiers de type absorbant [34]. Elle est notée ρ .

2.4.2 Propriétés mécaniques

2.4.2.1 Résistance à la traction

La résistance à la traction est utilisée pour savoir la charge qui peut être appliquée au papier sans qu'il ne se déchire. Elle est influencée par de nombreux paramètres de la pâte.

La résistance à la traction dépend de la résistance de la fibre individuelle [35] et de la capacité des fibres à former des liaisons interfibres [35], [36]. Également, la capacité de liaison des fibres dépend de la surface des fibres disponible [37]. La cellulose a une affinité avec elle-même du fait qu'elle possède des atomes d'hydrogène, ce qui lui permet de créer des liaisons hydrogène. Les

liaisons hydrogène sont les interactions principales des liaisons interfibres. Cela est possible seulement si les fibres sont très rapprochées, car elles sont capables de se lier lorsqu'elles se trouvent entre 0.25-0.35 nm l'une de l'autre [38].

La capacité de gonflement des fibres est indirectement liée à la résistance à la traction, puisque la capacité de gonflement dépend de la capacité de fibrillation des fibres et de la quantité de fines [37]. En effet, les groupements chimiques à la surface de la paroi cellulaire permettent un meilleur gonflement des fibres [37]. Il a aussi été démontré que la rigidité du papier est affectée par l'angle microfibrillaire. Ce dernier est défini par l'angle entre l'axe de la paroi cellulaire et les fibrilles, comme les macrofibrilles sont enroulées autour de l'axe de la paroi cellulaire. Ainsi, un angle fibrillaire faible permet une meilleur rigidité [39].

La résistance à la traction est affectée par de nombreux paramètres, c'est pour cela que les différents papiers ont des résistances à la traction très différentes en fonction des traitements chimiques et mécaniques qu'ils ont subi. La fourchette de résistance à la traction pour le papier va de 20 MPa à 200 MPa [40].

2.4.3 Propriétés barrières

Les propriétés barrières présentées ici sont les propriétés nécessaires pour une application alimentaire.

2.4.3.1 Résistance à l'eau

Le papier vierge a tendance à absorber la vapeur d'eau présente dans l'environnement. Afin d'augmenter la résistance à l'eau, des additifs sont utilisés, comme les anhydrides alcénylesucciniques (ASA) et les dimères d'alkylcétène (AKD). La méthode de caractérisation de cette propriété la plus commune est le Cobb Test (voir section 3.5.4) [40].

2.4.3.2 Résistance à l'huile

Le papier est de nature oléophile, ce qui est non désiré, alors afin de le rendre oléophobe, des additifs sont utilisés comme les composés fluorés [41]. Afin de tester la résistance aux corps gras du papier, le Kit Test est employé (voir section 3.5.3).

2.5 Papier recyclé

Depuis la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, l'utilisation de fibres recyclées comme matière première n'a cessé d'augmenter. En effet, par souci de respect de la nature et de l'importance du recyclage, le papier est de plus en plus recyclé. En 2018, au Québec, 71% des quantités de matières résiduelles de papier et de carton ont été acheminées à des fins de recyclage [42].

2.5.1 Procédé de remise en pâte

Afin de nettoyer les fibres de papier et de carton déjà utilisées dans le but de recréer de la matière première, plusieurs étapes sont nécessaires. Dans un premier temps, de l'eau est ajoutée avec les papiers et cartons recyclés dans un pulpeur, avec addition facultative d'agents mouillants et anti-moussants. Ces derniers vont permettre de diminuer la tension de surface et d'aider à disperser les cires, la poix, etc. présentes sur certains types de papier. Ces additifs permettent donc d'aider à défibrer les fibres. Les contaminants et déchets les plus gros vont se déposer au fond du pulpeur et vont être retirés [43]–[45].

Par la suite, un nettoyage à haute consistance est réalisé. Il permet d'enlever les déchets de 1 mm à 10 mm à l'aide de cyclones. La pulpe est ensuite passée dans des tamis qui vont permettre d'enlever tous les déchets de plus de 2 mm, qui n'ont pas pu être retirés à l'étape précédente [43]–[45].

La pulpe va être diluée à nouveau jusqu'à une basse consistance afin de subir un procédé de désencrage. La plupart des procédés de désencrage utilise le principe de flottation. Des produits chimiques et de l'air sont introduits par le bas de l'équipement. L'encre va s'accrocher aux bulles et se retrouver à la surface pour être retirée facilement. Différents produits chimiques sont utilisés en fonction du type de papier recyclé et du type de papier qui veut être fabriqué. En voici quelques-uns : l'hydroxyde de sodium, l'acide sulfurique, les sels de calcium, etc. Après le désencrage, la pulpe est à nouveau filtrée pour enlever les particules de déchets de plus petite taille et pour enlever les fines. Finalement, si désiré, un procédé de blanchiment peut être réalisé [43]–[45].

2.5.2 Propriétés des pâtes recyclées

De manière générale, le recyclage affecte négativement les propriétés mécaniques du papier. En effet, la résistance à la traction, la résistance à l'éclatement et la densité diminuent lorsque de la

pâte recyclée est utilisée. Comme le montre les travaux de Wistara et Young [37], pour des mises en pâte à 5% de consistance, la résistance à la traction, la résistance à l'éclatement et la densité apparente sont respectivement de 97.8 Nm/g, 8.76 kPa.m²/g et 0.74 g/cm³ pour la pâte non recyclée. Alors que pour la pâte recyclée une fois, les résultats suivants sont obtenus : 84.9 Nm/g, 7.42 kPa.m²/g et 0.71 g/cm³. Et pour un deuxième cycle de recyclage, les propriétés diminuent encore avec 81.3 Nm/g, 6.75 kPa.m²/g et 0.69 g/cm³. Comme vu précédemment dans la partie 2.4.2.1 sur les propriétés du papier, ces résultats s'expliquent par une diminution de la capacité de gonflement des fibres lors du recyclage, ce phénomène est appelé l'hornification de la cellulose. Cela engendre donc une difficulté des fibres à créer des liaisons entre elles à cause des dommages infligés à répétition lors des procédés de recyclage [37]. Les fibres recyclées sont endommagées, notamment, avec leur nombre plus faible de microfibrilles et la présence de petites failles.

De plus, la diminution de la concentration de carboxyles avec le recyclage, semble avoir un effet sur l'ensemble de leurs résultats. Car malgré l'utilisation de traitements chimiques, les capacités de liaisons ne sont pas augmentées et les propriétés physiques restent diminuées. Le gonflement de la cellulose ne semble pas améliorer les propriétés physiques, et les pertes d'hémicelluloses ont un rôle important dans la diminution des propriétés physiques [37].

Concernant les propriétés de surface des fibres avec le recyclage, Wistara, Zhang et Young [46] montrent que malgré une meilleure mouillabilité des fibres recyclées, ces changements n'affectent pas de manière importante les caractéristiques intrinsèques des fibres recyclées. De plus, l'augmentation des hémicelluloses à la surface des fibres n'engendre pas une amélioration des propriétés, car les pertes d'hémicelluloses dans l'intérieur des fibres sont trop importantes. Aussi, les auteurs relèvent que le recyclage des fibres n'affecte pas la cristallinité de la pulpe, mais augmente plutôt celle des fines.

2.6 Produits en pâte moulée

Les produits en pâte moulée sont majoritairement utilisés dans l'industrie de l'emballage des produits manufacturés et dans l'emballage alimentaire sous forme de barquette ou de contenant. Pendant très longtemps, leur utilisation était limitée aux boîtes d'œufs, mais l'aspect environnemental de ces produits leur a permis dans les dernières années de connaître une demande croissante. Au niveau académique, ce domaine est reconnu pour être peu connu et mal compris par

manque d'études. Tous les aspects des pâtes moulées et de leurs propriétés ne sont pas encore totalement compris [12].

2.6.1 Historique des produits en pâte moulée

À la moitié du XIX^{ème} siècle, la consommation de masse du papier fait baisser sa valeur commerciale, ce qui entraîne l'émergence de nouvelles applications pour le papier. Ainsi, la première méthode pour fabriquer des produits en pâte moulée apparaît en 1890 [47] et le premier brevet d'un équipement est déposé en 1903 [48]. Rapidement les premiers produits en pâte moulée font leur apparition avec les boîtes d'œufs inventées et produites par le canadien Joseph Coyle. Puis, les applications de cette technologie se multiplient, simplement en changeant la forme de l'emballage [12].

Aujourd'hui, les produits en pâte moulée sont majoritairement utilisés dans le domaine de l'emballage industriel et alimentaire [12]. Avec l'augmentation de la demande pour des emballages écologiques et l'interdiction prochaine du plastique à usage unique, de nouveaux produits en pâte moulée ont vu le jour. Les débouchés commerciaux sont notamment pour la fabrication de bouteilles, par exemple pour l'eau (voir Figure 2-12), la bière et le savon à lessive.



Figure 2-12 : Bouteille faite à base de pâte moulée de Paper Water BottleTM [49]

2.6.2 Classification des produits en pâte moulée

Les produits en pâte moulée peuvent être classés en 4 catégories d'après l'International Molded Fiber Association (IMFA) [50]. La première catégorie regroupe les produits avec des bords épais (*thick wall*). Ces produits sont moulés à l'aide d'un seul moule et ont une épaisseur de 5 mm à 10 mm et sont ensuite séchés dans un séchoir. La face du produit contre le moule a un fini plus lisse, alors que la face opposée possède un fini rugueux. Les produits de cette catégorie sont utilisés pour emballer des produits volumineux tels que des meubles ou des pièces de voiture [12]. La deuxième catégorie, appelée moulage par transfert (*transfer moulding*), comme les boîtes d'œufs, permet d'obtenir des produits de 3 mm à 5 mm d'épaisseur. Les produits sont formés à l'aide d'un moule de formage et d'un moule de transfert et sont également séchés dans un séchoir. La troisième catégorie, les produits thermoformés (*thermoformed*) ont une épaisseur de quelques millimètres seulement (entre 1 à 4). Les produits étant moulés, puis pressés et séchés en même temps, ils ont un fini très lisse des deux côtés. Finalement, la quatrième catégorie comprend les produits transformés (*processed*), c'est-à-dire les produits de pâte moulée nécessitant des traitements spécifiques, des additifs, des revêtements, etc.

2.6.3 Procédé de fabrication

Le plus souvent la matière première des produits en pâte moulée se retrouve sous la forme de grandes feuilles de fibres, conditionnées en ballot. Selon le produit fini désiré, la matière première diffère. Par exemple, pour les boîtes d'œufs et les emballages industriels, le papier recyclé est très utilisé, alors que pour les emballages alimentaires, des fibres vierges sont utilisées blanchies ou non-blanchies, afin de respecter les normes de contact avec les aliments. De plus en plus de nouvelles fibres cellulosiques sont utilisées tels que la bagasse, le bambou [51], la paille [52], etc. La Figure 2-13 présente un schéma simplifié du procédé de fabrication des produits en pâte moulée.

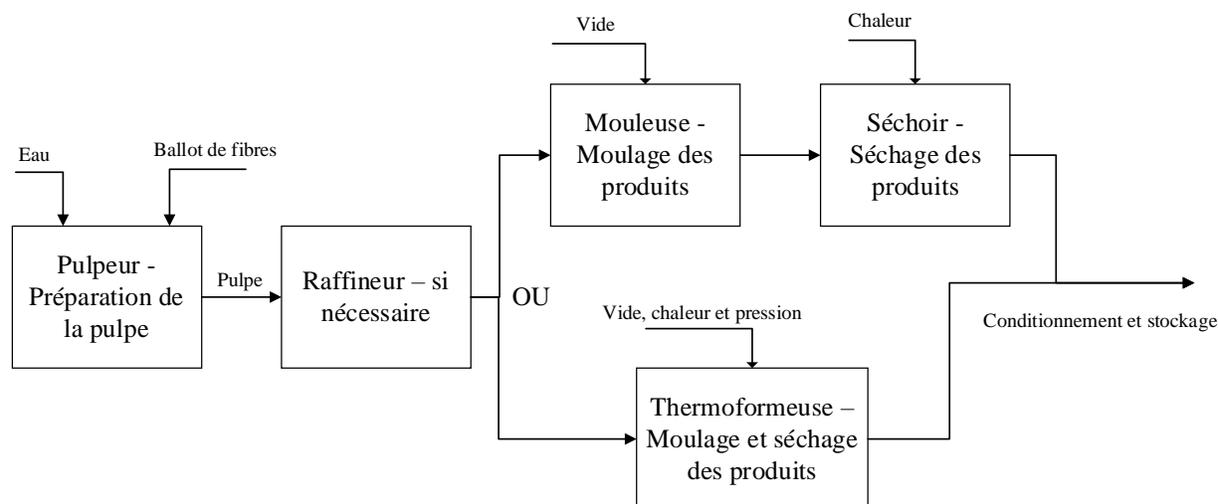


Figure 2-13 : Schéma simplifié de la fabrication de produits en pâte moulée

Les fibres sont mélangées à l'eau dans un pulpeur à basse consistance afin d'obtenir une pulpe. Cette étape est réalisée en procédé discontinu (*batch*) et le pulpeur opère pendant environ 20 min [12]. Par la suite, la pulpe peut être raffinée et/ou des additifs peuvent être ajoutés pour améliorer les propriétés du produit fini, en fonction de l'application finale du produit.

Ensuite, la pièce doit être formée, ou moulée, et séchée. Ces deux étapes peuvent être réalisées en série, ou en même temps à l'aide d'une thermoformeuse [12]. L'utilisation du thermoformage ou du moulage-séchage dépend à nouveau de l'application finale du produit. La technologie de thermoformage permet d'obtenir une surface plus lisse que le moulage-séchage.

2.6.3.1 Étape de moulage

Pour former la pièce, un moule mâle ou femelle est plongé dans un bain de pulpe à basse ou très basse consistance. La pulpe est aspirée contre le moule poreux à l'aide d'un vide, le temps d'aspiration est contrôlé en fonction de l'épaisseur souhaitée du produit fini. Le vide va permettre d'enlever une grande proportion de l'eau disponible présente dans la pulpe formée à l'aide du principe de Terzaghi [53]. Le tapis de fibres de cellulose aspiré sur le moule est une structure poreuse et l'aspiration par vide peut donc être considérée comme de la compression à l'état humide. Deux types de pression sont appliquées lors de la compression à l'état humide. La pression hydraulique de l'eau dans le milieu poreux et la pression causée par la structure de la fibre qui entre en opposition avec le flux d'eau. D'après le principe de Terzaghi [53], la pression dans le milieu poreux est égale à la somme des deux pressions et est constante. Ainsi, le vide appliqué lors de

l'aspiration vient contrer ces deux pressions et l'eau peut être évacuée. Lors de la compression, l'eau n'est pas seulement évacuée du matelas fibreux, mais elle est aussi déplacée à travers les parois des fibres. Un phénomène de stratification peut être observé lors de la compression dans le sens de l'épaisseur. Ce phénomène se produit lorsque la compression n'est pas uniforme à cause des forces visqueuses présentes dans le matelas fibreux. Finalement, une accumulation des fibres se fait dans les pores du moule et le moule doit être nettoyé après chaque cycle de fabrication [12]. Afin de minimiser ce phénomène, une maille est placée sur la surface du moule, ce qui permet d'uniformiser les pores.

Une fois la pièce formée, elle possède une humidité d'environ 40% à 55%. Il est donc nécessaire de la transférer à l'étape de séchage pour atteindre une humidité finale de 4% à 8%, dépendamment de l'humidité de l'environnement de stockage final.

2.6.3.2 Étape de séchage

Lors d'un procédé de moulage-séchage, la pièce est placée dans un séchoir. Ce procédé est utilisé lors de la formation de pièces à bords épais (catégorie 1) et de pièces moulées par transfert (catégorie 2). Il a l'avantage d'avoir un taux de production élevé, soit d'environ 20 tonnes de produits formés par jour [12]. Le séchoir opère à des températures supérieures au point d'ébullition de l'eau, généralement au-dessus de 200°C. Ces températures peuvent varier en fonction de l'humidité finale désirée et du temps de séchage des pièces.

Lors du procédé de thermoformage, la pièce est placée dans des moules chauffés (mâle et femelle) de même géométrie que le moule de formage. Les produits thermoformés (catégorie 3) sont fabriqués avec ce procédé. Tel que décrit précédemment, ce dernier permet l'obtention de produits avec une surface plus lisse, mais avec une vitesse de production plus basse. Le temps de cycle de fabrication de ces produits est autour de 17 à 20 secondes, alors qu'il est de l'ordre de 3 à 5 secondes pour le procédé de moulage-séchage. Le séchage lors de ce procédé est fait par transfert thermique à l'aide des deux moules entourant le produit. De plus, un des moules va appliquer une pression sur la pièce, ce qui va permettre d'augmenter les liaisons inter-fibres, permettant par le fait même l'amélioration des propriétés mécaniques du produit final [12].

2.6.4 Propriétés des produits en pâte moulée

Les produits en pâte moulée ayant des utilisations différentes, les propriétés désirées peuvent donc varier. Didone et al. [12] parlent d'ailleurs de cette problématique en disant que les articles scientifiques cherchent à généraliser les avancées scientifiques, ce qui limite l'utilisation de ces concepts techniques pour des utilisations précises.

2.6.4.1 Propriétés mécaniques

Didone et al. [12] ont regroupé plusieurs travaux afin de comparer la résistance à la traction de produits en pâte moulée et de carton orienté. Les résultats montrent que les produits en pâte moulée ont une résistance à la traction bien plus faible que les cartons orientés. En effet, la résistance maximale est d'un peu moins de 5 MPa pour les produits en pâte moulée, alors qu'elle atteint plus de 50 MPa pour le carton avec une orientation dans la direction machine et environ 20 MPa pour le carton orienté transversalement. Cette différence est liée aux types de procédés de fabrication des deux types d'échantillons. Dans le procédé de produits en pâte moulée, l'orientation des fibres n'est pas contrôlée, contrairement à l'autre procédé de fabrication. Cela a pour conséquence de créer des vides dans la structure et fragiliser le produit.

2.6.4.2 Résistance à l'eau et à l'huile

Les produits de pâte moulée étant à base de fibres cellulosiques, sont de nature hygroscopique (capacité à attirer et retenir les molécules d'eau présentes dans l'environnement). L'absorption de l'eau par les fibres de cellulose cause le bris des liaisons hydrogène et fragilise ainsi le produit au niveau des propriétés mécaniques. De plus, ces produits étant très utilisés dans l'emballage alimentaire, une résistance à l'eau et à l'huile est primordiale. Pour cela, des additifs sont utilisés, ils peuvent être mélangés à la pâte ou être appliqués comme revêtement. Les résines colloïdales et les cires sont utilisées pour rendre la surface hydrophobe et les produits fluorocarbonés sont utilisés pour avoir une surface oléophobe [12].

2.7 Fluoropolymères

Les fluoropolymères et les polymères à base de perfluoroalkyles sont des produits chimiques largement utilisés dans l'industrie pour différentes applications. Ils sont utilisés dans les emballages alimentaires de papier et de carton, mais aussi dans le textile d'extérieur, le textile spécialisé

comme dans la médecine, les services d'urgence (police, pompiers), le militaire ou les combinaisons de travail [54].

2.7.1 Chimie des fluoropolymères

Ils sont séparés en deux catégories, soit les polymères basés sur des monomères hautement fluoré et les polymères contenant des groupements perfluoroalkyles. Les polymères avec groupements perfluoroalkyles sont composés d'une chaîne d'hydrocarbures contenant entre 4 et 18 carbones avec des groupement fluorés [55], comme l'illustre la Figure 2-14.

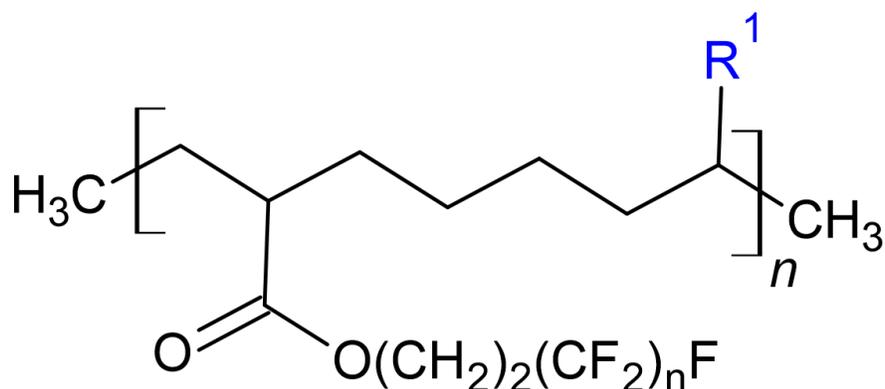


Figure 2-14 : Polymère à base de groupements perfluoroalkyles (adapté de [55])

Ce qui permet aux fluoropolymères d'avoir ces propriétés physiques et physicochimiques si convoitées, est la liaison C-F [56]. Cette liaison est l'une des liaisons chimiques les plus fortes. Le fluor étant l'élément le plus électronégatif, lorsqu'un atome se lie au fluor il va lui céder une portion importante de sa densité électronique. Ainsi, la distribution des électrons dans la liaison C-F va être centrée sur le fluor. De plus, le rayon ionique du fluor est relativement faible, ce qui signifie que ses électrons sont très rapprochés et qu'il est donc difficile de polariser cet atome. Cela explique en partie les propriétés uniques de la liaison C-F [55].

La faible polarisabilité du fluor fait en sorte que l'énergie d'attraction moléculaire est très faible, ainsi les forces intermoléculaires des matériaux avec des liaisons C-F sont très faibles. Cela permet aux perfluoropolymères et aux polymères avec des groupements perfluoroalkyles d'avoir une tension de surface très basse [55].

La tension de surface, ou tension superficielle, est un phénomène physico-chimique relatif aux interactions moléculaires d'un fluide (Figure 2-15). Un fluide en contact avec une surface va

chercher à être à l'équilibre, c'est-à-dire à tendre vers la configuration de plus basse énergie. Si la surface présente des dipôles polaires, les molécules polaires du fluide vont être attirées par la surface. Le fluide va donc s'étaler sur la surface. En revanche, si la surface est non-polaire, les interactions avec les molécules du fluide vont être faibles. Ainsi, le fluide va prendre une forme sphérique pour minimiser son énergie surfacique, car il est plus attiré par lui-même que par la surface [57].

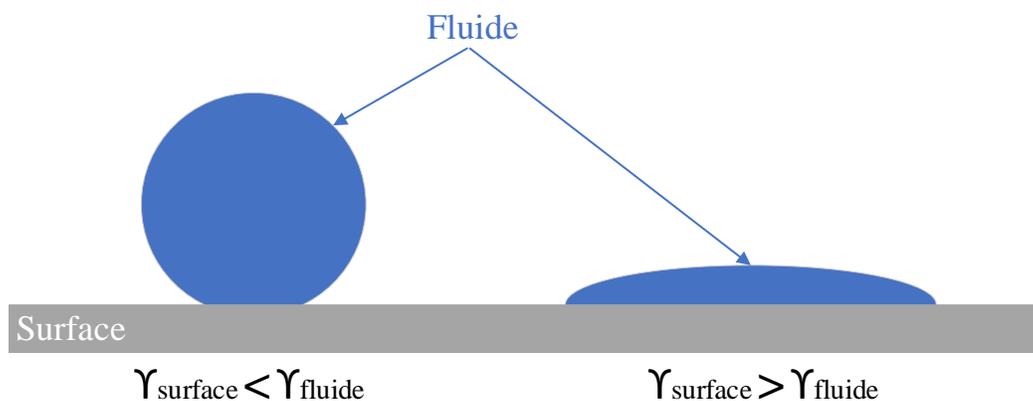


Figure 2-15 : Schéma de la tension de surface

Les polymères avec groupements perfluoroalkyles ayant une tension superficielle entre 10 mN/m et 20 mN/m [55] et donc plus faible que celle de l'eau (72 mN/m) et de l'huile (entre 30 mN/m et 40mN/m) [58], ils sont donc d'excellents additifs de résistance à ces fluides.

2.7.2 Aspect environnemental des fluoropolymères

Néanmoins, il est important de noter que ces produits chimiques ont aussi des désavantages. En effet, les liaisons entre les atomes de carbone et de fluor sont si fortes que ces composés organiques ne se décomposent pas dans la nature. Ainsi, des perfluoroalkyles (PFASs) ont été détectés dans l'environnement, la faune et la flore, ainsi que chez l'humain. Les emballages alimentaires à base de papier ou de carton étant biodégradables, lorsque des PFASs sont utilisés, ces molécules ne sont pas biodégradées une fois dans le compost municipal. Ces composés migrent dans le compost qui va être utilisé pour la croissance des plantes, puis vont ensuite migrer dans les plantes et se retrouver dans la chaîne alimentaire. Même une fois que les plantes, fruits ou légumes sont consommés par l'humain les PFASs sont toujours présents [59], [60]. Également, certains PFASs s'accumulent dans le corps humain et peuvent être à l'origine de cancers, de troubles endocriniens et peuvent causer des problèmes au niveau de la reproduction et du développement du fœtus. Une législation

a été mise en place afin de réglementer ces polluants organiques persistants, mais tous les PFASs ne sont pas encore visés [61].

2.8 Objectifs spécifiques

La revue de la littérature a permis de mettre en lumière que certains aspects des pâtes et papier sont peu étudiés, notamment au niveau des produits en pâte moulée pour une application d'emballage alimentaire. De plus, il a été vu qu'un manque de recherche se fait sentir au niveau des fibres disponibles au Québec.

Ainsi, l'objectif général de ce travail est de développer un emballage alimentaire à faible coût et sourcé localement. Afin de répondre à cet objectif, deux sous-objectifs ont été définis et sont rappelés ci-dessous :

1. Déterminer les impacts des paramètres de fabrication sur le produit final
2. Minimiser les coûts de production en considérant les performances du produit final

Lors de recherches passées exécutées par AecopaQ et en discutant avec les clients, les limites de propriétés suivantes ont été établies afin de respecter les exigences du marché adressé :

- Résistance à l'eau (Cobb Test) : $\leq 29 \text{ g/m}^2$
- Résistance à l'huile (Kit Test) : \geq niveau 6
- Résistance maximale à la traction : $> 1\,000 \text{ kPa}$

Ces propriétés sont étudiées pour répondre au sous-objectif 1 et différentes méthodologies sont utilisées pour respecter ces limites.

Ainsi, la méthodologie pour répondre à ces sous-objectifs est présentée dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Matières premières

Trois pâtes de différents fournisseurs canadiens ont été utilisées afin de respecter l'objectif d'approvisionnement en ressources locales. Une brève description des pâtes utilisées est présentée ci-dessous :

- Pâte A : de type *Northern Bleached Softwood Kraft* (NBSK), issue de résineux nordiques, elle est produite par un procédé de type Kraft et blanchie.
- Pâte B : est non blanchie de résineux nordique, issue de pins Douglas.
- Pâte C : est issue à 100% de papiers recyclés ayant subis un procédé Kraft, non blanchi.

De plus, l'ajout d'un additif est nécessaire afin d'assurer les propriétés de barrière à l'eau et à l'huile comme vu dans la revue de littérature. L'additif utilisé est une solution avec des groupements perfluoroalkyles.

3.2 Protocole expérimental

Dans le but de répondre au premier sous-objectif et en se basant sur la revue de la littérature, un protocole expérimental a été établi. Ce protocole permet d'étudier l'influence de deux paramètres : le pourcentage d'additif ajouté dans la formule et le taux de raffinage. De plus, afin d'offrir un plus grand nombre d'options potentielles à AecopaQ, des mélanges à base des trois pâtes ont été faits. Pour chaque série de test, les pâtes A, B et C ont été étudiées, ainsi que les mélanges suivants : pâte A/pâte B, pâte B/pâte C et pâte A/pâte C avec des ratios massiques 1/1.

Dans le but d'étudier l'influence des deux paramètres indépendamment, la quantité d'additif a d'abord été étudiée en utilisant trois quantités différentes nommées : faible, moyenne et élevée (les quantités ne peuvent être divulguées pour cause de confidentialité). Ces premières séries de tests ont été réalisées sans appliquer de raffinage supplémentaire. Ces séries de tests ont permis d'établir la quantité d'additif idéale à fixer pour étudier l'influence du raffinage. Ainsi, la quantité dite « moyenne » d'additif a été utilisée pour la suite des tests. Concernant le raffinage, des indices d'égouttage de 500 CSF et 430 CSF ont été étudiés. La valeur de 430 CSF correspond à une valeur déjà utilisée lors de fabrication d'échantillons précédents et acceptés par les clients. La valeur de

500 CSF a été choisie pour étudier une valeur intermédiaire. Ainsi, au total, 29 formules différentes ont été étudiées. La Figure 3-1 présente le plan expérimental utilisé lors de ces séries de tests.

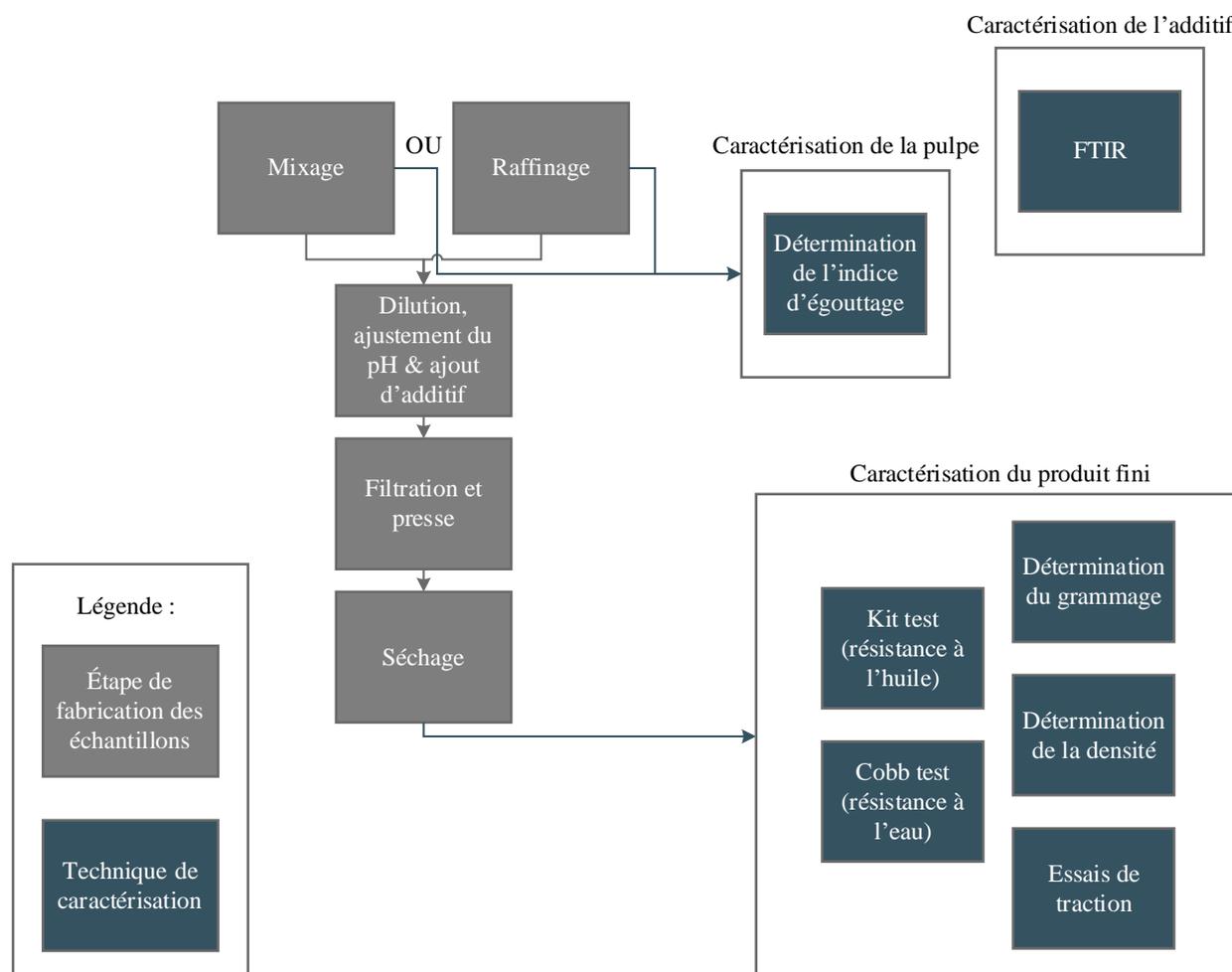


Figure 3-1 : Plan expérimental pour répondre à l'objectif spécifique 1

3.2.1 Fabrication des échantillons

Dans le cas où aucun raffinage n'est nécessaire, la première étape de la fabrication des échantillons consiste à mélanger les fibres avec de l'eau de manière à obtenir une pâte à basse consistance.

La consistance d'une pulpe réfère à la masse sèche de fibre divisée par la masse totale de pulpe, comme le montre l'équation 4, exprimée en pourcentage.

$$cons\% = \frac{m_{fibres}}{m_{p\grave{a}te}} \times 100 \quad (4)$$

Le Tableau 3-1 présente les fourchettes typiques de consistance considérées dans le domaine des pâtes et papiers [62].

Tableau 3-1 : Classification des consistances dans le domaine des pâtes et papiers

Classe	Consistance
Consistance élevée	12-40%
Moyenne consistance	5-12%
Basse consistance	1-5%
Très basse consistance	0,1-1%
Ultra basse consistance	0,01-0,1%

Par la suite, le mélange est broyé à l'aide d'un mixeur jusqu'à ce que toutes les fibres soient bien en suspension dans l'eau.

Lorsqu'une étape de raffinage est nécessaire, elle remplace l'étape de mixage et est effectuée selon la norme TAPPI T 200 sp-15 *Laboratory beating of pulp (Valley beater method)*, à l'aide d'un raffineur de laboratoire Valley Beater jusqu'à l'indice d'égouttage désiré [63].

Par la suite, la solution est diluée avec de l'eau jusqu'à une très basse consistance. Une fois la bonne consistance atteinte, le pH de la pulpe est mesuré. Si le pH de la solution est supérieur à 6, de l'acide est ajouté (acide chloridrique ou vinaigre alimentaire) de façon à obtenir un pH inférieur à 6. Cet ajustement du pH est nécessaire afin d'assurer un milieu acide et favorable à l'additif, qui peut être ajouté dans les proportions désirées.

Le pourcentage d'additif est calculé par rapport à la masse de fibres, de la manière suivante :

$$\%_{\text{additif}} = \frac{m_{\text{additif}}}{m_{\text{fibres}}} \times 100 \quad (5)$$

Afin de respecter les normes alimentaires de substance en contact avec les aliments, il est nécessaire de respecter une certaine quantité de solides par quantité de fibres. L'additif contenant un certain pourcentage de solides, les équations suivantes permettent de déterminer le pourcentage maximal d'additif pouvant être utilisé pour respecter ces normes.

$$\frac{m_{\text{solides additif}}}{m_{\text{fibres}}} \times 100 = \%_{\text{solides-fibres}} \quad (6)$$

$$\frac{m_{\text{solides additif}}}{m_{\text{additif}}} \times 100 = \%_{\text{solides-additif}} \quad (7)$$

$$\frac{m_{\text{additif}}}{m_{\text{fibres}}} \times 100 = \%_{\text{additif-fibres}} \quad (8)$$

Ainsi, le pourcentage maximal d'additif permis est calculé.

Une fois la pulpe prête, les échantillons sont formés à l'aide d'un montage sous vide avec entonnoir Büchner. Chaque échantillon est formé en mesurant 200 mL de pulpe à l'aide d'un bécher. Le mélange est filtré puis pressé avec un poids de 250 g. Une fois l'échantillon formé, il est placé dans un four sous vide opérant à environ 90°C et -80 kPa, et ce, pendant 30 min.

3.3 Technique de caractérisation de la pulpe

3.3.1 Standard canadien d'égouttage

La méthode de standard canadien d'égouttage (*Freeness of pulp*) est une méthode de caractérisation de la pulpe relativement simple. La norme utilisée pour cette caractérisation est la norme TAPPI T 227 om-17 *Freeness of pulp (Canadian standard method)*. Elle consiste à préparer une solution de pulpe à 0,3% de consistance (3 grammes de fibres pour 1 litre d'eau). Le mélange est placé dans une chambre hermétique ayant un tamis calibré dans le fond. Afin d'effectuer le test, il suffit d'ouvrir le rabat du bas et d'ouvrir l'entrée d'air. Ainsi, la solution peut s'écouler dans l'entonnoir munis d'un cône disperseur permettant de répartir uniformément le mélange sur les surfaces de l'entonnoir. À l'aide d'un orifice calibré au bas de l'entonnoir, le mélange peut s'écouler. Lorsque la solution s'écoule rapidement, une partie de celle-ci s'écoule par l'orifice de débordement, situé sur le côté. La quantité de solution sortant de l'orifice de débordement est mesurée à l'aide d'une éprouvette graduée. Cette quantité en mL représente l'indice d'égouttage et son unité est notée CSF pour Canadian Standard Freeness [64].

Cette technique de caractérisation permet de déterminer le taux de raffinage de la solution. La pulpe ayant tendance à retenir l'eau (par gonflement des fibres) après un raffinage accru, l'égouttage de la solution se fait plus lentement. Ce dernier se faisant plus lentement la majorité de la solution s'écoule par l'orifice calibré et non par l'orifice de débordement, et donc la mesure en mL ou CSF dans l'éprouvette est moindre. Au contraire, lorsque la pulpe est moins raffinée, les fibres retiennent moins l'eau et la solution s'écoule rapidement à travers les mailles du tamis. Ainsi, la

quantité de solution allant dans l'orifice de débordement est importante et la mesure de CSF est grande. Une photo et un schéma de l'équipement utilisé sont présentés à la Figure 3-2.

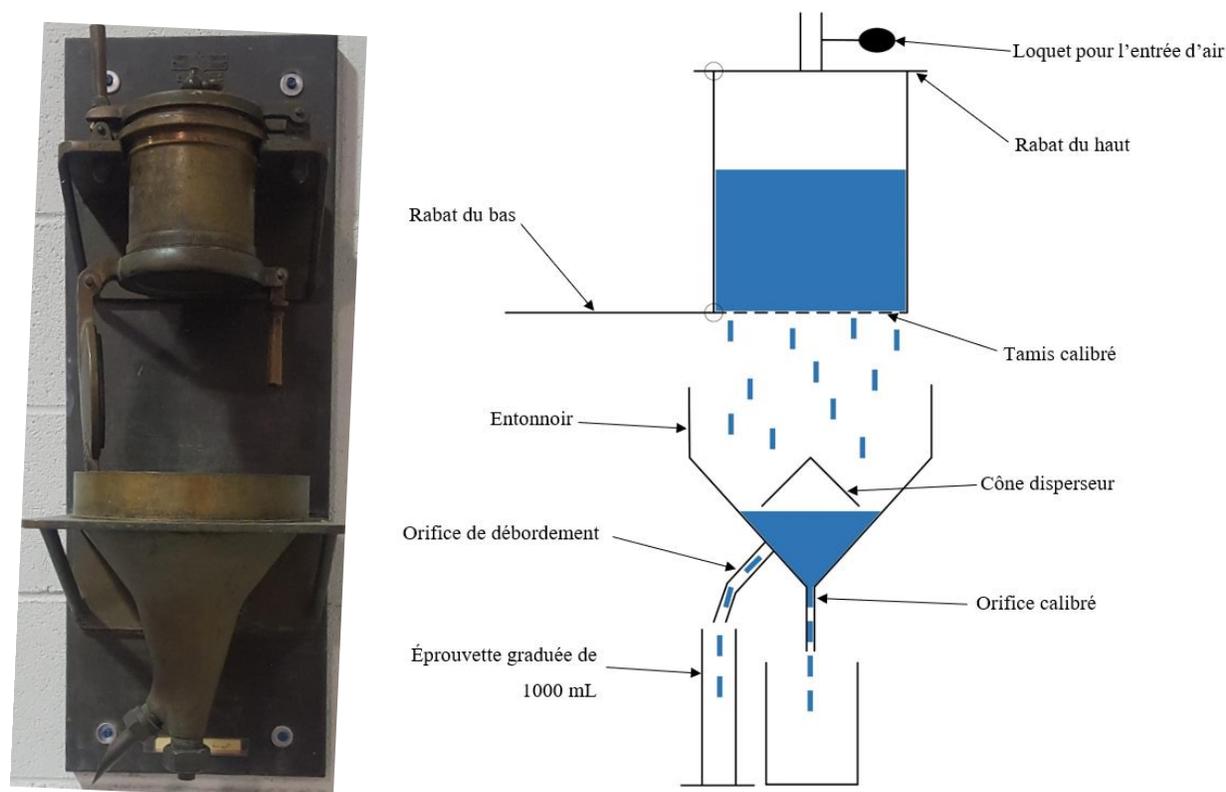


Figure 3-2 : Équipement de mesure de l'indice d'égouttage selon la méthode standard canadienne.

Photo (gauche) et schéma (droite)

3.4 Technique de caractérisation de l'additif

3.4.1 Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier est une technique de caractérisation qui permet d'identifier les groupements fonctionnels en surface d'un solide, d'un liquide ou d'un gaz. Un faisceau de lumière infrarouge est envoyé sur un interféromètre de Michelson – un ensemble de miroirs - qui par son déplacement va émettre un spectre de lumière différent et permettre de balayer l'échantillon de l'ensemble des longueurs d'onde infrarouge. L'échantillon, positionné sur la lentille de l'instrument, va absorber certaines longueurs d'ondes dû à la vibration des liaisons des groupements fonctionnels qui le compose. À l'aide de la transformation de Fourier, la lumière absorbée en fonction de la position du miroir est convertie en lumière absorbée par l'échantillon

en fonction de la longueur d'onde [65]. Afin de réaliser cette caractérisation, il est nécessaire au préalable de faire un scan de référence, c'est-à-dire sans substance sur la lentille afin d'obtenir le spectre d'absorption du milieu d'étude. Par la suite, l'échantillon est analysé et le spectre de référence y est soustrait afin d'obtenir le spectre d'absorption de l'échantillon seul. Cette technique de caractérisation est qualitative et non quantitative, c'est à dire qu'il est possible de déterminer les groupements fonctionnels présents dans l'échantillon, mais pas leur proportion.

3.5 Techniques de caractérisation des produits finis

Afin de s'assurer que les produits finis ont les propriétés mécaniques et barrières désirées, une série de tests a été effectuée.

Dans un premier temps, les techniques de caractérisation typiquement utilisées en pâte et papier sont présentées. Par la suite, les caractérisations relatives aux propriétés barrières sont énoncées et, finalement, la technique de caractérisation des propriétés mécaniques est expliquée.

Les principales propriétés recherchées sont la résistance à l'huile et à l'eau, en effet afin de permettre une utilisation alimentaire des produits finis, des limites ont été établies par les clients. De même, pour les propriétés mécaniques, des limites ont été établies avec les clients afin de s'assurer de la résistance mécanique des produits finis.

3.5.1 Calcul du grammage

Le grammage est calculé en divisant la masse du produit par sa surface en se basant sur la norme ISO 536 *Papier et carton – Détermination du grammage* [66].

3.5.2 Calcul de la densité

La densité est déterminée à l'aide de la surface du produit, son épaisseur et sa masse. L'épaisseur des échantillons a été mesurée à l'aide d'un pied à coulisse. L'épaisseur n'étant pas uniforme sur toute la surface de l'échantillon, 10 mesures ont été réalisées par échantillon, à raison de 20 à 25 échantillons par expérience.

3.5.3 Résistance à l'huile (Kit Test)

Afin de vérifier les propriétés barrière à l'huile des produits finis, le Kit Test a été effectué à l'aide de la norme TAPPI T 559 cm-12 *Grease resistance test for paper and paperboard*. Le Kit Test permet de tester le degré de répulsion à l'huile du papier ou du carton. Les agents fluorochimiques ayant une influence sur les capacités du papier à absorber les matières grasses, le Kit test a été mis au point pour vérifier les propriétés barrières à l'huile. Le test doit être effectué sur les produits contenant des agents fluorochimiques et est constitué de 12 niveaux, avec le niveau initial 1 qui est le moins agressif et 12, le plus agressif. Les solutions pour chaque niveau sont préparées à l'aide d'huile de ricin, de toluène et de n-heptane, avec les proportions de chaque produit chimique variant en fonction du niveau d'agressivité. Chaque niveau d'agressivité est testé en ordre, de 1 à 12, en déposant trois gouttes de la solution à la surface de l'échantillon. Si l'échantillon passe le niveau 1, le niveau 2 est testé et ainsi de suite jusqu'au niveau 12. Le test est accepté lorsque les trois gouttes à la surface de l'échantillon peuvent être retirées en ne laissant aucune trace. Si une trace d'absorption est observée, le test est rejeté [67]. La Figure 3-3 illustre un exemple de test accepté et rejeté.



Figure 3-3 : Exemple de Kit Test accepté (gauche) et rejeté (droite)

3.5.4 Résistance à l'eau (Cobb Test)

Les tests de résistance à l'eau ont été réalisés à l'aide du Cobb Test, présenté par la norme TAPPI T 441 om-09 *Water absorptiveness of sized (non-bibulous) paper, paperboard, and corrugated fiberboard (Cobb test)*. Ce test permet de mesurer la quantité d'eau absorbée par l'échantillon, avec la mesure donnée en g d'eau/m². Ce test consiste à déposer l'échantillon dans un appareil permettant une accumulation d'eau (de 1 cm) au-dessus de celui-ci. La Figure 3-4 illustre le type d'appareil utilisé pour ce test [68].



Figure 3-4 : Appareil utilisé pour le Cobb Test [69]

Plus la quantité d'eau absorbée par l'échantillon est faible, meilleure est la résistance à l'eau du matériel.

3.5.5 Essai de traction

Afin de s'assurer que le produit final soit assez résistant mécaniquement, des essais de traction ont été réalisés. À l'aide de l'équipement Instron, et de la norme ASTM D828 *Standard Test Method for Tensile Properties of Paper and Paperboard Using Constant-Rate-of-Elongation Apparatus* [70], les propriétés de résistance à la traction ont été obtenues. Des têtes de serrage pneumatiques ont été utilisées pour ce test, avec une cellule de 500 N. Ce choix a été fait car l'épaisseur des échantillons est inférieure à 1 mm.



Figure 3-5 : Équipement Instron utilisé pour la résistance à la traction

La technique utilisée permet une élongation contrôlée et constante de l'échantillon. La force de traction appliquée par l'équipement est mesurée pour chaque élongation et permet de calculer les contraintes appliquées (équation 9), les déformations (équation 10), ainsi que le module de Young (équation 11).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (10)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (11)$$

Avec σ , la contrainte ; F, la force de traction ; A, la surface ; ε , la déformation ; Δl , l'allongement ; l_0 , la longueur initiale de l'échantillon ; E, module de Young.

3.6 Analyse économique

Dans le but de répondre au deuxième objectif spécifique, une analyse des coûts de production a été réalisée. L'analyse a été séparée en deux parties : les coûts opérationnels fixes et les coûts opérationnels variables. Les coûts opérationnels fixes comprennent les frais d'électricité, d'eau, de main d'œuvre, de gaz naturel, de solution acide et d'emballage des produits finis. En effet, ces coûts restent inchangés, car ils sont relatifs au procédé et non aux matières premières et au raffinage. L'ensemble de ces coûts fixes ont été calculés à l'aide des bilans de matière et d'énergie réalisés pour AecopaQ, ainsi qu'avec les prix discutés par AecopaQ avec ses fournisseurs.

Les coûts variables quant à eux sont calculés en fonction des différentes pâtes utilisées, du pourcentage d'additif ajouté et du taux de raffinage appliqué aux fibres. Les coûts relatifs aux pâtes et à l'additif ont simplement été calculés en fonction de la quantité de matière première utilisée.

Concernant les coûts énergétiques relatifs au raffinage, une démarche répandue en pâtes et papier a été utilisée. Cette méthode est utilisée lors de l'utilisation d'un raffineur à disques. Les données relatives au raffineur ont été collectées auprès d'AecopaQ.

Dans un premier temps, la puissance hors charge, appelée $P_{no\ load}$ (hp) est calculée à l'aide de l'équation empirique suivante (équation 12) :

$$P_{no\ load} = 102 \times \left(\frac{\omega}{100}\right)^3 \times \left(\frac{D_{out}}{100}\right)^{4,3} \times \left(\frac{2W}{W+B}\right) \times \left(\frac{T}{4}\right) \quad (12)$$

Avec ω , la vitesse de rotation (rpm) ; D_{out} , le diamètre externe du disque du raffineur (in) ; W , la largeur de la cavité du disque (1/16 in) ; B , largeur de l'arrête (1/16 in) et T , profondeur de la cavité du disque (1/16 in).

Par la suite, il est possible de calculer la puissance nette utilisée pour le raffinage des fibres avec l'équation 13.

$$P_{net} = P_{motor} - P_{no\ load} \quad (13)$$

Avec P_{motor} , la puissance du moteur (hp).

À l'aide de la puissance nette et du débit journalier de fibres à traiter, il est possible de calculer l'énergie spécifique (hp/(t/j)), voir équation 14.

$$E_{spec} = \frac{P_{net}}{\dot{m}} \quad (14)$$

Finalement, il est possible de calculer la diminution d'indice d'égouttage par énergie spécifique avec l'équation 15.

$$\frac{\Delta CSF}{E_{spec}} = \frac{CSF_{in} - CSF_{out}}{E_{spec}} \quad (15)$$

Une fois cette donnée obtenue, elle est comparée aux valeurs typiques propres à chaque type de pulpe. Si la donnée est comprise entre le minimum et maximum des données types, cela signifie que le raffineur est adapté et peut être utilisé en continu. Si la valeur obtenue est supérieure au maximum, le raffineur fonctionnant en continu n'est pas suffisamment puissant pour les besoins. Afin de considérer les coûts dans ce cas-là, il est considéré que deux raffineurs sont utilisés en série. Finalement, lorsque la valeur est inférieure au minimum typique, le raffineur n'a pas besoin de fonctionner en continu pour atteindre l'indice d'égouttage désiré, ainsi un pourcentage d'utilisation du raffineur est calculé.

Pour terminer, les coûts relatifs au raffinage sont calculés à l'aide de l'énergie électrique consommée pour chaque type de pulpe.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

4.1 Caractérisation de l'additif

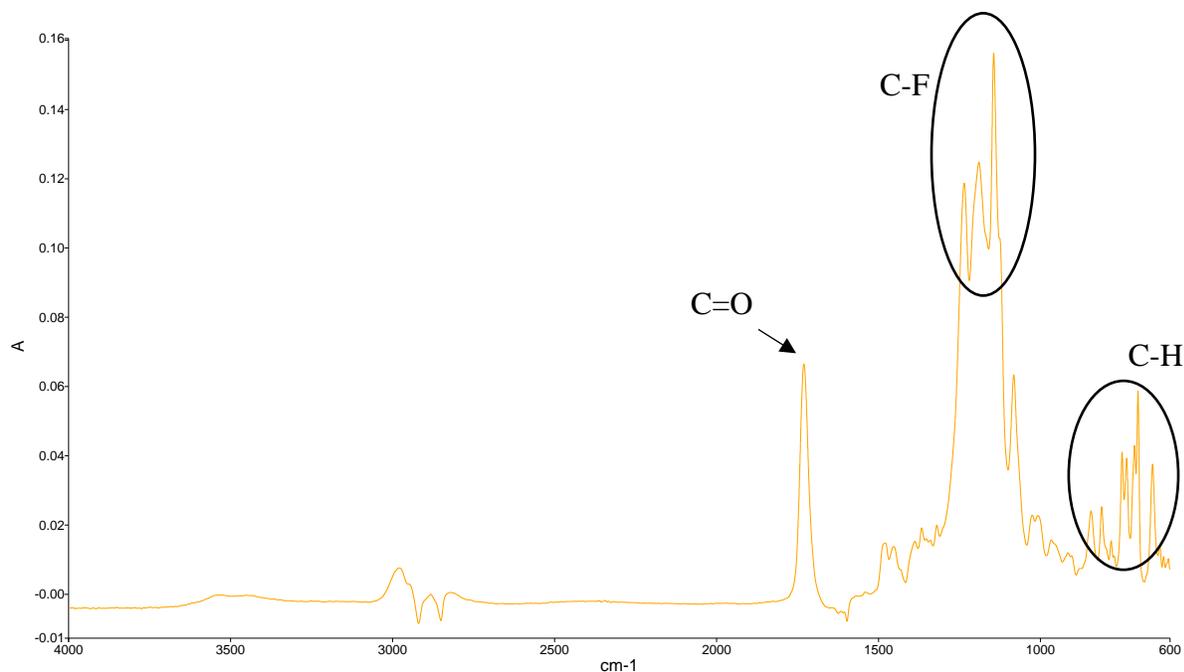


Figure 4-1 : Spectre FTIR de l'additif

Il est possible de remarquer sur la Figure 4-1 que l'additif présente une grande absorption dans les longueurs d'ondes entre $1\ 000$ et $1\ 400\ \text{cm}^{-1}$. Ces longueurs d'ondes reflètent, en effet, les composés fluorés et la liaison C-F [71]. Il n'y a aucun doute que l'additif est fait avec des composés fluorés. La présence d'un pic à $1\ 730\ \text{cm}^{-1}$ indique qu'une double liaison carbone-oxygène est présente dans la molécule. Cela correspond à la formule présentée à la Figure 2-14 de la revue de la littérature. Concernant les nombreux pics dans la région des empreintes digitales (*fingerprint region*) - qui correspond aux longueurs d'onde inférieures à $1\ 000\ \text{cm}^{-1}$ -, ils sembleraient correspondre à des liaisons C-H d'alkyles ou d'alcènes, notamment entre $600\ \text{cm}^{-1}$ et $800\ \text{cm}^{-1}$. En revanche, comme aucun pic n'est présent dans les longueurs d'ondes autour de $1\ 600\ \text{cm}^{-1}$ il est peu probable que la molécule contienne des alcènes [72]. Ces liaisons correspondent donc à des alkyles.

4.2 Influence de l'additif sur les propriétés

4.2.1 Grammage, épaisseur et densité

Dans un premier temps, il est possible de remarquer à l'aide de la Figure 4-2 que l'ensemble des échantillons ont un grammage entre 130 g/m² et 200 g/m², ce grammage est typique des papiers cartonnés comme le présente le Tableau 2-3 de la revue de la littérature. Il est possible de voir que la pâte C semble avoir un grammage plus faible que les autres pâtes pour une faible quantité d'additif. En revanche, lorsque la densité est étudiée pour cette série d'échantillon (Figure 4-4), il est possible de voir que la densité est de $3,11 \times 10^5$ g/m³, ce qui est dans la fourchette des autres pâtes. En effet, cette observation peut être expliquée par la faible épaisseur (voir Figure 4-3) des échantillons de pâte C pour une faible quantité d'additif. Malgré le faible grammage, ces échantillons étant fait à base de pâte recyclée, la capacité des fibres à être plus proches fait en sorte que la densité est relativement élevée. L'exemple de la pâte C montre bien que le grammage des échantillons peut amener une idée faussée sur les caractéristiques de ces tests, car les épaisseurs des différents types d'échantillons sont très différentes.

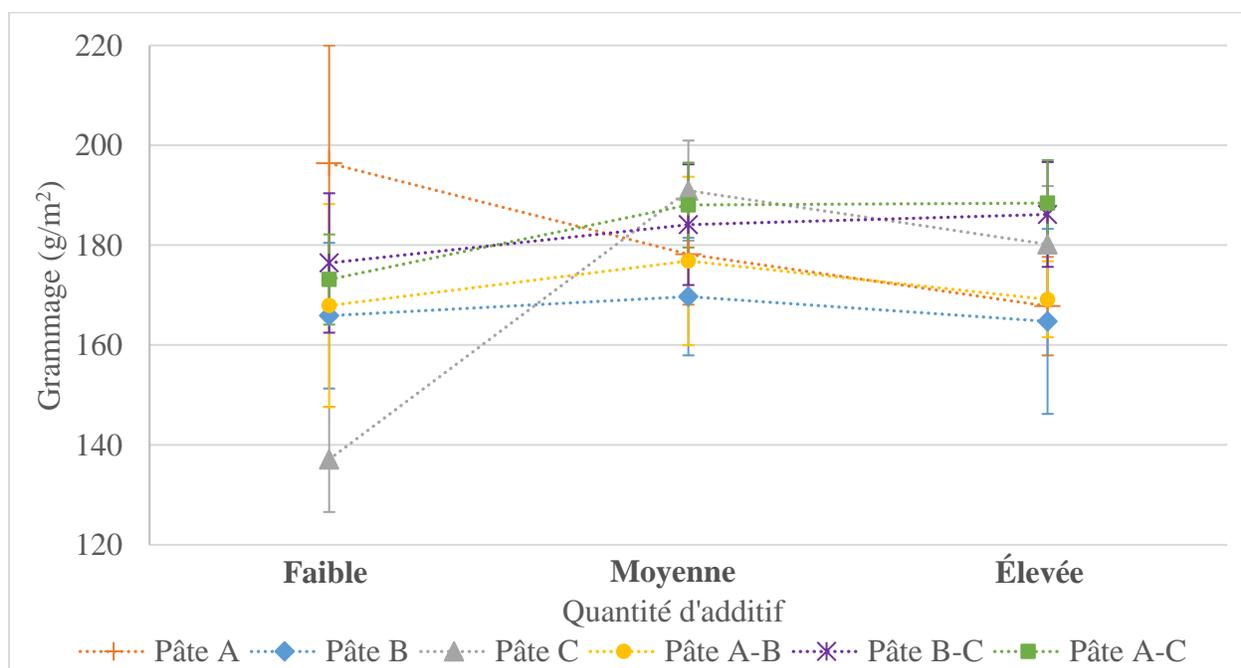


Figure 4-2 : Influence de la quantité d'additif sur le grammage

En effet, comme le montre la Figure 4-3, les échantillons ont une épaisseur moyenne très différente d'un type de pâte à un autre. La pâte C permet d'obtenir des échantillons plus fins, alors que la pâte A produit des échantillons plus épais.

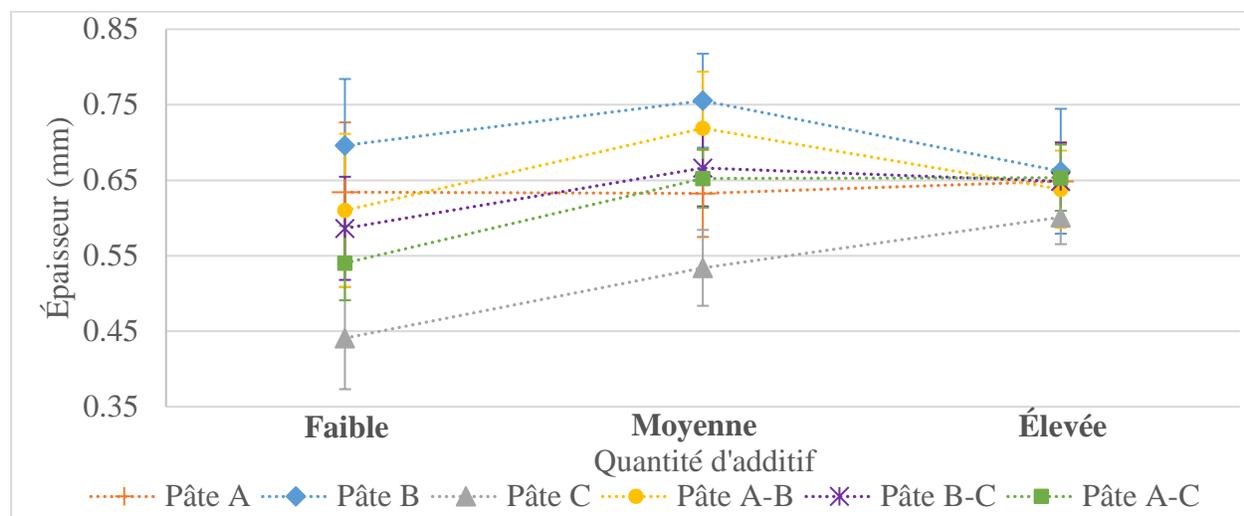


Figure 4-3 : Influence de la quantité d'additif sur l'épaisseur des échantillons

Il était possible de voir visuellement que les échantillons faits de la pâte B étaient très poreux et que ceux faits de la pâte C étaient plutôt denses. Cela est confirmé par la Figure 4-4. Une fois de plus, les échantillons faits de la pâte C proviennent de la pâte recyclée. Cette dernière a déjà été traitée maintes fois mécaniquement, favorisant donc le raccourcissement des fibres et l'augmentation de surface de contact des fibrilles. Ces dernières auront tendance à être plus compactes, car elles apportent plus de capacité de liaisons, et l'épaisseur est donc faible. Ceci est à l'opposé de la pâte B, qui est faite de fibres vierges, donc non raffinée. Ces fibres seront de plus grande taille, donc cela va forcément créer moins de liaison et conférer à l'échantillon final une structure plus imposante, d'où l'épaisseur plus importante. De plus, il est possible de voir que les échantillons de la pâte A sont plus denses que ceux faits avec la pâte B, malgré le fait que les deux pâtes soient de fibres vierges. Il semblerait que le blanchiment de la pâte A, signifiant que la presque totalité de la lignine ait été retirée de ce produit, permet de meilleures liaisons entre les fibres et donc une densité plus élevée. Concernant les échantillons faits à base de mélange de pâtes, il semblerait que le mélange des pâtes ne change pas les propriétés des échantillons, mais permet l'obtention d'échantillons moyens entre les deux pâtes utilisées pour chaque mélange. Aucune synergie positive ou négative est donc notée.

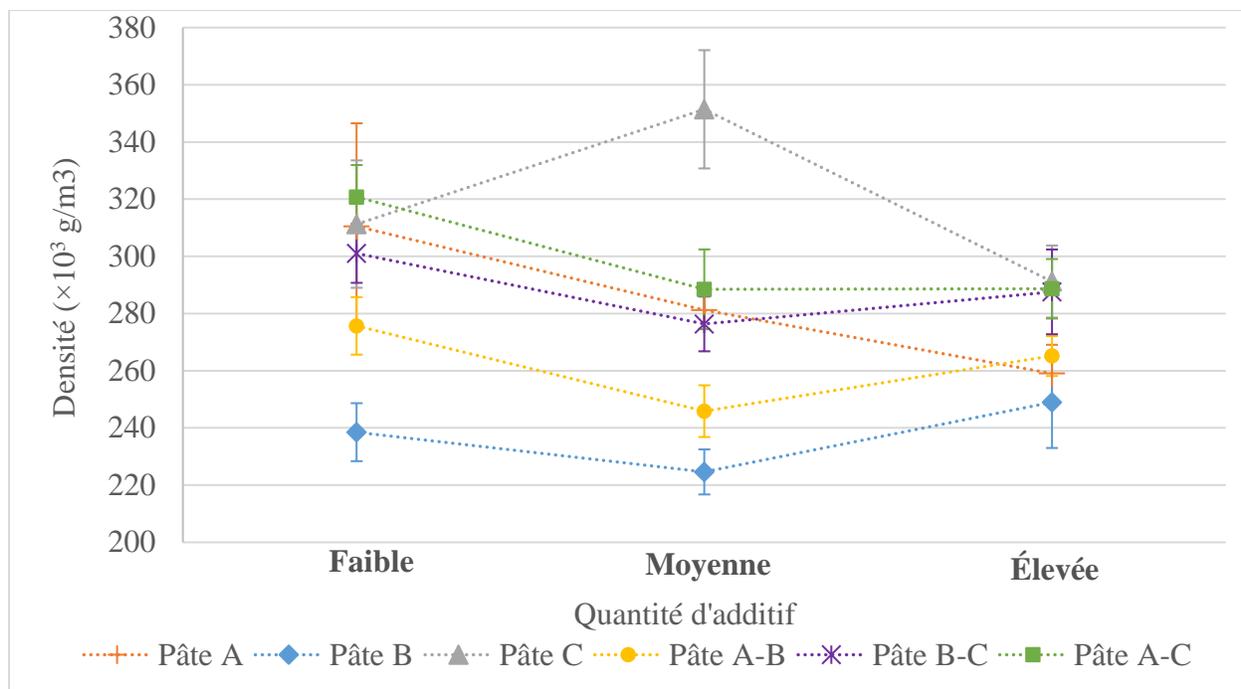


Figure 4-4 : Influence de la quantité d'additif sur la densité

De manière générale, les Figure 4-2, Figure 4-3 et Figure 4-4, montrent que la quantité d'additif ne semble pas avoir d'influence claire sur les propriétés morphologiques des échantillons.

4.2.2 Propriétés barrières : Kit test et Cobb test

Comme il est possible de voir à la Figure 4-5, plus la quantité d'additif dans l'échantillon est élevée plus la résistance à l'huile l'est aussi. Ce résultat était prévisible, étant donné que l'augmentation de la quantité d'additif va de pair avec l'augmentation de la quantité de liaisons carbone-fluor. Puisque ce sont les liaisons C-F qui permettent de diminuer la tension de surface de l'échantillon [55], il est normal que la tension de surface diminue avec l'ajout d'additif, et que la résistance à l'huile augmente conséquemment.

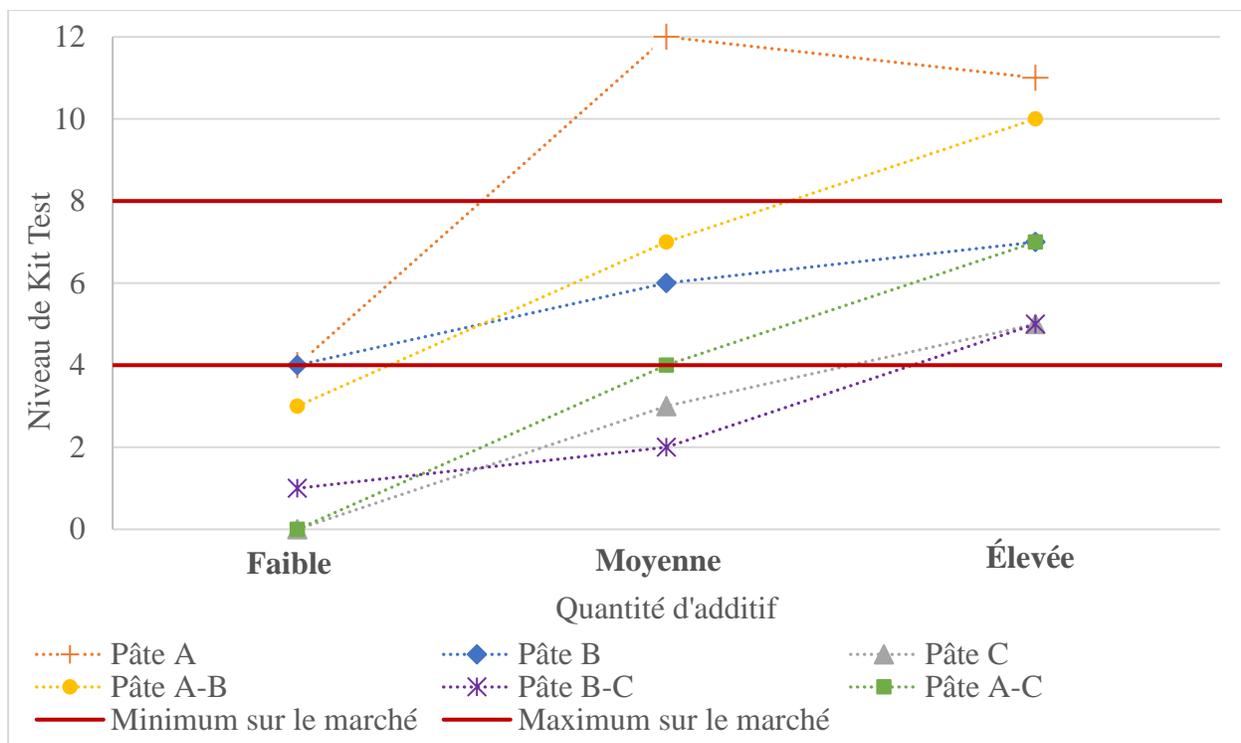


Figure 4-5 : Influence de la quantité d'additif sur la résistance à l'huile

En ce qui concerne les échantillons contenant la pâte C (C, A-C et B-C), ils présentent des résistances à l'huile plus faibles que les autres pâtes. Il est même possible de remarquer que les échantillons A-C et C, pour une faible quantité d'additif, ont un niveau de Kit test de 0, ce qui signifie que même la solution la moins agressive (d'huile de ricin uniquement) a pénétré dans les échantillons. Cette mauvaise résistance à l'huile, malgré l'ajout d'additif, peut s'expliquer par le manque de liaisons entre les fibres et l'additif, directement expliqué par les dommages occasionnés aux fibres recyclées. En revanche, pour les échantillons faits de fibres vierges, les résultats sont nettement supérieurs. Les fibres, ayant la capacité de créer plus de liaisons avec l'additif, vont permettre une résistance à l'huile plus élevée. De même, pour les échantillons préparés avec le mélange de A et B, la résistance à l'huile est excellente. Il est même possible de voir que les échantillons A, avec une quantité d'additif moyenne et élevée, et ceux de A-B, avec une quantité élevée, ont une résistance à l'huile supérieure aux produits présentement sur le marché. En revanche, il est difficile d'expliquer le fait que la résistance à l'huile des échantillons A, avec une quantité moyenne d'additif, soit supérieure à celle de la même pâte pour une quantité d'additif plus élevée, alors que ce phénomène n'est aperçu pour aucun autres échantillons. Il est important de

relever que le test a été réalisé à trois reprises sur les échantillons faits de la pâte A avec une quantité moyenne d'additif et tous les tests ont mené à un niveau de résistance de 12 au Kit Test.

Concernant la résistance à l'eau, il est aussi possible de remarquer dans la Figure 4-6 que l'ajout d'additif permet, de manière générale une meilleure résistance. En effet, comme il a été présenté dans la revue de la littérature, le papier et les produits en pâte moulée ont tendance à absorber l'eau présente dans l'environnement, et donc aussi les gouttes d'eau liquide. Ainsi, l'ajout de l'additif permettant de diminuer la tension de surface va, par conséquent, diminuer l'absorption de l'eau par les échantillons. Encore une fois, il est possible de voir que les échantillons en pâte C ont tendance à absorber une plus grande quantité d'eau que les autres échantillons, dû à la difficulté de l'additif à former des liaisons avec les pâtes recyclées. Le seul résultat contre intuitif est celui avec la quantité maximale d'additif, qui semble avoir une meilleure résistance à l'eau que les autres types de pâte. Concernant les pâtes de fibres vierges, il est possible de remarquer une meilleure résistance à l'eau, pour les mêmes raisons que la résistance à l'huile.

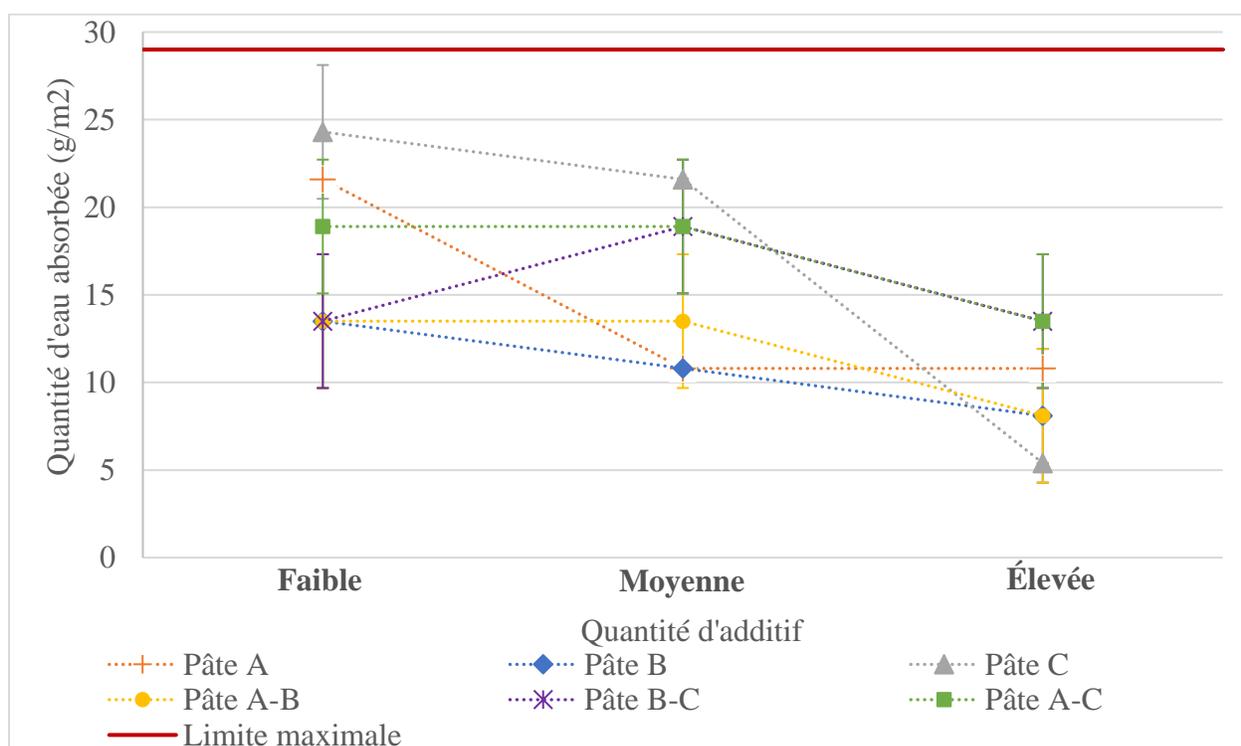


Figure 4-6 : Influence de la quantité d'additif sur la quantité d'eau absorbée par les échantillons

4.2.3 Propriétés mécaniques

Il est possible de voir sur la Figure 4-7 que les échantillons de pâte C ont le module élastique le plus élevé. Cela s'explique par le fait que cette pâte ait été raffinée à plusieurs reprises, ce qui lui permet de faire un plus grand nombre de liaisons hydrogène, grâce à l'augmentation de surface de contact des groupes fonctionnels à la surface de la cellulose. Le module de Young pour ces formulations a le même comportement que la densité. De plus, il est possible de voir que les échantillons de pâte B ont un module de Young très faible. Cela est non seulement causé par le faible taux de raffinage des fibres vierges, mais aussi par le fait que cette pâte n'ait pas subi de traitement de blanchiment. Cela engendre une présence plus importante de lignine, réduisant ainsi la surface de contact pour la formation des liaisons interfibrilles. Les échantillons de pâte A ont un module d'élasticité plus élevé que ceux de la pâte B, malgré le fait que la pâte A n'ait pas subi de raffinage non plus. Sa plus faible quantité de lignine lui permet de libérer les groupes fonctionnels à la surface des fibres rendant possible un plus grand nombre de liaisons interfibrilles. À nouveau, les échantillons faits de mélanges présentent des résultats moyens entre les deux pâtes utilisées.

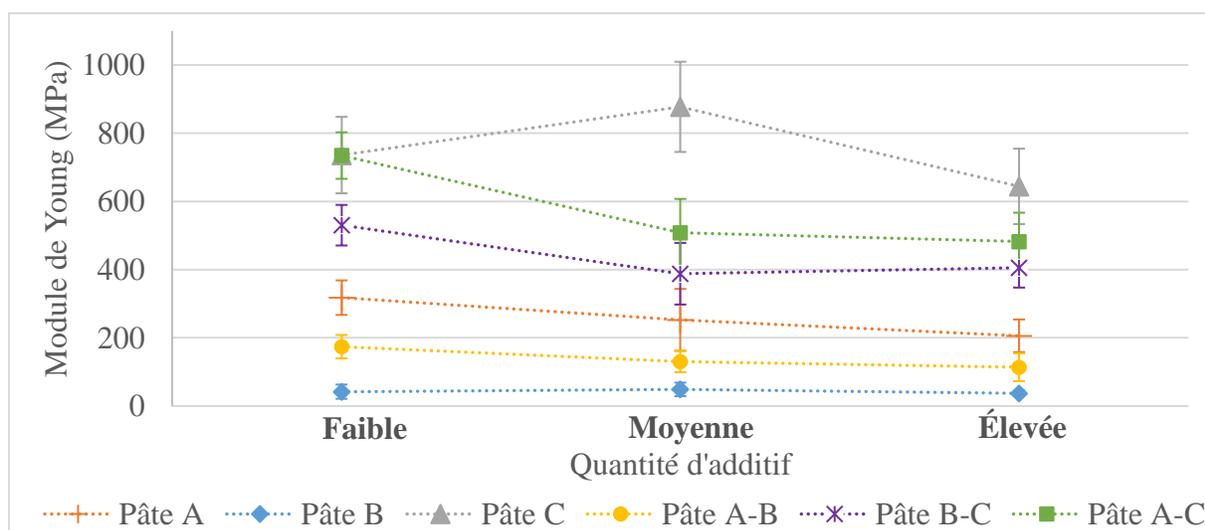


Figure 4-7 : Influence de la quantité d'additif sur le module d'élasticité

Les mêmes observations peuvent être faites à la Figure 4-8 concernant la résistance maximale à la traction et à la Figure 4-9 avec la résistance à la traction au point de rupture. Ces résultats sont expliqués par les mêmes faits que ceux avancés dans le paragraphe précédent. Les pâtes B et A-B ont des résistances à la traction extrêmement faibles, avec des valeurs allant entre 173 kPa à 275 kPa pour la pâte B. Ces échantillons étaient même difficiles à manipuler, car ils pouvaient se briser

uniquement en tirant dessus à la main. En effet, la très faible densité de ces échantillons montre qu'ils sont très poreux et ont formé peu de liaisons interfibres. Il est à noter que ces différentes propriétés mécaniques sont directement liées à la densité, tel qu'avancé à maintes reprises. Cela est corroboré par le fait que les trois premiers graphiques présentés dans cette section ont un aspect identique au graphique de la densité (Figure 4-4).

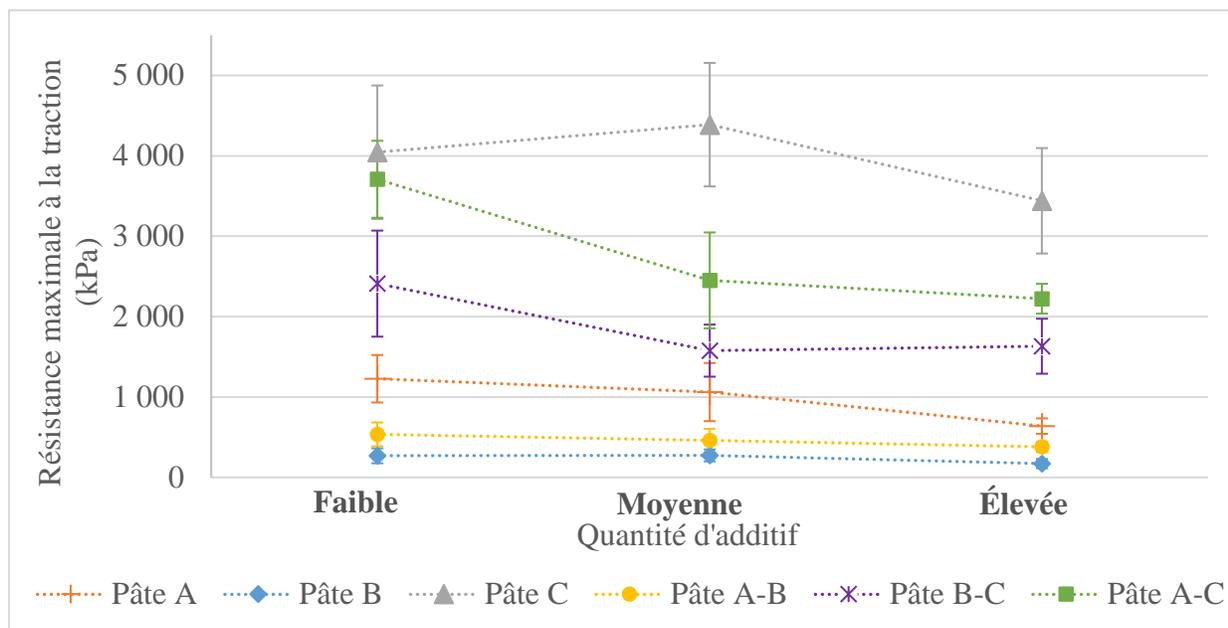


Figure 4-8 : Influence de la quantité d'additif sur la résistance maximale à la traction

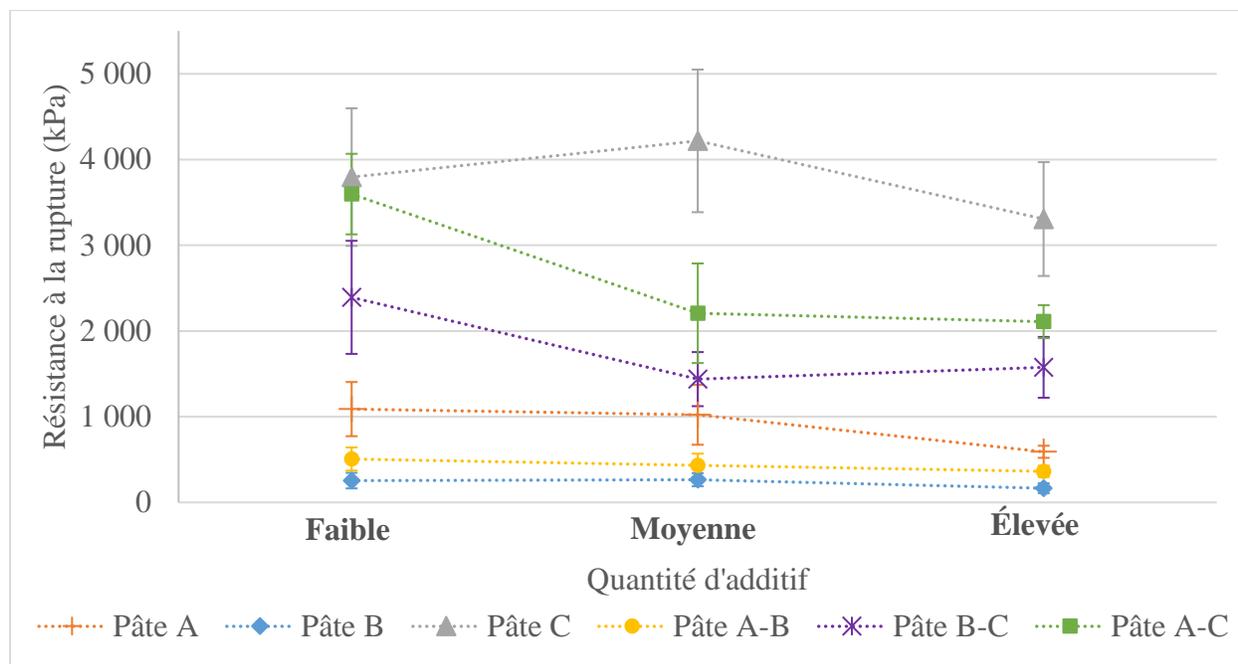


Figure 4-9 : Influence de la quantité d'additif sur la résistance à la rupture

Pour l'élongation à la résistance à la traction, il est possible de voir que les valeurs sont très faibles. En effet, les produits papetiers et les produits en pâte moulée ne présentent pas de grandes capacités de déformation. Ainsi, les échantillons possèdent de faibles élongations à la résistance à la traction, comme le montre les Figure 4-10 et Figure 4-11. Il est donc superflu de discuter de ces faibles variations et d'essayer d'en conclure des comportements d'intérêt.

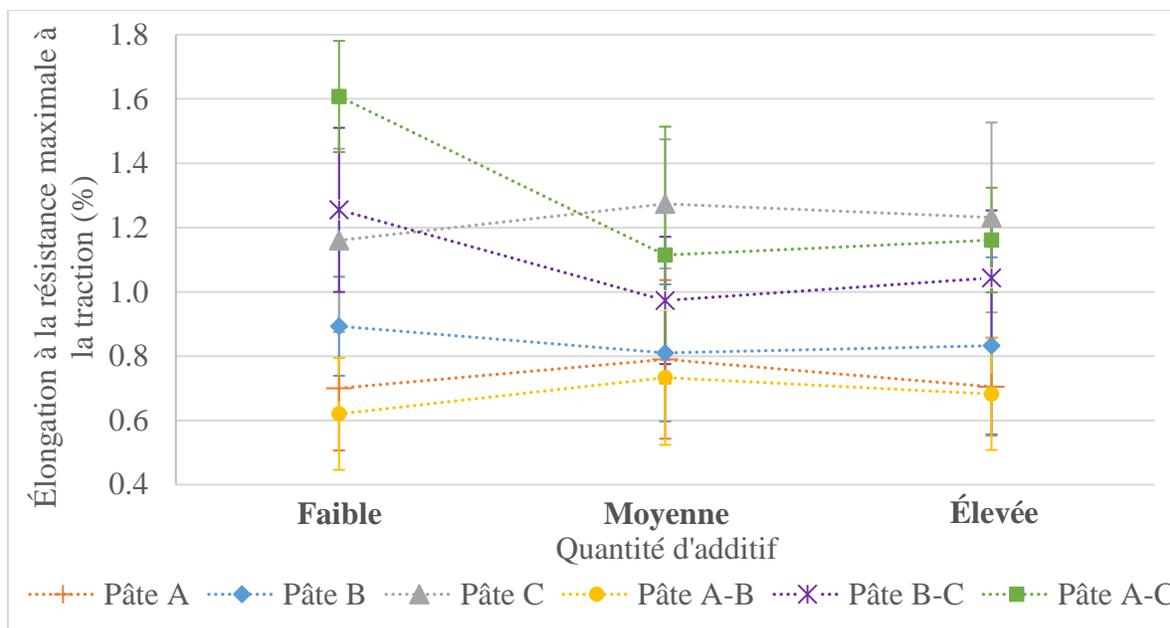


Figure 4-10 : Influence de la quantité d'additif sur l'élongation à la résistance maximale à la traction

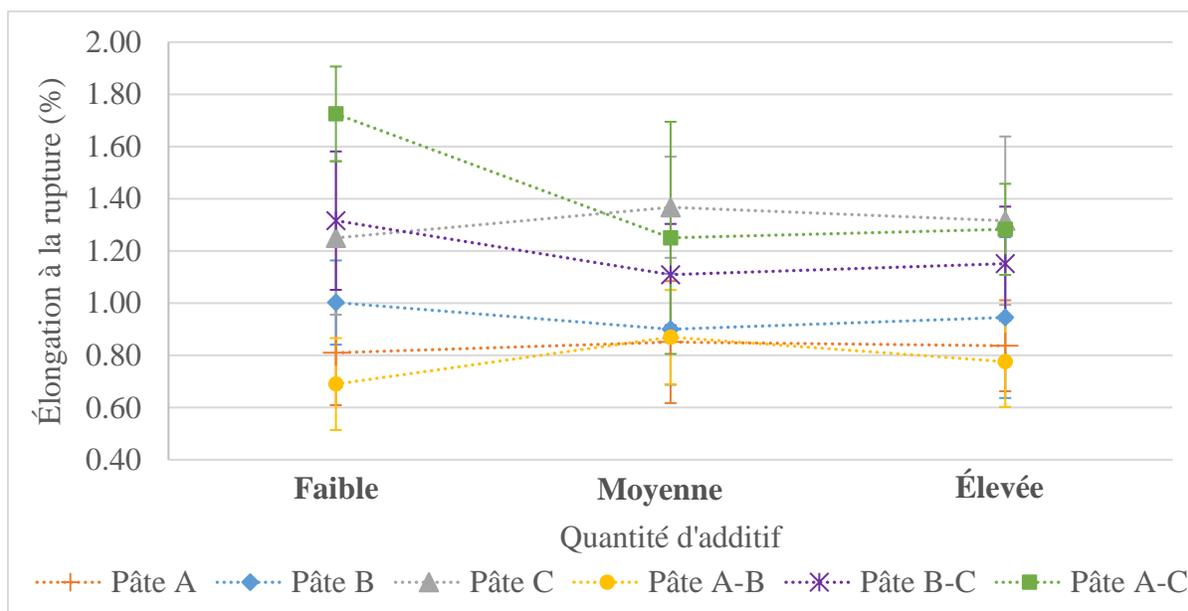


Figure 4-11 : Influence de la quantité d'additif sur l'élongation à la rupture

Finalement, de manière générale, il est possible de voir que l'ensemble des propriétés mécaniques sont diminuées avec l'augmentation de la quantité de perfluoroalkyles. En effet, les molécules de cellulose sont munies de groupes fonctionnels hydroxyles. Ces groupes fonctionnels rendent possible les liaisons hydrogènes qui renforcent les propriétés mécaniques des échantillons à base

de cellulose, comme vu dans la revue de la littérature. Toutefois, ces groupes fonctionnels permettent aussi les liaisons covalentes entre la cellulose et les perfluoroalkyles [73]. Les liaisons covalentes étant plus fortes que les liaisons hydrogène [74], les groupements hydroxyles vont avoir tendance à se lier préférentiellement aux perfluoroalkyles, plutôt qu'à d'autres groupements hydroxyles pour créer des liaisons hydrogène. Ceci semble expliquer le fait que les propriétés mécaniques des échantillons diminuent avec la quantité d'additif ajoutée.

4.3 Influence du raffinage sur les propriétés

Dans un premier temps, il est nécessaire de montrer quels étaient les différents indices d'égouttage des différentes pâtes. Étant difficile d'atteindre un indice d'égouttage précis, le raffinage des fibres a été fait de sorte à s'approcher le plus possible des valeurs posées de 500 CSF et 430 CSF. Ainsi, les indices d'égouttage obtenus pour chaque pâte sont présentés dans le Tableau 4-1.

Tableau 4-1: Indices d'égouttage des différentes pâtes pour l'étude du raffinage sur les propriétés

Pâte(s)	Indice d'égouttage (CSF)		
	Sans raffinage	500 CSF	430 CSF
A	717	506	423
B	740	506	433
C	505	N/A*	431
A-B	732	506	428
A-C	632	505	432
B-C	625	506	427

*La pâte C ayant déjà un indice d'égouttage de 505 CSF, elle n'a pas été raffinée d'avantage pour les tests à 500 CSF.

L'ensemble des graphiques suivants présentent un axe des abscisses décroissant, il a été décidé de présenter les résultats de cette manière, car une diminution des indices d'égouttage des fibres traduit une augmentation du taux de raffinage. De plus, comme vu dans la partie Protocole expérimental, ces tests ont été réalisés avec une quantité moyenne d'additif.

4.3.1 Grammage, épaisseur et densité

Comme il est possible de voir à la Figure 4-12, le grammage des échantillons ne semble pas avoir une tendance particulière avec le raffinage. Or, comme avec l'étude de l'influence de l'additif, sachant que les échantillons ont des épaisseurs différentes (Figure 4-13), il est dès lors plus approprié d'étudier la densité des différents échantillons, ce paramètre prenant en compte l'épaisseur des échantillons.

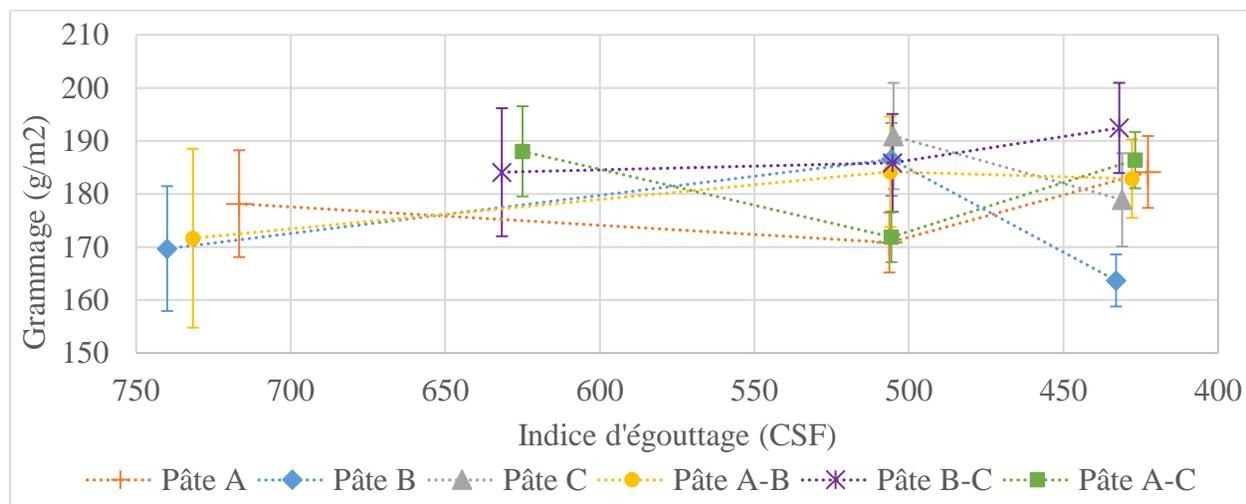


Figure 4-12 : Influence du taux de raffinage sur le grammage

À la Figure 4-13, une tendance globale se dessine et permet d'affirmer que l'épaisseur des échantillons diminue avec l'augmentation du taux de raffinage des fibres, et ce, pour tous les échantillons.

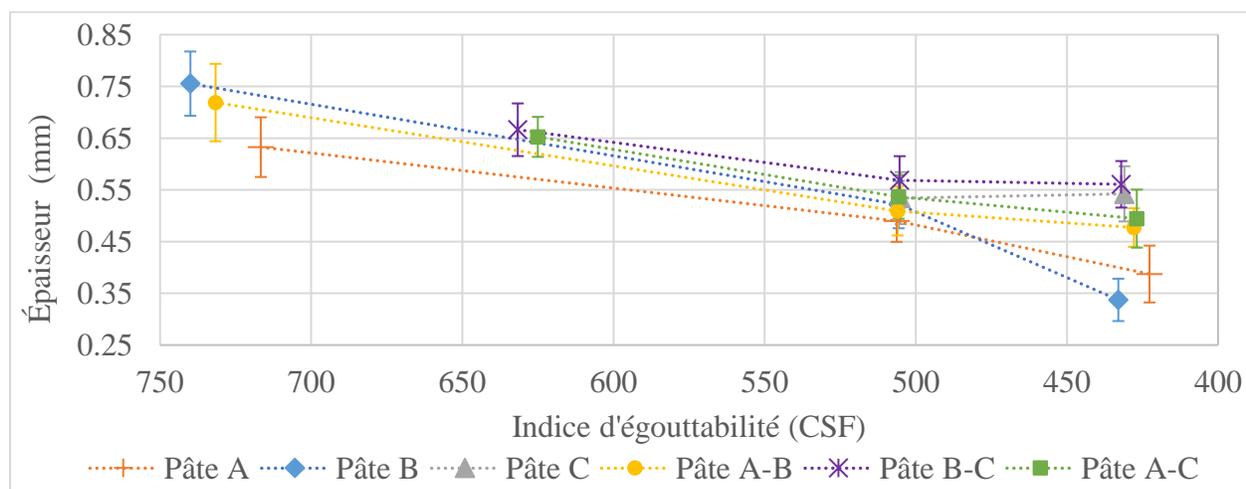


Figure 4-13 : Influence du taux de raffinage sur l'épaisseur des échantillons

Pour ce qui est de la Figure 4-14, il est évident que l'augmentation du taux de raffinage permet d'augmenter la densité des échantillons. En effet, tel que vu dans la section 2.3, le raffinage permet, en délaminant les couches P et S1, d'exposer les groupements fonctionnels présents dans la couche S2 et d'ainsi favoriser les liaisons inter-fibres. Par conséquent, cela permet de rapprocher les fibres et d'obtenir des échantillons plus denses. En revanche, il est possible de remarquer que la pâte C n'a pas le même comportement que les autres pâtes. En effet, sa densité passe de $351 \times 10^3 \text{ g/m}^3$ à 505 CSF à $331 \times 10^3 \text{ g/m}^3$ à 431 CSF. Il a été vu dans la revue de la littérature, que les fibres recyclées perdent leur capacité à faire des liaisons interfibres lorsqu'elles sont recyclées un trop grand nombre de fois. De plus, Howard et Bichard [75], ont montré que la densité des fibres provenant de pâte chimiques diminue avec le nombre de recyclage. Ceci permet d'expliquer la diminution de la densité observée pour la pâte C alors que toutes les autres pâtes ont une densité qui augmente avec le raffinage. Concernant les pâtes faites de mélanges, elles ont toutes tendance à avoir une densité qui augmente avec le raffinage. En revanche, la pâte A-B, pour un indice d'égouttage de 428 CSF semble avoir une densité faible en comparaison avec les pâtes A et B seules. Quant aux pâtes A-C et B-C leur densité se trouve entre celle des deux pâtes utilisées.

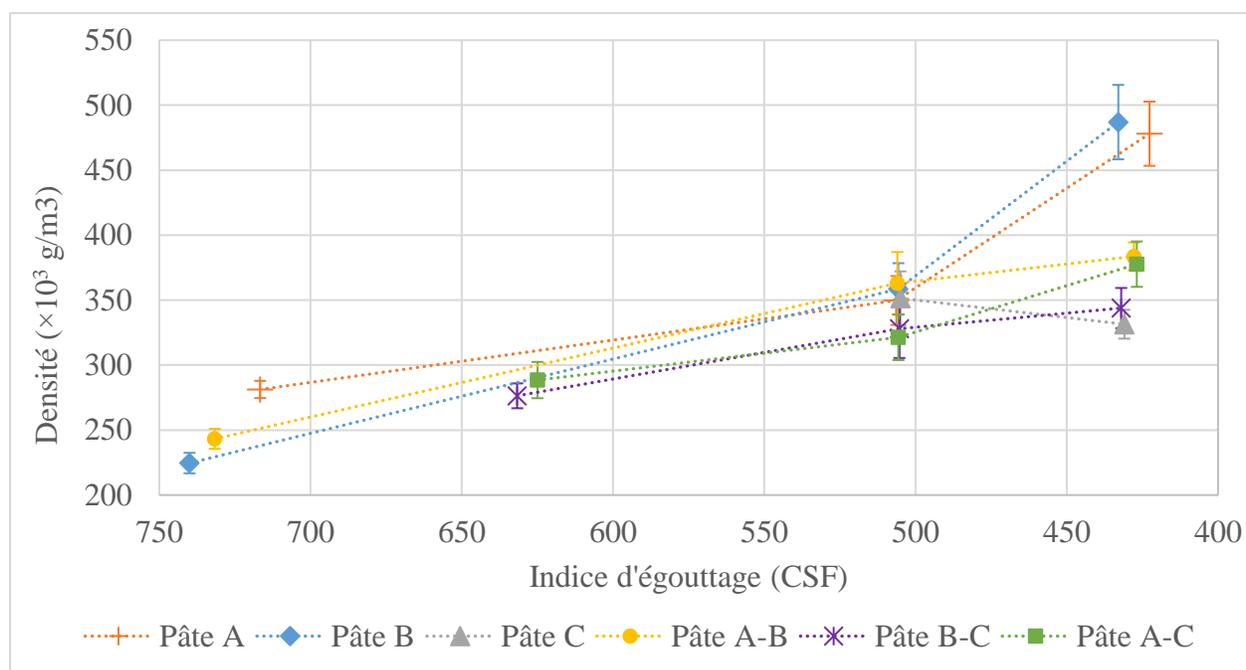


Figure 4-14 : Influence du taux de raffinage sur la densité

4.3.2 Propriétés barrières : Kit test et Cobb test

Il semblerait que le raffinage n'ait pas d'impact significatif sur la résistance à l'eau et à l'huile comme le montre les Figure 4-15 et Figure 4-16. En effet, bien que toutes les pâtes présentent un comportement légèrement différent, il n'y a pas de tendance à observer. La pâte A semble présenter une résistance à l'huile et à l'eau plus faible avec l'augmentation du taux de raffinage. Alors que la pâte B-C, a une résistance qui augmente avec le taux de raffinage, tout comme la pâte A-B qui présente une augmentation de la résistance à l'huile entre 732 CSF et 506 CSF. Cependant, celle-ci présente une diminution pour 428 CSF pour la résistance à l'huile, et elle a uniquement une diminution de la résistance à l'eau avec des quantités d'eau absorbée de 13,5, 16,2 et 21,6 g/m². La pâte A-B a une meilleure résistance à l'huile pour un raffinage de 427 CSF et présente aussi une meilleure résistance à l'eau pour ce raffinage. Finalement, les pâtes B et C ont une résistance à l'huile constante en fonction du taux de raffinage, mais présente des variations dans la résistance à l'eau.

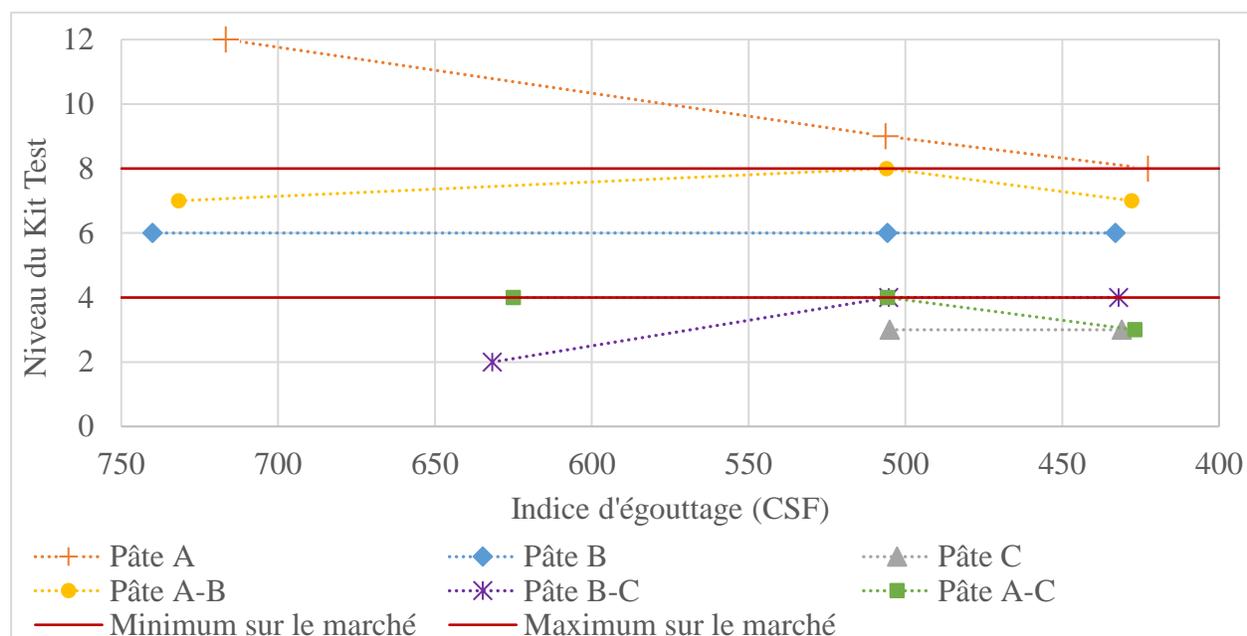


Figure 4-15 : Influence du taux de raffinage sur la résistance à l'huile

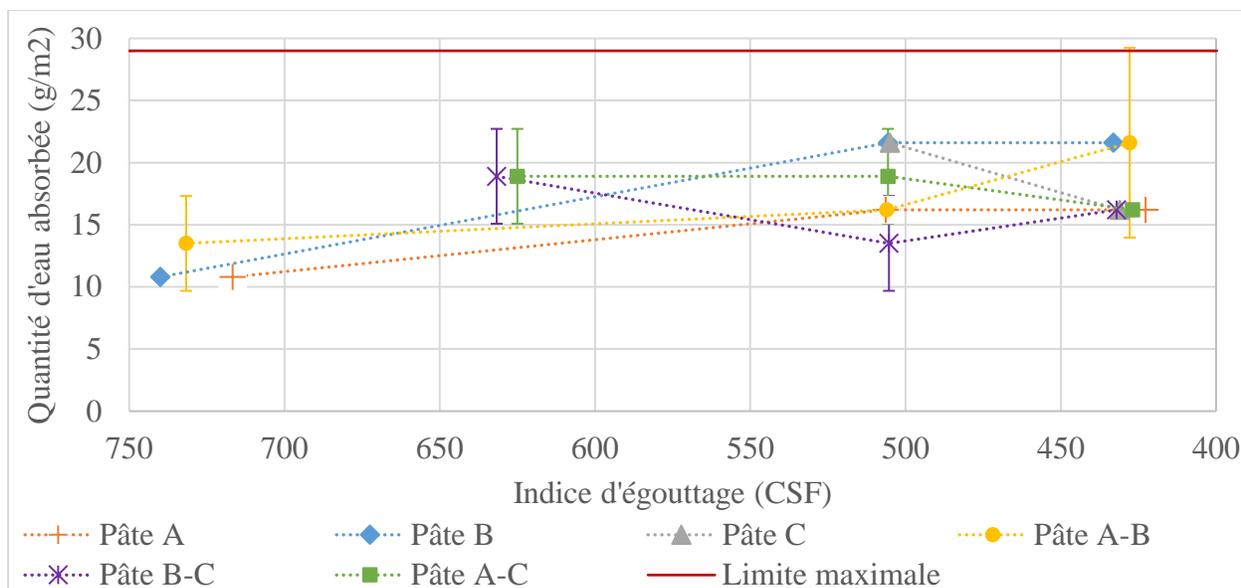


Figure 4-16 : Influence du taux de raffinage sur la résistance à l'eau

Somme toute, ces observations semblent montrer qu'il n'y ait pas de relation entre les propriétés barrières à l'eau et à l'huile et le taux de raffinage. Une hypothèse serait, étant donné qu'une seule quantité d'additif a été utilisée pour tous les échantillons, que cette quantité d'additif soit trop basse pour saturer les fibres, soit les groupements fonctionnels à la surface des fibres. Ainsi, peu importe le taux de raffinage, les fibres présentent suffisamment de groupes fonctionnels pour se lier à l'additif, et une augmentation de la surface de contact et du nombre de groupes fonctionnels libres ne permettent pas une augmentation de liaisons fibres-additif. En effet, il aurait été possible de penser, étant donné que le raffinage augmente la capacité à créer des liaisons, que l'additif soit davantage lié avec les fibres, et aurait donc augmenté la résistance à l'eau et à l'huile.

4.3.3 Propriétés mécaniques

Comme attendu, le module de Young a tendance à augmenter avec l'augmentation du raffinage dans les différents essais (Figure 4-17). Il est possible de voir que les pâtes de fibres vierges ont une augmentation plus marquée que les pâtes à base de fibres recyclées ou de mélanges contenant des fibres recyclées. La seule donnée étonnante est celle pour la pâte A à 506 CSF, avec un module élastique de 3134 MPa.

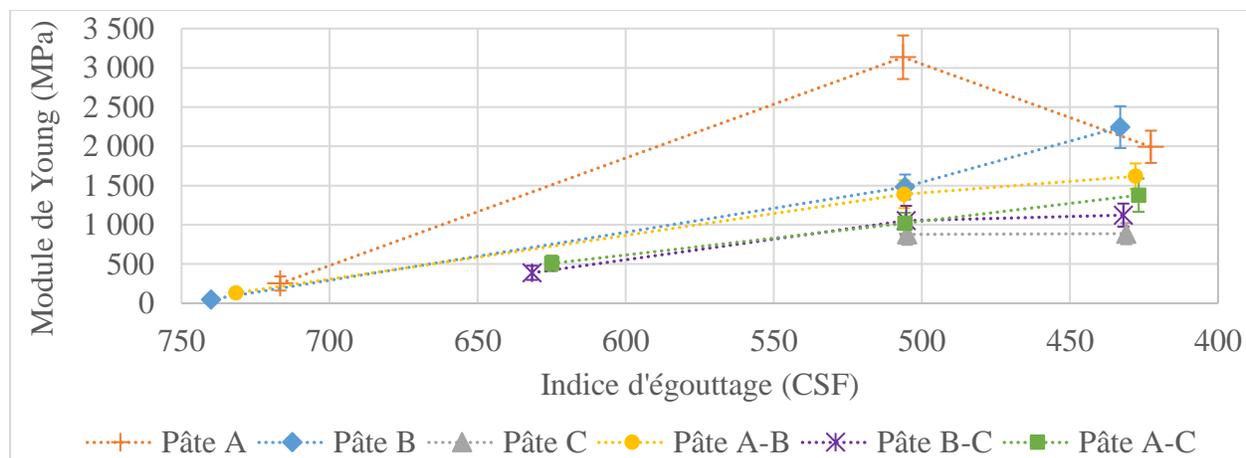


Figure 4-17 : Influence du taux de raffinage sur le module élastique

Concernant les résistances à la traction maximale (Figure 4-18) et à la rupture (Figure 4-19), il est possible de constater qu'elles augmentent fortement avec le taux de raffinage. La pâte B est celle avec la résistance à la traction la plus faible sans raffinage, soit respectivement de 275 kPa et de 265 kPa pour les résistances maximale et à la rupture. Toutefois, le raffinage (avec un indice d'égouttage de 433 CSF) permet d'obtenir des gains importants menant à la meilleure résistance à la traction, avec 20 900 kPa de résistance maximale et 20 100 kPa de résistance à la rupture. Ainsi, sa résistance à la traction a été multipliée par 75. La pâte C est celle qui a montré l'augmentation la plus faible, cette pâte ayant déjà été raffinée à plusieurs reprises lors des cycles de recyclage. Sa résistance maximale à la traction est passée de 4 387 kPa pour un raffinage de 505 CSF à 5 005 kPa pour un raffinage de 431 CSF, menant ainsi à une très faible augmentation de la résistance à la traction. Les pâtes mélangées présentent elles aussi une amélioration des résistances mécaniques, mais moins importantes que les pâtes de fibres vierges.

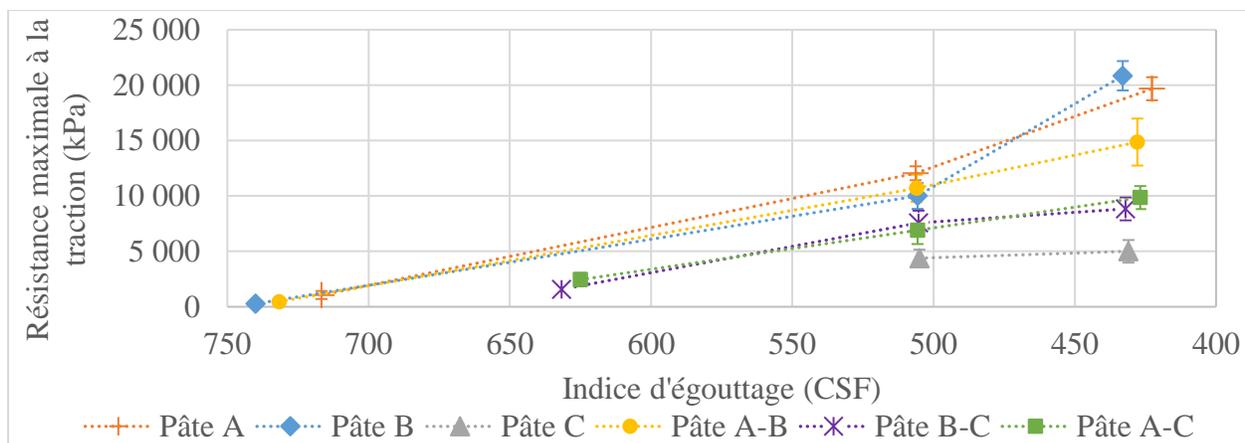


Figure 4-18 : Influence du taux de raffinage sur la résistance maximale à la traction

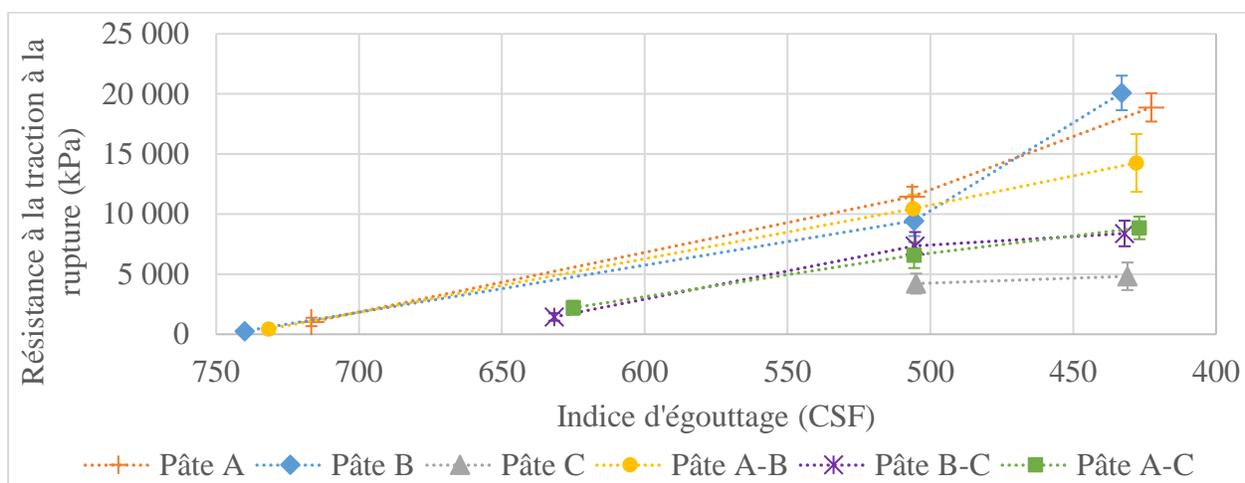


Figure 4-19 : Influence du taux de raffinage sur la résistance à la traction à la rupture

Il est aussi possible de voir avec les Figure 4-20 et Figure 4-21, que l'élongation des échantillons a été augmentée grâce au procédé de raffinage. Par contre, cela n'est pas le cas pour la pâte C, pour laquelle l'élongation à la résistance maximale et à la rupture a diminuée de 0,12% et 0,13% respectivement. Il est d'ailleurs possible de voir à nouveau que l'élongation des pâtes mélangées B-C et A-C présente une moins grande augmentation de l'élongation que les pâtes de fibres vierges, et même une diminution entre un raffinage de 505 CSF à 427 CSF pour la pâte B-C. Cela s'explique par la présence de fibres recyclées dans les échantillons.

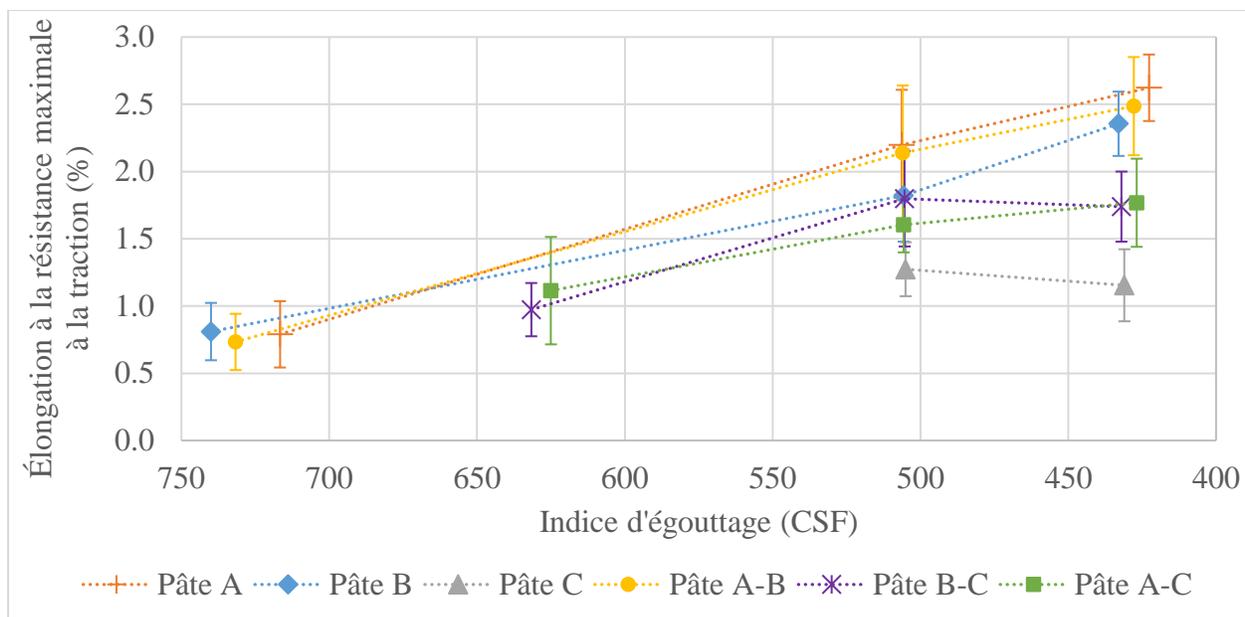


Figure 4-20 : Influence du taux de raffinage sur l'élongation à la résistance maximale à la traction

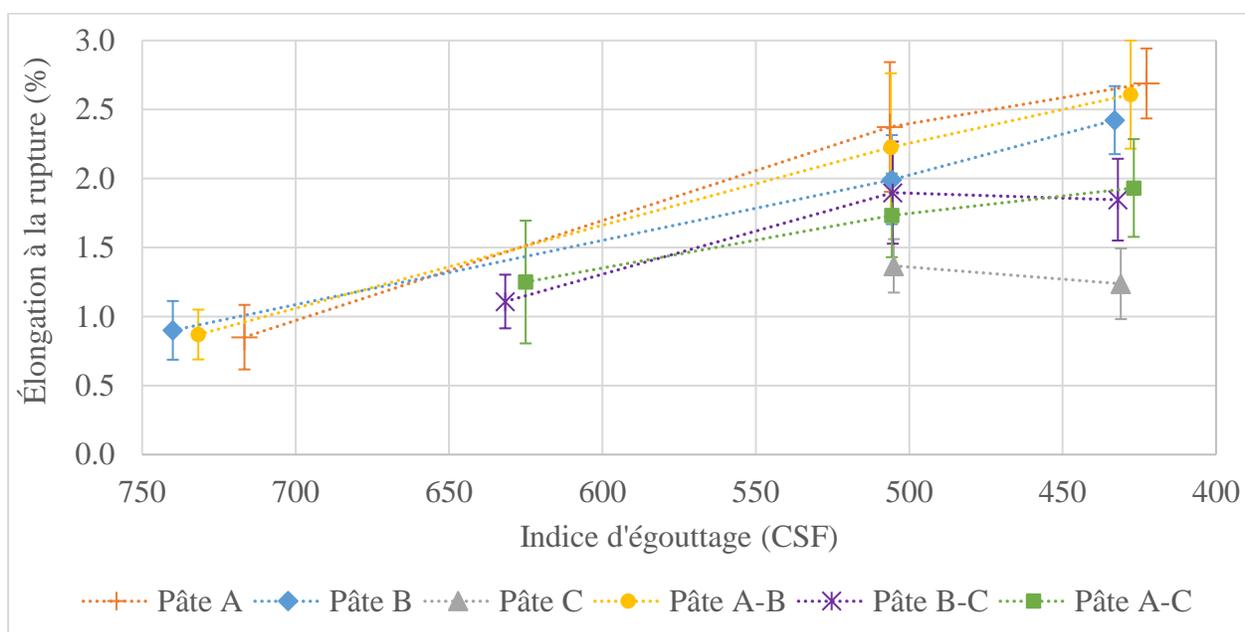


Figure 4-21 : Influence du taux de raffinage sur l'élongation à la rupture

Pour résumer, l'ensemble des propriétés mécaniques à la traction ont été améliorées avec le raffinage. En effet, ceci s'explique une fois de plus par la capacité des fibres à créer des liaisons hydrogène entre elles. Comme vu dans la section 2.3, le raffinage permet une plus grande surface de contact des groupements fonctionnels, ce qui augmente les chances de liaisons hydrogène. Ces liaisons étant la source principale de liaisons entre les fibres, leur augmentation cause directement

l'augmentation des propriétés mécaniques des produits papetiers. De plus, il a été observé que les pâtes avec des fibres recyclées présentent des améliorations de la résistance à la traction plus faibles, et même des diminutions de l'élongation. Ces résultats sont explicables par les dommages accumulés par les fibres à de multiples reprises lors des nombreuses remises en pâte.

4.4 Analyse économique

En premier lieu, les coûts fixes ont été calculés, mais les détails de ces calculs ne peuvent être présentés ici par soucis de confidentialité. En second lieu, les coûts variables ont été calculés en fonction des prix des matières premières. Ces derniers sont présentés en pourcentages relatifs de la pâte la plus chère dans le Tableau 4-2 suivant. Ainsi, il est possible de voir que la pâte B est la plus coûteuse, et que la C, celle de fibres recyclées est la moins coûteuse.

Tableau 4-2 : Coûts relatifs des pâtes

Pâte A	Pâte B	Pâte C	Pâte A-B	Pâte B-C	Pâte A-C
91%	100 %	57%	95%	79%	74%

De plus, il est important de savoir que l'additif est un produit très coûteux, par conséquent, une faible variation dans la quantité ajoutée dans la recette implique un impact important dans les coûts finaux.

Concernant les coûts d'opération liés au raffinage, la puissance hors charge ($P_{no\ load}$) du raffineur a été calculée et est de 11,6 hp. Cela a permis d'avoir la puissance nette (P_{net}) qui est de 38,4 hp, et subséquemment d'obtenir l'énergie spécifique (E_{spec}) qui est de 6,15 hp/(t/j). Il a donc été possible de calculer la diminution de l'indice d'égouttage par énergie spécifique. Les valeurs de ces données sont présentées au Tableau 4-3. Ainsi, il est possible de voir (cases en rouge) qu'un raffineur en continu n'est pas suffisant pour raffiner la pâte B, que ce soit pour l'amener à un indice d'égouttage de 500 CSF ou 430 CSF. Il en est de même pour la pâte A-B pour 430 CSF. Aussi, il est possible de remarquer que certaines pâtes n'ont pas besoin d'un raffinage en continu (cases en jaune), ce sont essentiellement les pâtes contenant les fibres recyclées.

Tableau 4-3 : Diminution de l'indice d'égouttage par énergie spécifique pour chaque type de pâte

Type de pâte	CSF à l'entrée	CSF 1 à la sortie	Δ CSF 1	Δ CSF 1 / hp/(t/d)	CSF 2 à la sortie	Δ CSF 2	Δ CSF 2 / hp/(t/d)	Valeur conseillées Δ CSF / hp/(t/d) [76]	
Pâte A	717	500	217	35.3	430	287	46.6	25	50
Pâte B	740	500	240	39.0	430	310	50.4	15	25
Pâte C	505	N/A	N/A	N/A	430	75	12.2	50	70
Pâte A-B	732	500	232	37.7	430	302	49.1	20	37.5
Pâte B-C	632	500	132	21.5	430	202	32.8	32.5	47.5
Pâte A-C	625	500	125	20.3	430	195	31.7	37.5	60

Ainsi, deux raffineurs en série sont nécessaires pour la pâte B et la pâte A-B pour 430 CSF. Cela implique un doublement des coûts d'opération de raffinage pour ces pâtes. Pour les pâtes avec une diminution d'indice d'égouttage par énergie spécifique plus faible que les valeurs conseillées, un pourcentage d'utilisation a été calculé, les données sont présentées dans le Tableau 4-4.

Tableau 4-4 : Pourcentage d'utilisation du raffineur

Type de pâte	Pourcentage d'utilisation du raffineur (%)	
	Δ CSF 1 / hp/(t/d)	Δ CSF 2 / hp/(t/d)
Pâte C	N/A	24
Pâte B-C	66	N/A
Pâte A-C	54	85

Finalement, l'ensemble des coûts de production ont été calculés et les coûts ont été normalisés par rapport à l'option la plus chère (Figure 4-22). Il est possible de remarquer que la quantité d'additif a une influence nettement plus importante sur les coûts que le raffinage. Néanmoins, l'augmentation des coûts de raffinage reste non négligeable à l'échelle d'une production industrielle.

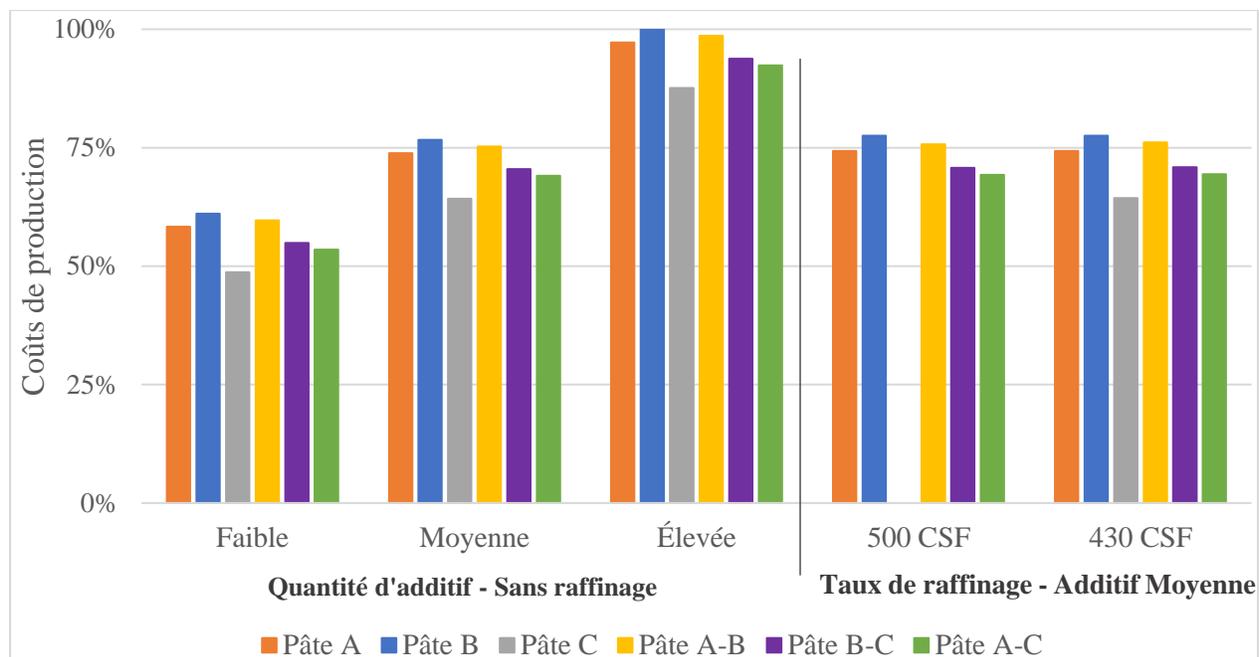


Figure 4-22 : Coûts de production relatifs des différentes options

4.5 Choix de la meilleure option

Une fois les propriétés barrières et mécaniques étudiées et les coûts de production calculés, il s'agit de proposer la meilleure option à AecopaQ. Ainsi, le Tableau 4-5 présente les caractéristiques des 29 formules qui ont été développées dans ces travaux.

Tableau 4-5 : Caractéristiques de chaque option

Code de l'option	Quantité d'additif	Indice d'égouttage (CSF)	Code de l'option	Quantité d'additif	Indice d'égouttage (CSF)
A-1	Faible	N/A	AB-3	Élevée	N/A
B-1	Faible	N/A	BC-3	Élevée	N/A
C-1	Faible	N/A	AC-3	Élevée	N/A
AB-1	Faible	N/A	A-2-500	Moyenne	500
BC-1	Faible	N/A	B-2-500	Moyenne	500
AC-1	Faible	N/A	AB-2-500	Moyenne	500
A-2	Moyenne	N/A	BC-2-500	Moyenne	500
B-2	Moyenne	N/A	AC-2-500	Moyenne	500
C-2	Moyenne	N/A	A-2-430	Moyenne	430
AB-2	Moyenne	N/A	B-2-430	Moyenne	430
BC-2	Moyenne	N/A	C-2-430	Moyenne	430
AC-2	Moyenne	N/A	AB-2-430	Moyenne	430
A-3	Élevée	N/A	BC-2-430	Moyenne	430
B-3	Élevée	N/A	AC-2-430	Moyenne	430
C-3	Élevée	N/A			

Afin de proposer une option unique à AecopaQ, un schéma décisionnel a été bâti avec la participation de AecopaQ et de ces clients, et est résumé à la Figure 4-23.

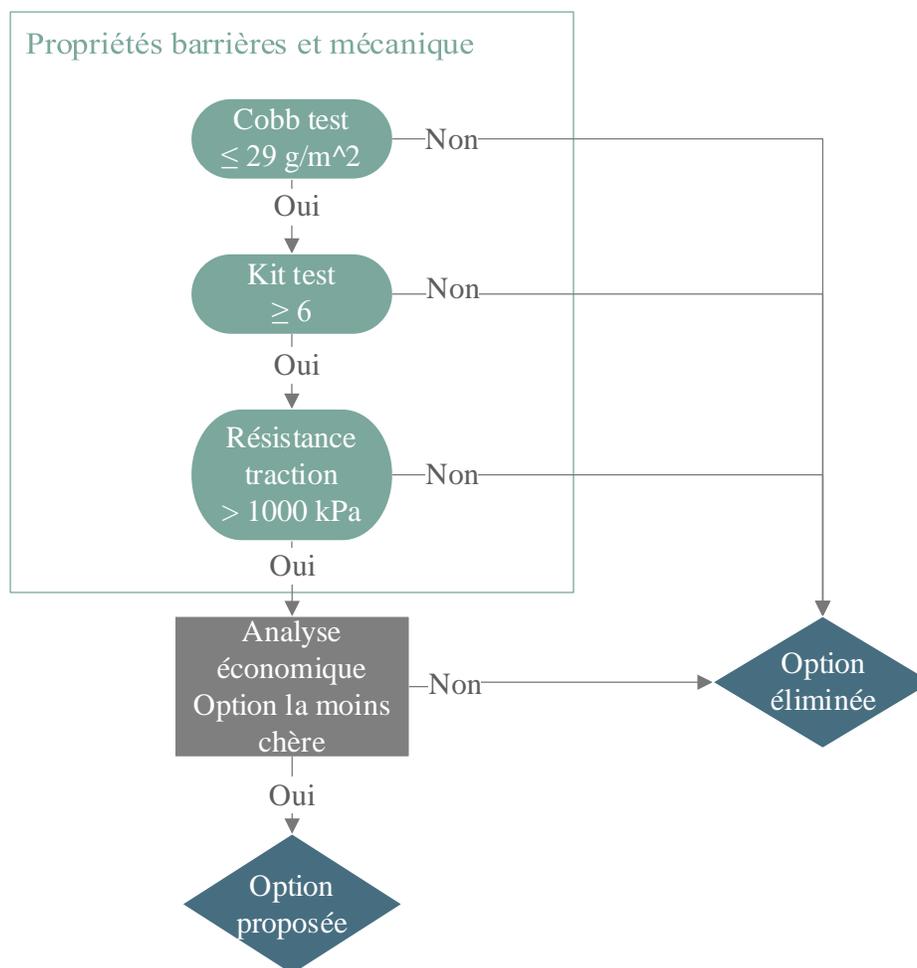


Figure 4-23 : Schéma décisionnel pour la proposition de la meilleure option

Dans un premier temps, il est possible de remarquer que l'ensemble des échantillons respecte la limite d'absorption à l'eau fixée par les clients. Ces derniers avaient accepté lors de travaux précédents des échantillons absorbant entre 26 g et 29 g d'eau par m^2 . Les échantillons produits ici sont tous entre 5,4 et 24,6 g d'eau/ m^2 . Ainsi, la résistance à l'eau ne permet pas d'éliminer des options.

Quant aux résultats du Kit test pour les différents pourcentages d'additif, il est possible de voir qu'aucune pâte non raffinée avec une quantité faible d'additif ne respecte les attentes en matière de barrière à l'huile, toutes inférieures au niveau 6 – niveau minimal requis par les clients. De plus, il est possible de voir que sans raffinage et avec des quantités moyenne et élevée d'additif, les options B-C et C ne sont pas acceptables et, comme le montre la Figure 4-15, le raffinage ne permet pas d'obtenir une meilleure résistance à l'huile. En revanche, il est possible de constater que

l'option AC-3 contenant des fibres recyclées est encore une possibilité, démontrant un niveau de résistance à l'huile de 7. Les options non éliminées sont : A-2, B-2, AB-2, A-3, B-3, AB-3, AC-3, A-2-500, B-2-500, AB-2-500, A-2-430, B-2-430 et AB-2-430.

La prochaine contrainte implique une résistance à la traction supérieure à 1 000 kPa. Il est possible de constater que parmi les options sans raffinage, les seules options ayant une résistance supérieure à 1 000 kPa sont A-2 et AC-3. De plus, le raffinage ayant une grande influence sur la résistance à la traction, toutes les options ayant passées le Kit test et étant raffinées sont encore des options envisageables.

Les options suivantes respectent les propriétés désirées : A-2, AC-3, A-2-500, B-2-500, AB-2-500, A-2-430, B-2-430 et AB-2-430. Il reste à déterminer quelle est l'option la plus rentable. À l'aide de l'analyse de coûts, il est possible de voir que l'option la plus avantageuse est la A-3. En effet, cette option ne possède qu'une quantité moyenne d'additif, mais permet tout de même d'obtenir les résistances à l'huile et à l'eau désirée. De plus, elle a l'avantage de ne nécessiter aucun raffinage supplémentaire pour avoir une résistance à la traction supérieure à 1 000 kPa, et donc elle permet d'éviter des coûts d'opération de raffinage, mais surtout des coûts élevés d'investissement dans ce type d'équipement. De plus, cette option présente une résistance extrême à l'huile (niveau 12). Cela signifie que des coûts pourraient être économisés en diminuant le pourcentage d'additif afin d'obtenir un niveau de 9 ou 10, qui est un niveau de résistance à l'huile largement suffisant pour les clients.

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ces travaux de recherche ont permis de tester 29 recettes de pâte différentes avec trois matières premières. Ces dernières sont toutes issues de procédé Kraft, deux sont à base de fibres vierges, l'une blanchie, l'autre non-blanchie et la dernière est à base de fibres recyclées. Dans le but de proposer la meilleure option possible à AecopaQ, deux paramètres de fabrication des échantillons ont été analysés : la quantité d'additif dans la pâte et le taux de raffinage. Afin de proposer un profil de propriétés global, les propriétés morphologiques ont été analysées, à l'aide du calcul du grammage, de l'épaisseur des échantillons et de la densité. Les propriétés barrières ont été testées avec deux tests, le Kit test pour la résistance à l'huile et le Cobb test pour la résistance à l'eau. Finalement, les propriétés mécaniques ont été étudiées par des essais de traction.

Les résultats ont montré que la solution de perfluoroalkyles (PFAs) n'avait pas une l'influence sur toutes les propriétés des échantillons. Évidemment l'augmentation de la quantité d'additif vient améliorer les propriétés de barrières à l'eau et à l'huile. Il a aussi été montré que les propriétés mécaniques diminuaient avec l'augmentation de la quantité d'additif. En revanche, les propriétés morphologiques ne semblent pas répondre à une quelconque influence de la quantité d'additif. Concernant l'influence du taux de raffinage il a été montré que le raffinage avait une influence sur les propriétés morphologiques et mécaniques des échantillons. Une augmentation du taux de raffinage entraîne une augmentation des propriétés mécaniques pour toutes les pâtes testées sauf la pâte d'origine recyclée. Mais aucune influence notable n'a été relevée sur les propriétés barrières. De manière générale, il a été montré que l'ensemble des propriétés dépend de la capacité des fibres à créer des liaisons, soit avec l'additif, soit entre fibres.

L'étude de ces propriétés a permis de réaliser un tableau de bord des propriétés recherchées et de proposer à AecopaQ la meilleure option en se basant sur les coûts de production des différentes options. L'option qui est proposée à AecopaQ est la pâte A, à base de fibres vierges blanchies, avec une quantité d'additif moyenne et aucun raffinage supplémentaire.

Au niveau des propriétés étudiées en laboratoire, il est recommandé de réaliser de plus amples recherches sur l'influence des paramètres et notamment en utilisant un procédé de thermoformage et non de moulage-séchage. Il serait aussi intéressant de réaliser une étude paramétrique sur le taux de raffinage et la quantité d'additif afin de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse qui a été formulée disant que la quantité d'additif utilisée est trop faible pour voir l'influence du raffinage sur les

propriétés barrières à l'eau et à l'huile. Finalement, afin d'offrir un plus grand nombre de pistes de solution pour une ressource locale, il est recommandé d'étudier la faisabilité de fabrication de produits en pâte moulée avec d'autres types de fibres disponibles au Québec, comme par exemple les pâtes mécaniques, le chanvre, le phragmite, etc.

Finalement, des recherches au niveau de l'additif doivent être faites, afin de trouver une solution moins impactante. En effet, les PFAs représentent un danger pour la qualité des écosystèmes et pour la santé humaine, comme vu dans la revue de la littérature.

RÉFÉRENCES

- [1] H. Ritchie et M. Roser, « Plastic Pollution », *Our World in Data*, 2018. [En ligne]. Disponible à: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>. [Consulté le: 04-mars-2021].
- [2] K. Marsh et B. Bugusu, « Food Packaging - Roles, Materials, and Environmental Issues », *J. Food Sci.*, vol. 72, n° 3, p. 39-55, 2007.
- [3] J. R. Jambeck *et al.*, « Marine Pollution. Plastic waste inputs from land into the ocean », *Science (80-.)*, vol. 347, n° 6223, p. 768-771, 2015.
- [4] A. Chamas *et al.*, « Degradation Rates of Plastics in the Environment », *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 8, p. 3494-3511, 2020.
- [5] M. Sigler, « The Effects of Plastic Pollution on Aquatic Wildlife: Current Situations and Future Solutions », *Water, Air Soil Pollut.*, vol. 225, n° 2184, 2014.
- [6] C. Wilcox, N. J. Mallos, G. H. Leonard, A. Rodriguez, et B. D. Hardesty, « Using expert elicitation to estimate the impacts of plastic pollution on marine wildlife », *Mar. Policy*, vol. 65, p. 107-114, 2016.
- [7] S. Kühn, E. L. Bravo Rebolledo, et J. A. van Franeker, « Deleterious Effects of Litter on Marine Life », dans *Marine Anthropogenic Litter*, 2015, p. 75-116.
- [8] D. W. Laist, « Impacts of Marine Debris: Entanglement of Marine Life in Marine Debris Including a Comprehensive List of Species with Entanglement and Ingestion Records », dans *Marine Debris*, 1997, p. 99-139.
- [9] Ville de Montréal, « Montréal va réduire et interdire les plastiques à usage unique ». 2019.
- [10] La Presse canadienne, « Ottawa veut interdire les articles en plastique à usage unique d'ici 2021 », *Radio-Canada*, 09-juin-2019.
- [11] T. Doucet, « Le plastique à usage unique revient en grâce avec la COVID-19 », *Radio-Canada*, 14-juin-2020.
- [12] M. Didone *et al.*, « Moulded Pulp Manufacturing: Overview and Prospects for the Process Technology », *Packag. Technol. Sci.*, vol. 30, p. 231-249, 2017.
- [13] C. J. Weber, V. Haugaard, R. Festersen, et G. Bertelsen, « Production and applications of

- biobased packaging materials for the food industry », *Food Addit. Contam.*, vol. 19, n° Supplement, p. 172-177, 2002.
- [14] K. Sudesh et T. Iwata, « Sustainability of Biobased and Biodegradable Plastics », *Clean*, vol. 36, n° 5-6, p. 433-442, 2008.
- [15] B. R. Stanmore, « Generation of Energy from Sugarcane Bagasse by Thermal Treatment », *Waste Biomass Valor*, vol. 1, p. 77-89, 2010.
- [16] R. Murphy, *Sugarcane. Production Systems, Uses and Economic Importance*. Nova Science Publishers Inc., 2017.
- [17] Centre international de référence sur le cycle de vie des produits procédés et services (CIRAIG), « Rapport Technique - Analyse de cycle de vie de différents types de vaisselle et de scénarios d'opération des aires de service alimentaire de Polytechnique Montréal », 2017.
- [18] Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), « Evaluation des ressources forestières mondiales 2010 », Rome, 2010.
- [19] AecopaQ, « Accueil », 2020. [En ligne]. Disponible à : <https://aecopaq.ca/>. [Consulté le: 04-mars-2021].
- [20] H. Sixta, *Handbook of Pulp*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006.
- [21] R. M. Rowell, Éd., *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. Taylor & Francis, 2005.
- [22] D. N.-S. Hon et N. Shiraishi, Éd., *Wood and cellulosic chemistry*, 2^e éd. Marcel Dekker, Inc., 2001.
- [23] S. Pérez, « Structure et morphologie de la cellulose ». 2000.
- [24] T. Stevanovic, « Chemical Composition and Properties of Wood », dans *Lignocellulosic Fibers and Wood Handbook*, N. Belgacem et A. Pizzi, Éd. John Wiley & Sons, Inc. & Scrivener Publishing LLC, 2016, p. 49-106.
- [25] K. J. Niklas, « The Cellular Mechanics of Plants », *Am. Sci.*, vol. 77, n° 4, p. 344-349, 1989.
- [26] P. Koch, *Utilization of hardwoods growing on southern pine sites*, vol. 2. U.S. Department

- of Agriculture, Forest Service, 1985.
- [27] R. P. Green et G. Hough, *Chemical Recovery in the Alkaline Pulping Processes*, 3ième. Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI), 1992.
- [28] H. Holik et R. Mayer, « Dryer Section », dans *Handbook of Paper and Board*, 2nd éd., H. Holik, Éd. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013.
- [29] Valmet, « Boosting pulp drying production », 2021. [En ligne]. Disponible à: <https://www.valmet.com/media/articles/pulping-and-fiber/pulp-drying/boosting-pulp-drying-production/>. [Consulté le: 19-févr-2021].
- [30] S. Gharekhani *et al.*, « Basic effects of pulp refining on fiber properties — A review », *Carbohydr. Polym.*, vol. 115, p. 785-803, 2015.
- [31] N. R. Nasab, J. A. Olson, J. Heymer, et M. D. Martinez, « Understanding of No-Load Power in Low Consistency Refiners », *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 92, p. 524-535, 2014.
- [32] J.-F. Bloch, « Paper Characterization and Testing », dans *Lignocellulosic Fibers and Wood Handbook*, N. Belgacem et A. Pizzi, Éd. John Wiley & Sons, Inc. & Scrivener Publishing LLC, 2016, p. 611-628.
- [33] S. Adamopoulos, C. Passialis, E. Voulgaridis, et J. V. Oliver Villanueva, « Grammage and structural density as quality indexes of packaging grade paper manufactured from recycled pulp », *Drewno*, vol. 57, n° 191, p. 146, 2014.
- [34] E. Brännvall et G. Annergren, « Pulp Characterisation », dans *Pulp and paper chemistry and technology*, 2009, p. 446.
- [35] D. H. Page, « A Theory for the Tensile Strength of Paper », *Tappi J.*, vol. 52, n° 4, p. 674-681, 1969.
- [36] U. B. Mohlin, « No Title », *J. pulp Pap. Sci.*, vol. 23, n° 1, 1997.
- [37] N. Wistara et R. A. Young, « Properties and treatments of pulps from recycled paper . Part I . Physical and chemical properties of pulps », *Cellulose*, vol. 6, p. 291-324, 1999.
- [38] A. Strand *et al.*, « The effect of chemical additives on the strength, stiffness and elongation potential of paper », *Nord. Pulp Pap. Res. J.*, vol. 32, n° 3, p. 324-335, 2017.

- [39] C. E. Courchene, G. F. Peter, et J. Litvay, « Cellulose microfibril angle as a determinant of paper strength and hygroexpansivity in *Pinus taeda* L. », *Wood Fiber Sci.*, vol. 38, n° 1, p. 112-120, 2006.
- [40] P. Bajpai, « Paper and Its Properties », dans *Biermann's Handbook of Pulp and Paper : Paper and Board Making*, vol. 2, Elsevier Inc., 2018.
- [41] J. Sheng, J. Li, et L. Zhao, « Fabrication of grease resistant paper with non-fluorinated chemicals for food packaging », *Cellulose*, vol. 26, p. 6291-6302, 2019.
- [42] RECYC-QUÉBEC, « Bilan 2018 de la gestion des matières résiduelles au Québec », 2020.
- [43] Japan Paper Association, « Reuse of the Fiber ». [En ligne]. Disponible à: <https://www.jpaa.or.jp/en/env/recycle/reuse/>. [Consulté le: 20-févr-2021].
- [44] L. Menke, « The Integrated Recycled Paper Mill (IRPM) », dans *Handbook of Paper and Board*, H. Holik, Éd. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013.
- [45] P. Bajpai, « Chemicals Used for Paper Recycling », dans *Pulp and paper industry : Chemicals*, Elsevier, 2015.
- [46] N. Wistara, X. Zhang, et R. A. Young, « Properties and treatments of pulps from recycled paper . Part II . Surface properties and crystallinity of fibers and fines », *Cellulose*, vol. 6, p. 325-348, 1999.
- [47] F. E. Keyes, « Method of molding pulp articles », 424,003, 1890.
- [48] M. L. Keyes, « Apparatus for making pulp articles », 740,023, 1903.
- [49] Paper Water Bottle, « Paper Water Bottle Products », 2021. [En ligne]. Disponible à: <https://paperwaterbottle.com/products/>. [Consulté le: 20-févr-2021].
- [50] International Molded Fiber Association (IMFA), « Molded fiber », 2021. [En ligne]. Disponible à: <https://www.imfa.org/molded-fiber/>. [Consulté le: 23-févr-2021].
- [51] Golden Arrow, « Bamboo Packaging: A Sustainable Molded Fiber Option », 2020. [En ligne]. Disponible à: <https://www.goldenarrow.com/eng/blog/bamboo-packaging-sustainable-molded-fiber-option>. [Consulté le: 23-févr-2021].
- [52] F. Vargas, Z. Gonzalez, R. Sanchez, L. Jiménez, et A. Rodriguez, « Cellulosic pulps of

- cereal straws as raw material for the manufacture of ecological packaging », *BioResources*, vol. 7, n° 3, p. 4161-4170, 2012.
- [53] J. Bear, *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Dover Publications, 1972.
- [54] AGC, « A new generation of fluorinated water/oil/alcohol repellent ». 2017.
- [55] R. R. Thomas, « Material Properties of Fluoropolymers and Perfluoroalkyl-Based Polymers », dans *Fluoropolymers 2*, G. Hougham, P. E. Cassidy, K. Johns, et T. Davidson, Éd. 1999.
- [56] K. Uneyama, « Fundamentals in Organic Fluorine Chemistry », dans *Organofluorine Chemistry*, Oxford ; Ames ; Iowa : Blackwell Pub., 2006, p. 1-100.
- [57] M. Khodaei, « Introductory Chapter: Superhydrophobic Surfaces - Introduction and Applications », dans *Superhydrophobic Surfaces - Fabrications to Pratical Applications*, 2019.
- [58] E. A. Melo-Espinosa *et al.*, « 2013 ISES Solar World Congress - Surface tension prediction of vegetable oils using artificial neural networks and multiple linear regression », *Energy Procedia*, vol. 57, p. 886-895, 2014.
- [59] Y. J. Choi, R. K. Lazcano, P. Yousefi, H. Trim, et L. S. Lee, « Perfluoroalkyl Acid Characterization in U.S. Municipal Organic Solid Waste Composts », *Environ. Sci. Technol. Lett.*, 2019.
- [60] R. C. Buck *et al.*, « Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Environment: Terminology, Classification, and Origins », *Integr. Environ. Assess. Manag.*, vol. 7, n° 4, p. 513-541, 2011.
- [61] European Chemicals Agency, « Substances perfluoroalkylées (PFAS) », 2020. [En ligne]. Disponible à : <https://echa.europa.eu/fr/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas#:~:text=Globally regulated PFAS&text=PFOA has been banned under,Convention and consequent global elimination.> [Consulté le: 17-févr-2021].
- [62] The University of British Columbia, « Consistency and Freeness Pulp Consistency ». .
- [63] Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI), *Laboratory beating of pulp (Valley beater method) (Norme TAPPI T200 sp-15)*. 2015.

- [64] Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI), *Freeness of pulp (Canadian standard method) (Norme TAPPI T 227 om-17)*. 2017.
- [65] P. R. Griffiths et J. A. de Haseth, *Fourier Transform Infrared Spectrometry*, 2^e éd. John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [66] International Organization for Standardization, *Papier et carton - Détermination du grammage (Norme ISO 536)*. 2019.
- [67] Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI), *Grease resistance test for paper and paperboard (Norme TAPPI T559 cm-12)*. 2012.
- [68] Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI), *Water absorptiveness of sized (non-bibulous) paper, paperboard, and corrugated fiberboard (Cobb test) (Norme TAPPI T 441 om-09)*. 2009.
- [69] Smithers, « Water Absorbency », 2021. [En ligne]. Disponible à: <https://www.smithers.com/industries/packaging/manufacturers-and-users/packaging-materials-testing/paper-testing-other-properties/water-absorbency>. [Consulté le: 21-mars-2021].
- [70] American Society for Testing and Materials (ASTM), *Standard Test Method for Tensile Properties of Paper and Paperboard Using Constant-Rate-of-Elongation Apparatus (Norme ASTM D828)*. 2019.
- [71] R. W. Hannah, « Groups Containing N=O Bonds, or Si, P, S, or Halogen Atoms », dans *Course Notes on the Interpretation of Infrared and Raman Spectra*, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [72] H.-U. Gremlich, « Infrared and Raman Spectroscopy », dans *Handbook of Analytical Techniques*, H. Günzler et A. Williams, Éd. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2001.
- [73] A. Baidya *et al.*, « Organic Solvent-Free Fabrication of Durable and Multifunctional Superhydrophobic Paper from Waterborne Fluorinated Cellulose Nanofiber Building Blocks », *ACS Nano*, vol. 11, p. 11091-11099, 2017.
- [74] L. C. Vander Wielen, « The Structure and Physical Properties of Pulpwood Fibers ».
- [75] R. C. Howard et W. Bichard, « The Basic Effects of Recycling on Pulp Properties », *J. Pulp*

Pap. Sci., vol. 18, n° 4, p. 151-159, 1992.

[76] J&L Fiber Services Inc, « Refining System Optimization ». 2007.