

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PRÉSENTÉE À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DU DOCTORAT EN GÉNIE PAPETIER

PAR
QUANQING ZHA

RAFFINAGE SÉLECTIF DES FIBRES APRÈS FRACTIONNEMENT

FÉVRIER 2009

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Remerciements

Je voudrais d'abord exprimer mes sincères remerciements à mon directeur, le Dr Robert Lanouette ainsi qu'à mon codirecteur, le Dr Kwei-Nam Law, pour leur supervision judicieuse du projet et leur constant support durant mes études.

J'aimerais remercier M. Alain Marchand et M. Pierre Gendron pour leurs conseils et leurs assistances au laboratoire. Je tiens également à remercier la Dre Agnès Lejeune, pour la réalisation des images de microscopie électronique à balayage.

Je remercie sincèrement le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada, pour son support financier.

Finalement, je remercie mon épouse, mon enfant et mes parents pour leurs encouragements et leur support spirituel pendant cette recherche.

Résumé

L'essence de bois a un effet significatif sur la pâte thermomécanique à cause de sa composition chimique et des propriétés morphologiques de ses fibres. À l'intérieur du bois, pour une même essence de bois, la morphologie des fibres varie énormément et cette différence est particulièrement remarquable entre les fibres du bois de printemps (BP) et celles du bois d'été (BE) pour les bois croissant dans les régions tempérées. Ces différences morphologiques, telles que la longueur des fibres, le diamètre des fibres et l'épaisseur des parois cellulaires, influencent non seulement les propriétés des fibres et du bois, mais aussi la mise en pâte, et par conséquent, influencent les propriétés finales des pâtes et papiers.

La mise en pâte thermomécanique (PTM) est le procédé le plus répandu parmi les procédés de mise en pâte mécanique utilisés au Québec. Cependant, il a connu peu de changement au cours des dernières années. Simultanément, nous sommes présentement à un tournant au niveau de l'utilisation du bois. Comme il n'y a actuellement aucune autre substance naturelle qui peut remplacer les produits de papier, l'industrie papetière est présentement face à un défi sévère. Par conséquent, l'utilisation de nouvelles essences et la demande croissante au niveau de la qualité des papiers doivent s'accompagner d'un changement technologique important. L'évolution de la technologie doit se faire le plus rapidement possible de façon à permettre l'utilisation des essences actuellement non désirables, ou pour accroître la qualité obtenue avec les essences traditionnelles. En même temps, une utilisation optimale de l'énergie doit se faire pour ce procédé extrêmement énergivore.

Le projet vise à fractionner une pâte en fractions de fibres de morphologies diverses, puis à appliquer un raffinage adapté à chaque fraction. L'objectif de cette étude est d'examiner si ce raffinage sélectif est plus efficace qu'un raffinage simultané des fibres sans fractionnement, soit le raffinage conventionnel. Les changements au niveau de la morphologie des fibres de chaque fraction à la suite du raffinage sont étudiés. La consommation d'énergie spécifique (CES), la longueur des fibres, l'épaisseur des parois,

la masse linéique, le développement des fines (le volume spécifique par sédimentation (VSS)) et les propriétés mécaniques et optiques des papiers sont suivis pour caractériser les modifications apportées. Les changements physiques des fibres sont aussi caractérisés à l'aide du microscope optique et du microscope électronique à balayage. De façon plus spécifique, nous déterminons la meilleure façon de raffiner chaque fraction de fibres et d'en tirer le meilleur produit possible à un coût énergétique minimum.

Dans l'étude, une pâte thermomécanique de premier stade de l'usine de Papiers Masson est utilisée. Afin de réaliser un raffinage sélectif idéal, la prémisse est de fractionner la pâte initiale efficacement. Le fractionnement est réalisé avec un tamis sous pression. La dimension d'ouverture des paniers influence le passage des fibres au travers les ouvertures et a un effet significatif sur le fractionnement. L'étude préliminaire a d'abord permis de trouver qu'après le fractionnement il existe une différence entre les fractions raffinées séparément, en plus de déterminer l'efficacité du fractionnement.

Un panier à trous lisses de 0,25 mm a par la suite été utilisé en positions primaire et secondaire d'un tamisage en cascade puisqu'il permet un bon fractionnement, essentiellement basé sur la longueur des fibres, résultant en un fractionnement de la pâte en fraction de fibres longues et de fibres courtes. Il produit un effet barrière très marqué pour les fibres longues, contrairement à un tamis plus conventionnel qui fait plutôt une séparation statistique. La pâte initiale est bien séparée entre la fraction R48 (fibres retenues sur le tamis de 48 mailles) et P48 (fibres traversant le tamis de 48 mailles).

Un panier à fentes de 0,10 mm a ensuite été utilisé en positions tertiaire et quaternaire de la cascade. Il fractionne principalement les fibres selon leur grosseur et sépare le rejet du secondaire en une fraction de fibres plus grossières et une fraction des fibres moins grossières ou plus élancées. Cela produit également un effet concentrant les fibres du BE dans les rejets et réduisant ces fibres dans les acceptés. Toutefois, à cause de sa moindre efficacité, la fraction longue plus grossière ne montre pas beaucoup de différence avec la fraction longue obtenue du panier à trous lisses au niveau de ses caractéristiques morphologiques.

La recherche permet de conclure que le raffinage sélectif des fibres après fractionnement est plus efficace en terme de consommation d'énergie spécifique. La consommation d'énergie au deuxième stade de raffinage après fractionnement avec les tamis à trous est plus faible de 28% par rapport au raffinage conventionnel (pâte raffinée sans fractionnement). Dans le cas d'un fractionnement en 4 stades avec deux tamis à fentes en positions tertiaire et quaternaire, l'économie peut atteindre 44%. La différence énergétique est déterminée également par la composition ou la morphologie des fibres raffinées, c'est-à-dire par les caractéristiques intrinsèques des fibres, telles que leur longueur et leur grosseur. Elle dépend aussi largement de l'efficacité de fractionnement qui est déterminé par les ouvertures des paniers. Afin de réaliser un raffinage sélectif idéal, la prémisse est de choisir un panier convenable qui pourrait faire un fractionnement plus efficacement.

Au cours du raffinage séparé, l'élimination des fines primaires facilite le contact fibre-à-fibre des fibres longues à l'intérieur du raffineur et permet un meilleur développement des fibres et des fines. Quoique le raffinage sélectif soit profitable pour développer les fibres au cours du raffinage, il n'améliore pas les indices de rupture et de déchirure de la pâte entière par rapport au raffinage de la pâte sans fractionnement. Mais, pour le fractionnement avec les deux tamis à trous, il peut augmenter l'absorption d'énergie à la rupture, l'indice d'éclatement et le coefficient de diffusion de la lumière de la pâte entière, de 14%, 5,7% et 5,2% respectivement par rapport au raffinage sans fractionnement.

La consistance et le nombre de stades de raffinage ont également un effet important sur le raffinage, influençant les propriétés des pâtes et papiers. L'utilisation d'une basse consistance a un effet très significatif sur la consommation d'énergie spécifique. Le raffinage à basse consistance consomme de 3 à 5 fois moins d'énergie que le raffinage à haute consistance lorsque le raffinage sélectif est utilisé. Toutefois, le raffinage à basse consistance s'accompagne aussi d'un raccourcissement de la longueur des fibres, produisant plus de fibres courtes et réduisant certaines propriétés des fibres. Il en résulte moins de perte d'épaisseur des parois cellulaires, de masse linéique et de fibrillation

externe. Le raffinage enlève légèrement la couche S_1 et expose la couche S_2 souvent près des ponctuations, affaiblissant les fibres et les propriétés mécaniques des papiers. Le raffinage à basse consistance a un effet plus marqué sur le raccourcissement des fibres et produit donc plus de fibres courtes, principalement dû à un entrefer faible et une intensité élevée. Comme les fibres courtes rempliront le réseau de fibres longues, cette façon de raffiner peut augmenter légèrement la densité du papier, favorisant les liens inter-fibres mais réduisant le bouffant du papier, ce qui peut être un inconvénient pour certains produits.

Bien que le raffinage à haute consistance demande plus d'énergie que le raffinage à basse consistance, il préserve mieux la longueur des fibres et permet de conserver les propriétés des fibres elles-mêmes. Au cours du raffinage, les fibres perdent plus d'épaisseur des parois et de masse linéique, ce qui rend les fibres plus flexibles. L'enlèvement de la couche S_1 et l'exposition de la couche S_2 se produit fréquemment. Tous ces phénomènes confèrent plus de fibrillation externe aux fibres et le raffinage développe plus les propriétés de la surface des fibres augmentant leur capacité des liaisons fibre-à-fibre. Après le raffinage, les pâtes et papiers possèdent de bonnes propriétés telles que l'indice de rupture, l'indice d'éclatement et l'indice de déchirure.

L'augmentation du nombre de stades de raffinage permet de préserver la longueur des fibres et conserve mieux les propriétés des fibres. Elle entraîne une perte plus importante de l'épaisseur des parois cellulaires et de la masse linéique des fibres par rapport au raffinage en un stade. L'augmentation du nombre de stades de raffinage amène un meilleur développement de la surface des fibres produisant plus de fibrillation externe et conférant une plus haute capacité de liaisons fibre-à-fibre et, produit des pâtes et papiers plus forts. La densité du papier est influencée par les caractéristiques fibreuses, telles que la présence de fibres longues, de fibres courtes et de fines. L'augmentation du nombre de stades de raffinage conserve mieux les fibres longues et produit moins de fibres courtes et de fines. Il en résulte peu d'impact sur la densité du papier mais plus d'énergie spécifique est requise pour le raffinage.

La consistance et le nombre de stades de raffinage ont un effet évident sur la consommation d'énergie spécifique, la coupe des fibres, l'épaisseur des parois, la masse linéique, la fibrillation externe des fibres et la qualité du papier. Cependant au cours du raffinage séparé, à cause de l'élimination des fines primaires par le fractionnement, la consistance et le nombre de stades de raffinage ont peu d'influence sur la qualité et la quantité de fines produites au cours du raffinage séparé, donc influence peu le coefficient de diffusion de la lumière. Comme les fines primaires sont séparées et non raffinées par la suite, il en résulte une augmentation de l'opacité et du coefficient de diffusion de la lumière car on évite de réduire la taille des particules fines. Ces fines n'ont pas de potentiel de développement ou de fibrillation, donc leur enlèvement n'est que totalement bénéfique.

Cette recherche nous a permis de mettre en évidence des bénéfices du raffinage sélectif, notamment en regard de la réduction de la consommation d'énergie spécifique. Quoique les résultats présentés soient obtenus par une expérimentation en usine pilote, ils offrent tout de même une référence pour la mise à l'échelle industrielle. Dans cette recherche, 28% d'énergie au deuxième stade de raffinage est économisée avec le fractionnement en deux stades suivi d'un raffinage sélectif, ce qui correspond à une réduction de 14% de l'énergie totale pour l'usine Papier Masson, sans perte de propriétés. Étant donné la portion des coûts de production liée à l'énergie de raffinage, cela représente une avancée majeure.

Cette recherche permet également d'acquérir de meilleures connaissances du comportement des fibres (fibres plus longues, plus grossières et moins grossières) lors du raffinage. Ces connaissances peuvent conduire à une amélioration technologique du procédé et une nouvelle stratégie de raffinage plus efficace. Le raffinage sélectif s'avérera aussi une meilleure façon d'utiliser les essences de bois actuellement moins utilisées en appliquant un traitement plus adapté à ces types de fibres. En somme, cette recherche amènera une nouvelle perspective pour l'industrie papetière.

Mots Clés

Pâte thermomécanique, PTM, bois de printemps, bois d'été, raffinage sélectif, raffinage à haute consistance, raffinage à basse consistance, intensité de raffinage, fibres longues, fibres grossières, fractionnement, liaisons fibre-à-fibre

Table des Matières

Remerciements.....	ii
Résumé.....	iii
Mots Clés.....	viii
Table des Matières	ix
Liste des Figures.....	xiii
Liste des Tableaux.....	xviii
Liste des Équations	xix
Liste des abréviations.....	xx
Chapitre 1 - Introduction.....	1
Chapitre 2 - Considérations théoriques.....	4
2.1 Notions générales du bois.....	4
2.1.1 Croissance du bois.....	4
2.1.2 Caractéristiques microscopiques du bois.....	5
2.1.3 Fibres du BP et du BE	6
2.1.4 Séparation des fibres.....	7
2.1.4.1 Fractionnement avant la mise en pâte	7
2.1.4.2 Fractionnement après la mise en pâte	8
2.1.4.2.1 Fractionnement par tamisage.....	8
2.1.4.2.2 Fractionnement par hydrocyclone	9
2.2 Mise en pâte mécanique.....	10
2.2.1 Mécanisme du raffinage.....	10
2.2.2 Raffinage à haute et à basse consistances.....	12
2.2.3 Raffinage sélectif (raffinage des fibres longues)	14

2.3	Comportement des fibres du BP et du BE lors du raffinage.....	15
2.3.1	Consommation d'énergie spécifique (CES)	15
2.3.2	Aplatissement des fibres	15
2.3.3	Réduction de l'épaisseur des parois cellulaires	17
2.3.4	Rupture de la paroi des fibres	17
Chapitre 3 - Proposition de recherche		18
3.1	Possibilité d'application industrielle.....	19
3.2	Objectifs.....	20
Chapitre 4 - Méthodologie		22
4.1	Fractionnement	23
4.1.1	Raffinage.....	24
4.1.2	Caractérisation des pâtes et papiers	26
4.1.2.1	Consommation d'énergie spécifique.....	28
4.1.2.2	Propriétés des fibres	29
4.1.2.2.1	Taux de rejets	29
4.1.2.2.2	Longueur des fibres des pâtes entières	29
4.1.2.2.3	Classification Bauer McNett	31
4.1.2.2.4	Volume spécifique par sédimentation (VSS) des fines.....	34
4.1.2.3	Propriétés des papiers.....	35
4.1.2.4	Analyse microscopique	35
Chapitre 5 - Résultats et discussions – essais préliminaires		37
5.1	Fractionnement	37
5.2	Raffinage.....	38
5.2.1	Consommation d'énergie spécifique (CES)	38
5.2.2	Propriétés des fibres.....	39
5.2.2.1	Longueur des fibres.....	39
5.2.2.2	Caractéristiques des fractions Bauer McNett	40
5.2.2.3	Volume spécifique par sédimentation (VSS) des fines.....	43

5.2.3	Propriétés des papiers	45
5.2.3.1	Propriétés physiques.....	45
5.2.3.2	Propriétés optiques	46
5.2.4	Optimisation du raffinage	47
Chapitre 6 - Résultats et discussions – essais finaux		50
6.1	Matière première.....	50
6.2	Fractionnement	52
6.2.1	Fractionnement avec les paniers à trous lisses.....	52
6.2.2	Fractionnement avec les paniers à fentes.....	54
6.3	Raffinage sélectif	60
6.3.1	Consommation d'énergie spécifique (CES)	60
6.3.2	Propriétés des fibres.....	61
6.3.2.1	Taux de rejets	61
6.3.2.2	Longueur des fibres	65
6.3.2.3	Caractéristiques des fractions Bauer McNett	70
6.3.2.3.1	Bauer McNett	70
6.3.2.3.2	Épaisseur des parois cellulaires.....	74
6.3.2.3.3	Masse linéique.....	76
6.3.2.3.4	Valeur de rétention d'eau (VRE).....	79
6.3.2.3.5	Développement de la fraction moyenne	93
6.3.2.4	Volume spécifique par sédimentation (VSS) des fines	94
6.3.3	Propriétés des papiers	96
6.3.3.1	Papier fabriqué à partir des fractions individuelles	96
6.3.3.1.1	Propriétés physiques.....	96
6.3.3.1.2	Propriétés optiques	99
6.3.3.2	Papier à partir de mélanges des fractions	101
6.4	Résumé sur les essais finaux.....	104

Chapitre 7 - Conclusions.....	107
7.1 Contribution à l'avancement des connaissances.....	111
7.2 Recommandation et perspective	112
Bibliographie.....	113
Annexe A - Observation au MEB des fines (P200)	130
Annexe B - Publication	134

Liste des Figures

Figure 2.1 Coupe transversale du tronc.....	4
Figure 2.2 Structure microscopique du bois résineux.....	5
Figure 2.3 Structure microscopique du bois feuillus.....	6
Figure 2.4 Séparation des fibres de bois initial et de bois final avant le raffinage par une machine à placage	8
Figure 2.5 Schéma général d'un tamis sous pression.....	9
Figure 2.6 Mécanisme du raffinage.....	11
Figure 2.7 Actions du raffinage sur la matrice du bois	12
Figure 2.8 Interaction du cisaillement et de la compression au cours du raffinage	12
Figure 2.9 La corrélation entre le % de fibres longues et le CSF.....	14
Figure 2.10 Distribution des dimensions des fibres	16
Figure 2.11 Vue transversale des fibres après raffinage.....	16
Figure 2.12 Réduction de l'épaisseur des parois cellulaires	17
Figure 3.1 Procédé de PTM en deux stades pour fabriquer le papier journal	19
Figure 3.2 Procédé proposé.....	20
Figure 4.1 Cheminement général de la recherche	22
Figure 4.2 Procédé de fractionnement pour les essais préliminaires	23
Figure 4.3 Procédé de fractionnement pour les essais finaux	24
Figure 4.4 Procédé de raffinage préliminaire.....	25
Figure 4.5 Procédé de raffinage final	26
Figure 4.6 Évaluation des pâtes et papiers pour les essais préliminaires.....	27
Figure 4.7 Évaluation des pâtes et papiers pour les essais finaux.....	28
Figure 4.8 Analyseur d'épaisseur des parois cellulaires Morfi	32
Figure 5.1 Énergie spécifique en fonction du CSF	38
Figure 5.2 Longueur des fibres en fonction du CSF	39
Figure 5.3 Masse linéique en fonction de la longueur des fibres -- R28.....	40
Figure 5.4 Masse linéique en fonction de la longueur des fibres -- R48.....	41
Figure 5.5 Épaisseur des parois en fonction de la longueur des fibres -- R28	41
Figure 5.6 Épaisseur des parois en fonction de la longueur des fibres -- R48	42

Figure 5.7 Masse linéique en fonction de l'épaisseur des parois -- R28.....	43
Figure 5.8 Masse linéique en fonction de l'épaisseur des parois -- R48.....	43
Figure 5.9 VSS en fonction de la teneur en fines.....	44
Figure 5.10 Indice de rupture en fonction du CSF	45
Figure 5.11 Indice d'éclatement en fonction du CSF.....	45
Figure 5.12 Indice de déchirure en fonction du CSF	46
Figure 5.13 Coefficient de diffusion en fonction du CSF	47
Figure 6.1 Vue générale de la pâte initiale (P), X50	50
Figure 6.2 Vue générale du rejet de P (A: X50, B: X400).....	51
Figure 6.3 Vue générale des fines de P, X400	52
Figure 6.4 Distribution en longueur pour les fractions R et A1	53
Figure 6.5. Microphotographie de la fraction R (A : X50, B : X100).....	54
Figure 6.6 Microphotographie de la fraction A1 (A : X50, B : X400)	54
Figure 6.7 Caractéristiques des fractions Bauer McNett de Q et A	55
Figure 6.8 Vue générale de la fraction P200 de A1	58
Figure 6.9 Vue transversale de la fraction R100 de A1	59
Figure 6.10 Vue transversale de la fraction R200 de A1	59
Figure 6.11 Énergie spécifique (CES) en fonction du CSF	60
Figure 6.12 Rejets Pulmac en fonction du CSF	62
Figure 6.13 Microphotographie des rejets des fractions raffinées (1), X50.....	63
Figure 6.14 Microphotographie des rejets des fractions raffinées (2), X50.....	64
Figure 6.15 Taux de réduction en rejets Pulmac en fonction du CSF.....	64
Figure 6.16 Longueur des fibres en fonction du CSF	66
Figure 6.17 Fraction R48 de la pâte R2, CSF de la pâte =100mL	66
Figure 6.18 Fraction R48 de la pâte RBC, CSF de la pâte =100mL.....	67
Figure 6.19 Fraction R48 de la pâte Q2, CSF de la pâte =100mL	67
Figure 6.20 Fraction R48 de la pâte QBC, CSF de la pâte =100mL.....	68
Figure 6.21 Fraction R48 de la pâte A, CSF de la pâte =100mL	68
Figure 6.22 Fraction R48 de la pâte ABC, CSF de la pâte =100mL.....	69
Figure 6.23 Taux de réduction en longueur des fibres en fonction du CSF.....	69
Figure 6.24 Teneur en R14 en fonction du CSF	71
Figure 6.25 Teneur en R28 en fonction du CSF	71

Figure 6.26 Teneur en R48 en fonction du CSF	72
Figure 6.27 Teneur en R100 en fonction du CSF	72
Figure 6.28 Teneur en R200 en fonction du CSF	73
Figure 6.29 Teneur en P200 en fonction du CSF	73
Figure 6.30 Taux de réduction en épaisseur des parois de R28 en fonction du CSF.....	74
Figure 6.31 Taux de réduction en épaisseur des parois de R48 en fonction du CSF.....	75
Figure 6.32 Taux de réduction en épaisseur des parois de R100 en fonction du CSF.....	75
Figure 6.33 Taux de réduction en masse linéique de R28 en fonction du taux de réduction en épaisseur des parois de R28.....	77
Figure 6.34 Taux de réduction en masse linéique de R48 en fonction du taux de réduction en épaisseur des parois de R48.....	77
Figure 6.35 Taux de réduction en masse linéique de R100 en fonction du taux de réduction en épaisseur des parois de R100.....	78
Figure 6.36 Taux de réduction en masse linéique de R28 en fonction du CSF	78
Figure 6.37 Taux de réduction en masse linéique de R48 en fonction du CSF	79
Figure 6.38 Taux de réduction en masse linéique de R100 en fonction du CSF	79
Figure 6.39 Valeur de rétention d'eau de R28 en fonction du CSF	80
Figure 6.40 Valeur de rétention d'eau de R48 en fonction du CSF	80
Figure 6.41 Valeur de rétention d'eau de R100 en fonction du CSF	81
Figure 6.42 Vue transversale des fibres de la fraction R48 de pâte A (CSF de la pâte = 100 mL). Un grand nombre des fibres sont fracturées.	82
Figure 6.43 Vue transversale des fibres de la fraction R48 de la pâte Q2 (CSF de la pâte = 100 mL). La délamination des parois cellulaires est évidente.	82
Figure 6.44 Surface des fibres de la fraction R28 de la pâte R2 (CSF de la pâte = 100 mL).....	84
Figure 6.45 Surface des fibres de la fraction R28 de la pâte RBC (CSF de la pâte = 100 mL).....	84
Figure 6.46 Surface des fibres de la fraction R48 de la pâte R2 (CSF de la pâte = 100 mL).....	85
Figure 6.47 Surface des fibres de la fraction R48 de la pâte RBC (CSF de la pâte = 100 mL).....	85

Figure 6.48 Surface des fibres de la fraction R100 de la pâte R2 (CSF de la pâte = 100 mL).....	86
Figure 6.49 Surface des fibres de la fraction R100 de la pâte RBC (CSF de la pâte = 100 mL).....	86
Figure 6.50 Surface des fibres de la fraction R28 de la pâte Q2 (CSF de la pâte = 100 mL).....	87
Figure 6.51 Surface des fibres de la fraction R28, de la pâte QBC (CSF de la pâte = 100 mL).....	87
Figure 6.52 Surface des fibres de la fraction R48 de la pâte Q2 (CSF de la pâte = 100 mL).....	88
Figure 6.53 Surface des fibres de la fraction R48 de la pâte QBC (CSF de la pâte = 100 mL).....	88
Figure 6.54 Surface des fibres de la fraction R100 de la pâte Q2 (CSF de la pâte = 100 mL).....	89
Figure 6.55 Surface des fibres de la fraction R100 de la pâte QBC (CSF de la pâte = 100 mL).....	89
Figure 6.56 Surface des fibres de la fraction R28 de la pâte A (CSF de la pâte = 100 mL).....	90
Figure 6.57 Surface des fibres de la fraction R28 de la pâte ABC (CSF de la pâte = 100 mL).....	90
Figure 6.58 Surface des fibres de la fraction R48 de la pâte A (CSF de la pâte = 100 mL).....	91
Figure 6.59 Surface des fibres de la fraction R48 de la pâte ABC (CSF de la pâte = 100 mL).....	91
Figure 6.60 Surface des fibres de la fraction R100 de la pâte A (CSF de la pâte = 100 mL).....	92
Figure 6.61 Surface des fibres de la fraction R100 de la pâte ABC (CSF de la pâte = 100 mL).....	92
Figure 6.62 CSF de la fraction moyenne (R100 + R200) en fonction du CSF	93
Figure 6.63 VSS en fonction du % des fines.....	95
Figure 6.64 Densité en fonction du CSF	96
Figure 6.65 Indice de rupture en fonction du CSF	97
Figure 6.66 Indice d'éclatement en fonction du CSF.....	98
Figure 6.67 Indice de déchirure en fonction du CSF	98
Figure 6.68 Indice de déchirure en fonction de l'indice de rupture	99
Figure 6.69 Coefficient de diffusion de la lumière en fonction du CSF	100

Figure 6.70 Coefficient de diffusion en fonction de l'indice de rupture	101
Figure 6.71 Coupes transversales des papiers reconstruits (R2/A1 et Q2/A/A1) et celui du P raffinée, CSF = 100 mL.....	103
Figure 6.72 Coefficient de diffusion de la lumière en fonction du CSF, incluant les trois meilleurs mélanges	106
Figure 6.73 Indice de déchirure en fonction de l'indice de rupture, incluant les trois meilleurs mélanges.....	106
Figure A-0.1 Vue générale des fines (P200) de la pâte P (CSF de la pâte = 100 mL).....	130
Figure A-0.2 Vue générale des fines (P200) de la pâte R2 (CSF de la pâte = 100 mL).....	131
Figure A-0.3 Vue générale des fines (P200) de la pâte R2 (CSF de la pâte = 100 mL).....	131
Figure A-0.4 Vue générale des fines (P200) de la pâte Q2 (CSF de la pâte = 100 mL).....	132
Figure A-0.5 Vue générale des fines (P200) de la pâte QBC (CSF de la pâte = 100 mL).....	132
Figure A-0.6 Vue générale des fines (P200) de la pâte A (CSF de la pâte = 100 mL).....	133
Figure A-0.7 Vue générale des fines (P200) de la pâte ABC (CSF de la pâte = 100 mL).....	133

Liste des Tableaux

Tableau 1.1. Approvisionnement et matériel sur pied*	1
Tableau 1.2 Propriétés des pâtes PTM de diverses essences de bois	2
Tableau 1.3 Consommation de bois des usines papetières québécoises, m ³	3
Tableau 4.1 Entrefèr entre les plaques du raffineur	26
Tableau 5.1 Caractéristiques de la pâte initiale P et des fractions obtenues du fractionnement.....	37
Tableau 5.2 Taux de changement des propriétés	47
Tableau 6.1 Caractéristiques de la pâte initiale pour les essais finaux	50
Tableau 6.2 Caractéristiques de la fraction R et A1	53
Tableau 6.3 Caractéristiques de la fraction Q et A	55
Tableau 6.4 Bilan massique des fibres du BP/BE.....	56
Tableau 6.5 Distribution hypothétique des fibres du BP et du BE (1).....	57
Tableau 6.6 Distribution hypothétique des fibres du BP et du BE (2).....	57
Tableau 6.7 Les meilleures propriétés des papiers reconstruits et ceux raffinés sans fractionnement (CSF=100mL).....	104
Tableau 7.1 Relations influencées entre les paramètres des essais et les propriétés des pâtes et papiers.....	108
Tableau 7.2 Relations influencées entre les paramètres des essais et les propriétés des pâtes et papiers.....	110

Liste des Équations

$T = \frac{\mu_r}{\mu_i} \frac{\partial EC_i L}{\omega^3 [L(r_2^2 - r_1^2) + C_i E r_1^2]} \left[\ln \frac{r_2}{r_1} - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{L - C_i E}{L} \right) \right]$	Équation 2.1..... 13
$Z = \frac{4\pi \times A_w}{P_i^2}$	Équation 2.2 16
$\ell_n = \sum_i n_i \ell_i / \sum_i n_i$	Équation 4.1 29
$\ell_{nw} = \sum_i n_i \ell_i^2 / \sum_i n_i \ell_i$	Équation 4.2 29
$\ell_{ww} = \sum_i n_i \ell_i^3 / \sum_i n_i \ell_i^2$	Équation 4.3 30
$TL = \frac{l_{w1} - l_{w2}}{l_{w1}} \times 100$	Équation 4.4 30
$TE = \frac{EP_1 - EP_2}{EP_1} \times 100$	Équation 4.5 32
$ML = \frac{M}{N \times L_n}$	Équation 4.6 33
$VSS(\text{cm}^3 / \text{g}) = V/P$	Équation 4.7 35

Liste des abréviations

AER	Absorption d'énergie à la rupture
ATPPC	Association Technique des Pâtes et Papiers du Canada
BE	Bois d'été
BP	Bois de printemps
CES	Consommation d'énergie spécifique
CIPP	Centre Intégré en Pâtes et Papiers
CRPP	Centre de Recherche en Pâtes et Papiers
CSF	Indice d'égouttage
MEB	Microscope électronique à balayage
PCM	Pâte chimicomécanique
PCTM	Pâte chimiothermomécanique
PMM	Pâte mécanique de meule
PMMP	Pâte mécanique de meule sous pression
PMPA	Pâte mécanique au peroxyde alcalin
PMR	Pâte mécanique de raffineur
PTM	Pâte thermomécanique
TAPPI	Association Technique de l'Industrie des Pâtes et Papiers (États-Unis)
UQTR	Université du Québec à Trois-Rivières
VRE	Valeur de rétention d'eau
VSS	Volume spécifique par sédimentation

Chapitre 1 - Introduction

Le bois est la principale source de fibres cellulosiques pour la fabrication des pâtes et papiers [1, 2]. Cependant, nous sommes présentement à un tournant au niveau de l'utilisation du bois : les forêts vierges sont de plus en plus rares, les bois disponibles proviennent de plus en plus de forêts secondaires ou de plantations, et sont souvent de qualité inférieure aux approvisionnements antérieurs. Le Tableau 1.1 nous présente les tendances futures d'approvisionnement annuel en bois et l'évolution du volume en bois sur pied au Canada [3]. La diminution des forêts naturelles contribue à la diminution des copeaux disponibles pour la production des pâtes et papiers. Comme il n'y a actuellement aucune autre substance naturelle qui peut remplacer les produits papetiers, l'industrie est présentement face à un défi sévère.

Tableau 1.1. Approvisionnement et matériel sur pied* [3]

	Unité	2000	2010	2050	2100	2150
Résineux						
Approvisionnement annuel	000 m ³	150,629	146,768	141,673 ^a	140,242 ^a	121,105 ^a
Bois sur pied	000 m ³	9,279,202	9,046,455	8,574,753	7,848,493 ^a	6,143,782 ^a
Feuillus						
Approvisionnement annuel	000 m ³	44,727	44,301	41,884 ^a	41,924 ^a	31,051 ^a
Bois sur pied	000 m ³	2,360,485	2,312,182	2,134,593	1,991,334 ^a	1,229,009 ^a

* : Résumé national

a : Non signalé pour toutes les années ni pour toutes les administrations

En raison de sa composition chimique et de ses diverses propriétés morphologiques des fibres, le bois de chaque essence possède des caractéristiques différentes. L'essence de bois a donc un effet significatif sur la pâte thermomécanique (PTM) [4, 5, 6, 7]. Tel qu'illustré au Tableau 1.3 [8, 9], les propriétés obtenues des pâtes PTM de diverses essences sont très différentes; l'essence de bois détermine largement les propriétés finales des pâtes et papiers. Elle est probablement le paramètre le plus important influençant les propriétés de la pâte PTM de même que celles de toutes les pâtes mécaniques [10, 11].

De plus, à l'intérieur du bois pour une même essence, il existe une grande différence de morphologie entre les fibres, tels que la longueur des fibres, le diamètre des fibres et

l'épaisseur des parois cellulaires [1, 12, 13]; cette différence est particulièrement remarquable entre les fibres du bois de printemps (BP) et celles du bois d'été (BE) pour les bois croissant dans les régions tempérées (Tableau 1.2) [14, 15].

Tableau 1.2 Différence morphologique entre les fibres du BP et du BE

	Fibres du BP	Fibres du BE
Longueur des fibres, mm	2-4	3-6
Épaisseur des parois cellulaires, μm	1,7-2,2	4,1-6,2
Diamètre des fibres	BP > BE	

Les différences morphologiques influencent non seulement les propriétés du bois [16, 17], mais aussi les procédés de mise en pâte. Elles jouent un rôle important dans la séparation des fibres lorsque le bois est soumis à une charge mécanique [18] et par conséquent, affectent le processus de mise en pâte [19, 20, 21]. Ceci a une grande influence sur les propriétés finales des pâtes et papiers [10, 22, 23, 24, 25].

Tableau 1.3 Propriétés des pâtes PTM de diverses essences de bois [8, 9]

	Épinette noire	Pin gris	Mélèze laricin	Bouleau Blanc
CSF, mL	130	130	130	100
Énergie spécifique, MJ/kg	12,8	12,6	10,2	-
Longueur des fibres, mm	2,04	2,03	1,86	0,76
Indice de rupture, N·m/g	42	38	34	14
Indice de déchirure, mN·m ² /g	9,0	9,0	6,7	2,7
Blancheur, %	56	58	51	50

À cause de sa flexibilité, la mise en pâte PTM [26] est la plus répandue parmi les processus de mise en pâte mécanique utilisé au Québec [27]. Cette technologie a été bien développée pendant le dernier siècle [28, 29, 30]. Cependant, en raison de sa forte consommation d'énergie, elle a connu peu de changement technologique au cours des dernières années et elle est à un carrefour de son développement. Entre-temps, au fil du développement des technologies et des équipements de fabrication des pâtes et papiers, les essences de bois traditionnelles ont été mises en valeur et ont été utilisées de plus en plus efficacement. Toutefois, ces essences traditionnelles sont de moins en moins disponibles. Cela engendre directement une décroissance en disponibilité de ces essences et donc une diminution en consommation par l'industrie papetière (Tableau 1.4) [31].

Tableau 1.4 Consommation de bois des usines papetières québécoises, m³ [29]

Essences	2000	2001	2002	2003	2004	2005
SEPM	20 605 412	18 778 578	19 233 708	19 120 852	19 279 271	18 598 753
Autres résineux	302 598	374 889	353 013	361 593	331 231	327 470
Peupliers	1 635 820	1 500 084	1 627 187	1 586 249	1 564 070	1 438 099
Feuillus durs	3 301 981	3 317 230	3 608 295	3 589 673	3 693 380	3 824 140
Total	25 845 811	23 970 781	24 822 203	24 658 367	24 867 952	24 188 462

SEPM : S (sapin), E (épinettes), P (pin gris), M (mélèzes)

Par conséquent, l'utilisation de nouvelles essences et la demande croissante au niveau de la qualité des papiers doivent s'accompagner d'un changement technologique important. L'évolution de la technologie doit se faire le plus rapidement possible de façon à permettre l'utilisation des essences actuellement non désirables, ou pour accroître la qualité obtenue avec les essences traditionnelles. Le co-raffinage de différents résineux [32, 33, 34, 35, 36] et l'utilisation d'un traitement chimique [35, 37, 38, 39] sont les sujets les plus souvent étudiés et employés pour accroître l'utilisation des essences actuellement non désirables. Pour réduire la consommation d'énergie, le concept de raffinage des copeaux comprimés préalablement [40, 41, 42, 43] et le raffinage des fibres longues [44, 45] ont aussi été introduits pour la mise en pâte de raffineur.

Chapitre 2 - Considérations théoriques

2.1 Notions générales du bois

Le bois a été employé par l'humanité depuis longtemps [14] et il est la matière première la plus employée par l'industrie papetière. Par rapport à l'utilisation d'autres matières, tels que le plastique, le béton ou le métal, l'utilisation du bois a un impact moindre sur l'environnement car il est renouvelable, recyclable et biodégradable [46]. Bien qu'il y ait seulement environ 200 ans que le bois est beaucoup plus consommé par l'industrie papetière, son utilisation dépasse de beaucoup l'utilisation d'autres matières premières, par exemple les matières non-ligneuses. Il faut actuellement aussi faire face à une nouvelle tendance, soit l'intégration de la sylviculture dans la production de pâtes et papiers, qui semble difficilement acceptée par l'industrie papetière.

2.1.1 Croissance du bois

La croissance du bois s'effectue suivant deux directions: soit en hauteur par l'action des méristèmes apicaux (méristèmes primaires) et en diamètre par l'action du cambium (méristème secondaire) [12, 47, 48]. Dans les zones climatiques tempérées, le cambium produit une couche de bois à la suite d'une division cellulaire du cambium à chaque saison de croissance, tout en formant les cernes annuels ou anneaux de croissance (Figure 2.1) [49].

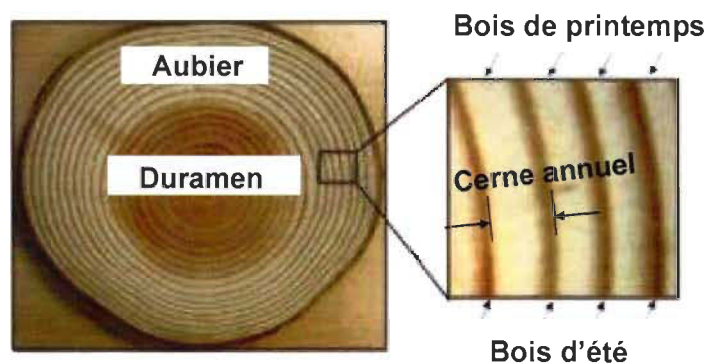


Figure 2.1 Coupe transversale du tronc

Dans un cerne de croissance, on trouve le bois de printemps, BP (ou bois initial) et le bois d'été, BE (ou bois final). Le BP est produit au début de la saison de croissance tandis que le BE est la partie produite vers la fin de la saison de croissance. La formation de BP et de BE est déterminée par la concentration d'auxine durant les divers stades de la saison de croissance [50, 51]. Généralement, les fibres du BE représentent 30% ou plus du bois total en masse [52]. Cependant, la masse et le volume du BE varient selon les essences de bois.

2.1.2 Caractéristiques microscopiques du bois

Dans le domaine botanique, les essences de bois peuvent être classifiés en bois résineux et bois feuillus [12, 14, 46, 47]. Ces deux bois sont nettement différents tant au niveau des caractéristiques de l'arbre qu'au niveau de la nature du bois. Les Figures 2.2 et 2.3 [53] montrent la structure microscopique de ces deux types de bois. Évidemment, la distinction la plus importante entre les deux est la présence des éléments de vaisseaux (ou des pores) chez les feuillus. Tandis que ces vaisseaux sont absents dans les conifères. Les éléments de vaisseaux du bois feuillus d'Amérique du Nord peuvent occuper en moyenne 30% du volume du bois [12, 14].

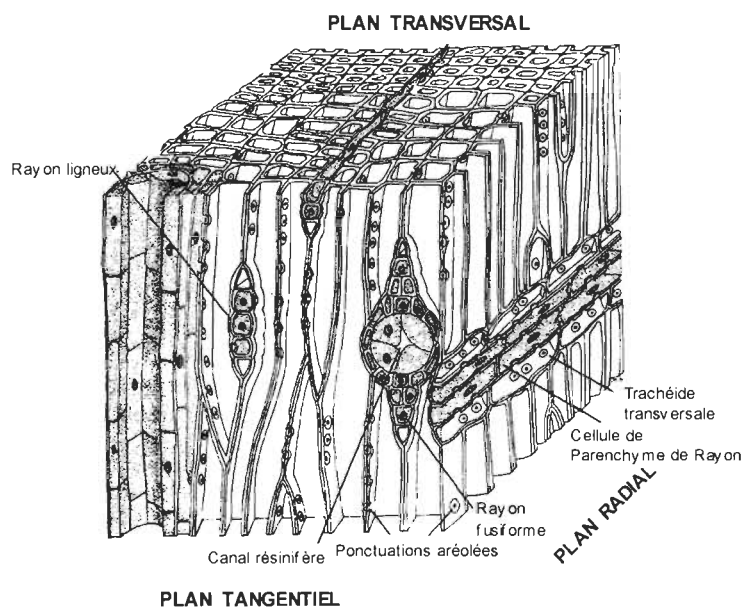


Figure 2.2 Structure microscopique du bois résineux

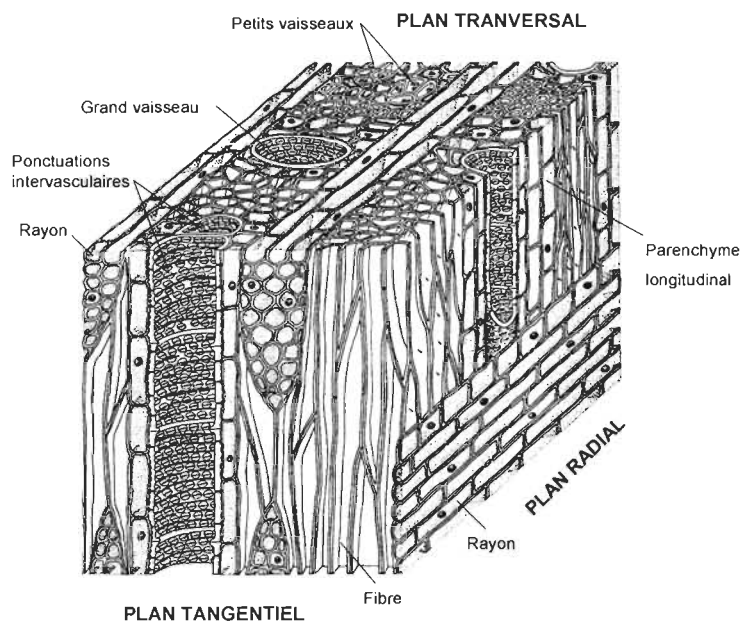


Figure 2.3 Structure microscopique du bois feuillus

Néanmoins, les cellules de parenchymes se trouvent chez les deux sortes de bois. Ces cellules courtes sont imbriquées [14]; elles se fibrillent rarement au cours du raffinage, ce qui réduit les liaisons inter-fibres et contribue au problème de peluchage du papier [54, 55]. En tant que matière première pour la mise en pâte, il est préférable que la proportion de cellules de parenchymes soit la plus faible possible. D'autre part, chez les feuillus, les éléments de vaisseaux possèdent des structures tubulaires vides et favorisent l'imprégnation de liqueur au cours de la mise en pâte chimique ou chimicomécanique. Toutefois, ils contribuent également au problème de peluchage du papier [56, 57, 58]. Quant aux résineux, ils contiennent des résines dans les canaux résinifères qui entraînent un problème de poix dans le système de circulation des eaux blanches et sur la machine à papier. A noter que certaines essences de feuillus (ex. *Acacia*) contiennent également des matières résineuses (dans les vaisseaux) et peuvent causer des problèmes de poix [59].

2.1.3 Fibres du BP et du BE

Le BP et le BE des conifères ont une morphologie différente [12, 13, 53, 60]:

- Les fibres du BP sont toujours plus courtes que celles du BE.

- Les fibres du BP ont un diamètre radial plus grand que celui des fibres du BE.
- Les fibres du BP ont des périmètres plus grands et des parois cellulaires plus minces que celles des fibres du BE.
- La densité du BP est relativement basse par rapport à celle du BE.
- L'angle des microfibrilles des parois cellulaires est inversement proportionnel à la longueur des fibres; il est donc plus grand dans le BP que dans le BE.

Toutefois, ces caractéristiques ne sont pas aussi évidentes chez les feuillus par rapport aux résineux car la proportion du BE du feuillus est très minime [12].

2.1.4 Séparation des fibres

La séparation des fibres du BP de celles du (BE du bois ou de la pâte) en deux fractions nous permet d'étudier de façon indépendante le comportement des fractions lors du raffinage. Globalement, il y a deux façons de séparer les fibres, soit la séparation avant la mise en pâte et la séparation après la mise en pâte.

2.1.4.1 Fractionnement avant la mise en pâte

La séparation des fibres du BP de celles du BE peut être réalisée avant la mise en pâte [61, 62] manuellement [62] ou mécaniquement (Figure 2.4) [61]. Avec un processus mécanique, tel que démontré à la Figure 2-4, la bûche est d'abord transformée en placage d'une épaisseur de 2 cm. Ce dernier est ensuite désintégré en copeaux. Les copeaux de BP et de BE sont séparés en se basant sur la différence de couleur; les fibres du BE sont plus foncées à cause de leur paroi épaisse. L'efficacité de cette séparation dépend grandement de la couleur des fibres de bois, mais ce type de séparation est plus théorique qu'utile en pratique.

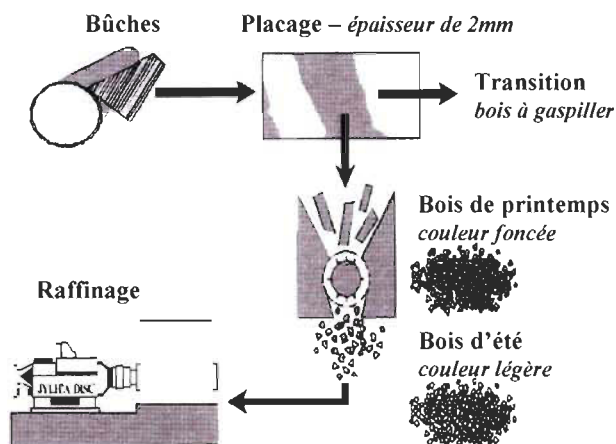


Figure 2.4 Séparation des fibres de bois initial et de bois final avant le raffinage par une machine à placage

2.1.4.2 Fractionnement après la mise en pâte

La séparation des fibres après la mise en pâte peut être effectuée en utilisant des tamis sous pression et des hydrocyclones, qui sont déjà utilisés par l'industrie papetière [22, 45, 63, 64, 65, 66, 67, 68]. Au niveau du laboratoire, la séparation peut aussi se faire à l'aide d'un classificateur, par exemple l'appareil Bauer McNett [69, 70, 71], ou par flottation [72, 73, 74].

2.1.4.2.1 Fractionnement par tamisage

Dans l'industrie papetière, les tamis sous pression conventionnels sont généralement employés pour enlever les contaminants ainsi que pour retirer les bûchettes et une partie des fibres longues des pâtes. Le fractionnement à l'aide du tamis à trou est essentiellement basé sur la longueur des fibres [75] tandis que celui du tamis à fente est basé sur la grosseur ou diamètre des fibres ou des bûchettes. Le processus commence par l'introduction d'une pâte tangentielle dans le tamis où elle forme un anneau entre le panier et l'élément rotatif. Les pulsations induites par le mouvement de l'élément rotatif permettent aux fibres acceptées de traverser les trous ou les fentes du panier (Figure 2.5) [76].

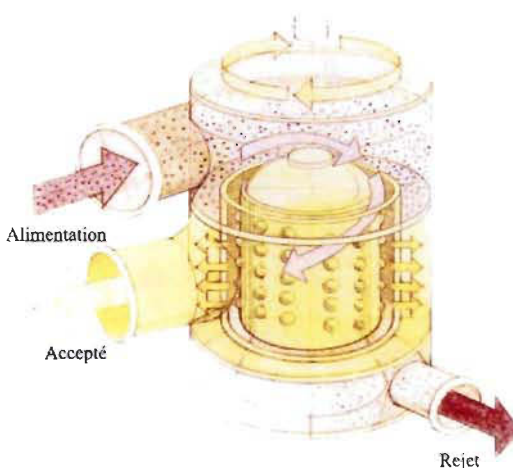


Figure 2.5 Schéma général d'un tamis sous pression

En fait, deux actions simultanées surviennent au cours du tamisage : la filtration du matelas fibreux et l'orientation des fibres [77, 78]. L'efficacité de ce type de fractionnement est influencée par plusieurs facteurs, telle que le type d'ouvertures dans les tamis (ouvertures à fentes ou à trous), la taille des ouvertures, le profil des ouvertures, le débit de pâte, la consistance de la pâte, la différence de pression, etc. [64, 79, 80, 81, 82].

2.1.4.2.2 Fractionnement par hydrocyclone

En raison de sa simplicité et du bas capital d'investissement et d'opération requis, l'hydrocyclone est l'un des plus utilisés parmi les appareils de classification. Le fractionnement par hydrocyclone est principalement basé sur la dimension, la surface spécifique et la densité des fibres [83].

Dans un hydrocyclone, il y a plusieurs forces agissant sur les fibres : la force centrifuge, la force de flottaison, la force de gravitation, la force de friction entre les fibres et celle entre les fibres et la paroi de l'hydrocyclone [84, 85]. Cependant, le mécanisme de fractionnement par hydrocyclone est peu connu. En général, l'épaisseur de la paroi cellulaire, la longueur des fibres, la masse linéique et la surface spécifique des fibres sont proposées comme propriétés qui pourraient permettre de séparer les fibres du BP de celles du BE [22].

2.2 Mise en pâte mécanique

La technologie de mise en pâte mécanique a considérablement évoluée au cours du dernier siècle, particulièrement dans les années 70 et jusqu'au début des années 90 [86, 87]. L'objectif de la mise en pâte mécanique est de transformer la matière première directement en fibres en minimisant la perte de rendement. La mise en pâte mécanique peut être séparée en trois catégories [88, 89, 90]:

- Les procédés utilisant des bûches: Pâte mécanique de meule (PMM) et pâte mécanique de meule sous pression (PMMP);
- Les procédés de raffinage à partir de copeaux sans ajout de produits chimiques: Pâte thermomécanique (PTM) et pâte mécanique de raffineur (PMR);
- Les procédés de raffinage à partir de copeaux avec traitement chimique: Pâte chimicomécanique (PCM), pâte chimicothermomécanique (PCTM) et pâtes mécaniques au peroxyde alcalin (PMPA).

2.2.1 Mécanisme du raffinage

La technologie de mise en pâte mécanique a été bien développée jusqu'à aujourd'hui. Cependant, le mécanisme du raffinage n'est présentement pas entièrement compris. On accepte généralement que la mise en pâte mécanique pourrait être divisée en une étape de séparation des fibres suivie d'une étape de développement de la surface des fibres [88, 91, 92] (Figure 2.6). Ces deux étapes se réalisent simultanément.

Pendant la première étape de séparation des fibres, les copeaux sont transformés en petites particules ou en faisceaux de fibres par des forces mécaniques, principalement des forces de cisaillement et de compression. L'étape de développement de la surface des fibres est particulièrement importante en ce qui concerne les propriétés papetières.

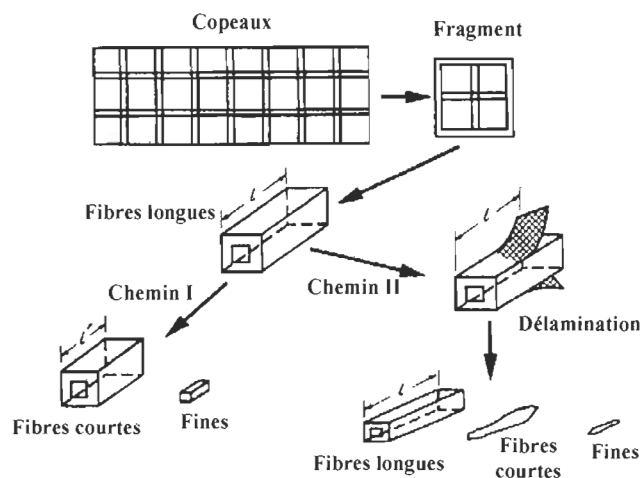


Figure 2.6 Mécanisme du raffinage [92]

En fait, deux mécanismes sont possibles lors du raffinage [88, 91, 92]. D'après la Figure 2.6, le chemin I implique la coupure des fibres, produisant des fibres courtes et des fines. D'autre part le chemin II, montre la possibilité de délaminer la paroi cellulaire, par enlèvement d'une partie de la paroi primaire P et de la couche S_1 des fibres, tout en exposant la couche S_2 . Ceci rend les fibres plus développées et plus flexibles, améliorant les propriétés physiques du papier [91].

Le raffinage des copeaux est un processus aléatoire durant lequel la structure physique et/ou la composition chimique des fibres sont modifiées par les impulsions répétitives d'énergie. Toutefois l'énergie ne reflète qu'un niveau de l'effet du raffinage sur les fibres. Page [93] a donc proposé qu'un nouveau mécanisme théorique soit établi pour exprimer les forces imposées aux fibres.

De son côté, Law proposait récemment que dans le raffineur les copeaux de bois subissent deux actions simultanées et répétitives: le cisaillement et la compression [94] (Figure 2.7). Cependant, la force de cisaillement dépend de celle de compression. Quand il n'y a pas de compression, l'action de cisaillement sur les copeaux est nulle. D'après Law, la fonction du cisaillement est de séparer et de fragmenter les fibres, tandis que la compression pourrait déformer et délaminer les fibres, promouvant l'augmentation de

flexibilité des fibres (Figure 2.8). Par conséquent, un rapport convenable de cisaillement/compression est critique pour optimiser les effets du raffinage.

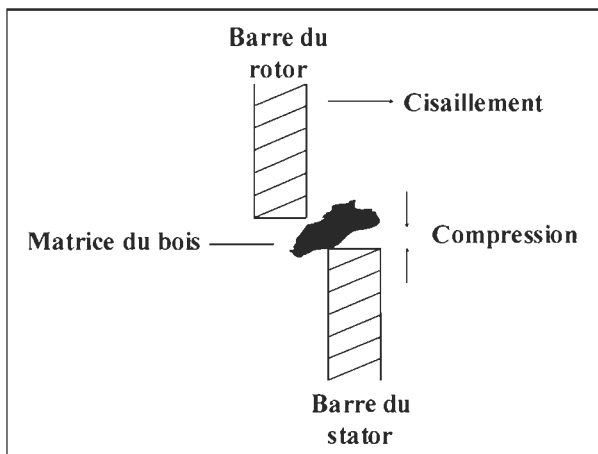


Figure 2.7 Actions du raffinage sur la matrice du bois [94]

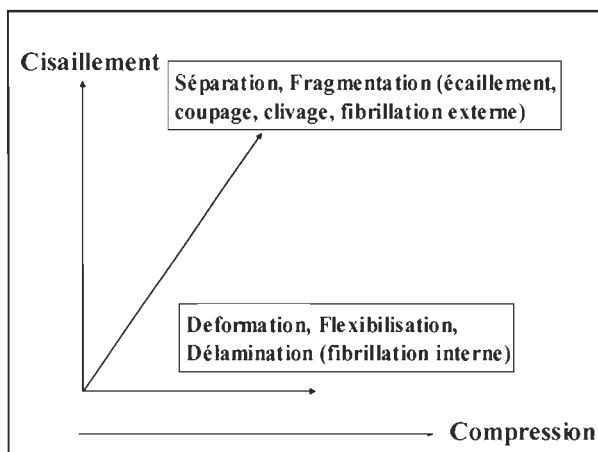


Figure 2.8 Interaction du cisaillement et de la compression au cours du raffinage [94]

2.2.2 Raffinage à haute et à basse consistances

La consistance de raffinage est un paramètre important influençant le comportement des fibres au raffinage et les propriétés de celles-ci [95, 96, 97]. Par rapport au raffinage à basse consistance, le raffinage à haute consistance est plus efficace pour produire des papiers ayant de meilleures propriétés mécaniques car il y a moins de contacts fibre-à-métal (barre de raffineur) et par conséquent, une meilleure préservation de la longueur des fibres et un meilleur développement de la surface des fibres [98]. Cependant,

l'augmentation de la consistance de raffinage entraîne une consommation d'énergie plus grande à un niveau donné d'indice d'égouttage.

La consistance de raffinage influence également le temps de rétention des fibres dans le raffineur, ce qui influence l'intensité du raffinage. Pour un système de raffinage fixe et un niveau donné d'énergie spécifique, le temps de résidence des fibres dans le raffineur est plus court lorsque la consistance est basse, tel que montré par l'équation 2.1 [97]. Ainsi, le nombre total des barres se croisant durant le passage des fibres diminuera et, comme conséquence inévitable, l'énergie spécifique transférée par chaque impact des barres et des fibres (intensité du raffinage) sera augmentée. Par conséquent, une augmentation de l'intensité de raffinage tend à réduire la longueur des fibres (Figure 2.9) [99].

$$T = \frac{\mu_r}{\mu_t} \frac{\partial EC_i L}{\omega^3 [L(r_2^2 - r_1^2) + C_i E r_1^2]} \left[\ln \frac{r_2}{r_1} - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{L - C_i E}{L} \right) \right] \quad \text{Équation 2.1}$$

Où, T : le temps de résidence des fibres dans le raffineur

ω : la vitesse angulaire

μ_r, μ_t : les coefficients de friction radial et tangentiel

$\partial = 4$ pour raffineur à simple disque; $= 2$ pour raffineur à double disques

E : l'énergie spécifique

L : la chaleur latente de la vapeur

C_i : la consistance à l'entrée

r_1, r_2 : les rayons d'entrée et de sortie de la région du raffinage

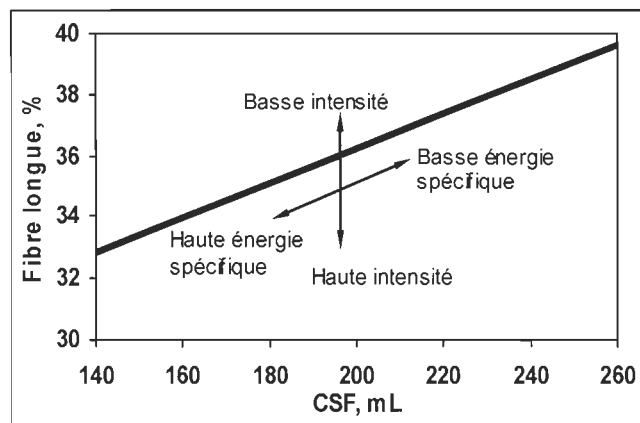


Figure 2.9 La corrélation entre le % de fibres longues et le CSF [98]

Le raffinage à basse consistance offre un fort potentiel pour réduire la consommation d'énergie [100]. Cette type de raffinage est souvent utilisé comme raffinage tertiaire à la fin du procédé [101, 102]. Cependant dans ce cas, l'entrefer entre les plaques est plus étroit, l'intensité du raffinage est plus élevée et le temps de résidence dans le raffineur est plus court. Comme conséquence, les fibres peuvent être moins fibrillées et leur longueur sera plus faible.

2.2.3 Raffinage sélectif (raffinage des fibres longues)

L'introduction du raffinage sélectif dans le domaine des pâtes mécaniques s'est faite sous l'impulsion du besoin de réduction de la consommation d'énergie [44, 45]. Cependant, cette technologie n'était pas employée par l'industrie jusqu'à aujourd'hui.

Les fibres longues possèdent des parois plus épaisses et confèrent donc une surface spécifique inférieure au cours de la mise en pâte mécanique par rapport aux fibres ayant une paroi plus mince [103]. À cause de leur haute teneur en lignine et de leur rigidité, Law [104, 105] a proposé que les fibres de PTM, particulièrement celles de la fraction longue, ont une pauvre capacité de liaisons fibre-à-fibre. Le raffinage des fibres longues peut produire un papier mieux consolidé [106, 107] ce qui contribue positivement à la capacité de liaisons fibre-à-fibre et améliore la qualité du papier.

2.3 Comportement des fibres du BP et du BE lors du raffinage

En comparaison avec les fibres du BE, les fibres du BP ont une longueur supérieure, un diamètre de cellule plus grand et des parois cellulaires plus minces. Ces caractéristiques intrinsèques jouent un rôle important au cours du raffinage ce qui entraîne que les fibres du BP et celles du BE se comportent différemment lors du raffinage.

2.3.1 Consommation d'énergie spécifique (CES)

Par rapport aux fibres du BE, les fibres du BP sont plus flexibles et moins résistantes aux forces mécaniques à cause de leur grand diamètre et de leur faible épaisseur des parois cellulaires. Au cours du raffinage, elles sont brisées plus facilement avec moins de force mécanique. En fait, les fibres du BP sont fibrillées moins efficacement à cause de cette facilité de fragmentation. D'autre part, leur plus grande flexibilité et leur comportement élastique font en sorte qu'elles absorbent beaucoup plus d'énergie spécifique que les fibres du BE lorsque l'énergie est mesurée en fonction de l'indice d'égouttage (CSF) [61].

2.3.2 Aplatissement des fibres

Au niveau de leur dimension les fibres du BP se différencient grandement de celles du BE (Figure 2.10) [108]. Dans la Figure 2.10, le paramètre Z est calculé selon l'équation 2.2 [109]. Il est utilisé pour départager les fibres du BE/BP ou pour indiquer leur potentiel d'aplatissement. Les fibres du bois mature sont plus grossières que celles du bois juvénile. La masse linéique des fibres du BE et celle du BP ont une large distribution. La mesure du potentiel d'aplatissement des fibres peut donc être suivi par la masse linéique.

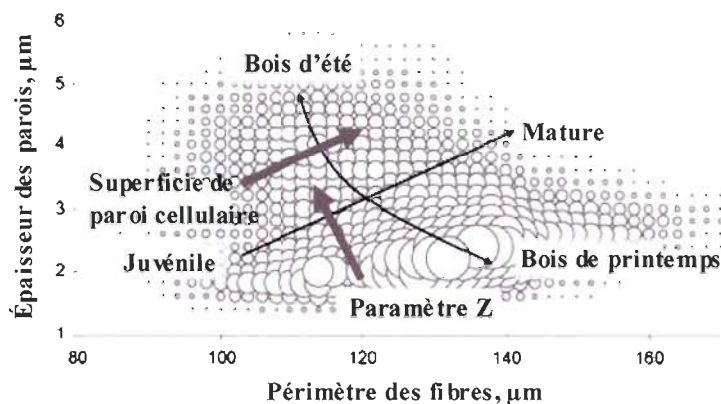


Figure 2.10 Distribution des dimensions des fibres [104]

$$Z = \frac{4\pi \times A_w}{P_F^2} \quad \text{Équation 2.2}$$

Où, A_w : superficie de la paroi cellulaire

P_F : périmètre des fibres

Dans le raffineur, à cause des actions de compression et de cisaillement, les fibres changent de dimension dans le sens transversal. Les fibres du BP s'aplatissent plus facilement dû à leurs parois minces. Par contre, les fibres du BE, à parois épaisses, s'aplatissent avec moins de facilité, elles ont une résistance mécanique plus importante tout en conservant souvent leur forme originale (Figure 2.11).

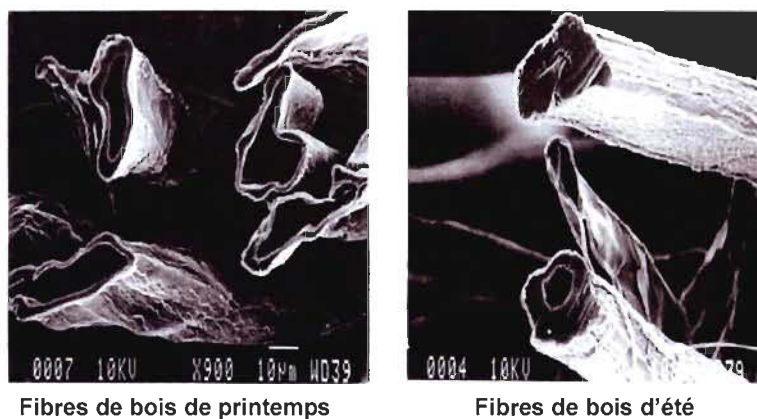


Figure 2.11 Vue transversale des fibres après raffinage [49]

2.3.3 Réduction de l'épaisseur des parois cellulaires

Lors du raffinage, une partie externe de la paroi des fibres est pelée, réduisant l'épaisseur des parois cellulaires. Étant donné que les fibres du BP sont plus larges et ont une paroi plus mince, elles seront plus faciles à courber par rapport aux fibres du BE sous les actions de cisaillement et de compression, Ainsi, la réduction de leur épaisseur des parois cellulaires est plus faible [69, 70, 110], tel que démontré à la Figure 2.12 [70].

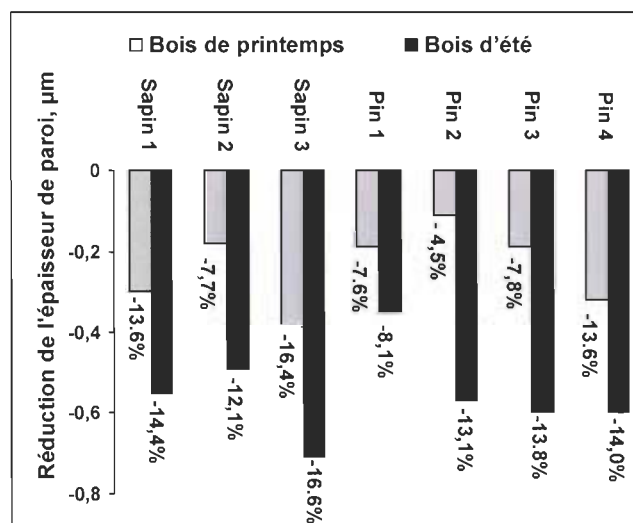


Figure 2.12 Réduction de l'épaisseur des parois cellulaires [70]

2.3.4 Rupture de la paroi des fibres

Toujours à cause de leurs faibles épaisseurs, les parois des fibres du BP se rompent facilement sous les actions du raffinage, surtout dans le premier stade de raffinage [69, 70, 111, 112]. Ces fibres brisées sont moins rigides et se conforment mieux lors de la consolidation du papier, ce qui a comme conséquence l'obtention d'une surface plus lisse [70, 109]. Ainsi, les papiers fabriqués à partir des fibres du BP ont souvent une rugosité plus basse que ceux produits de fibres du BE.

Chapitre 3 - Proposition de recherche

Dans la structure du papier, les propriétés des fibres, par exemple la longueur, la flexibilité, la surface spécifique, le nombre de liaisons fibre-à-fibre et la capacité de liaison, déterminent les propriétés mécaniques du papier [113, 114, 115]. Certaines propriétés des fibres telles que la résistance intrinsèque à la rupture sont beaucoup plus élevées que celles des liaisons fibre-à-fibre. Par conséquent, les propriétés mécaniques du papier dépendent principalement sur celles qui affectent la capacité de liaison, la surface de liaison et la longueur des fibres [115]. Le but du raffinage est de transformer les copeaux de bois en fibres individuelles puis de développer ces dernières. Cependant, au cours du raffinage, l'effet mécanique amène toujours des dommages aux fibres donc détériore certaines propriétés des pâtes et de celles du papier final. Cette contradiction est inévitable. La stratégie envisagée consiste à accroître la capacité de liaisons fibre-à-fibre et à préserver au maximum la longueur des fibres au cours du raffinage.

La morphologie des fibres a un effet significatif pendant la mise en pâte de raffineur et influence grandement les propriétés finales des pâtes et papiers. Le raffinage des fibres longues peut augmenter la capacité de liaisons fibre-à-fibre et améliorer la qualité du papier. Par conséquence, les propriétés finales du papier pourraient être contrôlées par un raffinage sélectif s'adaptant aux caractéristiques morphologiques des fibres.

Afin de réaliser un raffinage sélectif, il est certainement préférable d'utiliser une pâte obtenue d'un premier stade de raffinage qui consomme une basse énergie. Selon Stationwala et al [116], avant que l'effet du raffinage sur la qualité de la pâte devienne apparent, un niveau minimum d'énergie spécifique doit être appliqué, ce qui se fait normalement pendant le raffinage en premier stade. Il est également nécessaire d'appliquer l'énergie de raffinage le plus tôt possible sur les fractions de fibres voulues plutôt que sur l'ensemble de la pâte. En outre, le fractionnement d'une PTM de premier stade sera relativement facile à appliquer au niveau industriel. Le procédé actuel inclut déjà un système de tamisage et trois raffineurs (primaire, secondaire et rejet). Plus de pâte devra être tamisée, mais à un indice d'égouttage beaucoup plus élevé, ce qui

augmente la capacité de tamisage. Pour ces raisons, la pâte visée par ce projet est la pâte produite par un premier stade de raffinage.

Le fractionnement peut être réalisé au moyen de tamis sous pression, ce qui nous permet de séparer la pâte en deux ou plusieurs fractions. Ensuite, un raffinage séparé sur les fractions sera fait pour en tirer le meilleur produit possible à un coût énergétique minimum. Le raffinage se fera soit à haute, à basse consistance ou à haute consistance en plusieurs stades, de façon à pouvoir évaluer l'impact du raffinage sous diverses conditions en terme d'intensité.

3.1 Possibilité d'application industrielle

La Figure 3.1 [117] montre un procédé classique de PTM pour fabriquer le papier journal. Si la recherche atteint le but désiré, ce que nous devons faire consistera à sauter le deuxième stade de raffinage et à introduire directement la pâte dans le tamisage (**Figure 3.2**). Dans ce cas, le raffinage des rejets deviendra le raffinage des fibres longues.

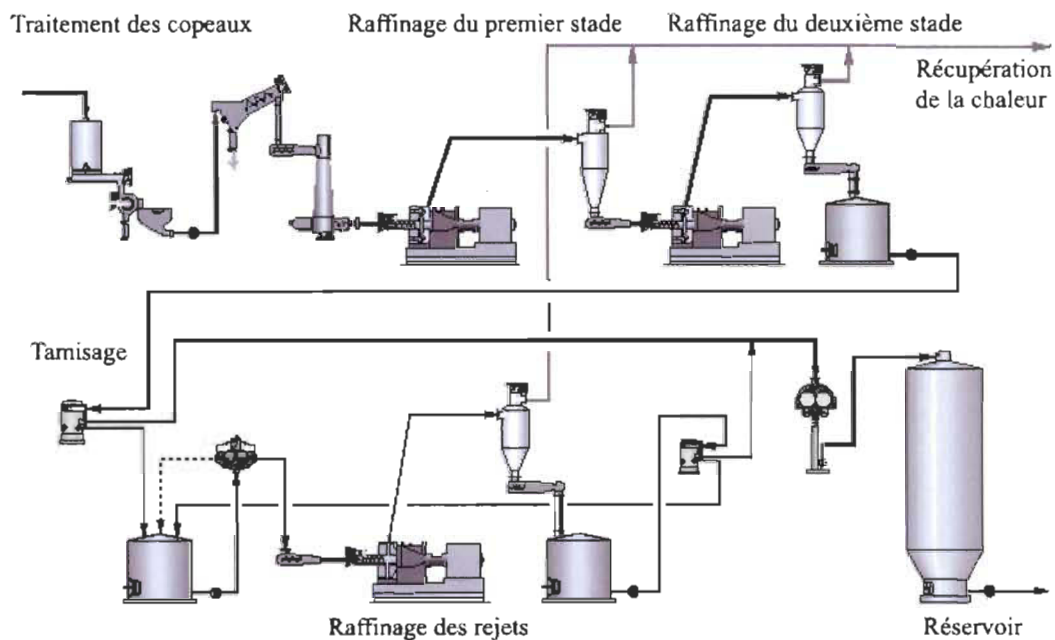


Figure 3.1 Procédé de PTM en deux stades pour fabriquer le papier journal

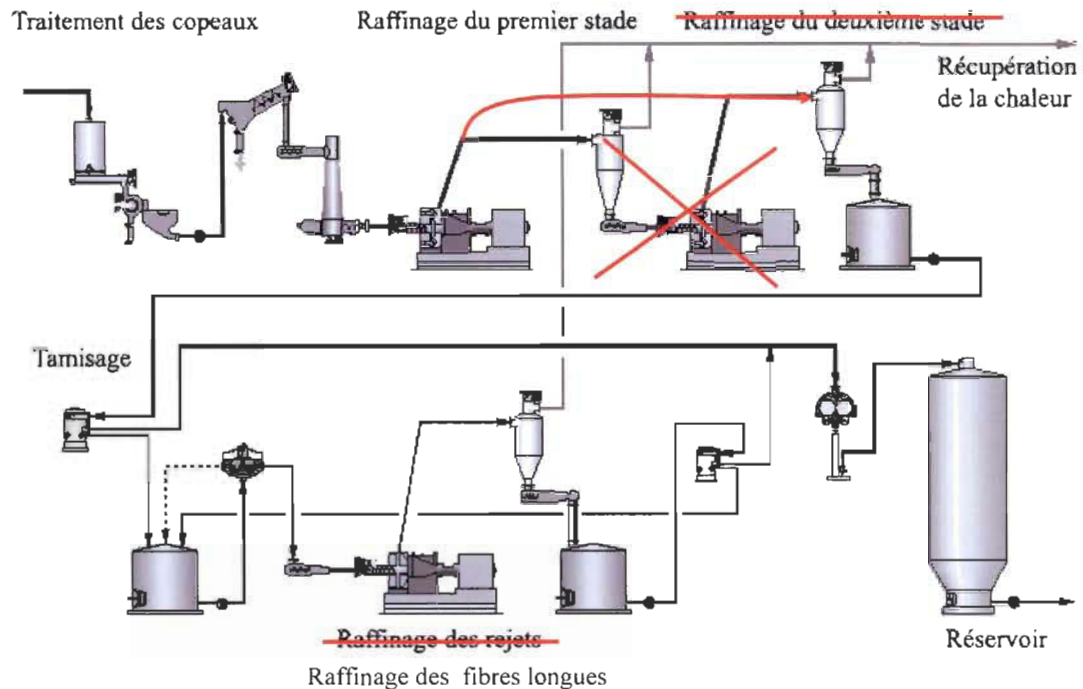


Figure 3.2 Procédé proposé

Nous n'aurons ainsi pas besoin d'ajouter d'équipement supplémentaire et économiserons au niveau de l'investissement. Ce sera une amélioration technologique du procédé. Comme l'énergie de tamisage est déjà présente dans le procédé, nous ne considérerons pas la consommation d'énergie du tamisage dans cette recherche. Il y aura certainement une légère augmentation puisque la quantité de pâte à tamiser augmentera mais cette différence est difficile à évaluer et est probablement marginale.

3.2 Objectifs

L'objectif principal de cette recherche dans son ensemble est de déterminer si un raffinage sélectif est plus efficace qu'un raffinage conventionnel des fibres sans fractionnement. De façon plus spécifique à cette thèse, nous déterminerons la meilleure façon de raffiner chaque fraction de fibres et de produire le meilleur papier journal possible à un coût énergétique minimum. Nous étudierons également les niveaux d'énergie et l'effet du nombre de stades de raffinage appliqué sur chaque fraction. Notre attention portera particulièrement sur le changement des fibres à la suite du raffinage. À

l'aide de diverses mesures sur les fibres ou sur les pâtes et papiers produits, incluant l'utilisation du microscope optique et du microscope électronique à balayage, nous caractériserons le développement des fibres et, nous expliquerons les phénomènes particuliers observés au cours du raffinage.

Chapitre 4 - Méthodologie

Étant donné que la morphologie des fibres a un effet significatif sur la mise en pâte et sur les propriétés finales des pâtes et papiers, nous séparons les fibres suivant leur morphologie, et raffinons séparément les fractions de fibres afin d'obtenir le meilleur résultat de raffinage de chaque fraction tout en minimisant l'énergie requise lorsque cela est possible. Par conséquent, cette recherche globale se compose de deux parties : séparation des fibres (fractionnement) et raffinage sélectif après fractionnement. La séparation des fibres est réalisée par Alexandre Ferluc [118, 119] au cours de ses récentes études de 3^{ième} cycle à l'UQTR. De mon côté, j'ai utilisé les fractions qu'il a obtenues pour étudier le comportement des diverses fractions lors du raffinage. Les travaux ont été effectués avec une pâte prise directement de l'usine Papier Masson, soit une PTM du premier stade, composée principalement d'épinette noire. La Figure 4.1 ci-dessous présente le cheminement général de la recherche.

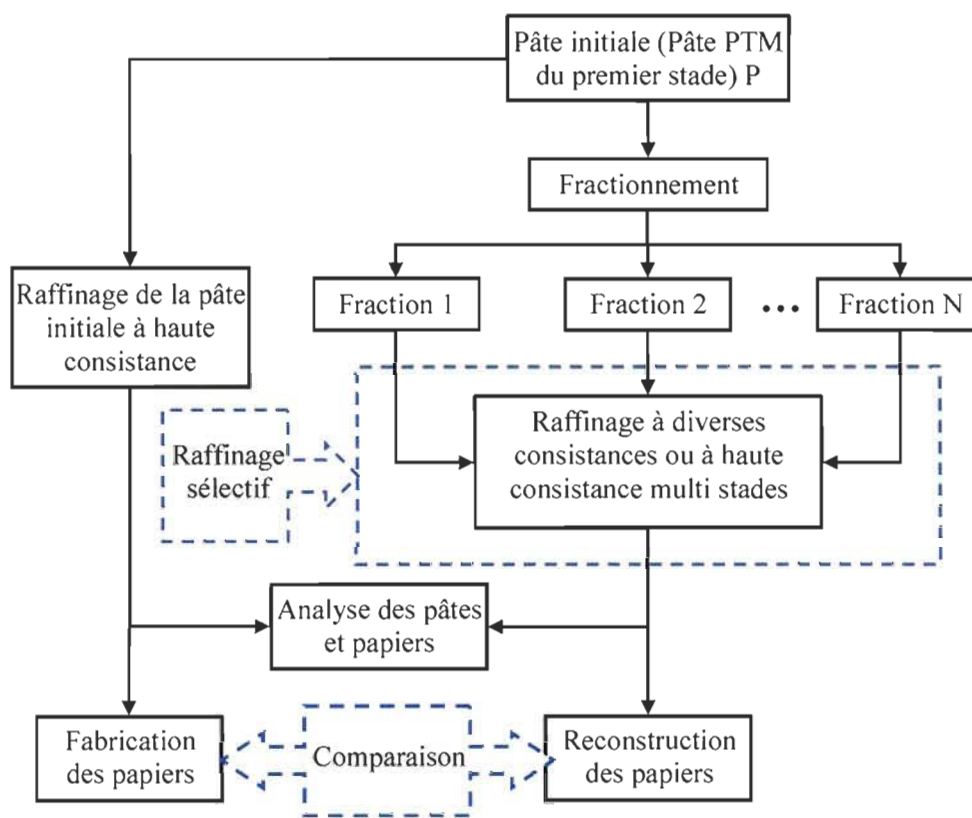


Figure 4.1 Cheminement général de la recherche

4.1 Fractionnement

La pâte initiale P (Figure 4.1) emballée dans des fûts de carton a été diluée à 4% de consistance, chauffée à une température de 75°C et agitée pendant 45 minutes pour en éliminer la latence. La pâte a ensuite été diluée davantage pour atteindre la consistance requise pour chaque fractionnement.

Le fractionnement est effectué en utilisant un tamis sous pression Black Clawson modèle 8-P, équipé d'un élément rotatif à deux lames. Le raffinage sélectif après fractionnement est bien sûr fortement relié à l'efficacité du fractionnement, qui reste un élément critique lors du raffinage puisqu'il détermine le matériel qui entrera dans le raffineur. Dans le but d'accroître l'efficacité de fractionnement, les essais se sont divisés en deux parties : les essais préliminaires et les essais finaux, tel que démontré aux Figure 4.2 et Figure 4.3.

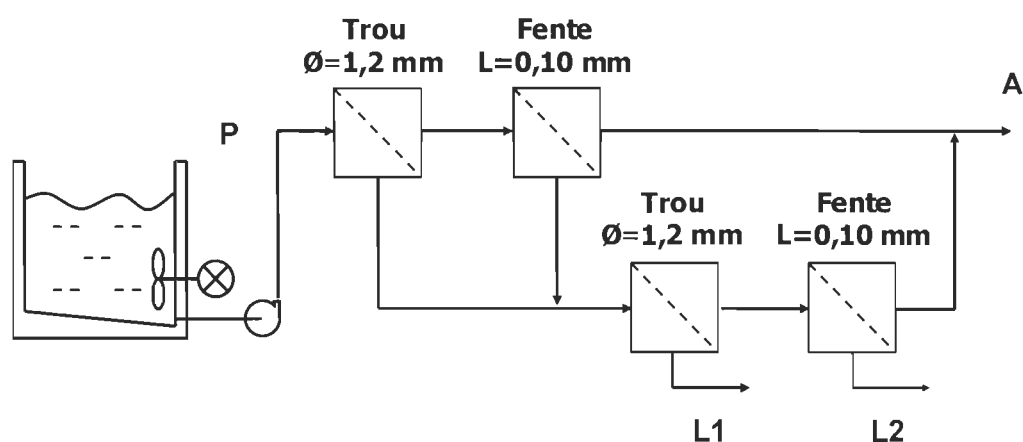


Figure 4.2 Procédé de fractionnement pour les essais préliminaires

Pour le fractionnement préliminaire, deux types de paniers ont été utilisés : un panier à trous lisses de 1,2 mm de diamètre et un panier à fentes profilées de 0,10 mm avec un profil de type CAE B IV, tandis qu'un panier à trous lisses de 0,25 mm de diamètre et un panier à fentes profilées de 0,10 mm a été utilisé pour les essais finaux.

Depuis 2005, certains essais préliminaires ne visant que le fractionnement ont aussi été effectués mais ne seront pas discutés dans cette thèse. Les essais considérés se

concentreront uniquement sur ceux où une séparation intéressante des fibres a été obtenue et où nous avons effectué le raffinage des fractions.

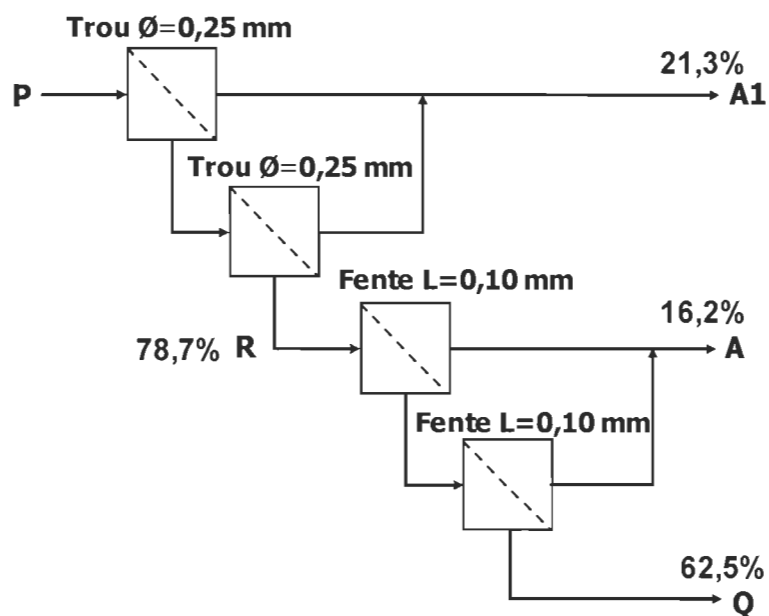


Figure 4.3 Procédé de fractionnement pour les essais finaux

4.1.1 Raffinage

Les raffinages ont été effectués à pression atmosphérique en utilisant l'unité pilote de raffinage CD 300 (Metso inc.) du Centre Intégré des Pâtes et Papiers (CIPP) de l'UQTR. Un disque rotatif R3809BG et un disque fixe R3803 ont servi aux essais de raffinage. Au cours des essais préliminaires, les fractions ont été raffinées à haute consistance (20%) et à basse consistance (4-5%) (Figure 4.4).

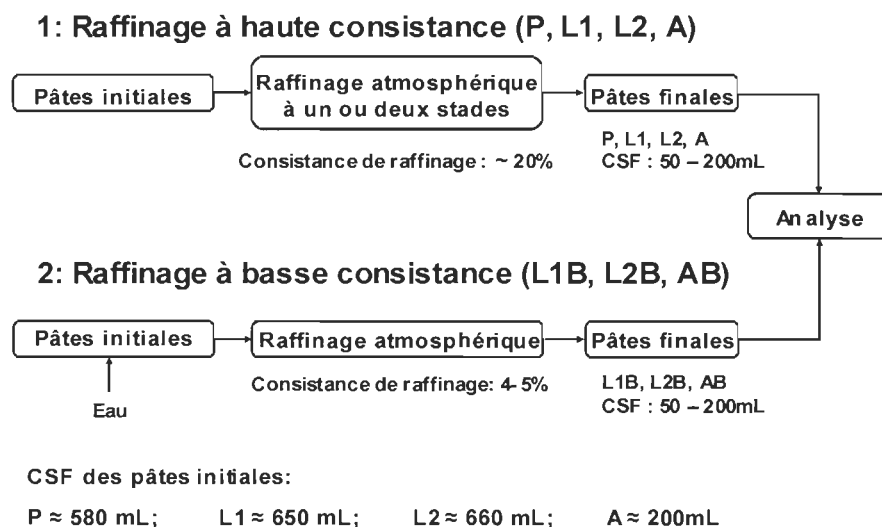


Figure 4.4 Procédé de raffinage préliminaire

- P : Pâte initiale P raffinée à haute consistance
- L1 : Fraction L1 raffinée à haute consistance
- L2 : Fraction L2 raffinée à haute consistance
- A : Fraction A raffinée à haute consistance
- AB : Fraction A raffinée à basse consistance
- L1B : Fraction L1 raffinée à basse consistance
- L2B : Fraction L2 est raffinée à basse consistance

La Figure 4.5 illustre le cheminement du raffinage final où on a effectué un raffinage à haute consistance, un raffinage à basse consistance et un raffinage à haute consistance en deux stades. Comme référence et pour fin de comparaison, la pâte initiale P a été raffinée à haute consistance, ce qui simule le procédé normal de l'usine.

Au cours du raffinage, la consistance de raffinage est contrôlée entre 20%-24% dans le cas du raffinage à haute consistance et 4%-5% pour le raffinage à basse consistance. Lors du raffinage à haute consistance les pâtes ont été raffinées à quatre niveaux de CSF (de 50 à 200 mL) tandis qu'à basse consistance elles sont raffinées à trois niveaux de CSF. Le CSF est contrôlé pour chaque échantillon des pâtes raffinées à haute consistance par un ajustement de l'entrefer entre les plaques du raffineur. Au cours du raffinage à basse consistance, les échantillons sont obtenus par plusieurs passes de raffinage avec une combinaison de différents entrefers entre les plaques. Les données spécifiques de l'entrefer sont présentées au Tableau 4.1.

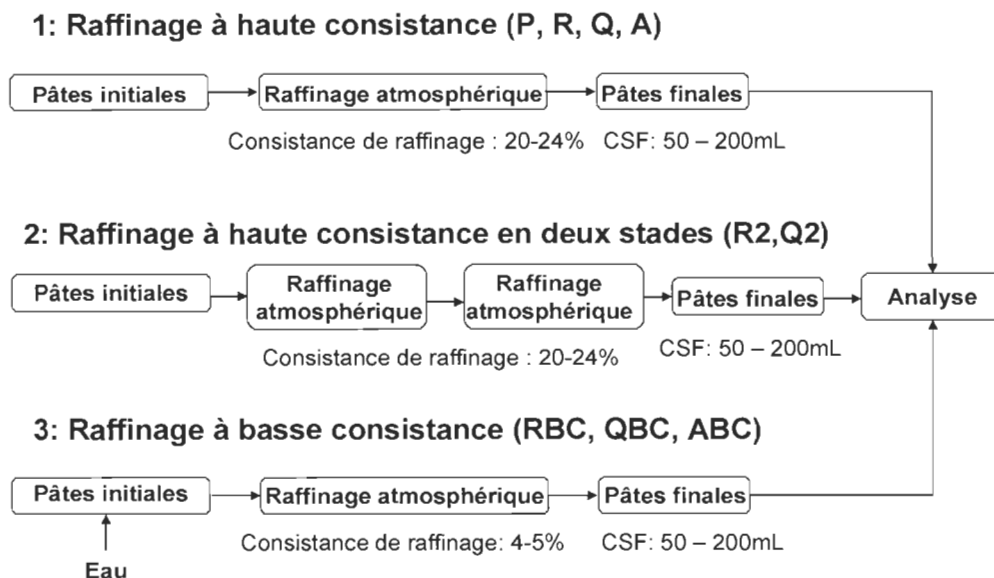


Figure 4.5 Procédé de raffinage final

- P : Pâte initiale P raffinée à haute consistance
 R : Fraction R raffinée à haute consistance
 R2 : Fraction R raffinée à haute consistance en deux stades
 RBC : Fraction R raffinée à basse consistance
 Q : Fraction Q raffinée à haute consistance
 Q2 : Fraction Q raffinée à haute consistance en deux stades
 QBC : Fraction Q raffinée à basse consistance
 A : Fraction A raffinée à haute consistance
 ABC : Fraction A raffinée à basse consistance

Tableau 4.1 Entrefer entre les plaques du raffineur

Entrefer, mm	Raffinage à haute consistance	Raffinage à basse consistance
Disques plats	0,3 – 0,7	0,2, 0,25, 0,4
Disques coniques	0,9 – 2,1	0,6, 0,75, 1,2
Distance réelle	0,3 – 0,7	0,2, 0,25, 0,4

4.1.2 Caractérisation des pâtes et papiers

Le raffinage rend les fibres spiralées, tortillées et ondulées. Par conséquent, les pâtes ont souvent un indice d'égouttage (CSF) élevé et de faibles propriétés physiques car les

fibres sont à l'état dit "latent". Pour cette raison, la latence des fibres doit être éliminée en les désintégrant à l'eau chaude (env. 98 °C) avant de les caractériser. Pour ce faire on a employé un désintégrateur Domtar. La caractérisation des pâtes et papiers pour les essais préliminaires et celle des essais finaux sont illustrées à la Figure 4.6 et à la Figure 4.7.

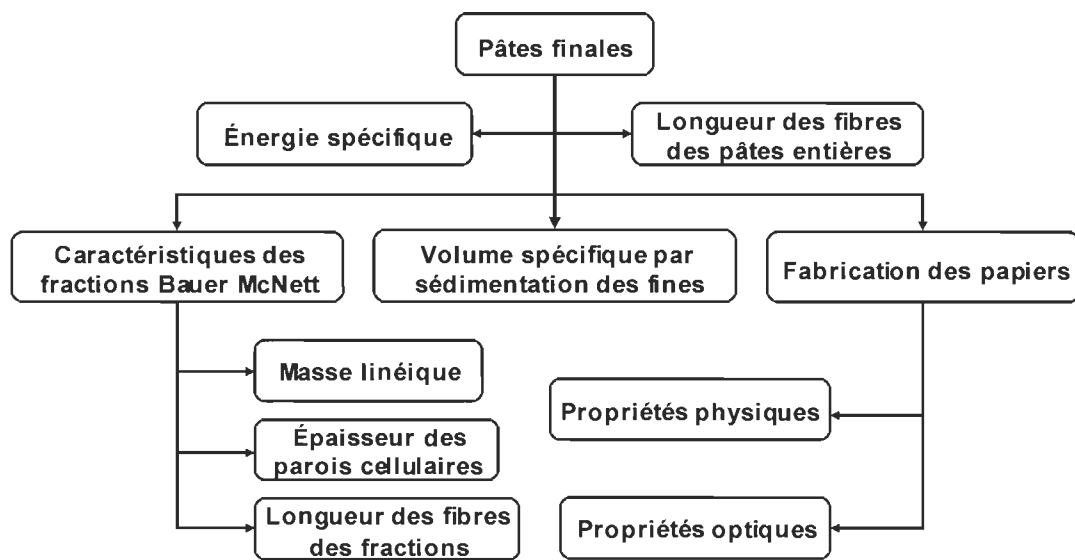


Figure 4.6 Évaluation des pâtes et papiers pour les essais préliminaires

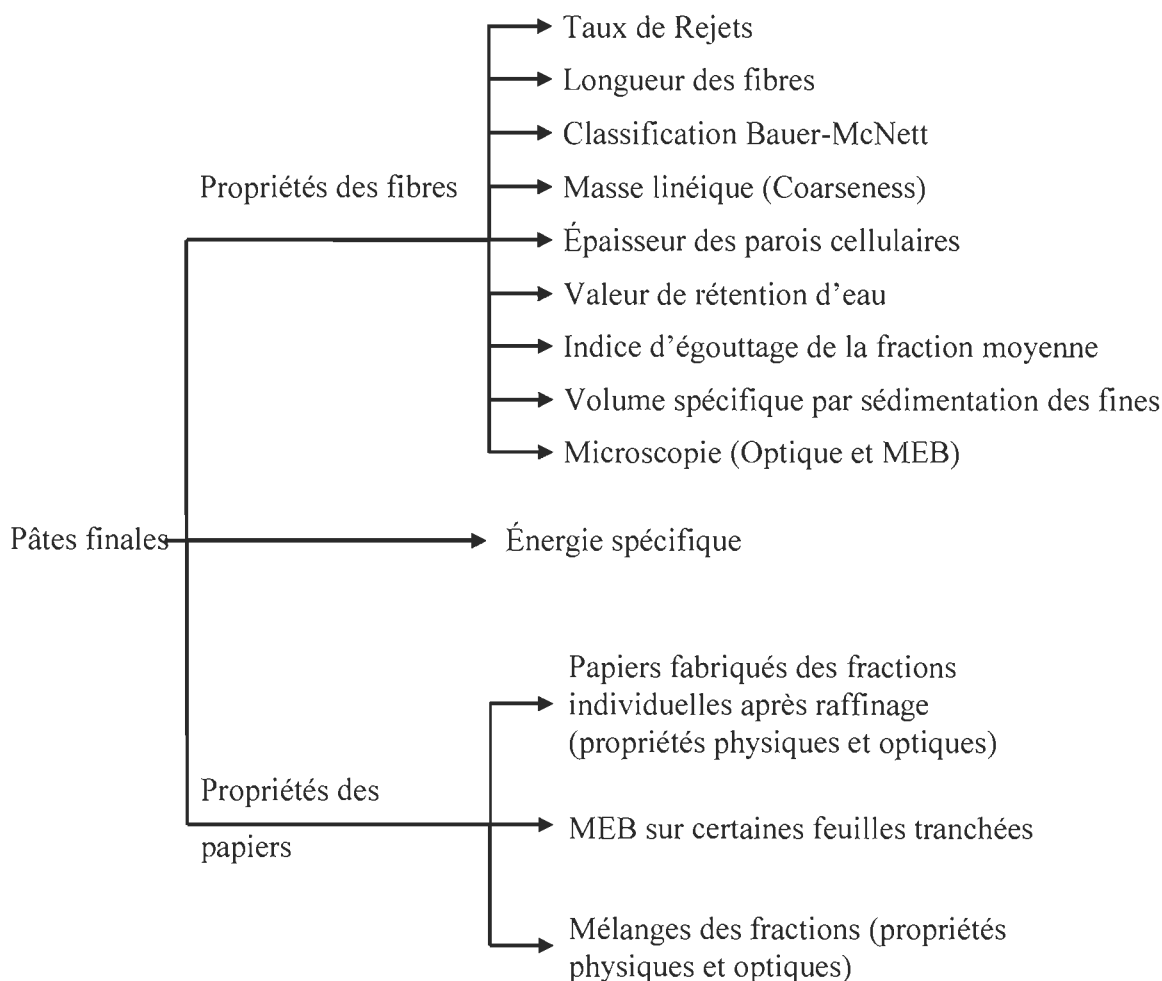


Figure 4.7 Évaluation des pâtes et papiers pour les essais finaux

4.1.2.1 Consommation d'énergie spécifique

Lors du raffinage à haute consistance, la consommation d'énergie est enregistrée directement par un ordinateur branché au raffineur. Cependant, dans le cas du raffinage à basse consistance, les pâtes traversent trop vite le raffineur et il n'y a pas de possibilité de mesurer correctement la quantité d'énergie appliquée sur l'unité pilote. Par conséquent, l'énergie spécifique à basse consistance n'a pas été mesurée; les valeurs d'énergie spécifique présentées sont estimées sur la base de l'évolution du CSF au cours du raffinage à basse consistance dans un raffineur conique de type Conflo de Metso. Ces estimations sont réalisées à partir de données fournies par Metso.

4.1.2.2 Propriétés des fibres

4.1.2.2.1 Taux de rejets

La présence de rejets peut former des points faibles dans le réseau fibreux, ce qui influence les liens inter-fibres et diminue les propriétés mécaniques du papier. Une haute teneur en rejets peut aussi causer des cassures du papier sur la machine à papier et la déchirure du papier au calandrage. Par conséquent, une faible teneur en rejets dans la pâte est préférée.

Le taux de rejets est déterminé à l'aide d'un tamis Pulmac dont les fentes sont de 0,1 mm. Le tamis laisse passer la pâte acceptée en présence d'un écoulement d'eau régulier, pendant que les rejets sont retenus sur le tamis. La mesure des rejets est exprimée en pourcentage de la masse totale de pâte. Des rejets humides ont également été recueillis pour l'analyse microscopique.

4.1.2.2.2 Longueur des fibres des pâtes entières

La réduction en longueur des fibres au cours du raffinage nous indique partiellement le niveau d'effet mécanique reçu par les fibres. Si l'intensité du raffinage est trop haute, lorsque le raffinage est fait à basse consistance, les fibres sont trop coupées et leur longueur diminue drastiquement.

La longueur des fibres peut être mesurée par comptage microscopique, analyse d'images [120], ou à l'aide d'un appareil optique tel que l'analyseur FQA, etc. Ce dernier a été utilisé dans notre recherche. En général, les résultats de FQA peuvent nous fournir la longueur des fibres moyenne en trois catégories : longueur moyenne arithmétique (l_n), longueur moyenne pondérée en longueur (l_{lw}) et longueur moyenne pondérée en poids (l_{ww}) (Équation 4.1 – Équation 4.3) [121].

$$l_n = \sum_i n_i \ell_i / \sum_i n_i \quad \text{Équation 4.1}$$

$$l_{lw} = \sum_i n_i \ell_i^2 / \sum_i n_i \ell_i \quad \text{Équation 4.2}$$

$$\ell_{ww} = \sum_i n_i \ell_i^3 / \sum_i n_i \ell_i^2 \quad \text{Équation 4.3}$$

Où , n_i : Nombre de fibres

l_i :Longueur des fibres

Si l'échantillon se compose de fibres assez uniformes en longueur, la longueur moyenne arithmétique est adéquate. Pour les fibres non-uniformes, l'analyse de la fraction fines n'est pas fiable car ce n'est pas toutes les fines qui sont détectées par l'appareil optique [122]. Nos échantillons contiennent des fibres longues, des fibres courtes et des fines, ainsi cette forme d'expression ne nous convient pas. La longueur moyenne pondérée en poids est définie dans le cas où la masse linéique des fibres est proportionnelle à la longueur des fibres. Selon Clark [121], la masse linéique des fibres naturelles est proportionnelle avec la longueur des fibres. Ainsi, il a proposé d'utiliser la longueur moyenne pondérée en poids. Cependant, après le raffinage, il y a certainement certains changements des caractéristiques naturelles des fibres. Bently et al. [123] ont montré que la longueur moyenne pondérée en longueur pourrait nous donner une meilleure prévision du potentiel de développement des fibres. Par conséquent, nous avons choisie la pondération en longueur dans cette recherche (Équation 4.2).

Afin de bien connaître l'influence de l'effet du raffinage sur la longueur des fibres, nous avons également utilisé le taux de réduction en longueur des fibres (Équation 4.4) dans la recherche.

$$TL = \frac{l_{lw1} - l_{lw2}}{l_{lw1}} \times 100 \quad \text{Équation 4.4}$$

Où , TL : Taux de réduction en longueur des fibres

l_{lw1} : Longueur moyenne pondérée en longueur avant le raffinage

l_{lw2} : Longueur moyenne pondérée en longueur après le raffinage

4.1.2.2.3 Classification Bauer McNett

Au cours du raffinage, l'effet mécanique raccourcit les fibres, diminue l'épaisseur des parois cellulaires ou la masse linéique, etc. Afin de bien comprendre l'effet mécanique et son influence sur les fibres, notre analyse est basée sur les fractions Bauer McNett. Nous avons déjà discuté que l'analyse des fractions fines par l'appareil optique n'est pas fiable car les fines ne peuvent pas être détectées [122]. La fraction Bauer McNett R14, a pour sa part tendance à bloquer les appareils. Quoiqu'elle peut être analysée par microscopie. Cependant, cette fraction contient aussi des rejets, en plus des fibres individuelles (bien séparées). Les rejets se composent de bûchettes et d'agrégats [35,124]. Ceux-ci, particulièrement les agrégats, pourraient causer une imprécision de la mesure. Par conséquent, nous les avons exclues de l'étude pour ne conserver que les fractions R28, R48 et R100. Certaines fractions sont, de plus, analysées par microscopie.

4.1.2.2.3.1 Épaisseur des parois cellulaires

L'épaisseur des parois cellulaires est un paramètre morphologique important car elle affecte la rigidité ou la flexibilité des fibres. Une haute rigidité des fibres affecte négativement les liaisons fibre-à-fibre. La mesure de l'épaisseur des parois cellulaires peut donner des informations sur le comportement des fibres lors du fractionnement, puis du raffinage subséquent. Dans notre recherche, l'épaisseur des parois cellulaires est mesurée au moyen d'un analyseur d'épaisseur des parois cellulaires (Morfi fiber wall thickness analyser, TechPap, France). Cet appareil se compose de deux parties : une partie collecte les données (Partie I) et une autre partie les traite (Partie II) (Figure 4.8). Lors de l'opération, la consistance d'échantillon est maintenue à 1 mg/L.

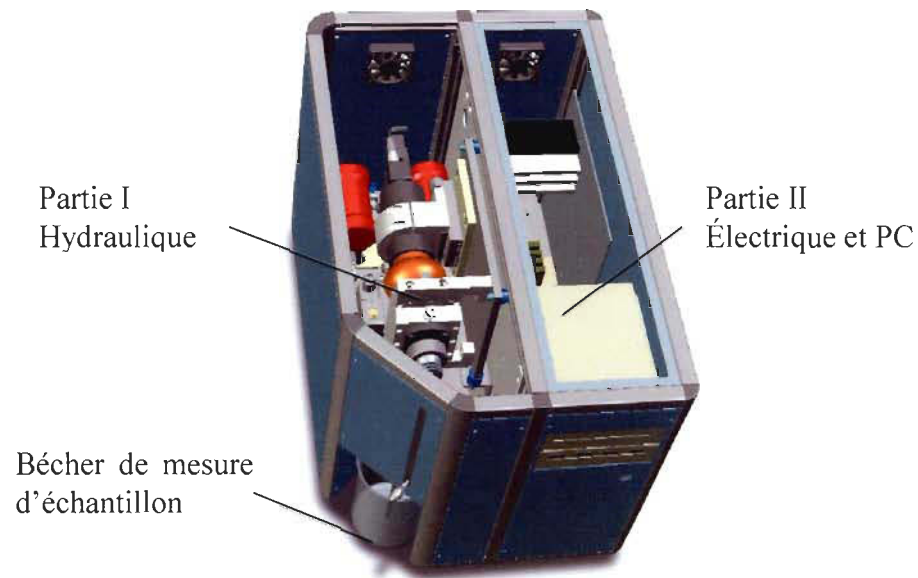


Figure 4.8 Analyser d'épaisseur des parois cellulaires Morfi

Comme dans le cas de la longueur des fibres, le taux de réduction en épaisseur des parois cellulaires est aussi calculé et il est défini par l'équation suivante (Équation 4.5).

$$TE = \frac{EP_1 - EP_2}{EP_1} \times 100 \quad \text{Équation 4.5}$$

Où, TE : Taux de réduction en épaisseur des parois cellulaires

EP_1 : Épaisseur des parois cellulaires avant le raffinage

EP_2 : Épaisseur des parois cellulaires après le raffinage

4.1.2.2.3.2 Masse linéique (Coarseness)

Le raffinage diminue non seulement la longueur des fibres mais aussi leur masse linéique [92, 125]. La masse linéique est définie comme la masse de fibres par unité de longueur (Équation 4.6). Elle représente une information importante pour les fibres car elle a un effet sur les propriétés de structure et de résistance ainsi que sur les propriétés optiques des papiers finaux [126].

La masse linéique est également déterminée à l'aide de l'analyseur de fibres FQA. Le nombre total de fibres (N) et la longueur moyenne arithmétique (L_n) sont obtenus directement par l'appareil. Par conséquent, la précision de la masse linéique dépend de la masse sèche des fibres que nous mesurerons.

$$ML = \frac{M}{N \times L_n} \quad \text{Équation 4.6}$$

Où , ML : Masse linéique, mg/m

M : Masse sèche des fibres, mg

N : Nombre total de fibres

L_n : Longueur moyenne arithmétique, mm

4.1.2.2.3.3 Valeur de rétention d'eau (VRE)

La valeur de rétention d'eau (VRE) indique la capacité à absorber l'eau par les fibres [127]. L'action mécanique pendant le raffinage délamine la paroi cellulaire et fibrille la surface des fibres, ce qui augmente la surface spécifique et expose les groupes hydrophiles (-OH) tout en augmentant la capacité d'absorption d'eau des fibres. Par conséquent, la VRE peut refléter le niveau de raffinage et le degré de délamination et de fibrillation des fibres. Ici nous avons déterminé la VRE selon la méthode standard TAPPI UM-256.

4.1.2.2.3.4 Développement de la fraction moyenne (indice d'égouttage de la fraction R100+R200)

L'indice d'égouttage (CSF) dépend fortement de la teneur en fines [128] mais aussi de la conditions de surface des fibres, telle que la fibrillation externe. Cet indice est donc utile pour vérifier le traitement mécanique sur les fibres, particulièrement pour vérifier les fractions Bauer McNett car elles ne sont pas influencées par les fines. Au niveau de la morphologie, les fibres dans la fraction moyenne (R100+R200) sont beaucoup plus

complexes et très difficiles de caractériser car elles sont la plupart du temps incomplètes et de forme très variée. Nous avons donc utilisé cet indice (CSF) pour évaluer le développement et donc le degré de raffinage des fibres de cette fraction.

4.1.2.2.4 Volume spécifique par sédimentation (VSS) des fines

Les fines sont très différentes des fibres en regard de leurs propriétés physiques [129]. En effet, la qualité des fines des pâtes mécaniques est une caractéristique importante influençant non seulement le CSF mais aussi la résistance mécanique du papier. Elle peut être qualifiée par le volume spécifique par sédimentation (VSS) en suivant la méthode de Marton et Robie [130] et Luukko [131].

D'après cette méthode, les matières fines qui passent à travers un tamis de 200 mailles dans un DDJ (Dynamic Draining Jar, 2L) ont été premièrement collectées. Pour chaque collection, 0,5 g de pâte a été mis dans l'eau déminéralisée et le volume total est ajusté à 500 mL. Afin de bien récupérer les fines, nous avons ajouté, 3-4 fois 500 mL d'eau déminéralisée pour nettoyer la pâte. Le mélange eau-fines a ensuite été placé dans une chaudière et laissé pendant 24 heures pour décanter. L'eau surnageante a été siphonnée et les fines ont été concentrées à une consistance d'environ 0,4-0,5% à l'aide d'une centrifuge. Une partie des fines est utilisée pour l'analyse microscopique.

Pour la détermination du VSS, les fines concentrées (0,4-0,5%) sont diluées à 0,15 % avec une solution contenant Na_2SO_4 (120 mg/L) et CaCl_2 (30 mg/L) pour équilibrer la teneur en ions. Après l'ajustement du pH (6-6,5), la solution a été introduite dans deux cylindres gradués de 100 mL. Avec une pompe à vide, l'air de la solution a été enlevé pendant 10 minutes. Après cette étape, nous avons scellé les cylindres avec du parafilm et les avons posé sur une plaque horizontale stable pendant 24 heures. Finalement, nous avons pris le volume du dépôt de fines (V , cm^3) et avons pesé les fines séchées (P , g). Le VSS est déterminé selon l'Équation 4.7.

$$VSS(cm^3 / g) = V/P \quad \text{Équation 4.7}$$

Où , V : Volume du dépôt, cm^3

P : Poids sec des fines, g

4.1.2.3 Propriétés des papiers

Les propriétés des fibres et celles des pâtes se reflètent inévitablement sur la qualité des papiers produits. Pour les essais préliminaires, nous avons étudié les papiers fabriqués à partir des fractions individuelles. Cependant, au cours des essais finaux, après le raffinage, nous avons étudié les papiers fabriqués à partir des fractions individuelles ainsi que ceux faits à partir des mélanges selon leurs proportions déterminées par le processus du fractionnement. Les mesures des propriétés physiques et optiques sont effectuées suivant les méthodes normalisées de l'Association Technique des Pâtes et Papiers du Canada (ATPPC).

4.1.2.4 Analyse microscopique

L'analyse conventionnelle, tels que les tests physiques et optiques, pourrait nous donner une compréhension plus directe de la réponse des fibres au raffinage. Cependant, elle n'explique pas suffisamment le changement des fibres à la suite du raffinage, surtout certains phénomènes durant le raffinage. Dans ce travail, les fractions et les rejets Pulmac sont caractérisées avec un microscope optique et tandis que les caractéristiques des surfaces des fibres et des fines sont évaluées en utilisant un microscope électronique à balayage (MEB). Les coupes transversales des fibres sont également observées avec le MEB. On a aussi examiné les sections transversales du papier fabriqué à partir de la pâte sans fractionnement et celles de deux papiers ayant les meilleures propriétés, obtenus à partir des fractions mélangées.

Pour l'observation sur la coupe transversale des fibres, les fibres des fractions Bauer McNett sont d'abord alignées par la méthode proposée par Law et al. [132]. Les fibres

ou les papiers sont ensuite progressivement déshydratées avec de l'éthanol et sont séchées à 20 °C. Les fibres sont alors imprégnées d'une résine [133] dans des moules en silicone puis placées à l'étuve à 60°C pendant 12 à 24 heures afin de durcir la résine. Une composition modifiée de la résine a été utilisée afin d'obtenir une faible viscosité [134], c'est-à-dire que l'on a remplacé l'époxyde ERL 4206, qui est hautement toxique, par l'époxyde ERL 4221. Cette dernière est moins toxique mais possède un poids moléculaire plus élevé.

Les blocs de résine sont taillés et lissés avec un couteau de verre. La résine à la surface du bloc est ensuite dissoute afin de libérer l'extrémité des fibres et d'améliorer ainsi la netteté des images. Le solvant utilisé est une solution saturée de soude dans un mélange d'éthanol et d'oxyde de propylène [135]. Les observations sont effectuées à l'aide du microscope électronique à balayage JSM-5500 (Jeol Ltd.) du laboratoire de microscopie électronique du CIPP.

Chapitre 5 - Résultats et discussions – essais préliminaires

En 2006, les essais préliminaires ont été réalisés au Centre de Recherche en Pâtes et Papiers (CRPP) de l'UQTR. L'objectif des essais était de séparer la plus grande partie possible des fibres avec une morphologie différente à partir d'une pâte produite lors du premier stade. Cette séparation a été suivie d'un raffinage séparé suivant diverses conditions.

5.1 Fractionnement

La pâte initiale P a été fractionnée en trois fractions : L1, L2 et A. L1 est la fraction des fibres longues (que l'on espérait enrichie en fibres du BE), L2 est la fraction intermédiaire et A est la fraction des fibres courtes contenant principalement des fibres du BP et des fines. Dû au fait que le fractionnement était peu efficace, ces essais ne nous permettent que d'évaluer si les fractions se comportent différemment au cours du raffinage. Les proportions des fractions de Bauer McNett de la pâte initiale P et des fractions sont présentées au Tableau 5.1.

Tableau 5.1 Caractéristiques de la pâte initiale P et des fractions obtenues du fractionnement

		P	L1	L2	A
Indice d'égouttage, mL		580	650	660	200
Longueur des fibres, mm		1,67	1,86	1,76	1,27
Bauer McNett %	R14	18,3	25,8	24,6	4,2
	R28	28,7	30,0	33,1	21,0
	R48	19,1	17,6	19,8	19,7
	R100	9,3	8,0	10,0	12,2
	R200	5,6	4,3	4,2	8,3
	P200	19,0	14,3	8,3	34,6

5.2 Raffinage

5.2.1 Consommation d'énergie spécifique (CES)

Dans le cas du raffinage à haute consistance (Figure 5.1), pour un indice d'égouttage (CSF) donné, il n'existe pas beaucoup de différence en consommation d'énergie spécifique (CES) parmi les trois pâtes, soit P, L1 et L2, particulièrement entre L1 et L2. On observe que L1 et L2 consomment beaucoup plus d'énergie spécifique que A, ce qui est probablement dû au fait que la pâte A a un CSF initial relativement plus bas (600 mL vs. 200 mL).

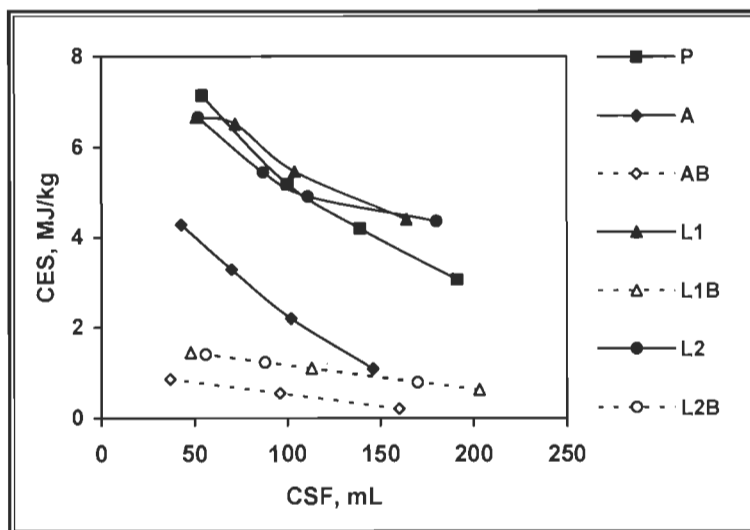


Figure 5.1 Énergie spécifique en fonction du CSF

Cependant, toutes les fractions raffinées à basse consistance consomment toujours moins de 50% de l'énergie spécifique de celles raffinées à haute consistance. Ceci signifie qu'en terme de CES, le raffinage à basse consistance entraîne une économie significative des coûts de production.

5.2.2 Propriétés des fibres

5.2.2.1 Longueur des fibres

Au cours du raffinage, la longueur des fibres diminue en fonction du CSF (Figure 5.2). Étant donné que les pâtes L1 et L2 sont plus riches en fibres longues, leurs longueurs sont un peu supérieures à celles de P même s'elles sont toutes deux raffinées à haute consistance. De plus, la pâte A qui est la fraction fine, a la longueur des fibres la plus basse parmi les pâtes.

D'autre part, le raffinage à basse consistance produit un taux de réduction de la longueur plus rapide par rapport au raffinage à haute consistance, indiquant que le raffinage à basse consistance tend à couper les fibres de façon plus sévère à cause de la faible distance de l'entrefer des plaques de raffineur et la forte intensité de raffinage lors du raffinage à basse consistance. D'autre part, l'action du raffinage à haute consistance est plus douce sur les fibres et permet de mieux les préserver par rapport au raffinage à basse consistance, car il y a moins de contact entre les fibres et les barres du raffineur.

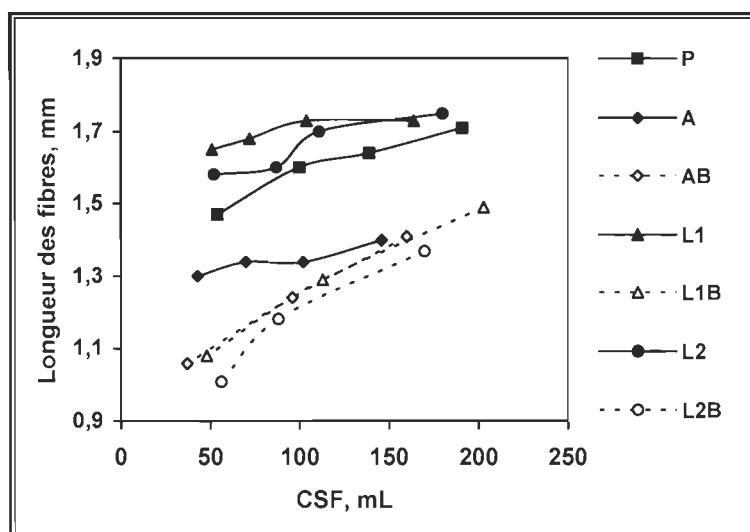


Figure 5.2 Longueur des fibres en fonction du CSF

5.2.2.2 Caractéristiques des fractions Bauer McNett

Le raffinage a changé de façon considérable la morphologie des fibres : réduction en longueur, en épaisseur de paroi cellulaire et en masse linéique, tel que montré aux figures 5.3 à 5.6.

On note qu'à haute consistance, la masse linéique et l'épaisseur des parois cellulaires de la fraction R28 diminuent rapidement pour toutes les pâtes, mais que la longueur des fibres subit peu de changement (Figure 5.3 et Figure 5.5). Par contre, ce phénomène est moins marqué pour la fraction R48. Ceci pourrait signifier que le raffinage à haute consistance produit plus de fibrillation externe et moins de coupure de fibres. En d'autres mots, les fibres sont mieux développées lors du raffinage à haute consistance vis-à-vis celui à basse consistance. Cette différence de comportement permet aussi de présumer qu'il serait possible de faire un raffinage plus spécifique sur chaque fraction avec un gain de propriétés ou peut-être une gain d'économie d'énergie.

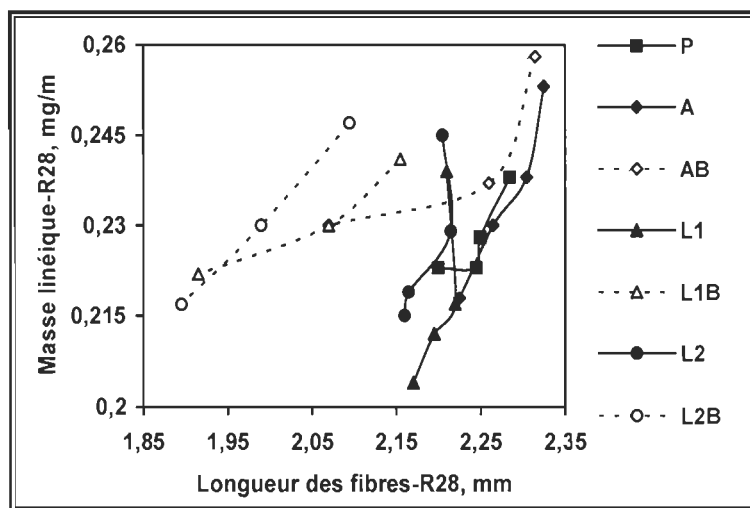


Figure 5.3 Masse linéique en fonction de la longueur des fibres -- R28

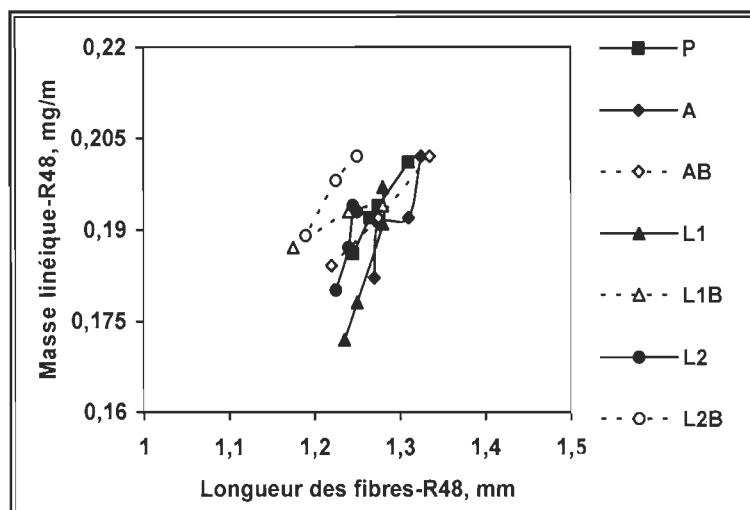


Figure 5.4 Masse linéique en fonction de la longueur des fibres -- R48

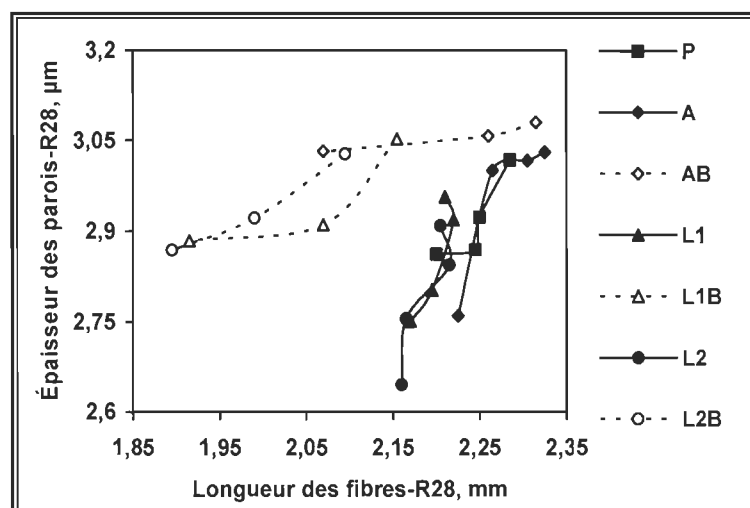


Figure 5.5 Épaisseur des parois en fonction de la longueur des fibres -- R28

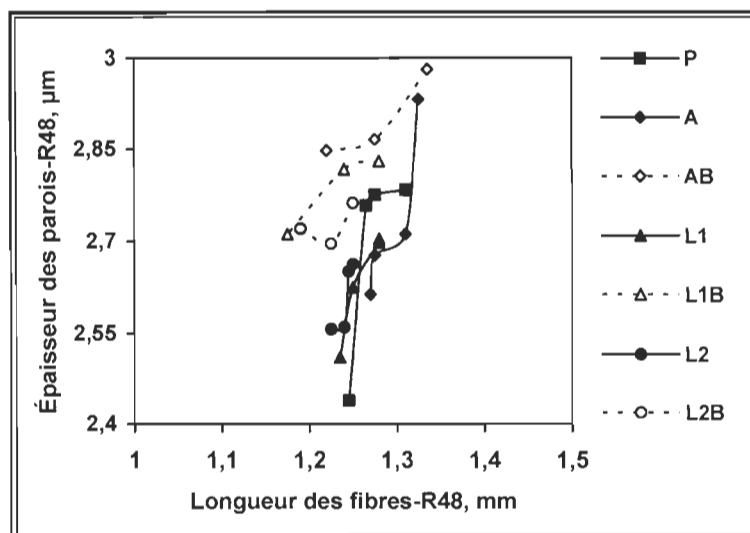


Figure 5.6 Épaisseur des parois en fonction de la longueur des fibres -- R48

Théoriquement parlant, la masse linéique des fibres a une relation linéaire avec l'épaisseur des parois cellulaires. Les relations non linéaires observées aux Figures 5.7 et 5.8 suggèrent que, très probablement, l'épaisseur de paroi cellulaire des fibres n'est pas uniforme le long de la longueur des fibres. Ceci est concevable car les actions mécaniques du raffinage sur les amas des fibres sont arbitraires. Cette caractéristique est évidemment montrée aux figures 5.7 et 5.8. Simultanément, si on compare les figures 5.7 et 5.8 avec les figures 5.3 et 5.4, nous constatons qu'au cours du raffinage la réduction en longueur des fibres n'apporte pas nécessairement une diminution de la masse linéique; mais la réduction en épaisseur des parois correspond bien à la diminution de la masse linéique.

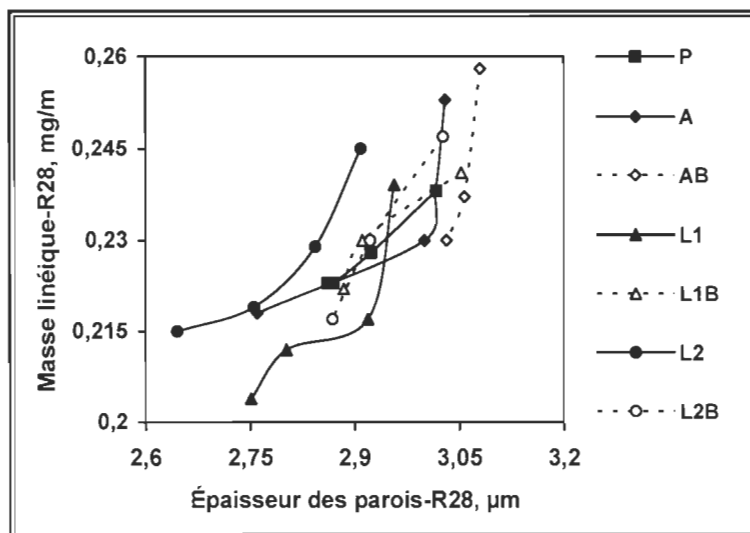


Figure 5.7 Masse linéique en fonction de l'épaisseur des parois -- R28

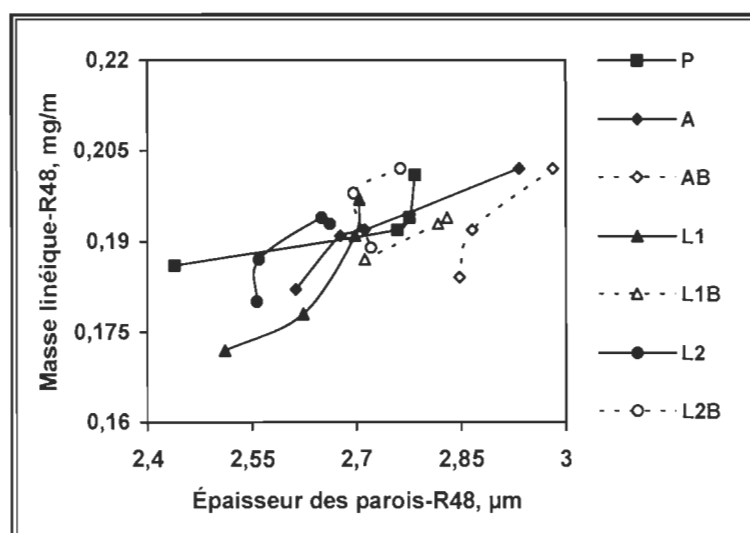


Figure 5.8 Masse linéique en fonction de l'épaisseur des parois -- R48

5.2.2.3 Volume spécifique par sédimentation (VSS) des fines

La qualité des fines des pâtes mécaniques est une caractéristique importante et peut être mesurée par le VSS. On observe que les pâtes L1 et L2 ont une faible teneur en fines. Cependant ces fines ont une haute valeur de VSS qui est supérieure à celle des pâtes P et A (Figure 5.9). On note également que le VSS de A est toujours plus bas car ses fines se composent principalement des fines primaires qui contiennent en grande majorité des

parenchymes et les couches externes (composite de la lamelle mitoyenne et de la paroi primaire) [92, 136, 137, 138]. On sait que les parenchymes sont rarement fibrillés au cours du raffinage à cause de leurs petites dimensions et que les couches externes de la paroi cellulaire ne se fibrillent pas facilement dû à leurs caractéristiques chimiques et physiques. Par conséquent, ces fines apportent une faible valeur de VSS et un coefficient de diffusion de la lumière supérieur. On constate que ce sont les éléments fibrillaires provenant de la paroi secondaire qui contribuent à l'augmentation du VSS.

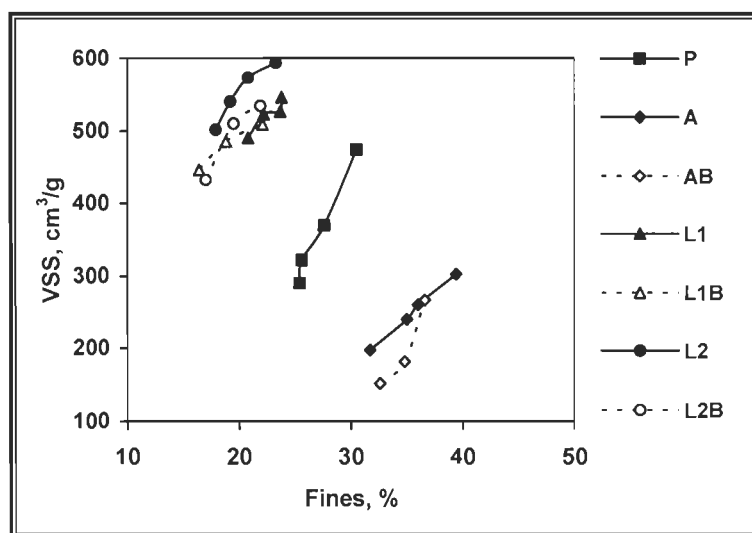


Figure 5.9 VSS en fonction de la teneur en fines

On observe que la consistance du raffinage a peu d'influence sur les valeurs de VSS pour toutes les fractions de pâte raffinées. On peut présumer que les fibres qui sont coupées se retrouvent dans les fractions courtes ou moyennes, diminuant ainsi la longueur sans augmenter la quantité de fines. Étant donné que les valeurs de VSS sont semblables pour toutes les fines produites, on peut présumer qu'elles sont constituées en grande partie de fibrilles. Cela indique que la consistance de raffinage influence différemment la longueur des fibres (Figure 5.2) mais amène peu de changement sur le développement de la quantité et de la qualité des fines.

Les fractions L1 et L2 contiennent des fibres longues et moyennes et elles se développent au cours du raffinage plus avantageusement que les fibres courtes. Nous

allons vérifier cette hypothèse à l'aide du microscope optique et/ou du microscope électronique à balayage dans la prochaine étape – les essais finaux.

5.2.3 Propriétés des papiers

5.2.3.1 Propriétés physiques

Dans l'ensemble, les propriétés physiques sont semblables pour les pâtes L1 et L2, et ce, pour n'importe quelle consistance de raffinage (Figure 5.10, Figure 5.11 et Figure 5.12).

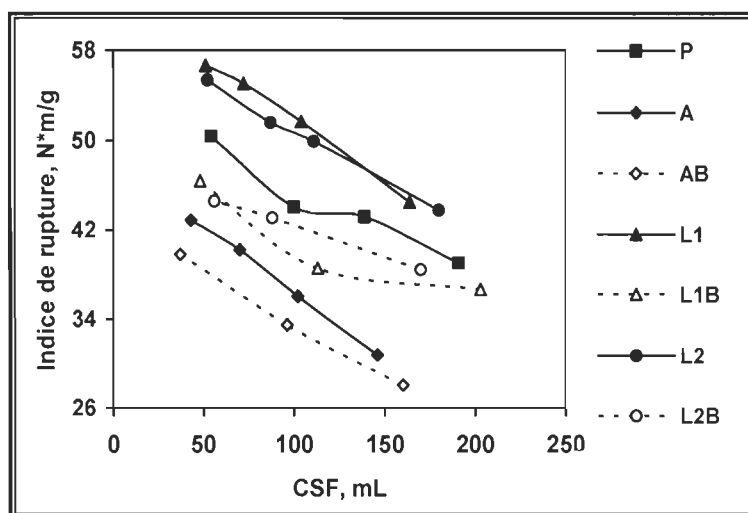


Figure 5.10 Indice de rupture en fonction du CSF

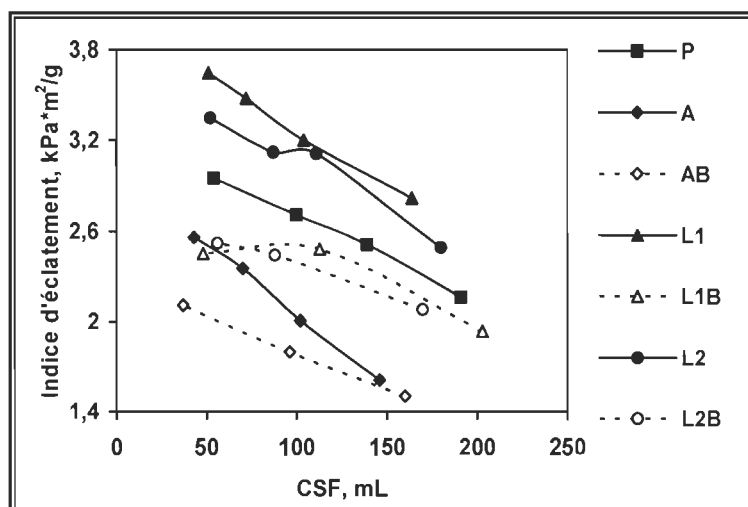


Figure 5.11 Indice d'éclatement en fonction du CSF

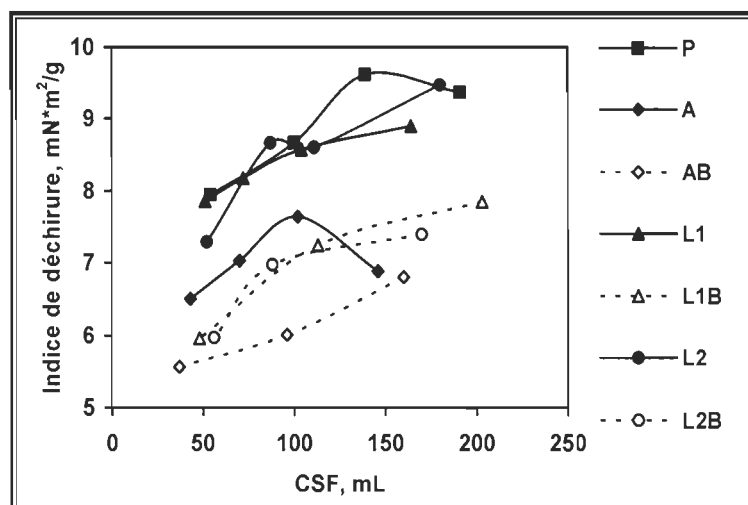


Figure 5.12 Indice de déchirure en fonction du CSF

Toutefois, à cause de sa faible longueur initiale, les propriétés physiques de la pâte A sont plus basses que celles des L1 et L2. Les propriétés papetières développées lors du raffinage à haute consistance sont toujours supérieures à celles du raffinage à basse consistance. La différence pour les pâtes L1 et L2 peut atteindre jusqu'à 30%. Au contraire, cette différence ne se manifeste pas pour la pâte A (excepté pour l'indice de déchirure); cette pâte est donc moins sensible à la variation de la consistance de raffinage pour ces propriétés. D'un autre côté, le raffinage à haute consistance des fractions demande moins d'énergie spécifique que le raffinage de la pâte P (sans fractionnement), ce qui signifie un avantage au niveau de la consommation d'énergie. D'autre part, le raffinage à basse consistance de la pâte A entraîne une économie d'énergie sans influencer trop les propriétés physiques.

5.2.3.2 Propriétés optiques

Le raffinage de la pâte A a résulté en une haute teneur en fines (Figure 5.9) et un haut coefficient de diffusion de la lumière, contrairement au raffinage des pâtes L1 et L2 (Figure 5.13). Cependant, pour un CSF donné, les pâtes L1 et L2 possèdent un coefficient de diffusion de la lumière similaire. On a déjà souligné que les fines dans A se composent de fines primaires, tandis que les fines dans L1 et L2 sont plutôt des fines secondaires qui sont principalement des fibrilles. À cause de leurs différences de nature

physique, les deux types de fines contribuent différemment au coefficient de diffusion de la lumière; les fines primaires ont un plus grand pouvoir de diffusion de la lumière par rapport aux fibrilles issues de la paroi secondaire.

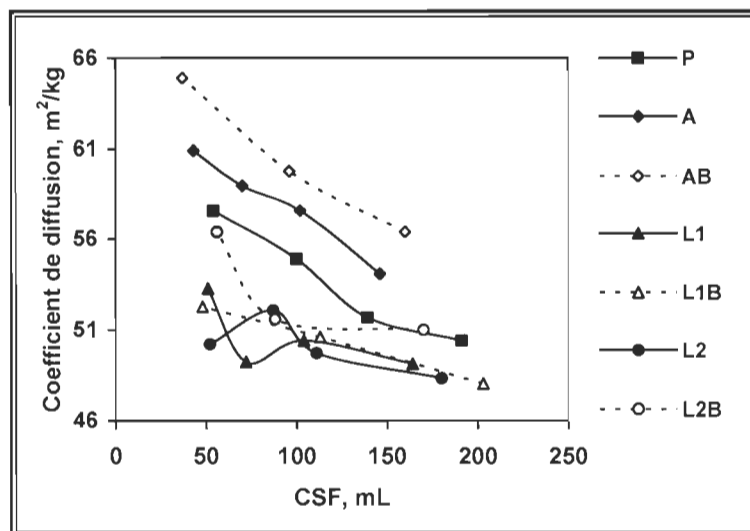


Figure 5.13 Coefficient de diffusion en fonction du CSF

5.2.4 Optimisation du raffinage

Dans le cas du raffinage à haute consistance, les valeurs absolues du taux de changement des propriétés sont moindres que celles du raffinage à basse consistance (Tableau 5.2).

Tableau 5.2 Taux de changement des propriétés

	Raffinage à haute consistance				Raffinage à basse consistance			
	$\Delta LF / \Delta \acute{E}$	$\Delta IR / \Delta \acute{E}$	$\Delta I\acute{E} / \Delta \acute{E}$	$\Delta ID / \Delta \acute{E}$	$\Delta LF / \Delta \acute{E}$	$\Delta IR / \Delta \acute{E}$	$\Delta I\acute{E} / \Delta \acute{E}$	$\Delta ID / \Delta \acute{E}$
L1	-0,04	5,37	0,37	-0,45	-0,51	12,10	0,63	-2,33
L2	-0,07	5,02	0,37	-0,94	-0,59	10,16	0,72	-2,33
A	-0,03	3,81	0,30	-0,12	-0,53	18,00	0,94	-1,91

$\Delta LF / \Delta \acute{E}$: Taux de changement de la longueur des fibres par unité d'énergie spécifique

$\Delta IR / \Delta \acute{E}$: Taux de changement de l'indice de rupture par unité d'énergie spécifique

$\Delta I\acute{E} / \Delta \acute{E}$: Taux de changement de l'indice d'éclatement par unité d'énergie spécifique

$\Delta ID / \Delta \acute{E}$: Taux de changement de l'indice de déchirure par unité d'énergie spécifique

On suppose que si une même quantité d'énergie était appliquée aux fractions, il semble que le raffinage à basse consistance amènerait de meilleures propriétés physiques. Il est

donc plus économique d'utiliser un raffinage à basse consistance mais il ne sera pas toujours possible d'appliquer l'énergie requise à basse consistance. Par contre, la longueur des fibres et l'indice de déchirure subissent moins de réduction lorsque le raffinage est réalisé à haute consistance. Il serait ainsi plus avantageux de choisir le raffinage à haute consistance pour maintenir ces deux propriétés.

Toutefois, on observe une grande économie d'énergie spécifique lorsque le raffinage est effectué à basse consistance plutôt qu'à haute consistance; la différence pouvant atteindre jusqu'à environ 3 fois en magnitude (Figure 5.1). Évidemment, le raffinage à basse consistance serait plus économique en comparaison avec celui à haute consistance. Cependant, le transfert d'énergie aux fractions pourrait être difficile lorsque le raffinage se réalise à basse consistance, ce qui limite le développement des propriétés physiques. Par conséquent, le raffinage à basse consistance utilisé seul ne serait pas un bon choix dans les conditions de l'étude. Bien que les propriétés physiques de A soient plus basses que celles de L1 et L2 quand le raffinage est fait à haute consistance (Figure 5.10 et Figure 5.11), ses propriétés sont similaires à celles obtenues à basse consistance. Il serait donc probablement avantageux de raffiner la pâte A à basse consistance.

Sur la base des essais préliminaires, on peut résumer que :

- Le raffinage séparé des fractions obtenues du fractionnement montre qu'il existe peu de différence entre les pâtes L1 et L2 au cours du raffinage. Toutefois, le comportement de A (fibres courtes) est toujours différent de celui des deux autres fractions soit L1 et L2 qui contiennent des fibres longues.
- Il indique que la séparation des fibres d'une pâte produite lors du premier stade selon leur morphologie est possible. Cependant, dû à la mauvaise dimension d'ouverture des paniers, l'efficacité de fractionnement au cours des essais préliminaires n'a pas atteint les résultats désirés, produisant des fractions L1 et L2 similaires en terme de longueur des fibres.
- Le raffinage des fractions à haute consistance ne demande pas plus d'énergie spécifique que le raffinage sans fractionnement. Le raffinage à basse consistance

consomme moins d'énergie, mais il requiert un sacrifice au niveau de la longueur des fibres. Ce procédé de raffinage semble offrir la possibilité de diminuer la consommation d'énergie spécifique.

- Du point de vue des propriétés physiques, le raffinage à basse consistance produit des papiers plus faibles que le raffinage à haute consistance.

L'optimisation du raffinage après fractionnement devra donc être un compromis entre l'énergie à appliquer et les propriétés physiques minimales à obtenir. Il faut aussi garder en mémoire que les essais préliminaires ont été faits sur des fractions tout de même assez semblables, ce qui pourrait aussi avoir une forte influence si l'on parvient à obtenir des fractions plus différenciées.

Chapitre 6 - Résultats et discussions – essais finaux

6.1 Matière première

Dans les essais finaux, la pâte utilisée comme base pour notre recherche a également été prise à l'usine Papier Masson et se compose principalement d'un mélange d'épinette noire, d'épinette blanche et de sapin. Le Tableau 6.1 présente les propriétés de la pâte.

Tableau 6.1 Caractéristiques de la pâte initiale pour les essais finaux

Propriétés de la pâte entière	Indice d'égouttage, mL		625			
	Taux de rejets, %		8,74			
	Longueur des fibres, mm		1,77			
Propriétés des fractions						
	R14	R28	R48	R100	R200	P200
Bauer McNett, %	17,3	31,2	17,9	8,6	4,7	20,3
Masse linéique, mg/m	--	0,318	0,259	0,198	--	--
Épaisseur des parois cellulaires, μm	--	3,85	3,63	3,26	--	--
Longueur des fibres, mm	--	2,39	1,45	0,77	--	--



Figure 6.1 Vue générale de la pâte initiale (P), X50

La Figure 6.1 montre qu'après le premier stade de raffinage les fibres sont bien séparées et que la pâte contient des fibres longues, des fibres courtes et des fines. Ainsi, il devrait être possible de séparer les fibres en différentes fractions selon leur morphologie, telles

que la distribution en longueur (fibres longues et fibres courtes) ou la masse linéique des fibres (fibres plus grossières et fibres moins grossières).

Dans les recherches précédentes [35, 124], les bûchettes non fibrillées et les agrégats se trouvent dans les rejets de pâte raffinée. Toutefois, les rejets dans la pâte obtenue d'un raffinage de premier stade n'englobe que les bûchettes non fibrillées (Figure 6.2); les agrégats fibreux ne sont pas observés. Il est généralement accepté que les agrégats se composent de fibres séparées agrégées au moyen de fibrilles. L'absence d'agrégats montre que le raffinage du premier stade agit essentiellement sur la séparation des fibres. De plus, des fibres du BP et du BE se retrouvent dans les rejets. Les deux sortes de fibres coexistent ensemble ou individuellement.

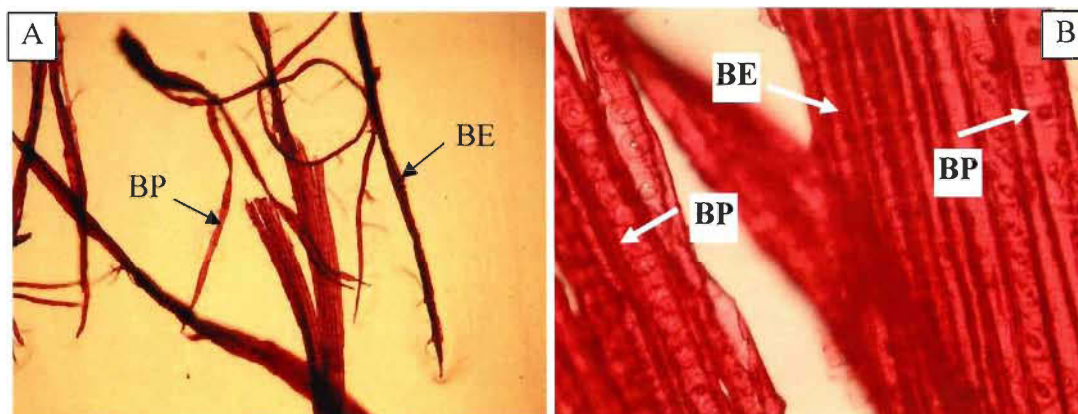


Figure 6.2 Vue générale du rejet de P (A: X50, B: X400)

La complexité et les aléas du raffinage entraînent l'absence d'un processus unique et absolu. Bien que la première étape de raffinage soit principalement de séparer les fibres, on remarque également la présence de fibrillation lorsque l'on examine les fines (Figure 6.3). Par conséquent, au cours du raffinage primaire la séparation et le développement des fibres ne sont pas isolés mais se déroulent plutôt concomitamment.



Figure 6.3 Vue générale des fines de P, X400

Au fil du raffinage, ces deux effets se chevauchent mais à des niveaux différents. La séparation des fibres est prédominante en début de raffinage et son effet diminue peu à peu tandis que le développement débute lentement puis s'accroît.

6.2 Fractionnement

Au cours des essais finaux, deux types de paniers ont été employés pour réaliser le fractionnement, soient les paniers à trous lisses pour les premiers deux stades et les paniers à fentes pour les deux derniers stades (Figure 4.3).

6.2.1 Fractionnement avec les paniers à trous lisses

Après le fractionnement avec deux premiers tamis à trous de 0,25mm, la distribution en longueur des fibres (Figure 6.4) montre qu'il n'y a presque pas de fibres longues dans la fraction A1, pendant que la majorité des fibres courtes et des fines s'y retrouve. Les faibles ouvertures des paniers à trous lisses peuvent fractionner les fibres selon leur longueur en une fraction de fibres longues et une fraction de fibres courtes.

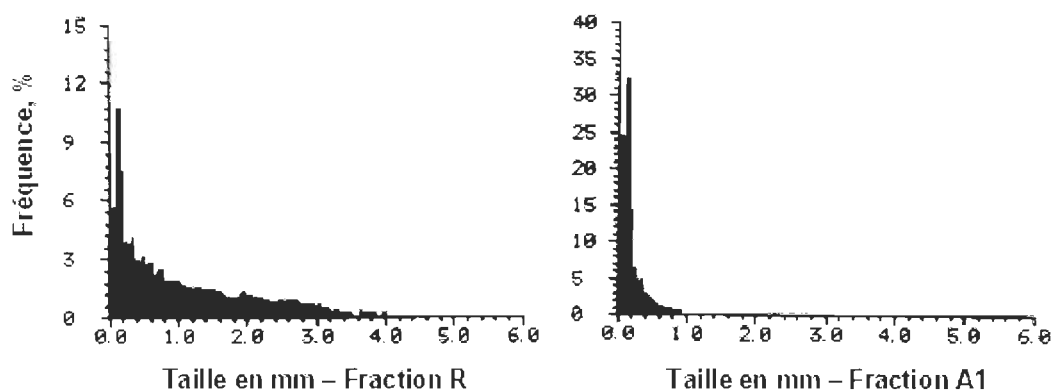


Figure 6.4 Distribution en longueur pour les fractions R et A1

L'analyse des fractions du Bauer McNett (Tableau 6.2) montre également que, grâce aux faibles ouvertures des paniers, la pâte est bien séparée entre la fraction R48 (fibres retenues sur le tamis de 48 mailles) et P48 (fibres traversant le tamis de 48 mailles).

Tableau 6.2 Caractéristiques de la fraction R et A1

Propriétés des fractions après fractionnement							
Fraction R	Indice d'égouttage, mL	705					
	Taux de rejets, %	10,07					
	Longueur des fibres, mm	1,92					
Fraction A1	Indice d'égouttage, mL	15					
	Taux de rejets, %	--					
	Longueur des fibres, mm	0,48					
Propriétés des fractions Bauer McNett							
		R14	R28	R48	R100	R200	P200
Fraction R	Bauer McNett, %	25,6	36,9	19,5	8,9	3,2	5,9
	Masse linéique, mg/m	--	0,301	0,233	0,182	--	--
	Épaisseur des parois cellulaires, μm	--	3,85	3,83	3,48	--	--
	Longueur des fibres, mm	--	2,37	1,45	0,77	--	--
Fraction A1	Bauer McNett, %	0,5	1,7	2,3	6,4	11,2	77,9

L'observation avec un microscope optique (Figure 6.5) montre que la fraction R est plus propre que P et qu'elle a peu de fines. Cet effet de purification rend la distribution de longueur des fibres plus uniforme. Les fines se rassemblent essentiellement dans A1 (Figure 6.6) où il n'y a pas beaucoup de fibres longues, soit 0,96% de celles de P.

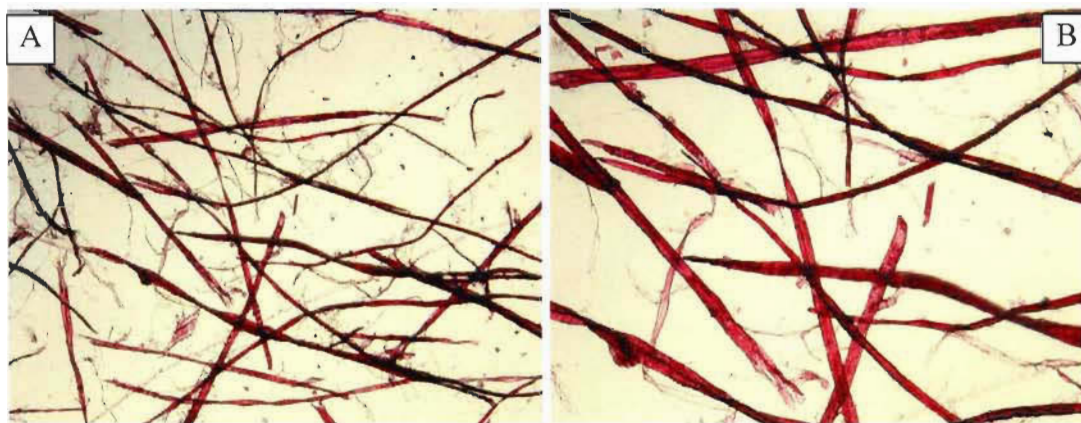


Figure 6.5. Microphotographie de la fraction R (A : X50, B : X100)

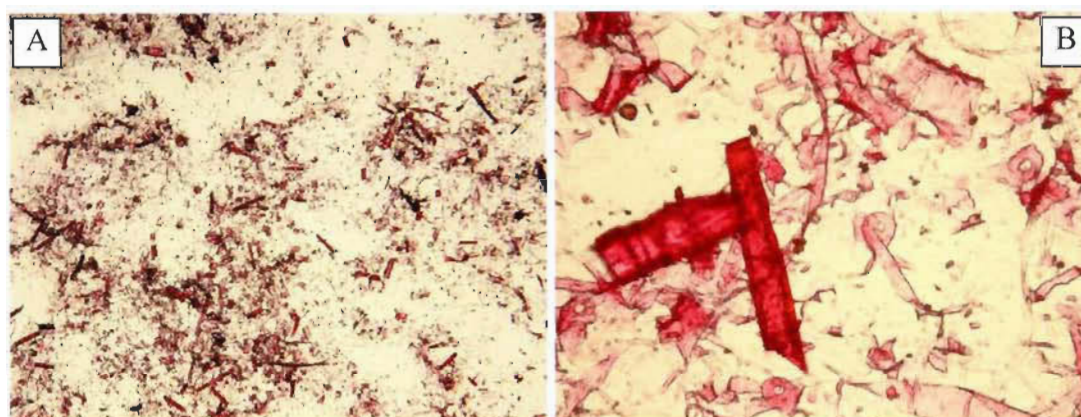


Figure 6.6 Microphotographie de la fraction A1 (A : X50, B : X400)

6.2.2 Fractionnement avec les paniers à fentes

La fraction longue R est ensuite fractionnée en fractions Q et A par les deux derniers paniers à fentes. Certaines de leurs caractéristiques sont présentées au Tableau 6.3. On observe qu'il y a encore des fines (P200) dans la fraction, soit 13,2% de celles de P pour la fraction Q et 10,0% pour la fraction A, et que par conséquent il pourrait être possible d'augmenter encore l'efficacité du fractionnement. Dans ce but, la clé du problème est d'améliorer l'efficacité de fractionnement des deux premiers tamis à trous puisque c'est à ce niveau que se produit l'effet principal de séparation des fines. Au niveau des tamis tertiaires et quaternaires, on obtient une distribution statistique des fibres séparées, ce qui ne permet pas l'atteinte d'une grande efficacité de séparation. Les fibres plus longues, plus rugueuses ou plus grossières sont retenues comme rejets dans la fraction Q (Tableau

6.3, Figure 6.7). Les deux paniers à fentes fractionnent plutôt en une fraction longue plus grossière (Q) et une fraction longue moins grossière (A).

Tableau 6.3 Caractéristiques de la fraction Q et A

Q	Indice d'égouttage, mL	718					
	Taux de rejets, %	11,47					
	Longueur des fibres, mm	2,03					
		<i>R14</i>	<i>R28</i>	<i>R48</i>	<i>R100</i>	<i>R200</i>	<i>P200</i>
	Bauer McNett, %	31,2	36,6	17,9	7,4	2,6	4,3
	Masse linéique, mg/m	--	0,289	0,238	0,194	--	--
	Épaisseur des parois cellulaires, μm	--	3,83	3,62	3,27	--	--
	Longueur des fibres, mm	--	2,38	1,48	0,79	--	--
A	Indice d'égouttage, mL	533					
	Taux de rejets, %	0,93					
	Longueur des fibres, mm	1,47					
		<i>R14</i>	<i>R28</i>	<i>R48</i>	<i>R100</i>	<i>R200</i>	<i>P200</i>
	Bauer McNett, %	6,5	32,3	25,5	15,5	7,6	12,6
	Masse linéique, mg/m	--	0,272	0,231	0,186	--	--
	Épaisseur des parois cellulaires, μm	--	3,57	3,49	3,17	--	--
	Longueur des fibres, mm	--	2,28	1,36	0,72	--	--

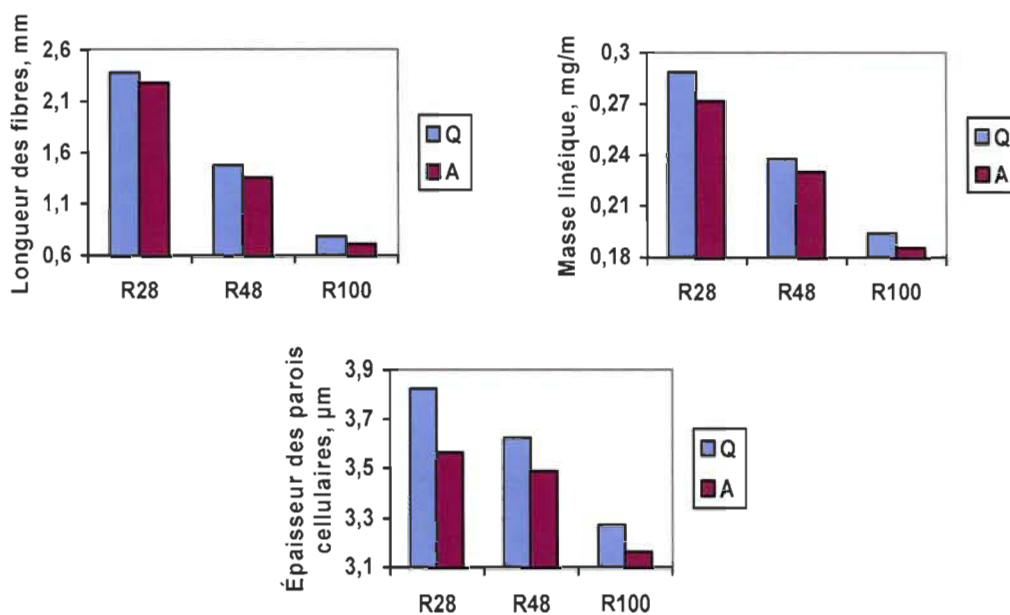


Figure 6.7 Caractéristiques des fractions Bauer McNett de Q et A

La séparation a été analysée statistiquement à partir des résultats de l'analyseur d'épaisseur des parois cellulaires (Morfi fiber wall thickness analyser), ainsi que de la longueur des fibres et de la masse linéique (Tableau 6.4). À noter que les proportions (en nombre) des fibres du BP et du BE, les épaisseurs des parois et la largeur des fibres pour chaque fraction ont été mesurées à partir de micrographies obtenues avec le Morfi. Ces résultats sont ensuite utilisés pour calculer les pourcentages en poids de fibres du BP et du BE.

Tableau 6.4 Bilan massique des fibres du BP/BE

%	Pourcentage en poids de fibres du BP			Pourcentage en poids de fibres du BE		
	P	Q	A	P	Q	A
R28	57,4	49,1	58,9	42,6	50,9	41,1
R48	66,7	63,2	75,9	33,3	36,8	24,1
R100	74,8	66,5	78,4	25,2	33,5	21,6

La fraction R14 se compose de fibres individuelles (bien séparées) et de bûchettes (fibres non séparées). À cause de leur structure physique particulière, l'analyse statistique des fibres du BP/BE dans les bûchettes est très complexe et difficile. D'autre part, les éléments des fractions R200 et P200 sont beaucoup plus petits et fragmentés (Figure 6.8, Figure 6.10) et, par conséquent, l'identification des fibres du BP et du BE est également impossible. Cependant, une hypothèse peut nous indiquer la tendance de distribution approximative des fibres du BP et du BE dans les fractions Q et A, mais cette hypothèse rend également le compte plus imprécis.

Pour les fractions R28, R48 et R100, évaluées sur la base des images du Morfi, le pourcentage en fraction Bauer McNett et le pourcentage en poids de fibres du BP et du BE sont employés pour calculer statistiquement le poids des fibres du BP et celui du BE dans chaque fraction Bauer McNett. Toutefois, pour les fractions R14, R200 et P200, nous pouvons présumer que ces fractions sont constituées uniquement des fibres du BP (Tableau 6.5) ou du BE (Tableau 6.6). Les fibres de bois se composant de fibres du BP et de celles de BE, la distribution des fibres de BP et de BE sera certainement entre les deux valeurs hypothétiques.

Tableau 6.5 Distribution hypothétique des fibres du BP et du BE (1)

10g	P		Q		A	
	BP	BE	BP	BE	BP	BE
R14, g	1,73	0	3,12	0	0,65	0
R28, g	1,78	1,34	1,80	1,86	1,90	1,33
R48, g	1,19	0,60	1,13	0,66	1,94	0,61
R100, g	0,65	0,21	0,49	0,25	1,22	0,33
R200, g	0,47	0	0,26	0	0,76	0
P200, g	2,03	0	0,43	0	1,26	0
Total, g	7,85	2,15	7,23	2,77	7,73	2,27
BE/(BE+BP), %	21,50		27,70		22,70	

Tableau 6.6 Distribution hypothétique des fibres du BP et du BE (2)

10g	P		Q		A	
	BP	BE	BP	BE	BP	BE
R14, g	0	1,73	0	3,12	0	0,65
R28, g	1,78	1,34	1,80	1,86	1,90	1,33
R48, g	1,19	0,60	1,13	0,66	1,94	0,61
R100, g	0,65	0,21	0,49	0,25	1,22	0,33
R200, g	0	0,47	0	0,26	0	0,76
P200, g	0	2,03	0	0,43	0	1,26
Total, g	3,62	6,38	3,42	6,58	5,06	4,94
BE/(BE+BP), %	63,8		65,80		49,40	

Selon cette hypothèse, nous pouvons conclure que le fractionnement concentre les fibres du BE dans la fraction Q et réduit leur contenu dans les acceptés de la fraction A. Mais en raison du manque de données précises, nous ne pouvons pas les relier totalement avec le concept du BP et du BE. Par conséquent, nous définissons Q comme la fraction de fibres longues plus grossières tandis que A la fraction de fibres longues moins grossières, ceci est par rapport à la pâte initiale P.

Le Tableau 6.3 démontre, qu'au niveau morphologique, les différences entre Q et A ne sont pas extrêmement différentes. Bien que les fractions ne sont pas parfaitement séparées en terme de BP et BE, elles sont tout de même suffisamment différentes quant aux fractions Bauer McNett et il serait intéressant d'évaluer le potentiel de ce type de fractionnement accompagné d'un raffinage sélectif. Nos discussions se basent donc sur

les fractions longues plus et moins grossières. Les renseignements détaillés du raffinage seront discutés à la section suivante.

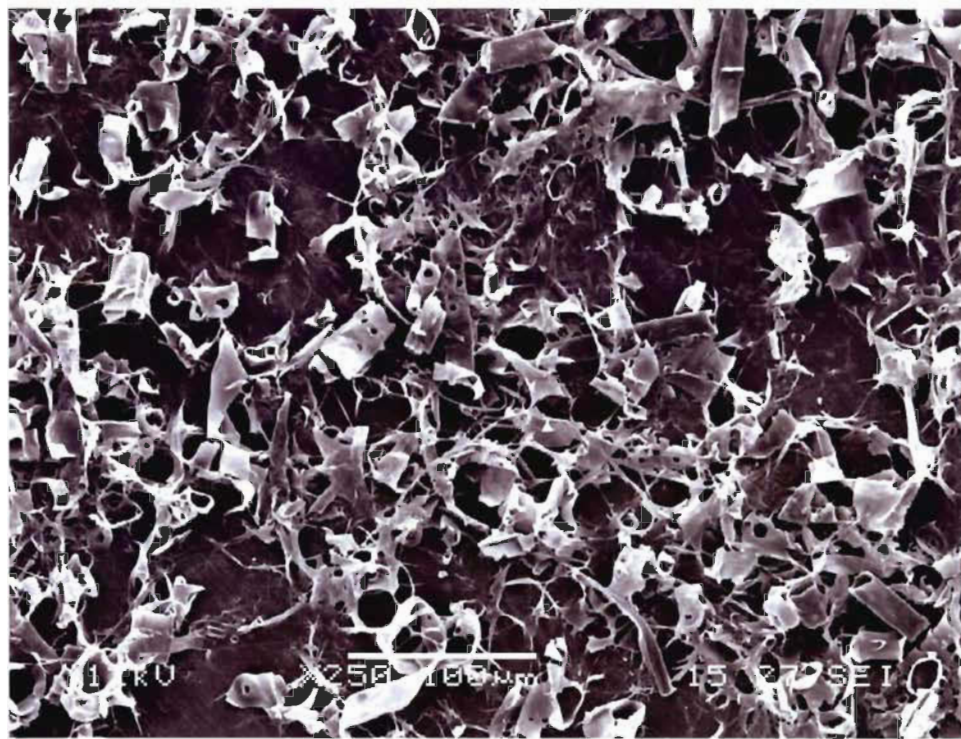


Figure 6.8 Vue générale de la fraction P200 de A1

L'analyse Bauer McNett de la pâte A1 (Tableau 6.2) montre qu'elle se compose principalement des fractions R100, R200 et P200. Le P200 (fines) se compose de cellules de parenchymes, des couches externes des parois cellulaires et très peu de fibrilles (Figure 6.8). Au raffinage, les fines primaires ne se fibrillent pas et, par conséquent, n'ont pas de potentiel significatif de contribution à l'augmentation de leur surface spécifique par rapport aux fines secondaires [44]. En effet, il n'y a pas d'avantage à les raffiner car on risque de dépenser l'énergie juste pour briser les particules fines, ce qui réduit inutilement le coefficient de diffusion de la lumière.

L'image au MEB des coupes transversales indique qu'il y a eu beaucoup de fibres fracturées dans la paroi pour les fractions R100 et R200 (Figure 6.9, Figure 6.10). On peut constater que ces fractions n'ont probablement pas besoin d'être raffinées davantage. En considération de son bas CSF, de sa faible longueur des fibres et de sa

composition particulière, A1 est employée, sans raffinage, directement dans les mélanges finaux.

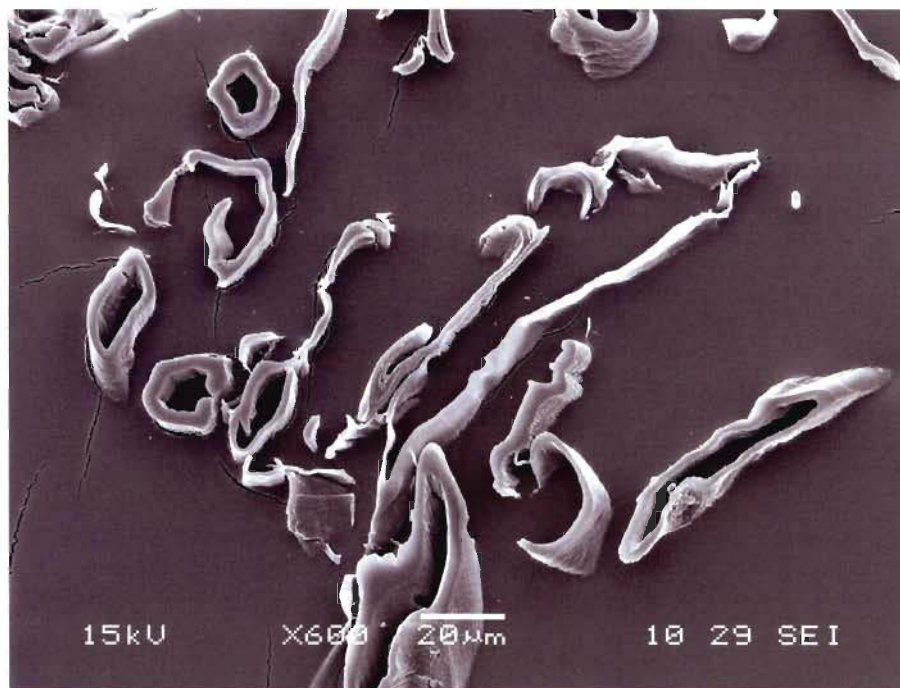


Figure 6.9 Vue transversale de la fraction R100 de A1

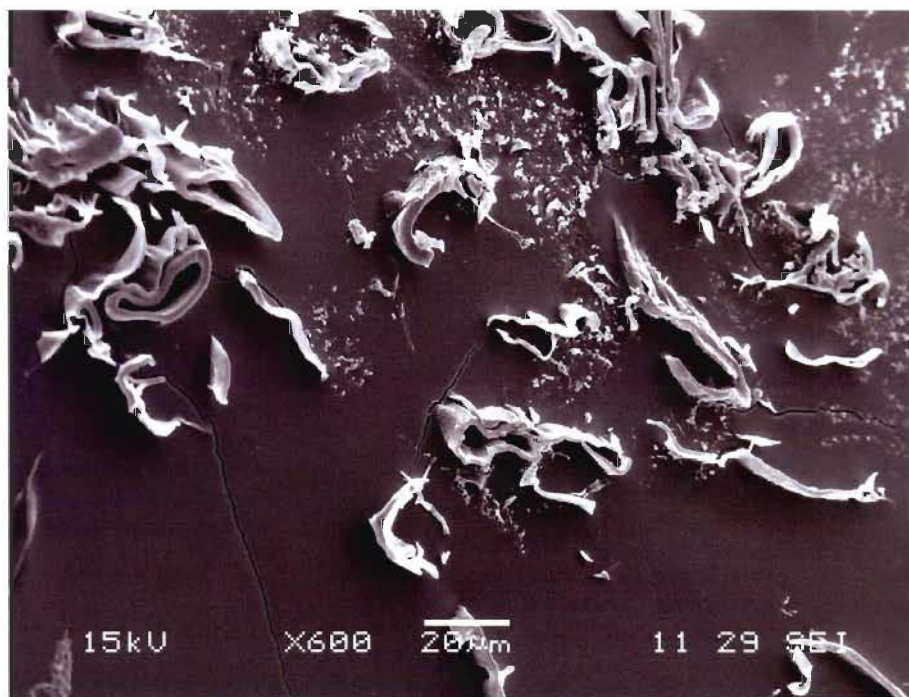


Figure 6.10 Vue transversale de la fraction R200 de A1

Pour fin de comparaison, nous avons aussi raffiné la pâte entière initiale P. Pour vérifier l'efficacité du fractionnement des fibres selon leur grossièreté, suivi d'un raffinage séparé, la fraction longue R a été raffinée. Les résultats sont comparés relativement à ceux des fractions Q et A.

6.3 Raffinage sélectif

6.3.1 Consommation d'énergie spécifique (CES)

À un CSF donné, les fractions longues (R, Q et A) consomment toujours moins d'énergie spécifique lorsqu'elles sont raffinées à basse consistance, en comparaison avec le raffinage à haute consistance (Figure 6.11). Ceci confirme nos observations précédentes. Cependant, une basse consommation d'énergie risque d'être insuffisante pour développer la capacité de liaison.

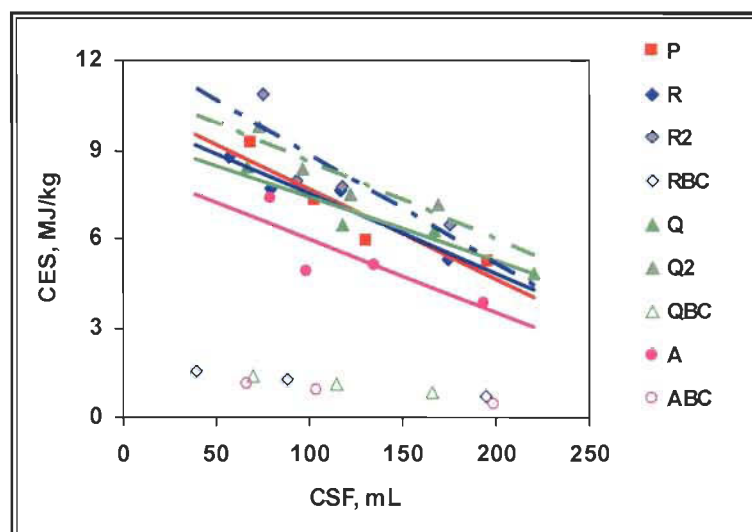


Figure 6.11 Énergie spécifique (CES) en fonction du CSF

En effet, à basse consistance, les fibres sont éparpillées dans l'eau et traversent rapidement le raffineur suivant le courant du fluide. Une certaine quantité d'énergie mécanique se transforme en énergie thermique et peu d'énergie est transférée aux fibres. La température de la pâte à la sortie du raffineur est plus élevée par rapport à la pâte raffinée à haute consistance et les fibres se développent moins. Ce phénomène sera

discuté dans la section suivante. De façon générale, le raffinage à basse consistance consomme de 3 à 5 fois moins d'énergie qu'à haute consistance. Le fractionnement des pâtes accroît davantage ce phénomène et rend l'utilisation de l'énergie spécifique plus efficace.

À haute consistance de raffinage, la pâte A demande moins d'énergie spécifique par rapport à la pâte Q. Ceci pourrait être expliqué par le fait que les fibres de la pâte Q ont des parois plus épaisses et une plus haute teneur en rejets par rapport à la pâte A. Par conséquent, elle a besoin de plus d'énergie afin de réduire son CSF à un niveau donné.

Par rapport au raffinage en un stade, l'entrefer entre les plaques du raffinage en deux stades est plus large et réduit de plus les contacts fibre-à-métal. Le raffinage en deux stades est donc plus doux, moins intensif, qu'en un seul stade. La demande d'énergie des fractions longues augmente avec le nombre de stades de raffinage. On note également que la consommation d'énergie est similaire pour R et Q, ceci est dû au fait que ces deux fractions ont des fibres longues et des rejets. Si on parle simplement de la consommation d'énergie spécifique, le fractionnement pourrait être arrêté au stade où on peut acquérir la fraction R.

6.3.2 Propriétés des fibres

6.3.2.1 Taux de rejets

La teneur en rejets diminue suivant la diminution du CSF (Figure 6.12). On note qu'il y a peu de différence en rejets entre R et Q. La fraction A a un taux de rejets plus bas, car elle a une basse teneur initiale en rejets. D'après Patrick [139] le taux de rejets est réduit presque linéairement avec l'augmentation de la CES. Cependant, dans notre étude, le raffinage à basse consistance a peu d'effet sur la teneur en rejets. D'une part, le raffinage à basse consistance consomme toujours moins d'énergie. D'autre part, il est possible que peu d'énergie soit transférée aux fibres à basse consistance, ayant ainsi tendance à maintenir une teneur en rejets plus haute. Ainsi, l'augmentation de l'intensité du raffinage ne semble pas avoir contribué à réduire le taux de rejets.

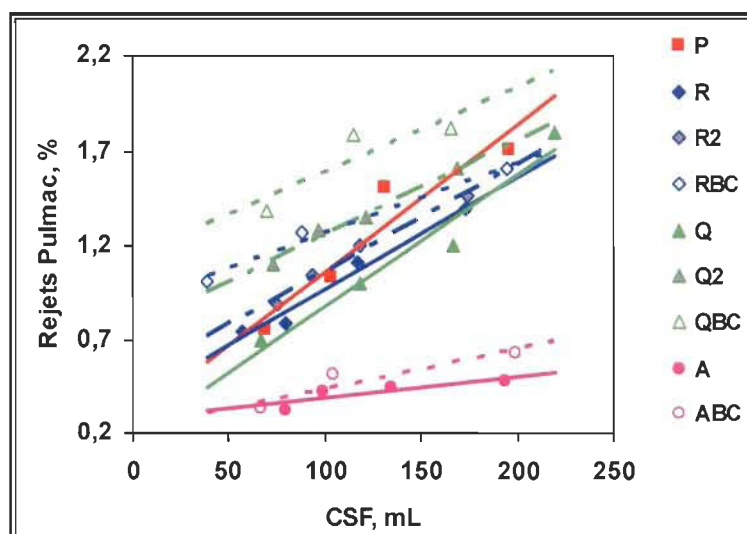


Figure 6.12 Rejets Pulmac en fonction du CSF

On note qu'après le deuxième stade de raffinage, les rejets se composent de mini bûchettes et d'agrégats (Figure 6.13, Figure 6.14). Les fibres bien séparées et les bûchettes co-existent dans la pâte. Lors du raffinage, l'énergie spécifique est consommée par ce mélange. C'est-à-dire que l'énergie est transférée aux fibres déjà bien séparées (fibres individuelles) ainsi qu'aux bûchettes. Nous avons déjà montré que les rejets après le premier stade de raffinage (pâte initiale P) sont constitués principalement de bûchettes. Par conséquent, l'énergie est utilisée pour développer les propriétés des fibres bien séparées ainsi que pour détacher les bûchettes produisant les mini bûchettes et les agrégats. L'énergie consommée pendant le deuxième stade de raffinage n'est donc pas employée totalement à développer les propriétés des fibres bien séparées. Puisque les fractions ont des différences en terme de fibres bien séparées et de rejets, le raffinage des fractions montre certains écarts de CES (Figure 6.11). La pâte ayant une haute teneur en rejets consomme plus d'énergie que celle ayant une basse teneur en rejets. Un raffinage sélectif ayant pour but de minimiser la consommation d'énergie selon la morphologie des fibres (la longueur ou la masse linéique des fibres) ou la composition des fractions (teneur en rejets, etc.) semble possible et devrait présenter des avantages.

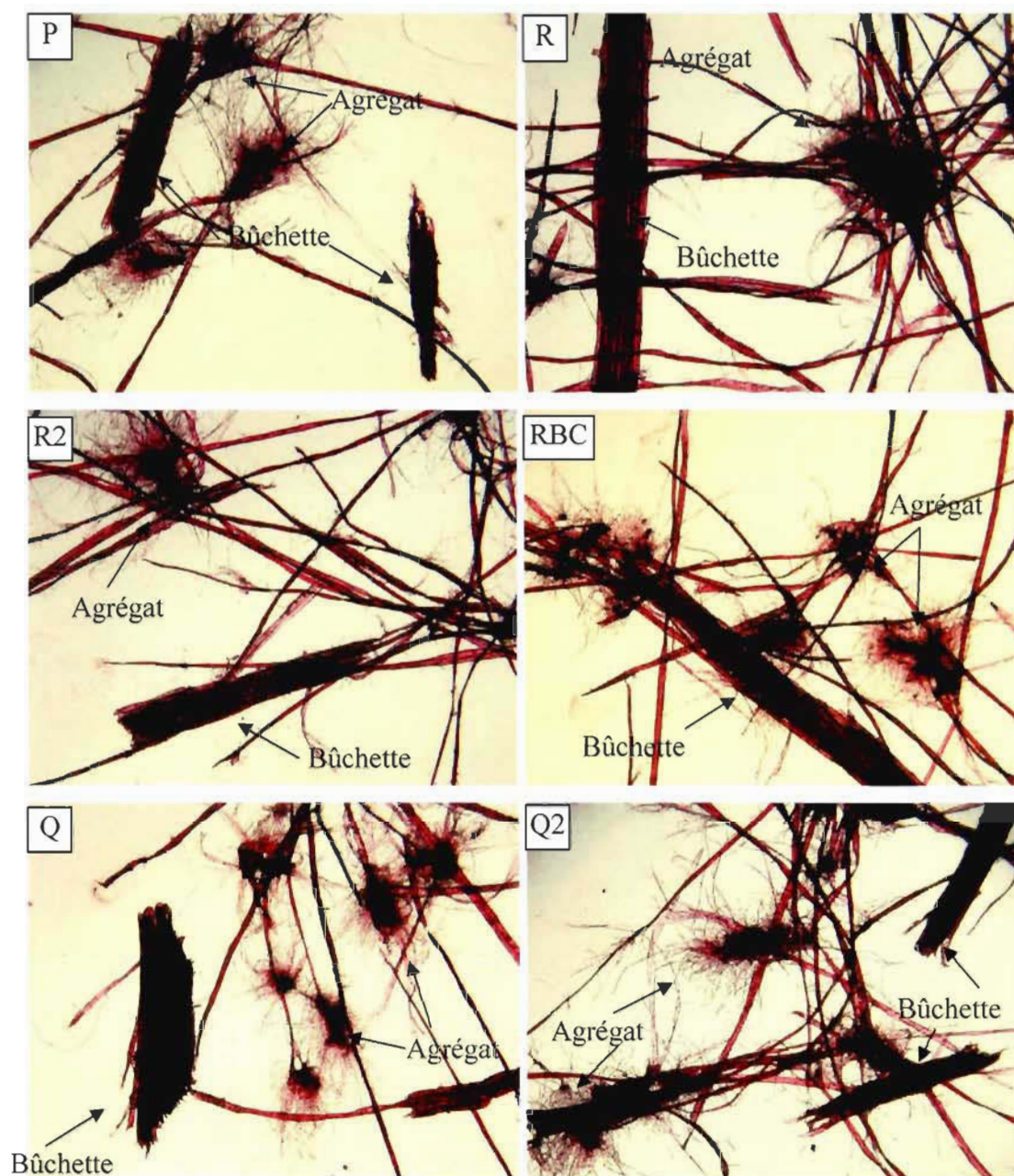


Figure 6.13 Microphotographie des rejets des fractions raffinées (1), X50

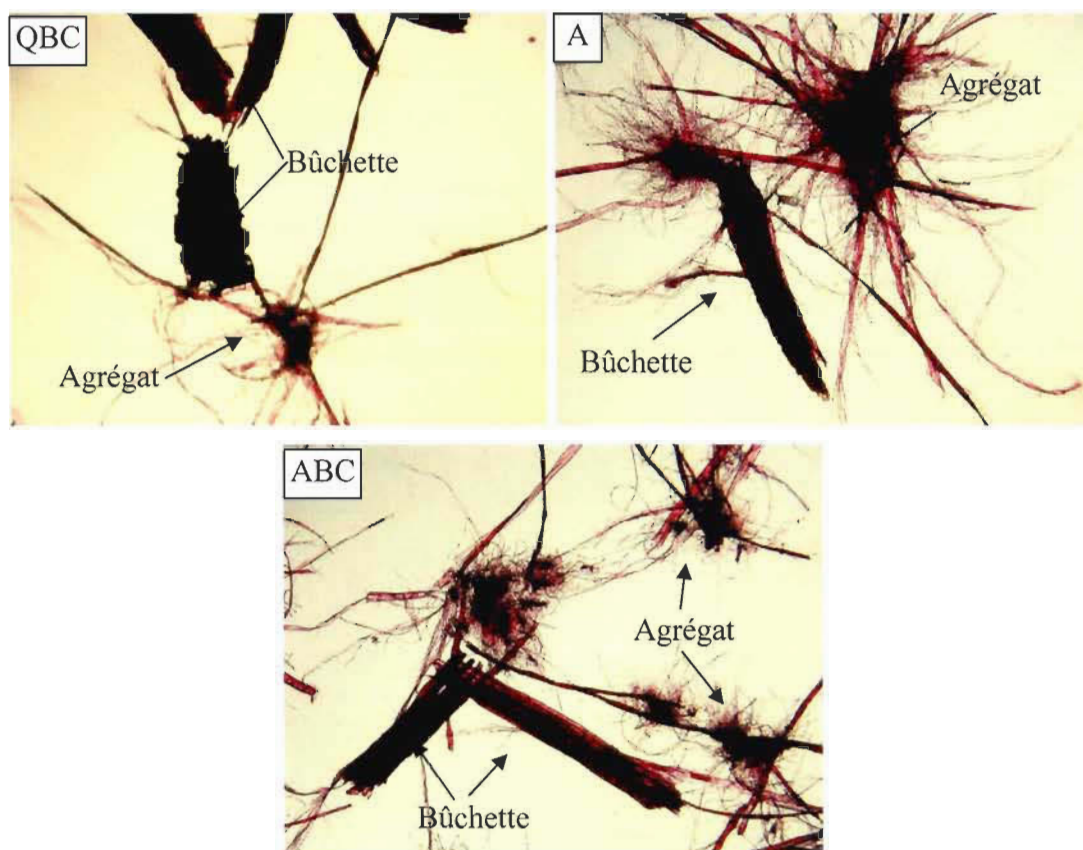


Figure 6.14 Microphotographie des rejets des fractions raffinées (2), X50

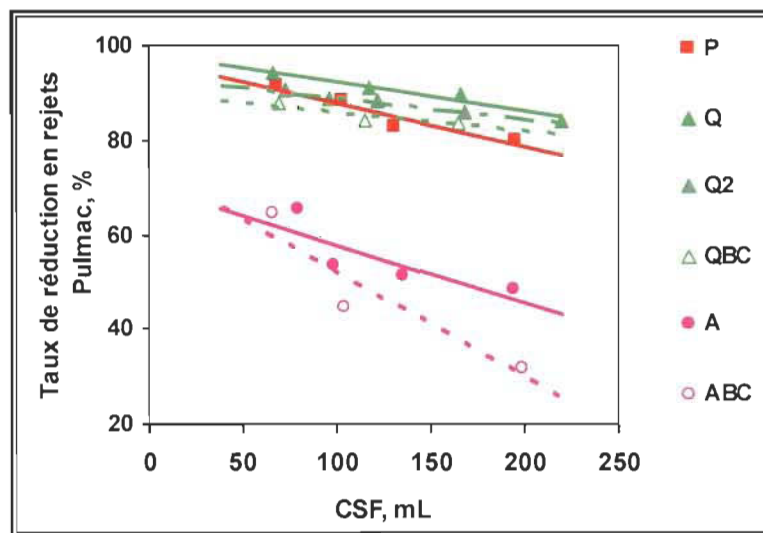


Figure 6.15 Taux de réduction en rejets Pulmac en fonction du CSF

Par rapport aux fibres de la fraction moins grossière (A), les fibres de la fraction plus grossière (Q) ont des parois plus épaisses. Reme et al [70] ont indiqué que les fibres ayant des parois plus épaisses produisent des pâtes avec une faible teneur en rejets. Dans notre recherche, la teneur en rejets des fractions Q et A est tout à fait différente après le fractionnement et, la teneur absolue en rejets ne reflète pas la conclusion de Reme et al. Toutefois la réduction en rejets de la fraction Q est plus évidente que celle de la fraction A (Figure 6.15). Cela démontre qu'au cours du raffinage les fibres ayant des parois plus épaisses profitent d'avantage d'une réduction des rejets, ce qui est en accord avec la conclusion de Reme.

6.3.2.2 Longueur des fibres

La longueur des fibres diminue en fonction de la réduction du CSF (Figure 6.16). En comparaison avec le raffinage à basse consistance, le raffinage à haute consistance produit toujours des fibres plus longues. Comme on a déjà constaté précédemment, les fibres sont coupées plus facilement lors du raffinage à basse consistance car l'entrefer des plaques de raffineur est faible. Alors, à basse consistance il y a plus de contacts fibre-à-métal, ce qui aggrave le raccourcissement des fibres et profite moins au développement de la surface des fibres. La surface des fibres raffinées à haute consistance est toujours plus fibrillée en comparaison avec celles raffinées à basse consistance (Figure 6.17 à Figure 6.22) et apporte une meilleure capacité de liaisons fibre-à-fibre. On peut conclure que le raffinage à haute consistance est avantageux au niveau du développement des fibres et de la conservation de la longueur des fibres. Cependant, ce procédé demande plus d'énergie en comparaison avec le procédé à basse consistance.

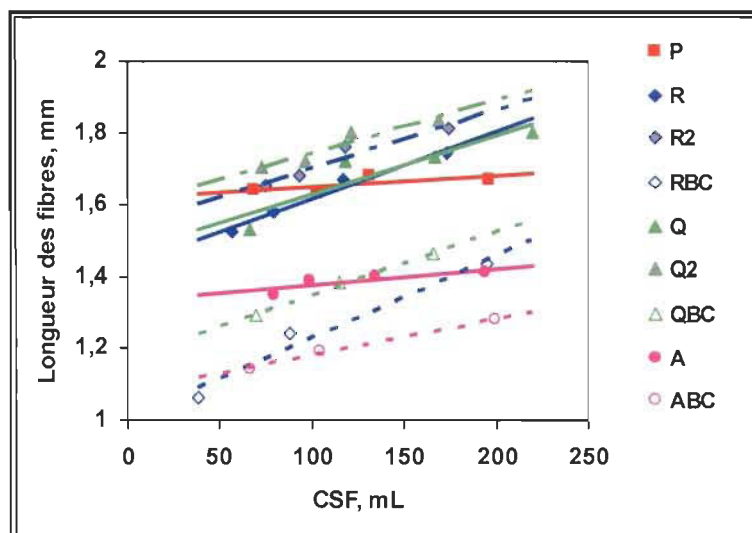


Figure 6.16 Longueur des fibres en fonction du CSF

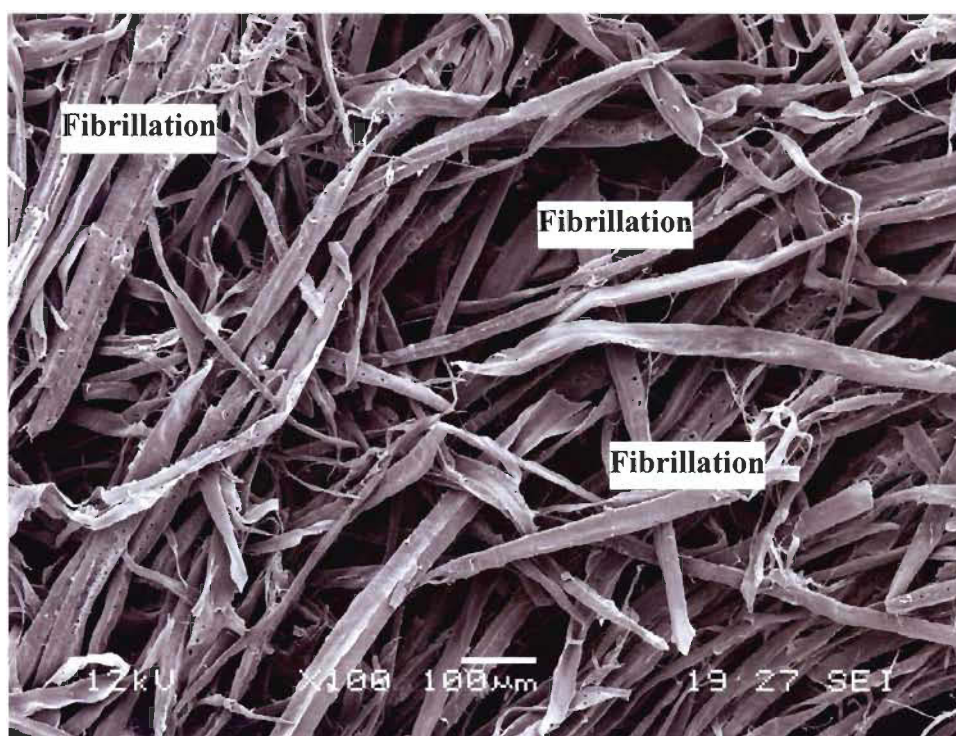


Figure 6.17 Fraction R48 de la pâte R2, CSF de la pâte =100mL

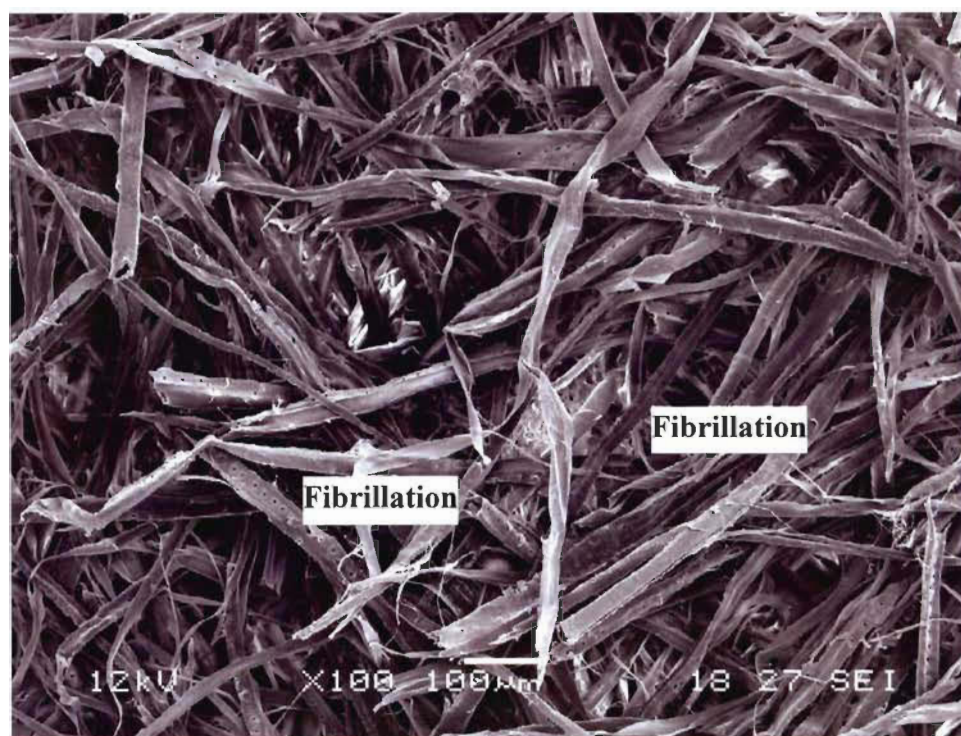


Figure 6.18 Fraction R48 de la pâte RBC, CSF de la pâte =100mL

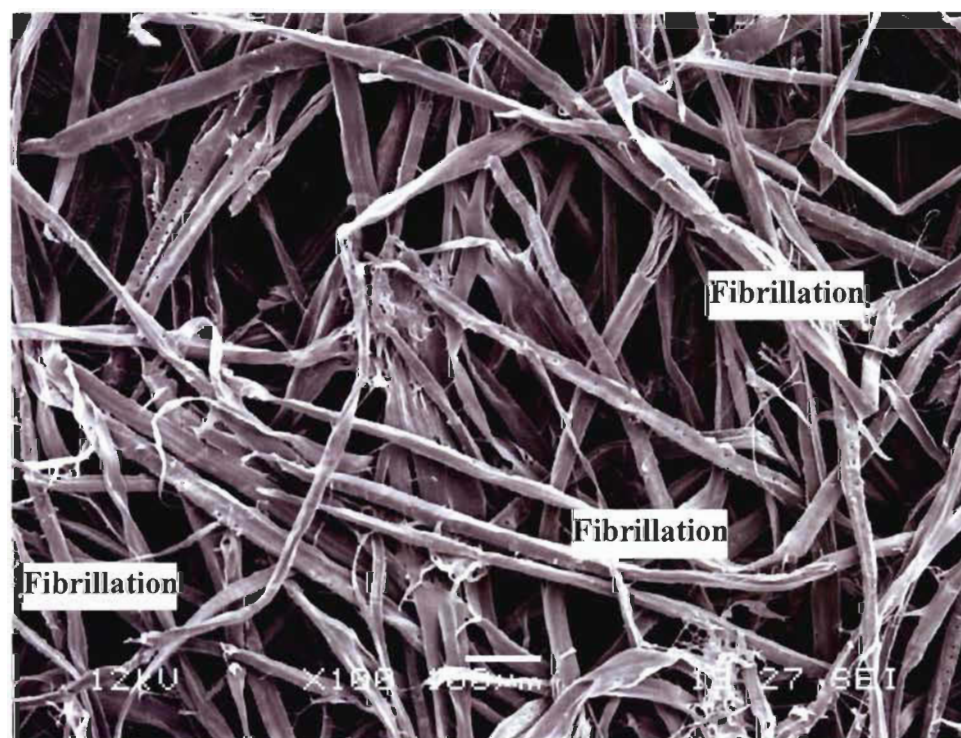


Figure 6.19 Fraction R48 de la pâte Q2, CSF de la pâte =100mL

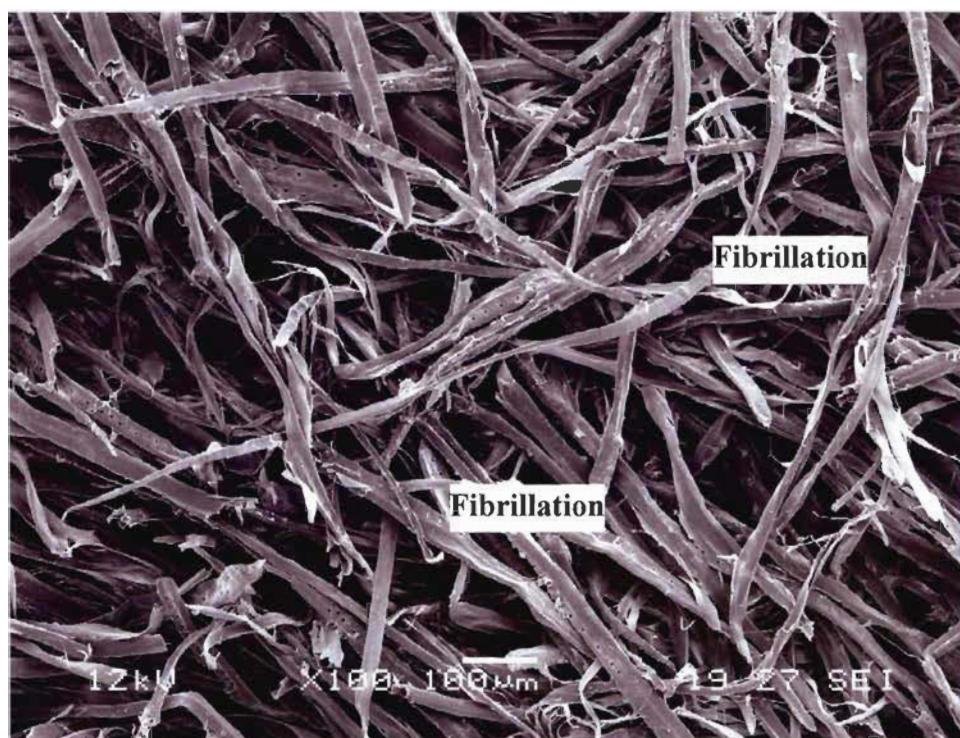


Figure 6.20 Fraction R48 de la pâte QBC, CSF de la pâte =100mL

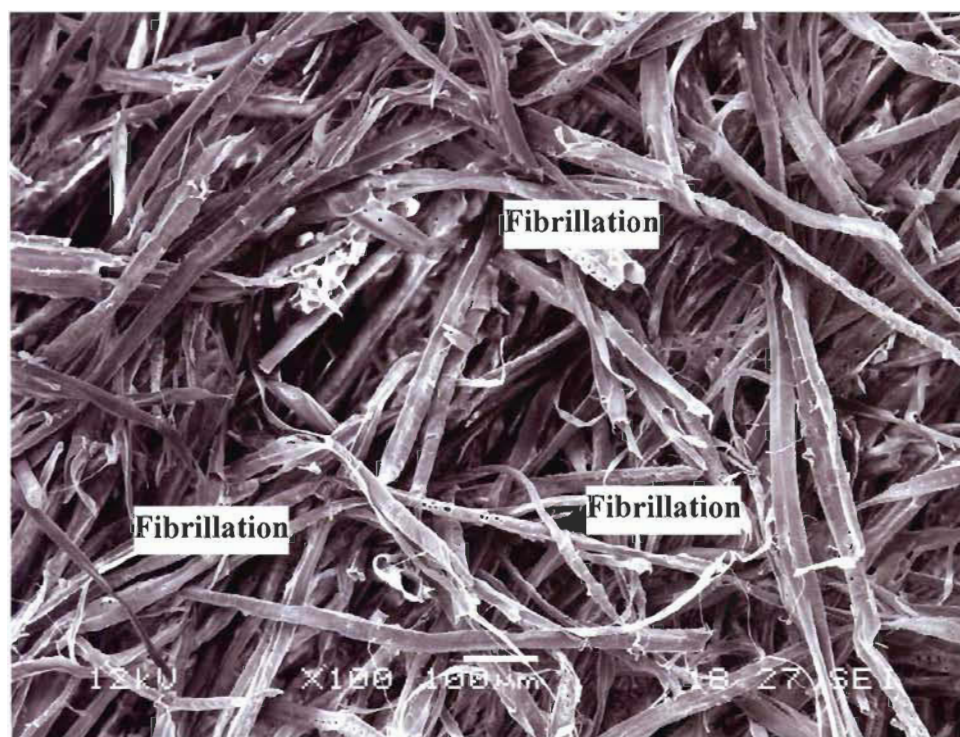


Figure 6.21 Fraction R48 de la pâte A, CSF de la pâte =100mL

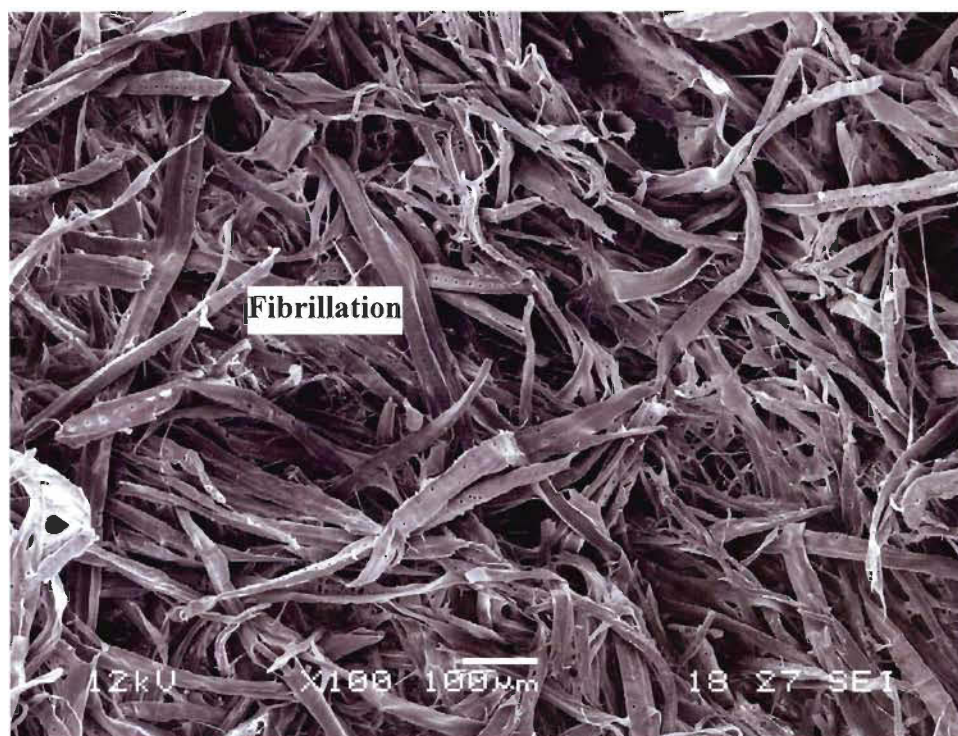


Figure 6.22 Fraction R48 de la pâte ABC, CSF de la pâte =100mL

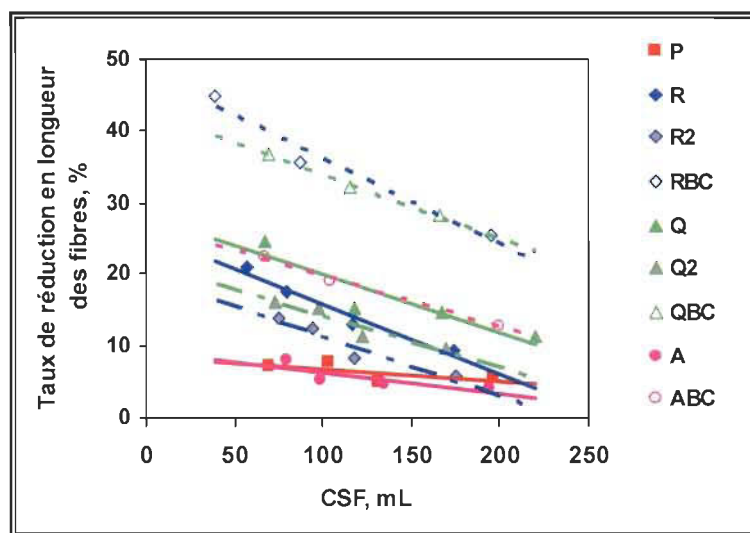


Figure 6.23 Taux de réduction en longueur des fibres en fonction du CSF

Dans le cas du raffinage à basse consistance, le taux de réduction en longueur des fibres est plus évident par rapport au raffinage à haute consistance (Figure 6.23). Une augmentation de l'intensité de raffinage (à basse consistance) accroît la diminution de

longueur des fibres. L'intensité de raffinage a un effet important sur le raccourcissement de la longueur des fibres. En comparaison avec A, les fibres de la pâte Q étant plus grossières, et plus longues, ont perdu plus en longueur sous des conditions de raffinage semblables. Afin de minimiser la réduction en longueur des fibres ainsi que les propriétés mécaniques, le choix d'un raffinage convenable pour chaque fraction est nécessaire. Il est cependant à noter que les raffineurs à basse consistance sont actuellement utilisés largement par l'industrie pour augmenter les propriétés de liaison des fibres. Dans notre recherche, l'utilisation d'un raffineur conventionnel pour faire le raffinage à basse consistance a possiblement nuit au développement des fibres. Il serait judicieux d'optimiser le raffinage à basse consistance dans un raffineur prévu pour cette tâche, étant donné le gain énergétique appréciable qui peut être atteint.

On note qu'il existe peu de différence entre la pâte R et la pâte Q en ce qui concerne la longueur des fibres. Ce phénomène peut être dû au fait qu'après le fractionnement, la pâte Q est constitué de presque 80% de R (Tableau 6.2, Tableau 6.3).

6.3.2.3 Caractéristiques des fractions Bauer McNett

6.3.2.3.1 Bauer McNett

Le fractionnement concentre les fibres longues dans les pâtes R et Q, qui possèdent une haute teneur en R14, pendant que les fibres relativement courtes sont dirigées dans la pâte A qui a une basse teneur en R14 par rapport à la pâte P. Le raffinage raccourci la longueur des fibres et, par conséquent, la teneur en R14 diminue après le raffinage, ce qui est observé pour toutes les pâtes (P, R, Q et A) (Figure 6.24). La tendance de réduction est semblable à celle observée pour la pâte non fractionnée.

Le raffinage en deux stades est plus doux et moins intensif que le raffinage en un stade. L'augmentation du nombre de stades de raffinage permet donc de conserver une meilleure longueur des fibres. Dans le cas du raffinage à basse consistance, la teneur en R14 est inférieure par rapport à celui à haute consistance car l'entrefer entre les plaques

du raffineur utilisé est plus petit, résultant en un effet néfaste sur la coupe des fibres et causant une diminution importante de la teneur en R14.

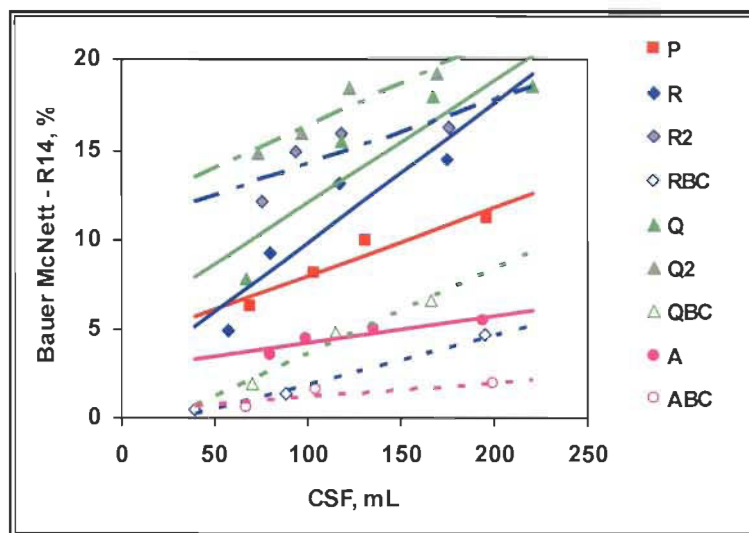


Figure 6.24 Teneur en R14 en fonction du CSF

La Figure 6.25 présente la tendance de réduction en R28 en fonction du CSF. On note que l'intensité du raffinage a un effet important sur le raccourcissement des fibres de cette fraction, similaire au R14. Le raccourcissement des fibres est plus prononcé dans la fraction longue.

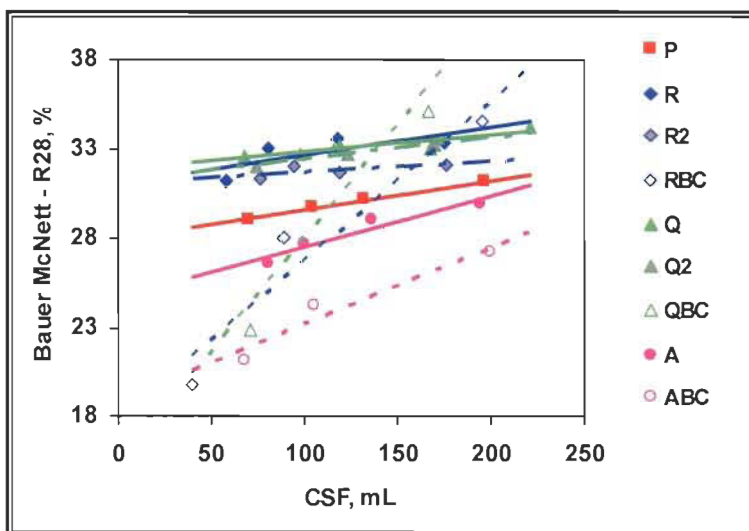


Figure 6.25 Teneur en R28 en fonction du CSF

Par ailleurs, les fractions R48, R100, R200 et P200 augmentent (Figure 6.26 à Figure 6.29), et de façon plus marquée dans le cas du raffinage à basse consistance. Comme nous avons discuté dans le cas du raffinage à basse consistance, l'entrefer entre les plaques de raffineur est plus petit, ce qui a un effet significatif sur la coupe des fibres, réduisant la teneur en fibres longues et augmentant la teneur en fibres courtes. En fait, le raffinage à basse consistance produit des fractions appauvries en R14, R28 mais enrichies en R48 et R100 par rapport aux raffinages à haute consistance.

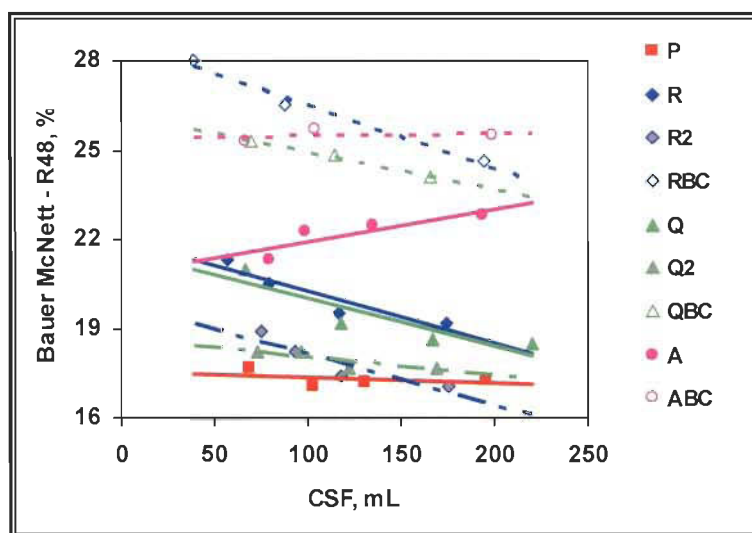


Figure 6.26 Teneur en R48 en fonction du CSF

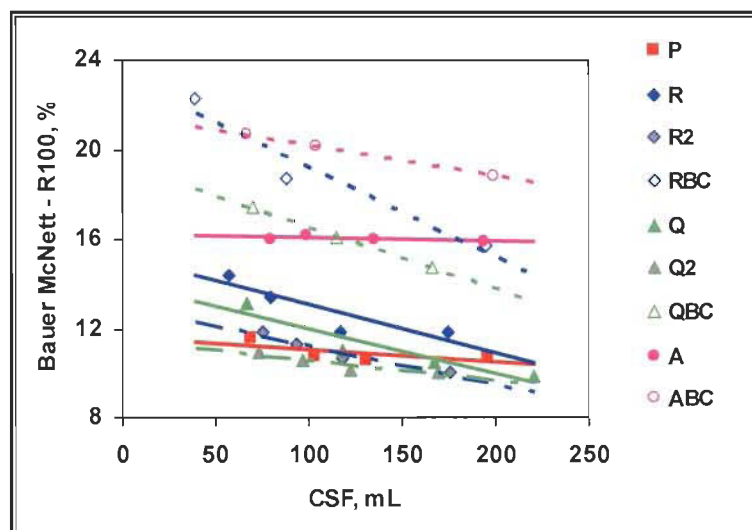


Figure 6.27 Teneur en R100 en fonction du CSF

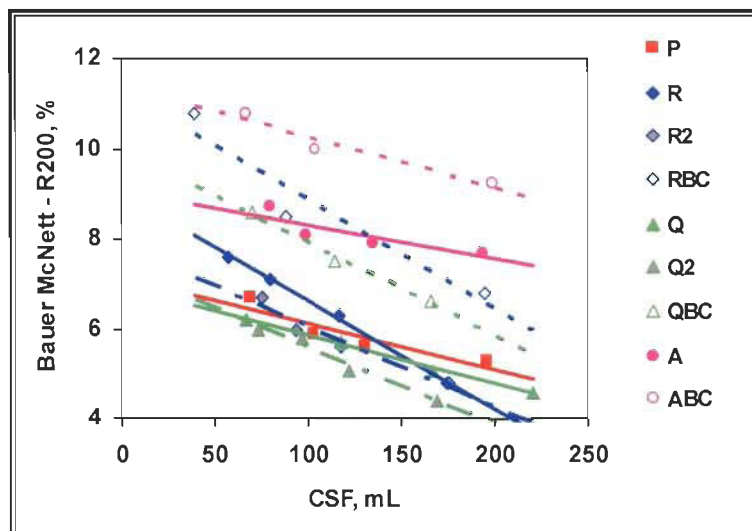


Figure 6.28 Teneur en R200 en fonction du CSF

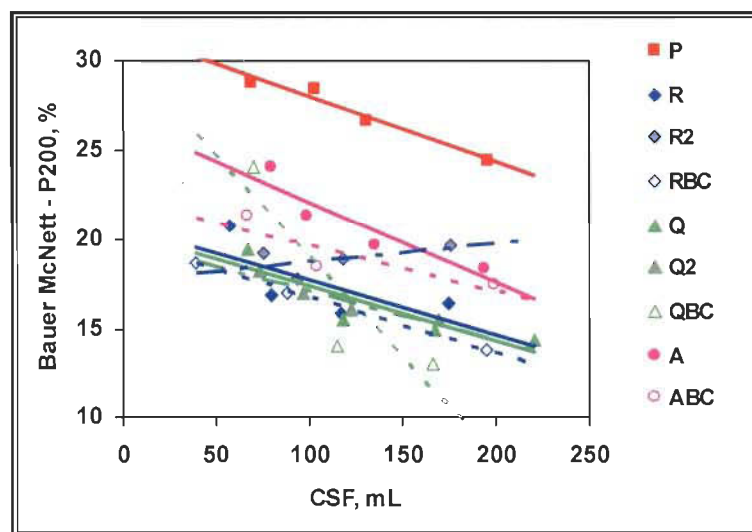


Figure 6.29 Teneur en P200 en fonction du CSF

En fait, le raffinage est un processus complexe et aléatoire. Au cours du raffinage, certains morceaux délaminés de la fraction précédente se retrouvent dans la fraction suivante, ce qui amène une fluctuation de la teneur des fractions ainsi qu'une variation de la masse linéique et de l'épaisseur des parois entre les fractions. L'intensité de raffinage peut jouer un rôle déterminant dans la coupe des fibres.

6.3.2.3.2 Épaisseur des parois cellulaires

Comme conséquence du raffinage, la paroi de la fibre est délaminée progressivement, son épaisseur diminuant suivant la baisse du CSF (Figure 6.30, Figure 6.31 et Figure 6.32). On a déjà parlé que, dans le cas du raffinage à basse consistance, l'entrefer entre les plaques est plus petit et le temps de rétention des fibres dans le raffineur est plus court, ce qui intensifie l'action du raffinage sur les fibres. Comme conséquence, le taux de réduction en épaisseur des parois est un peu moindre que celui du raffinage à haute consistance. Cette caractéristique est plus évidente pour les fractions R28 et R48. Cependant, à cause de la migration des fragments délaminés des fibres longues, les fibres de R100 ont une tendance différente. Ces différences en développement de surface des fibres font ressortir la complexité du raffinage. Une stratégie particulière en raffinage des fractions de fibres s'impose.

La réduction en épaisseur des parois cellulaires accompagne l'effet de fibrillation. Le faible taux de réduction indique que le raffinage à basse consistance produit moins de fragment des parois et profite moins au développement de la surface des fibres.

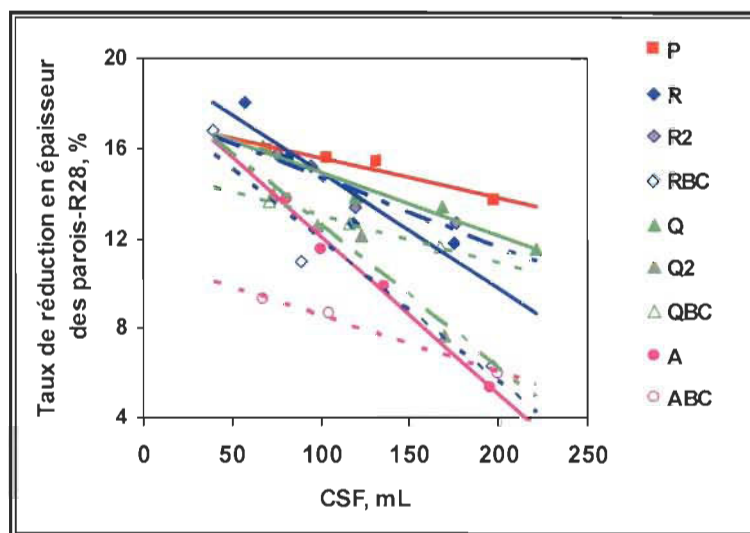


Figure 6.30 Taux de réduction en épaisseur des parois de R28 en fonction du CSF

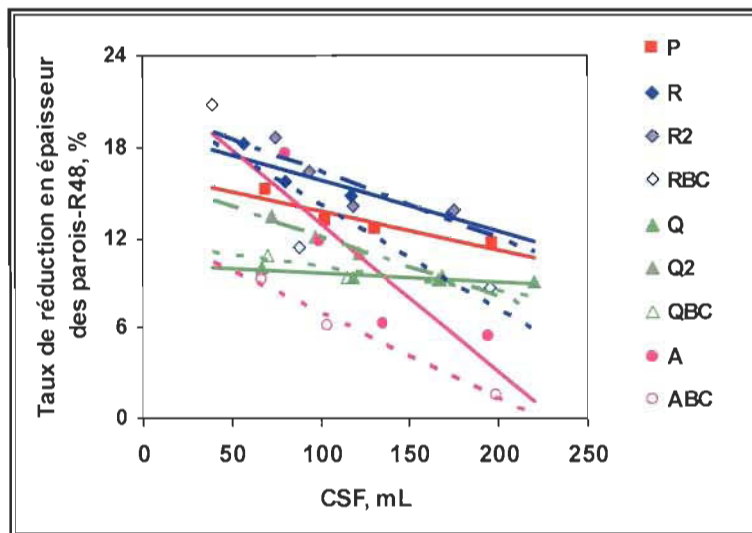


Figure 6.31 Taux de réduction en épaisseur des parois de R48 en fonction du CSF

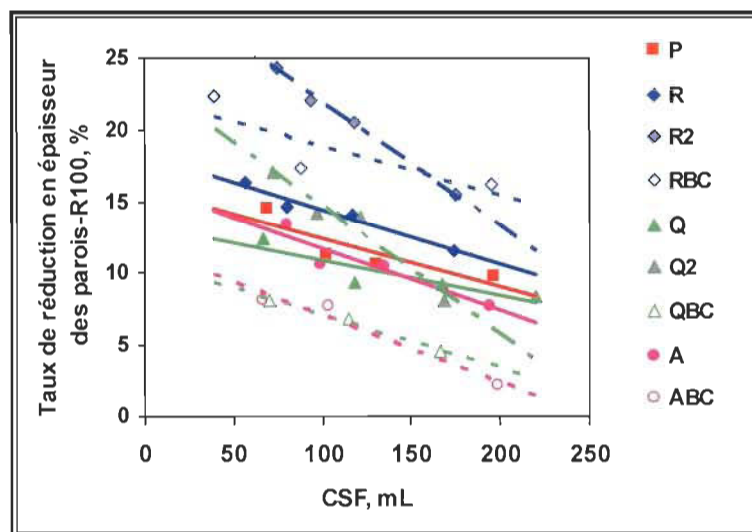


Figure 6.32 Taux de réduction en épaisseur des parois de R100 en fonction du CSF

On remarque cependant que, pour un bas CSF, les fibres longues de la fraction R peuvent être délaminées presque autant à basse consistance qu'à haute consistance. Il y aurait donc des conditions pour lesquelles il devrait être possible de profiter de la réduction énergétique associée à la basse consistance, si l'on parvient à mieux contrôler la réduction de longueur des fibres.

L'analyse des images obtenues de l'appareil Morfi démontre que les fractions R28, R48 et R100 de la pâte A contiennent plus de fibres de BP que celle de la pâte Q. Pour la fraction R28, les fibres de la pâte A montrent un faible taux de réduction de l'épaisseur des parois par rapport aux fibres de la pâte Q. Les fibres de la fraction riche en BP sont plus flexibles et plus tendres que celles de BE. Au cours du raffinage, les fibres du BP sont plus résistantes à l'effet de délamination. La fraction plus grossière (Q) manifeste une réduction supérieure en épaisseur des parois et a une plus grande influence sur la fibrillation que la fraction moins grossière (A). Cependant, ce phénomène n'est pas observé dans les fractions R48 et R100, probablement dû à la migration des fragments délaminés de la fraction précédente.

Les pâtes R et Q possèdent des fibres longues et leurs fibres des fractions R28, R48 et R100 ont une même tendance relative à la réduction en épaisseur des parois cellulaires. Encore une fois, la migration des fibres délaminées de la fraction plus longues contribue plus ou moins à la différence observée. En somme, la perturbation des fragments délaminés de la fraction précédente influence plus les fractions courtes que les fractions longues.

6.3.2.3.3 Masse linéique

L'effet du raffinage amène la réduction de l'épaisseur des parois ainsi que la réduction de la masse linéique (Figure 6.33, Figure 6.34 et Figure 6.35). En effet, l'épaisseur de paroi et la masse linéique sont toutes les deux modifiées par l'enlèvement de la paroi. La masse linéique diminue suivant la réduction de la longueur des fibres [140]. La longueur des fibres change rapidement lorsque le bout de la fibre est effiloché. Cela change également la valeur de la masse linéique. Comme conséquence, l'épaisseur de paroi n'est pas directement proportionnelle à la masse linéique.

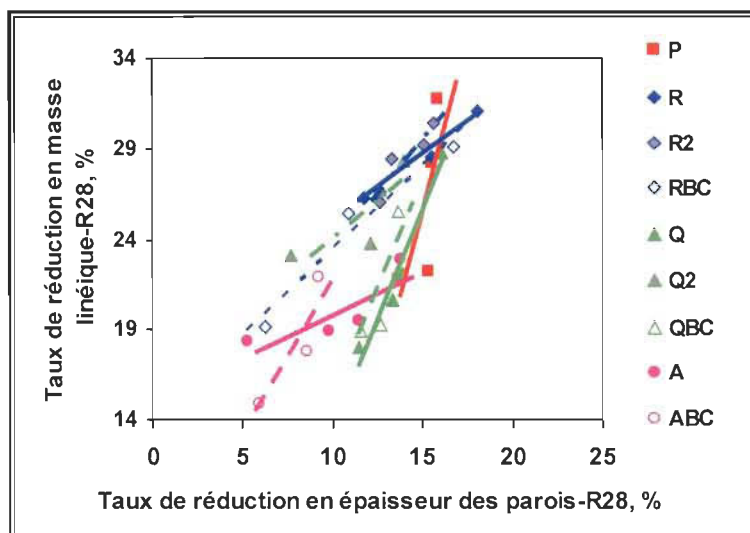


Figure 6.33 Taux de réduction en masse linéique de R28 en fonction du taux de réduction en épaisseur des parois de R28

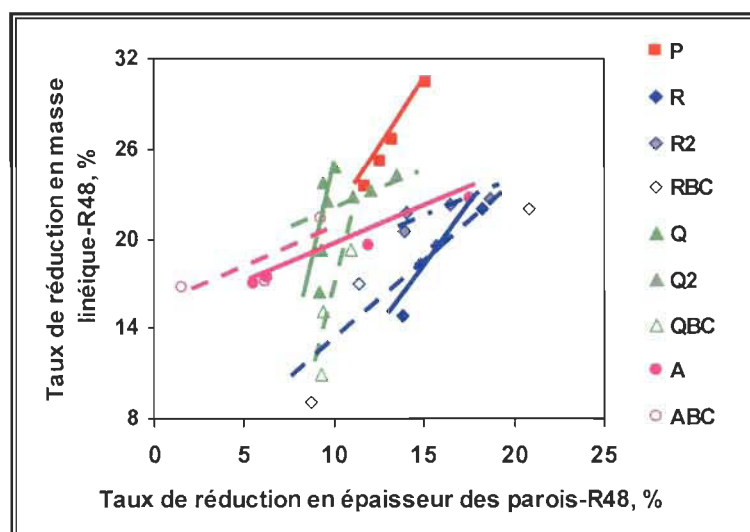


Figure 6.34 Taux de réduction en masse linéique de R48 en fonction du taux de réduction en épaisseur des parois de R48

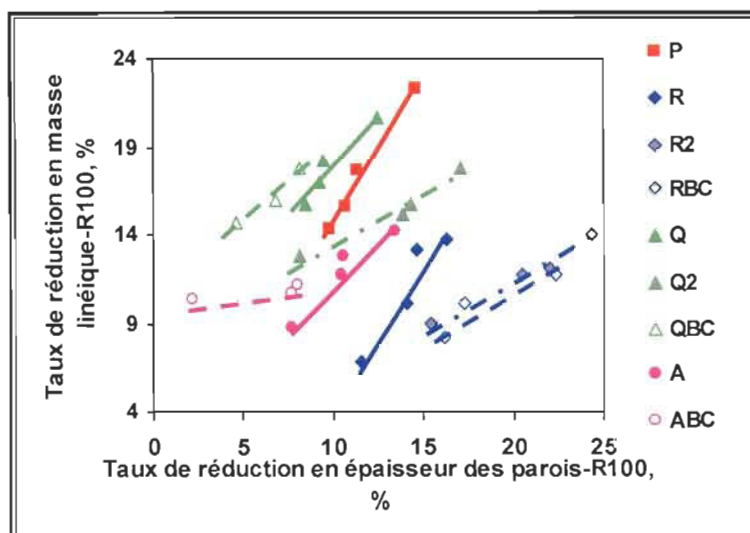


Figure 6.35 Taux de réduction en masse linéique de R100 en fonction du taux de réduction en épaisseur des parois de R100

En comparaison avec le raffinage à basse consistance, le raffinage à haute consistance est plus efficace pour réduire l'épaisseur des parois cellulaires et la masse linéique (Figure 6.36, Figure 6.37 et Figure 6.38), ce qui rend les fibres plus flexibles. Toutefois, l'augmentation du nombre de stades de raffinage peut amener un meilleur développement de la surface des fibres; ainsi le raffinage en deux stades entraîne une perte plus importante de la masse linéique des fibres par rapport au raffinage en un stade.

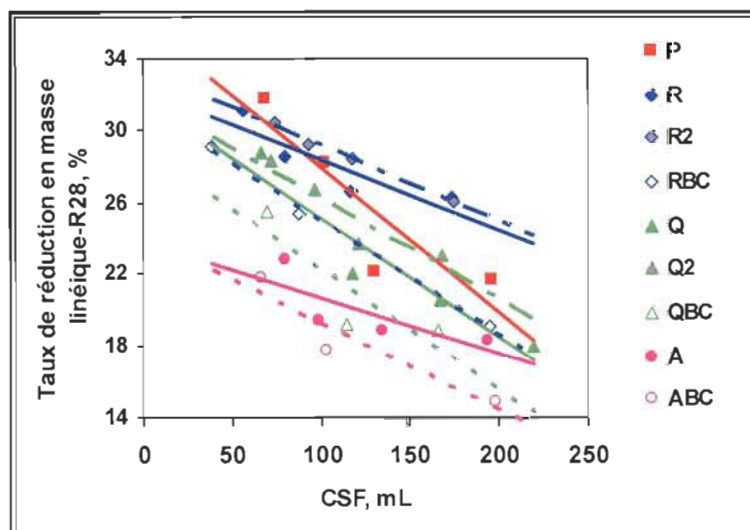


Figure 6.36 Taux de réduction en masse linéique de R28 en fonction du CSF

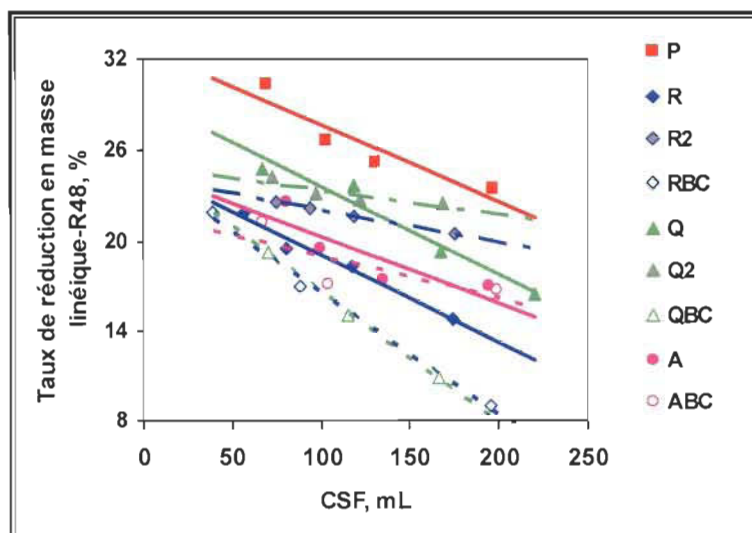


Figure 6.37 Taux de réduction en masse linéique de R48 en fonction du CSF

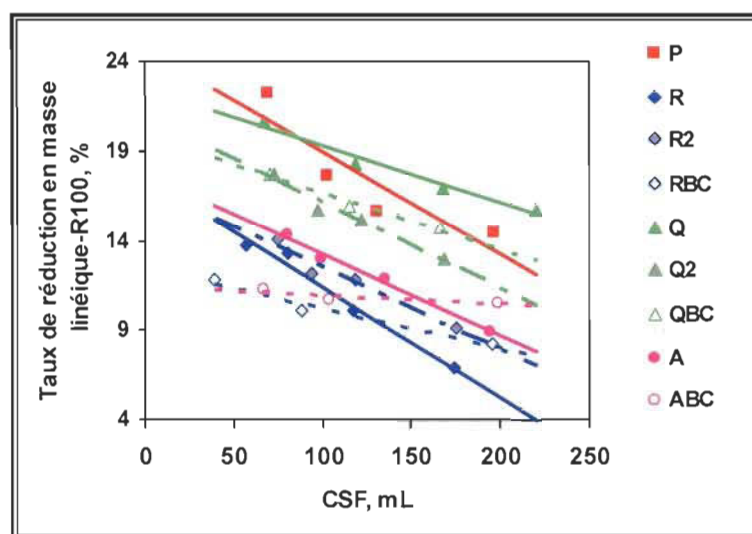


Figure 6.38 Taux de réduction en masse linéique de R100 en fonction du CSF

6.3.2.3.4 Valeur de rétention d'eau (VRE)

La valeur de rétention d'eau (VRE) d'une pâte influence les propriétés du papier [141]. Il est bien connu que le raffinage délamine les parois cellulaires (c'est-à-dire la fibrillation interne) et fibrille la surface (la fibrillation externe) des fibres, augmentant la surface spécifique et le nombre de groupements hydrophiles. Comme conséquence, on constate une augmentation de la capacité des fibres à retenir l'eau et de la capacité de liaisons

[142]. Par conséquent, la VRE reflète le degré de délamination et de fibrillation des fibres raffinées. Afin de bien comprendre le comportement de la fibrillation et de la délamination des fractions lors du raffinage, nous étudierons cette valeur sur les fractions R28, R48 et R100 (Figure 6.39, Figure 6.40 et Figure 6.41) dans notre recherche.

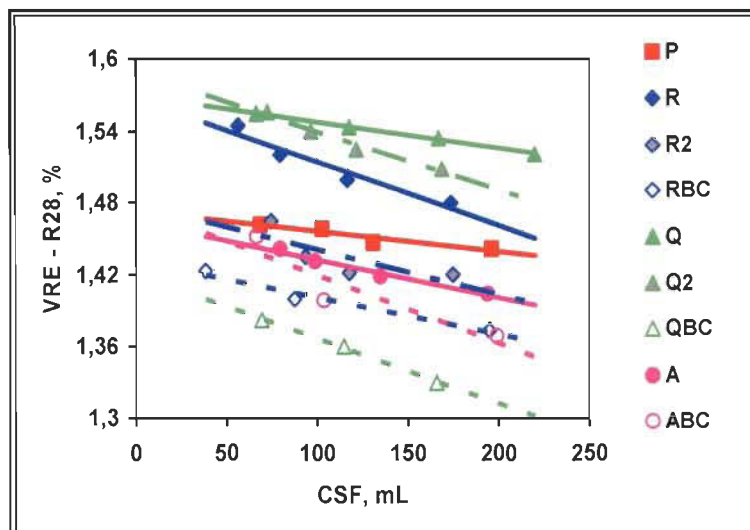


Figure 6.39 Valeur de rétention d'eau de R28 en fonction du CSF

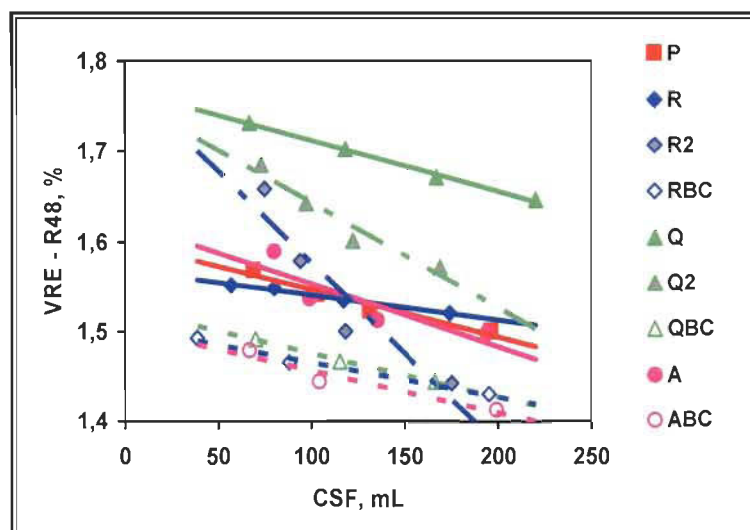


Figure 6.40 Valeur de rétention d'eau de R48 en fonction du CSF

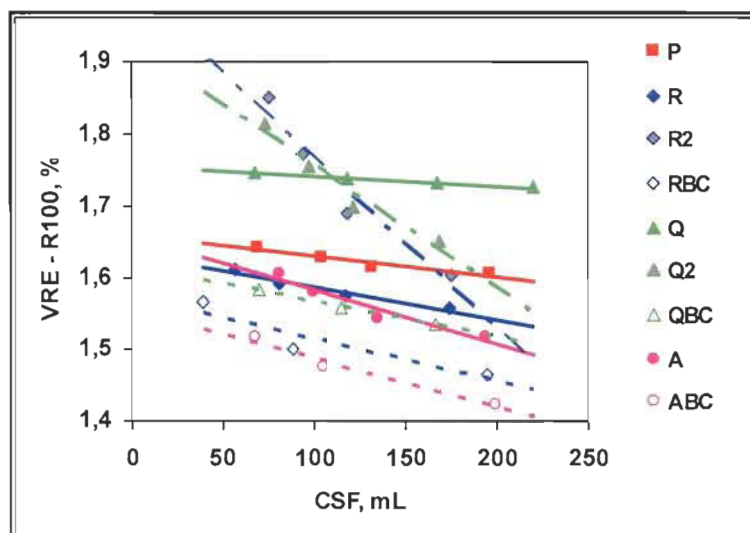


Figure 6.41 Valeur de rétention d'eau de R100 en fonction du CSF

Selon Law et al. [143], au cours du raffinage, les fibres du BP étant plus flexibles que celles du BE, tendent à se fracturer plus facilement, tandis que les fibres du BE sont plutôt délaminiées. Les images prises au MEB de coupes transversales montrent également des cellules fracturées (BP) et des fibres délaminiées (BE) (Figure 6.42, Figure 6.43). La délamination augmente la capacité d'absorption d'eau, ce qui confère sans doute aux fibres du BE leur plus grand pouvoir d'absorption. Pour cette raison, on trouve que la VRE est toujours supérieure pour la fraction riche en fibres du BE par rapport à celle du BP. Les fractions R28, R48 et R100 des pâtes Q et R contiennent plus de BE que la pâte A. La VRE de ces fractions est toujours supérieure à celle de la pâte A (Figure 6.39, Figure 6.40 et Figure 6.41).

On observe également que les fractions raffinées à basse consistance possèdent une VRE plus faible comparativement à celles raffinées à haute consistance. La raison est que le raffinage à basse consistance produit plutôt un raccourcissement des fibres que le développement de surface par rapport au raffinage à haute consistance, ceci amène une basse VRE. De plus, les pâtes R et Q ont une VRE un peu plus basse que la pâte A dans la fraction R28. Le fait est que les fibres plus longues possèdent une épaisseur des parois plus élevée et une surface spécifique inférieure développée au cours du raffinage par

rapport aux fibres ayant une épaisseur de paroi plus faible, ce qui produit une faible VRE.

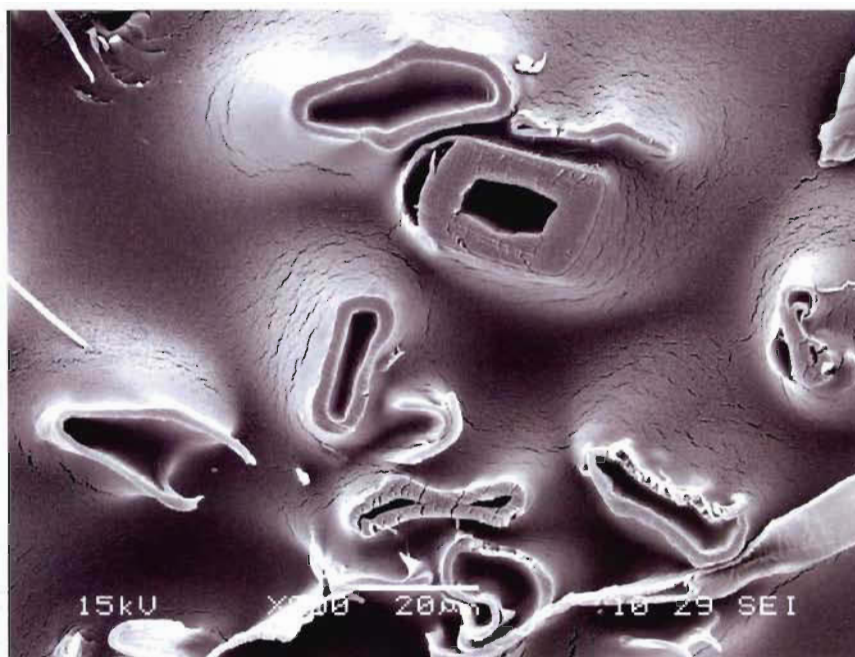


Figure 6.42 Vue transversale des fibres de la fraction R48 de pâte A (CSF = 100 mL).

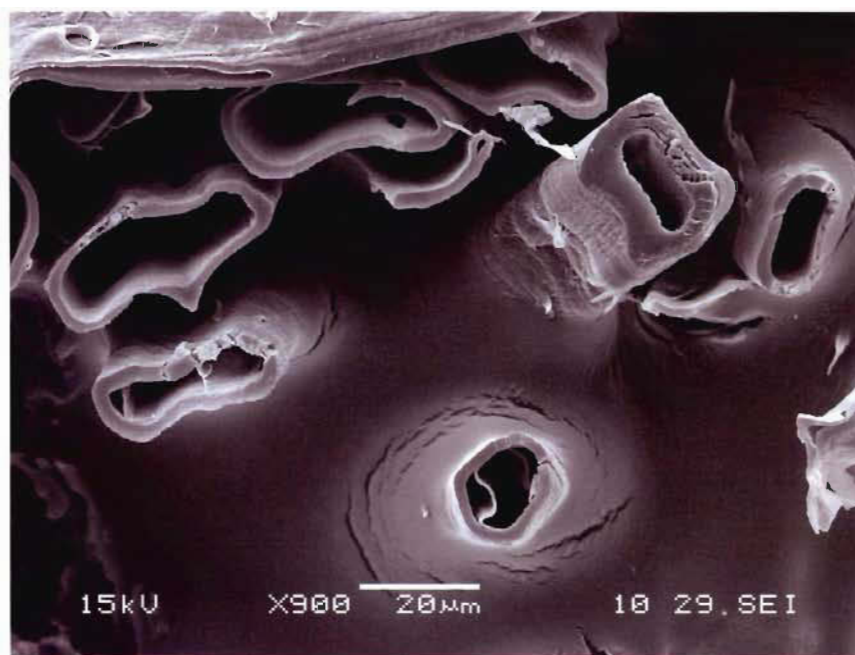


Figure 6.43 Vue transversale des fibres de la fraction R48 de la pâte Q2 (CSF = 100 mL).

Contrairement à ce que l'on pourrait s'attendre, la VRE n'augmente pas d'avantage en fonction de l'augmentation du nombre de stades de raffinage. Elle est inférieure dans le cas du raffinage à haute consistance en deux stades comparativement à un seul stade. Notre explication est que, pour un échantillon donné, la VRE est déterminée par la fibrillation et la délamination. Law et al. [143] ont démontré qu'une faible compression agit principalement sur les fibres du BP mais rarement sur celles du BE. Tandis qu'avec une haute compression, les fibres du BE sont touchées et, par conséquence, produisent plus de délamination. En comparaison avec le raffinage en un stade, l'effet du raffinage sera plus doux dans le cas du raffinage en deux stades. L'augmentation du nombre de stades de raffinage peut probablement augmenter la fibrillation, mais diminue certainement la délamination entre les couches des parois cellulaires. De plus, après le raffinage, les pâtes raffinées en un stade contiennent moins de rejets que celles raffinées en deux stades (Figure 6.12). La haute teneur en rejets ne profite pas à l'absorption d'eau car les rejets sont surtout constitués de fibres longues. Pour ces raisons, l'augmentation du nombre de stades de raffinage ne peut pas conférer aux fractions une haute capacité d'absorption d'eau.

Au cours du raffinage, une partie de la paroi primaire P et de la couche S_1 des fibres est enlevée. Ceci est favorable à une augmentation de la fibrillation externe, la surface spécifique et le nombre de groupements hydrophiles. Par conséquent, on observe une augmentation de la VRE des fibres. Les figures 6.44 à 6.61 nous indiquent qu'après le raffinage, lorsque les fibres sont raffinées à basse consistance, l'enlèvement de la couche S_1 se produit rarement et l'exposition de la couche S_2 se produit souvent près des ponctuations (Figure 6.53, Figure 6.59), ce qui affaiblit les fibres. Cependant, le raffinage à haute consistance produit plus d'enlèvement de la couche S_1 , tout en exposant la couche S_2 et produisant plus de fibrillation externe. Comme conséquence, les fibres raffinées à basse consistance ont une surface moins développée que celle raffinée à haute consistance. Plus fréquente est l'exposition de la couche S_2 , plus importante est la fibrillation produite et plus intéressante est la capacité de liaisons fibre-à-fibre. Afin d'obtenir une pâte avec une meilleure VRE, tout en maintenant constantes les autres

conditions, telles que l'énergie spécifique et le développement des propriétés des fibres, le raffinage doit être fait préférentiellement à haute consistance.

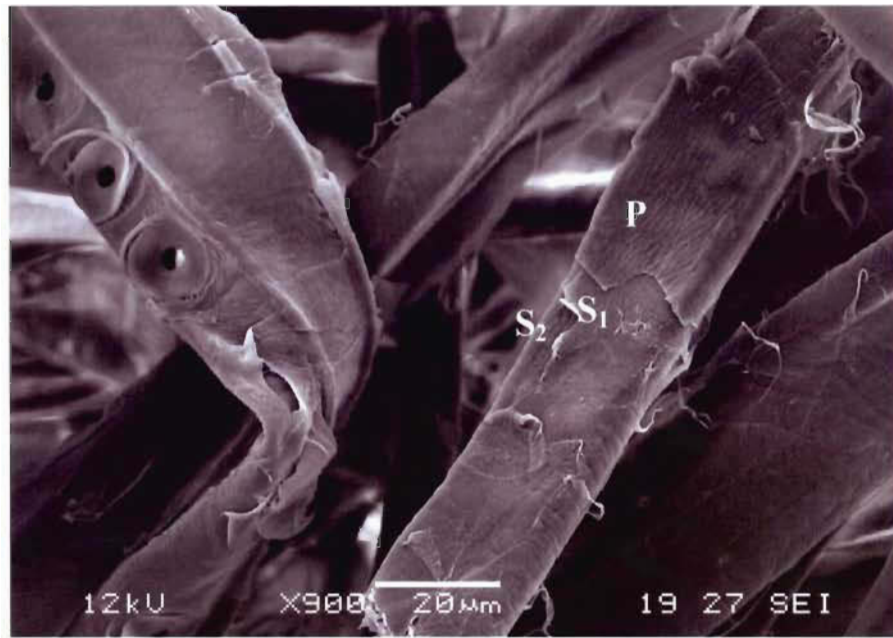


Figure 6.44 Surface des fibres de la fraction R28 de la pâte R2 (CSF de la pâte = 100 mL)

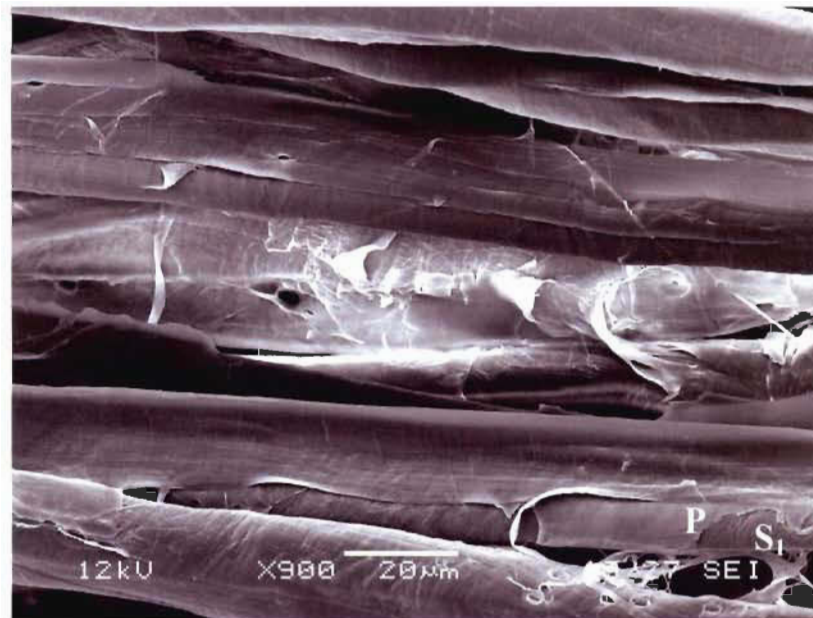


Figure 6.45 Surface des fibres de la fraction R28 de la pâte RBC (CSF de la pâte = 100 mL)

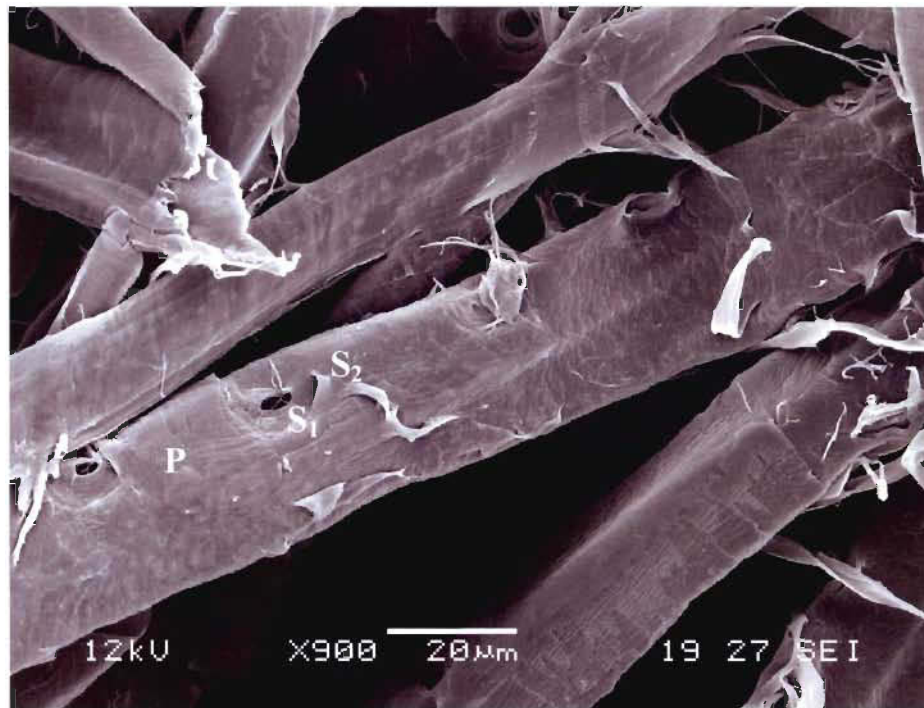


Figure 6.46 Surface des fibres de la fraction R48 de la pâte R2 (CSF de la pâte = 100 mL)

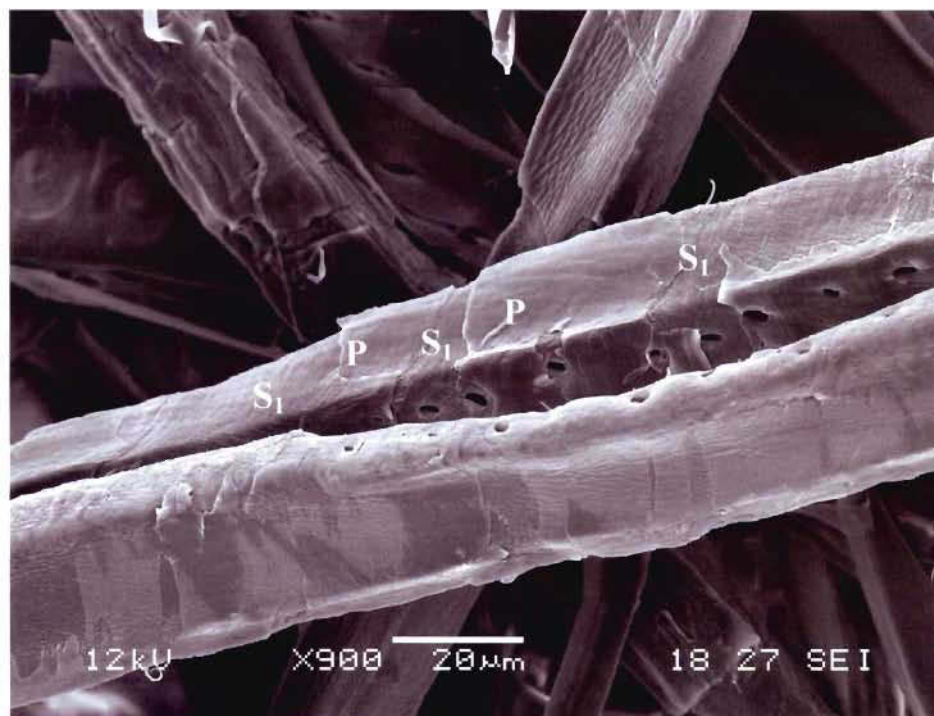


Figure 6.47 Surface des fibres de la fraction R48 de la pâte RBC (CSF de la pâte = 100 mL)

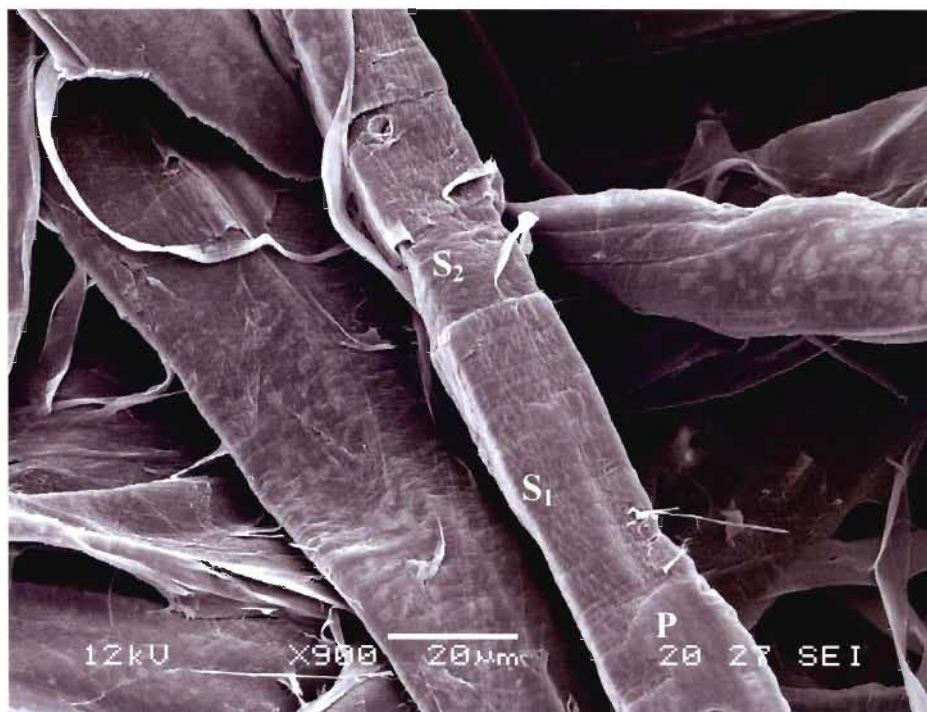


Figure 6.48 Surface des fibres de la fraction R100 de la pâte R2 (CSF de la pâte = 100 mL)

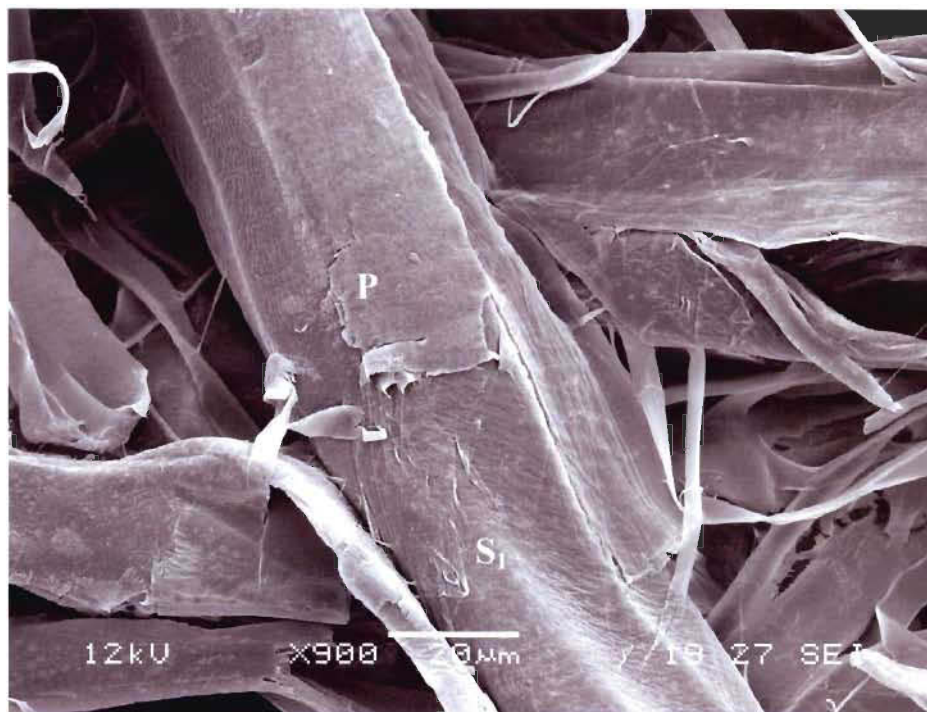


Figure 6.49 Surface des fibres de la fraction R100 de la pâte RBC (CSF de la pâte = 100 mL)

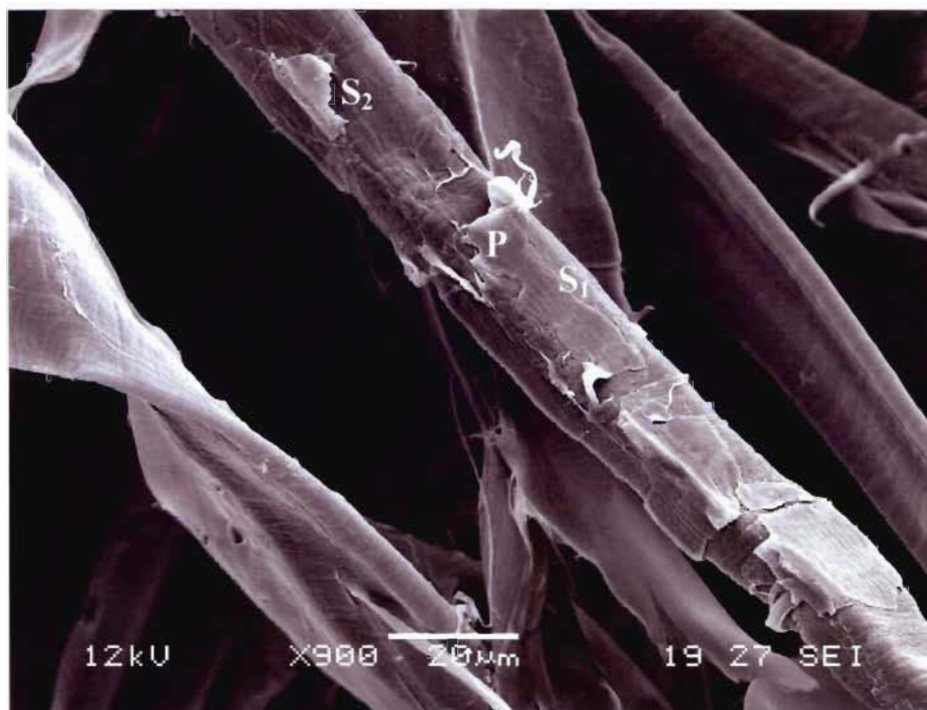


Figure 6.50 Surface des fibres de la fraction R28 de la pâte Q2 (CSF de la pâte = 100 mL)



Figure 6.51 Surface des fibres de la fraction R28, de la pâte QBC (CSF de la pâte = 100 mL)

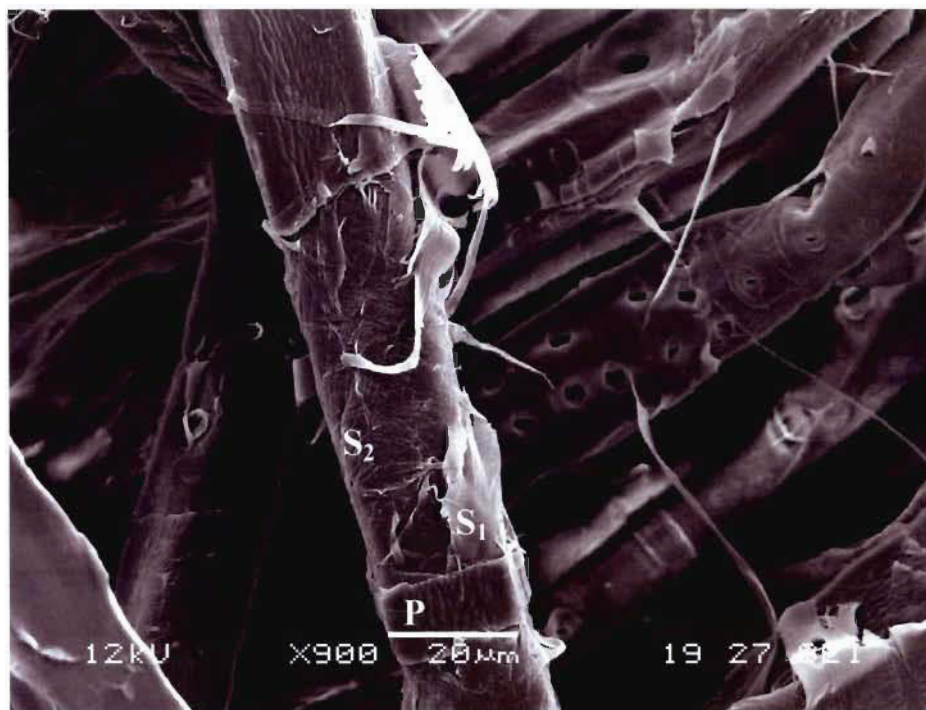


Figure 6.52 Surface des fibres de la fraction R48 de la pâte Q2 (CSF de la pâte = 100 mL)

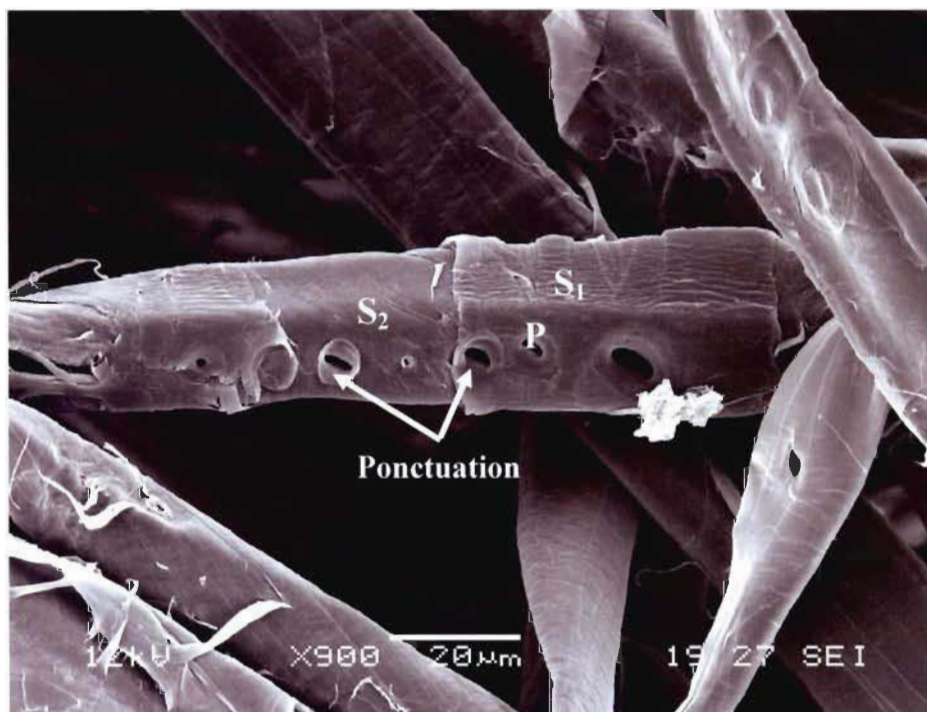


Figure 6.53 Surface des fibres de la fraction R48 de la pâte QBC (CSF de la pâte = 100 mL)

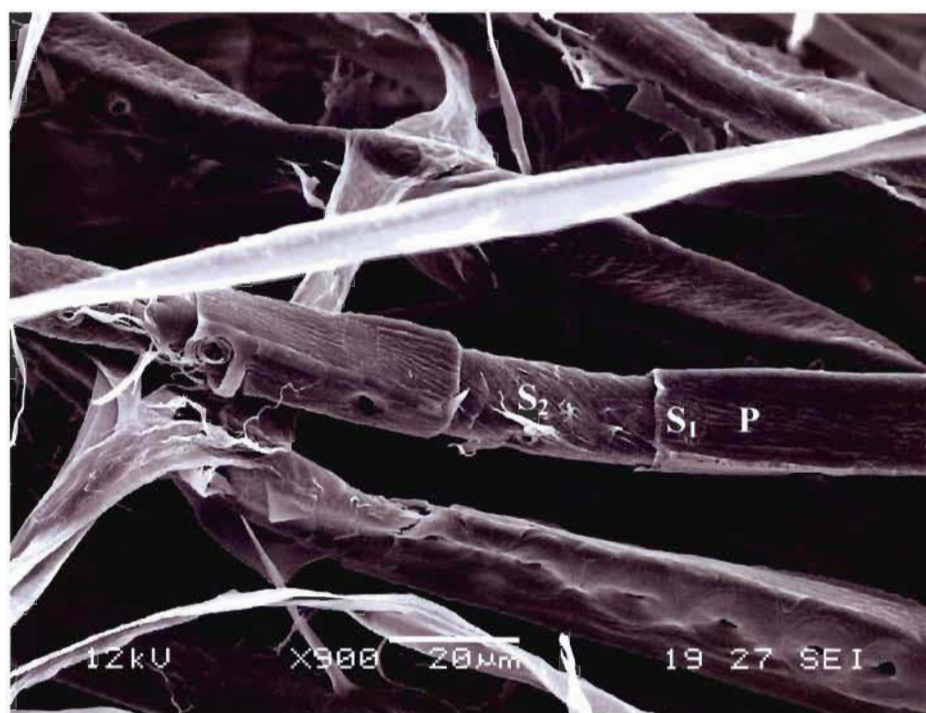


Figure 6.54 Surface des fibres de la fraction R100 de la pâte Q2 (CSF de la pâte = 100 mL)

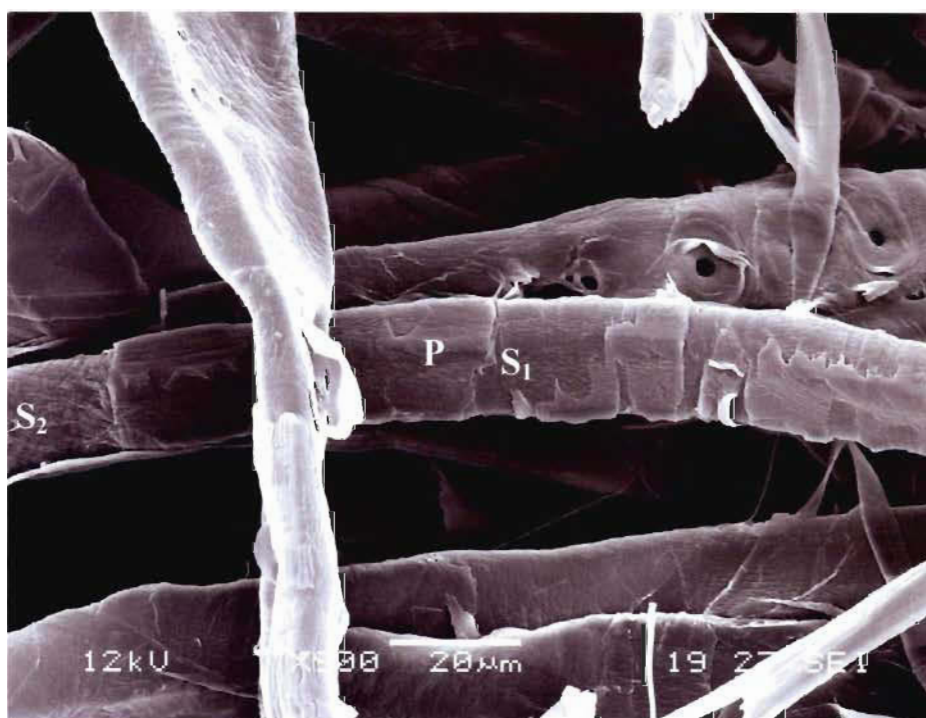


Figure 6.55 Surface des fibres de la fraction R100 de la pâte QBC (CSF de la pâte = 100 mL)

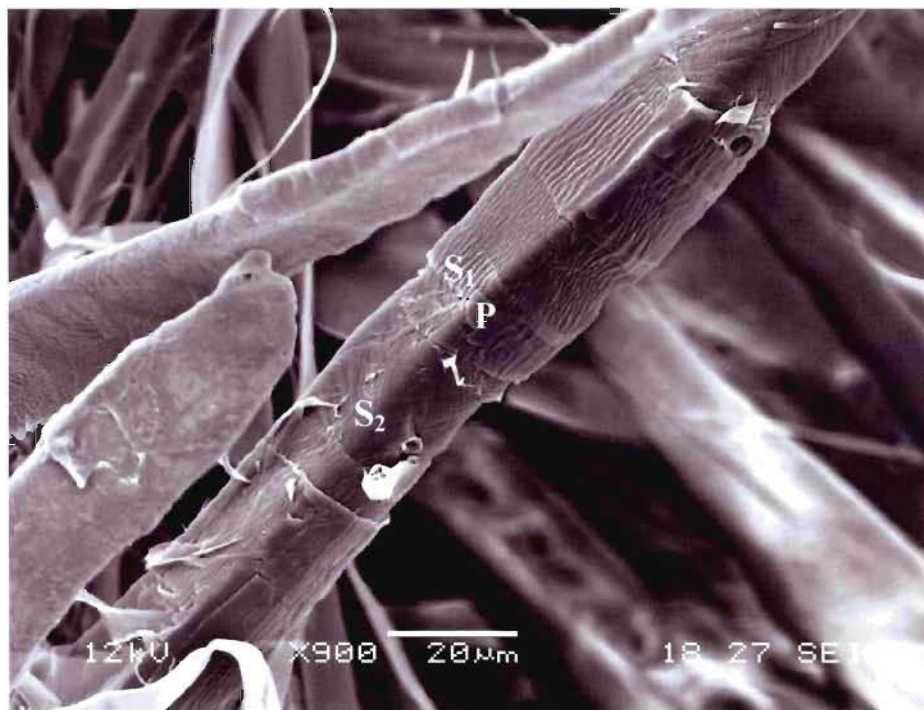


Figure 6.56 Surface des fibres de la fraction R28 de la pâte A (CSF de la pâte = 100 mL)

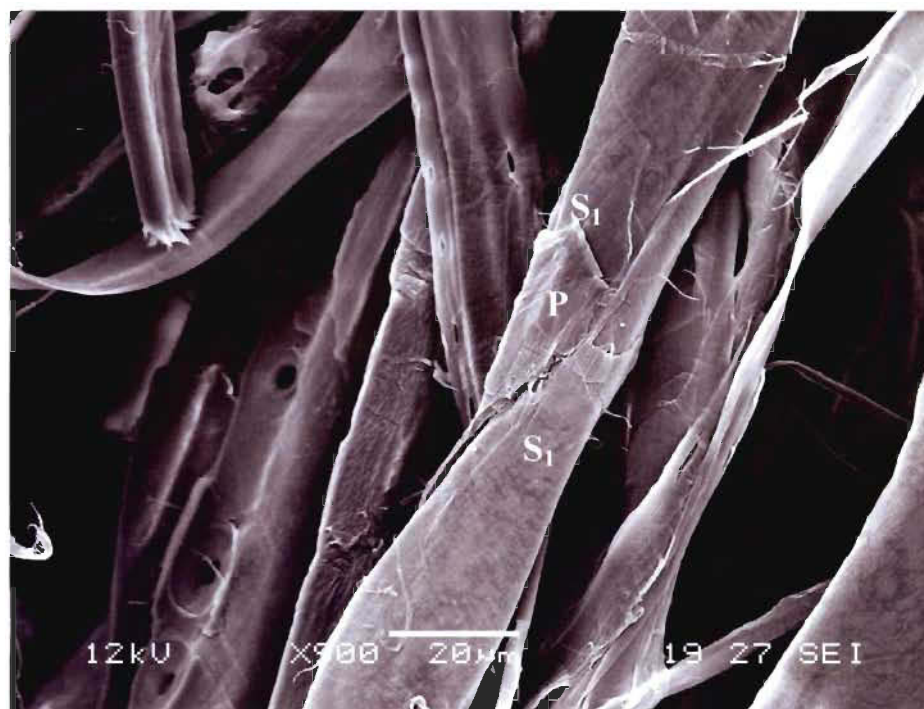


Figure 6.57 Surface des fibres de la fraction R28 de la pâte ABC (CSF de la pâte = 100 mL)

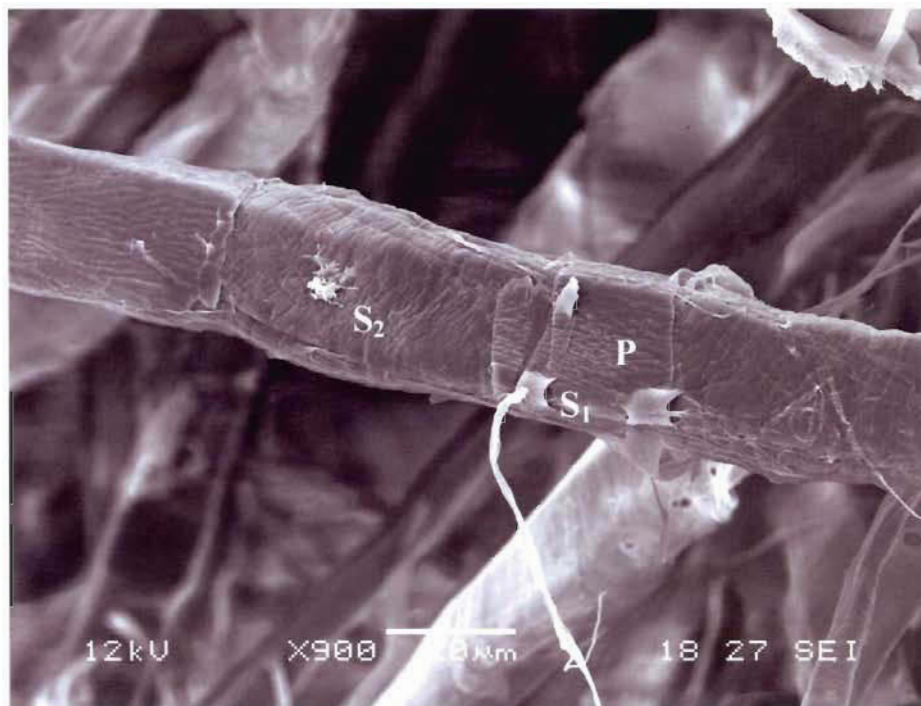


Figure 6.58 Surface des fibres de la fraction R48 de la pâte A (CSF de la pâte = 100 mL)

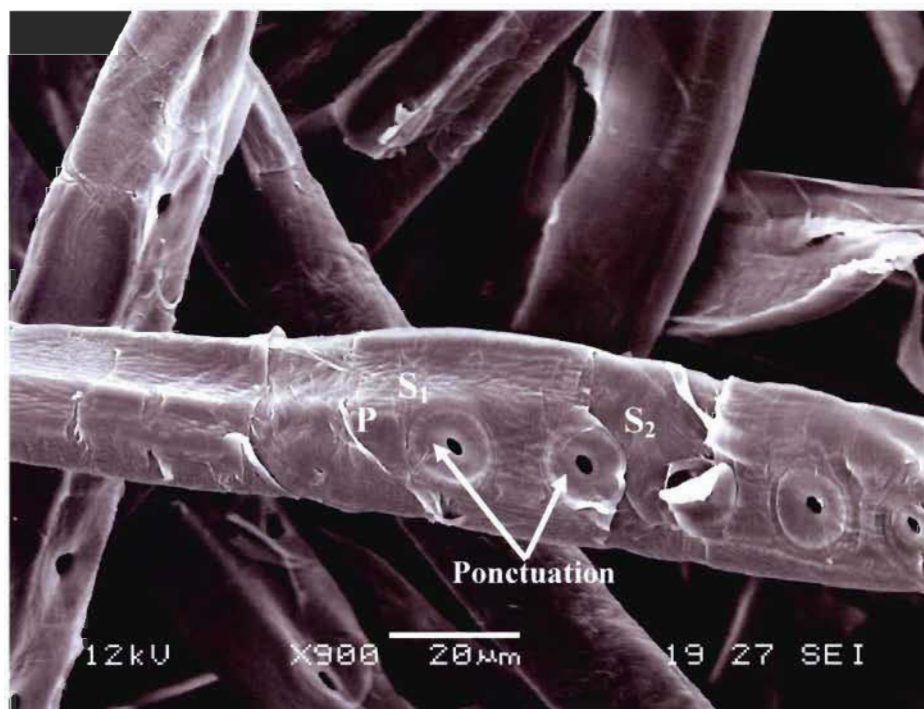


Figure 6.59 Surface des fibres de la fraction R48 de la pâte ABC (CSF de la pâte = 100 mL)

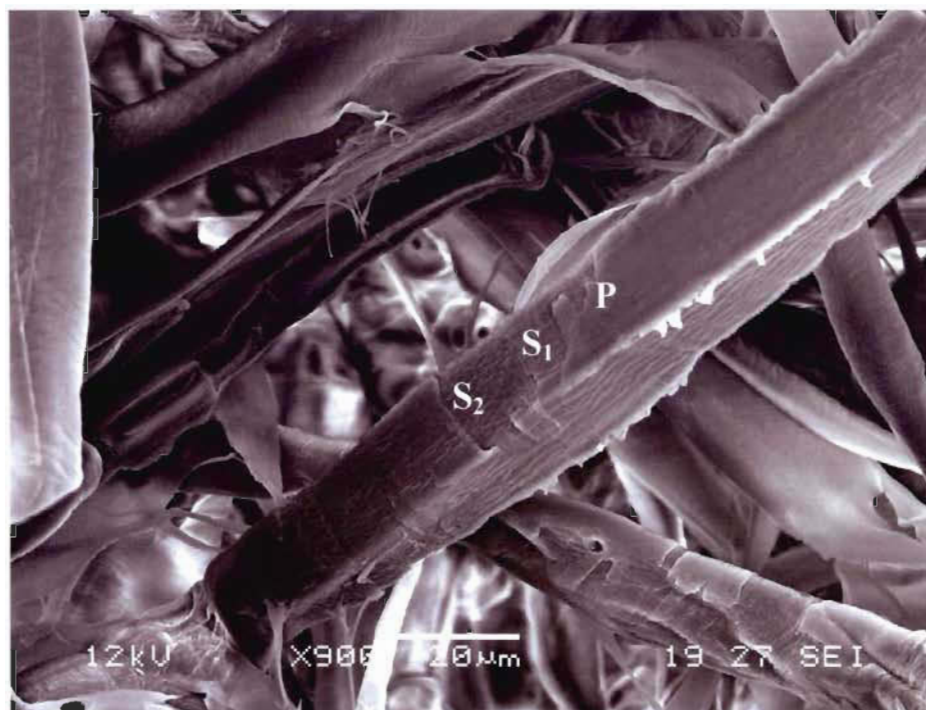


Figure 6.60 Surface des fibres de la fraction R100 de la pâte A (CSF de la pâte = 100 mL)

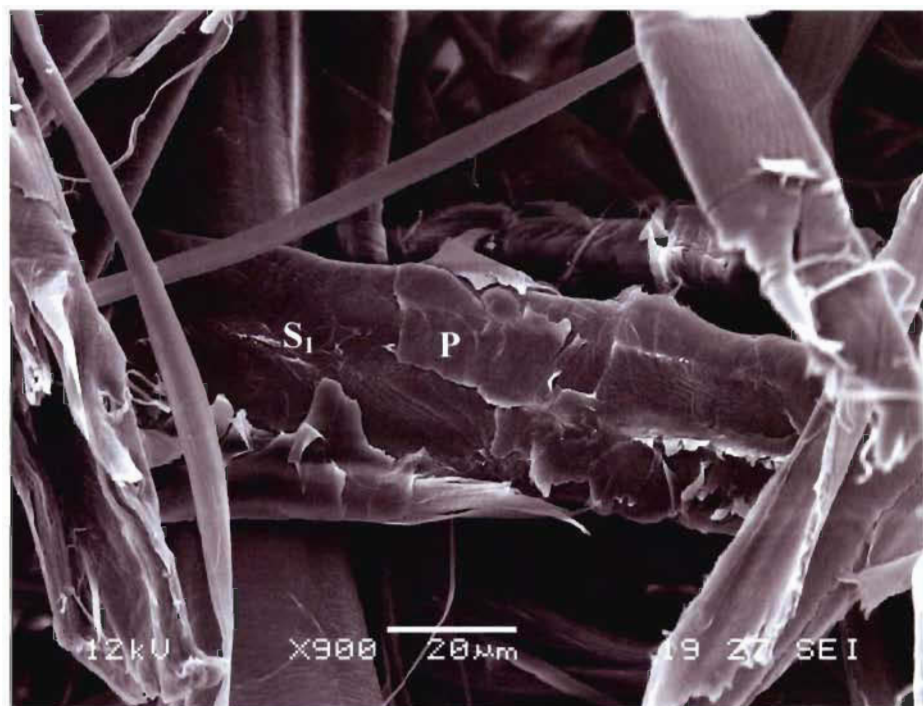


Figure 6.61 Surface des fibres de la fraction R100 de la pâte ABC (CSF de la pâte = 100 mL)

6.3.2.3.5 Développement de la fraction moyenne

La Figure 6.62 présente les tendances du CSF des fractions combinées (R100+R200). Les tendances sont similaires et ne semblent pas être influencées par la consistance de raffinage. Ceci pourrait indiquer que, lors du raffinage, les fibres des fractions moyennes possèdent une tendance de développement semblable. Comme nous avons précédemment discuté, le raffinage à basse consistance a moins d'impact sur le développement des fibres par rapport au raffinage à haute consistance. Ainsi, les fractions raffinées à basse consistance ont une valeur de CSF moyenne supérieure. En appliquant plus d'énergie aux pâtes, la différence est cependant atténuée et les fibres les moins développées initialement profitent plus de l'énergie supplémentaire appliquée. Il en résulte une pente qui s'accroît en observant les courbes du bas vers le haut dans le graphique.

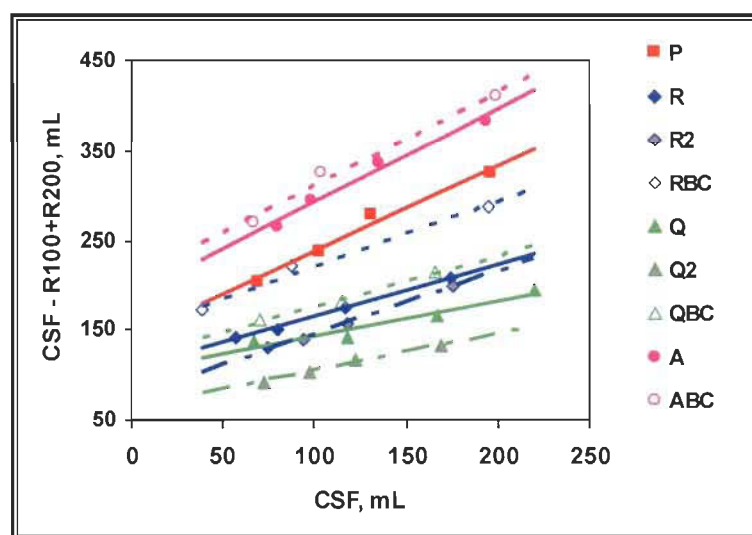


Figure 6.62 CSF de la fraction moyenne (R100 + R200) en fonction du CSF

La fraction moyenne de la pâte Q présente toujours un CSF plus faible que la fraction longue R, indiquant qu'au cours du raffinage, la fibrillation s'est produite plus sur la fraction longue plus grossière que celle moins grossière.

6.3.2.4 Volume spécifique par sédimentation (VSS) des fines

Les caractéristiques des fines jouent un rôle déterminant sur les propriétés d'une pâte mécanique. En comparaison avec les fibres, les fines ont une grande surface spécifique et une grande capacité à absorber l'eau [122]. En effet, pour une même masse, les fines absorbent presque deux fois plus d'eau que les fibres [144]. Ici, nous utiliserons le volume spécifique par sédimentation (VSS) pour caractériser le développement des fines au cours du raffinage.

En comparaison avec la pâte A, la pâte Q produit des fines ayant une valeur de VSS supérieure (Figure 6.63). Le raffinage de la fraction longue plus grossière (Q) réduit de façon plus importante l'épaisseur des parois que pour la fraction longue moins grossière (A). Toutefois, la consistance et le nombre de stades de raffinage ont peu d'effet sur le développement des fines. En fait, la majorité des fines primaires est extraite des fractions longues durant le fractionnement. Pour les fractions qui n'ont pas ou qui ont peu de fines primaires, l'intensité du raffinage a une influence plus importante sur la longueur des fibres que sur la réduction en épaisseur des parois cellulaires.

La fraction A1 contient la majorité des fines primaires qui contiennent en grande partie des parenchymes et les couches externes. Bien que son VSS soit plus bas, après le raffinage, les fractions reconstruites selon leurs proportions à l'ordre du fractionnement ont un VSS plus haut que celui de la pâte initiale (P). Pendant le raffinage, les fines primaires sont rarement fibrillées et leur présence dans la pâte réduit le développement des fines entières. Cela est probablement l'un des plus importants avantages du fractionnement, exception faite de la réduction énergétique.

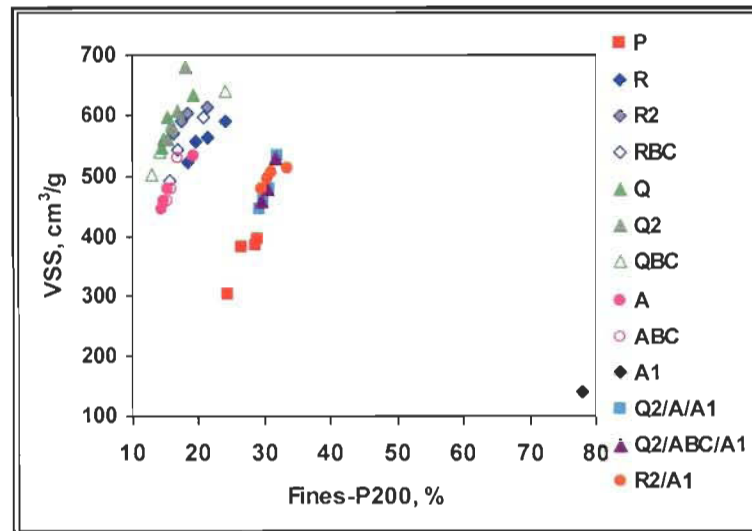


Figure 6.63 VSS en fonction du % des fines

- A1 : Fraction A1 (non raffinée)
 R2/A1 : Mélange des pâtes R2 et A1 après raffinage
 Q2/A/A1 : Mélange des pâtes Q2, A et A1 après raffinage
 Q2/ABC/A1 : Mélange des pâtes Q2, ABC et A1 après raffinage

Après le fractionnement, la fraction de fibres longues a peu de fines primaires et produit plus de fines fibrillaires dans P200 que la pâte P raffinée sans fractionnement. Ces résultats étant plus subjectifs qu'objectifs, nous les avons regroupés à l'Annexe A. Ceci est probablement dû à l'élimination des fines primaires qui facilite le contact inter-fibres à l'intérieur du raffineur et permet un meilleur développement des fibres et des fines. Dans la structure du papier, les fines contribuent au coefficient de diffusion de la lumière ainsi qu'à la capacité de liaisons fibre-à-fibre. Le raffinage des fractions après fractionnement a donc le potentiel de développer les propriétés des fractions, augmentant la qualité de la pâte entière, tout en préservant les fines primaires, ce qui apporte un meilleur pouvoir de diffusion de la lumière aux pâtes.

6.3.3 Propriétés des papiers

6.3.3.1 Papier fabriqué à partir des fractions individuelles

6.3.3.1.1 Propriétés physiques

6.3.3.1.1.1 Densité

Le fractionnement sépare les fines primaires des fractions longues et apporte une diminution de la teneur en fines après le raffinage (Figure 6.63), ce qui diminue la densité des papiers fabriqués à partir des fractions longues par rapport au papier fabriqués à partir de la pâte P sans fractionnement (Figure 6.64). Le papier fabriqué à partir des fibres de la pâte A est plus dense que celui préparé avec les fibres de la pâte Q, car la fraction Q est plus grossière que celle de la pâte A. Pour cette raison, la densité du papier fabriqué de cette fraction (A) est plus haute.

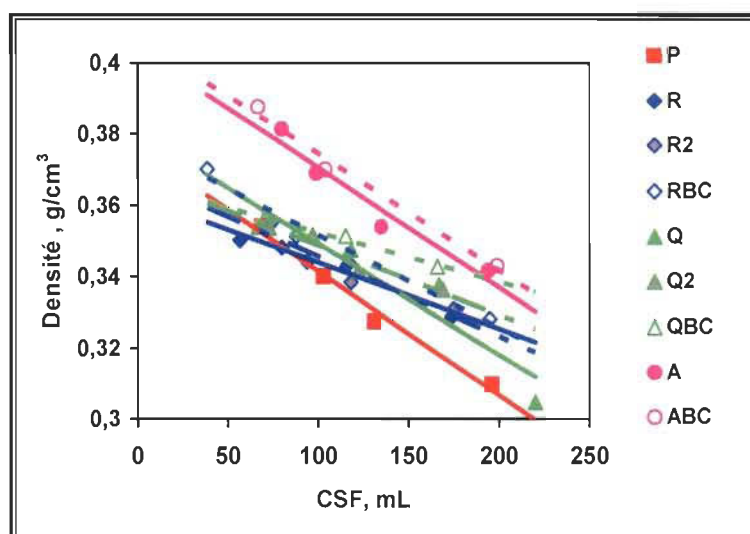


Figure 6.64 Densité en fonction du CSF

Étant donné que le raffinage à basse consistance produit un effet plus intensif sur le raccourcissement des fibres et produit plus de fibres courtes, et que les fibres courtes remplissent le réseau des fibres longues, cette façon de raffiner aide à augmenter légèrement la densité du papier. De plus, on observe que l'augmentation du nombre de

stades de raffinage n'a pas d'effet sur la densité. En fait, la densité du papier est influencée par les caractéristiques fibreuses, par exemple la présence des fibres longues, des fibres courtes, des fines et des liaisons fibre-à-fibre. On note que l'augmentation du nombre de stades de raffinage conserve mieux les fibres longues et produit moins de fibres courtes et de fines, résultant en une densité du papier moins élevée (Figure 6.28, Figure 6.29).

6.3.3.1.1.2 Propriétés de résistance

Pour n'importe quelle consistance de raffinage, la pâte Q présente des propriétés physiques du papier meilleures que celles de la pâte A (Figure 6.65, Figure 6.66 et Figure 6.67). Ceci pourrait être dû au fait que la pâte Q a des fibres qui sont comparativement plus longues que celles de la pâte A. Au cours du raffinage, elle produit plus de fibrillation, tout en augmentant son potentiel de liaison. Comme conséquence, à un CSF donné, elle possède des propriétés supérieures à celles de la fraction moins grossière (A). La pâte R possède également une longueur des fibres élevée et produit plus de fibrillation lors du raffinage, résultant en des propriétés papetières supérieures. Le fractionnement retire la fraction courte (les fibres courtes et les fines) permettant d'appliquer l'énergie de façon plus efficace aux fibres plus longues et contribue à les développer davantage.

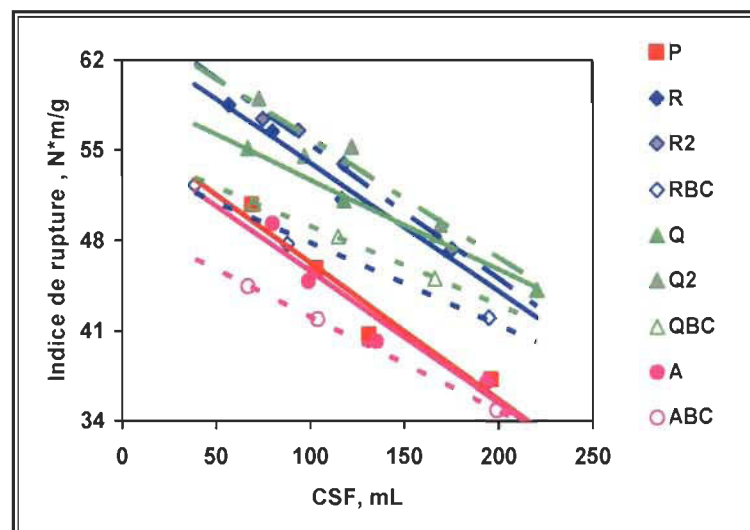


Figure 6.65 Indice de rupture en fonction du CSF

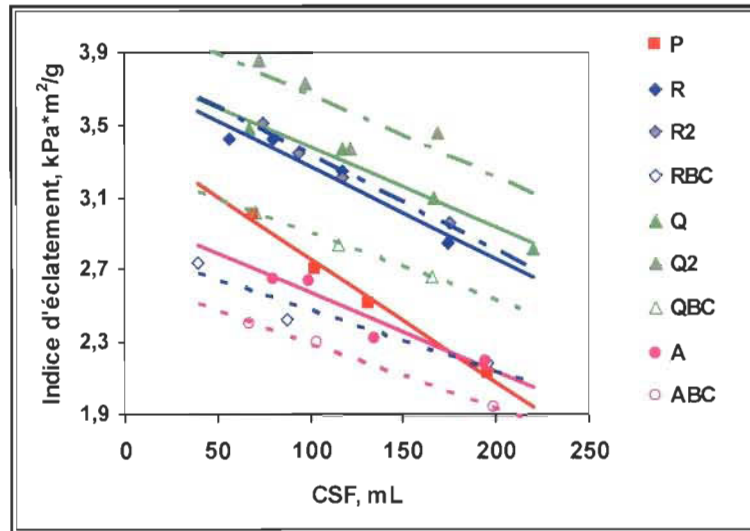


Figure 6.66 Indice d'éclatement en fonction du CSF

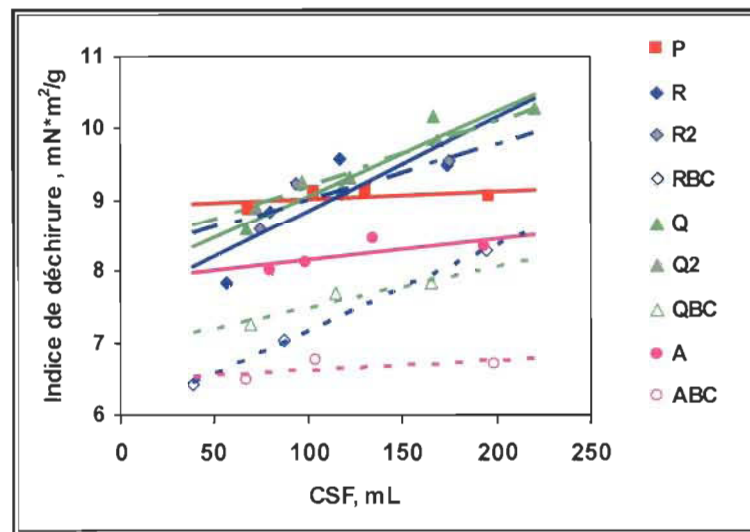


Figure 6.67 Indice de déchirure en fonction du CSF

Le raffinage à haute consistance produit toujours des propriétés physiques supérieures par rapport au raffinage à basse consistance. Ceci suggère que le raffinage à basse consistance ne semble pas être un bon choix. Cependant, pour la fraction A, la consistance du raffinage influence plus l'indice de déchirure que l'indice de rupture (Figure 6.68). C'est-à-dire que le raffinage développe l'indice de rupture mais maintient moins aisément un bon indice de déchirure. Comme la demande d'énergie dans le cas du raffinage à basse consistance est comparativement plus faible, l'utilisation de ce procédé

pour raffiner la fraction moins grossière (A) est intéressante sous la prémisses de ne pas perdre des propriétés papetières lors de la reconstruction des feuilles de papier.

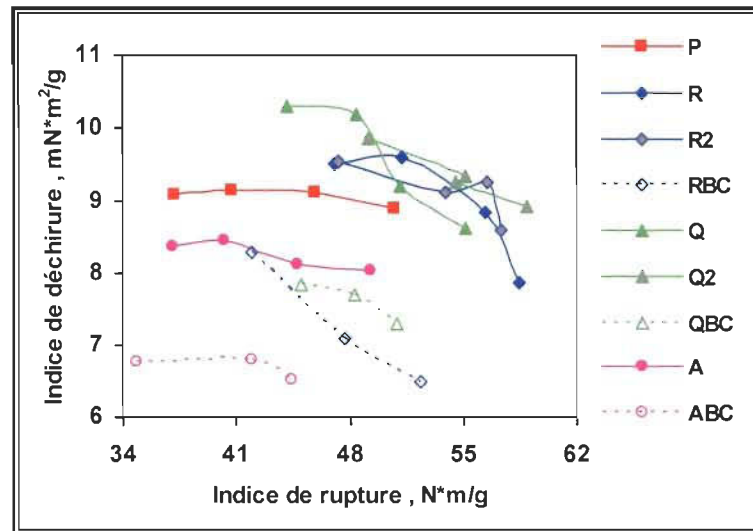


Figure 6.68 Indice de déchirure en fonction de l'indice de rupture

6.3.3.1.2 Propriétés optiques

6.3.3.1.2.1 Coefficient de diffusion de la lumière

Les propriétés optiques du papier sont influencées fortement par la surface spécifique des fines et celle des autres fractions d'une pâte [145]. La quantité ainsi que la qualité des fines influencent de façon considérable le coefficient de diffusion de la lumière du papier [138]. Les fines primaires et secondaires ont des structures physiques et chimiques différentes [146, 147], contribuant différemment au coefficient de diffusion de la lumière. Par conséquent, le raffinage après fractionnement a un effet important sur ce coefficient tel que démontré à la Figure 6.69.

Durant le raffinage à basse consistance, l'entrefer entre les plaques de raffineur est plus étroit, ce qui produit plus de fines, augmentant le coefficient de diffusion de la lumière du papier [148].

De plus, à un CSF donné, en comparaison avec les autres fractions (R et Q), la fraction A obtient un coefficient de diffusion de la lumière relativement plus élevé; pour n'importe

quelle consistance de raffinage. En fait, au cours du raffinage, les fines provenant de A contiennent plus de fines primaires (bas VSS) par rapport à celles de R et de Q, contribuant à l'augmentation du coefficient de diffusion de la lumière de la feuille. Une bonne part des fines non séparées durant le fractionnement initial se retrouvent en effet dans cette fraction.

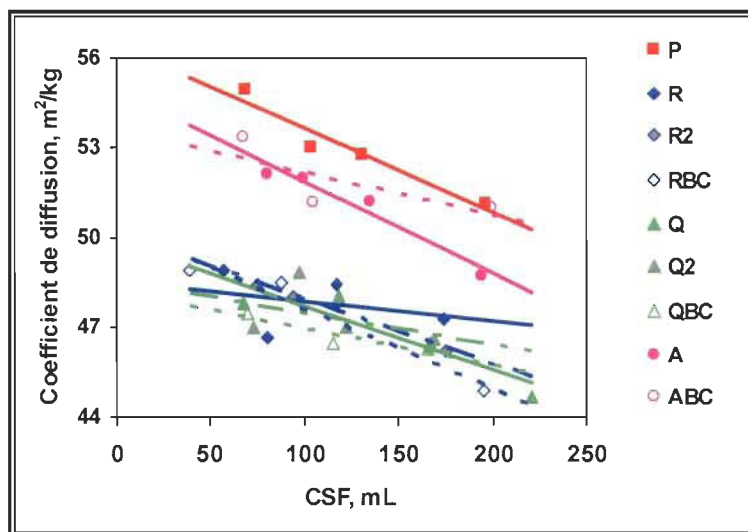


Figure 6.69 Coefficient de diffusion de la lumière en fonction du CSF

Le développement de l'indice de rupture (capacité de liaison) et du coefficient de diffusion sont tous deux reliés au développement de la surface spécifique des fibres et à la présence de fines (Figure 6.70). La teneur en fines et le VSS des fines ne présentent pas de différence après un raffinage sélectif des fractions. La pâte R ayant un peu plus de fines primaires, elle démontre un léger avantage au niveau du coefficient de diffusion pour un même indice de rupture. L'intensité du raffinage a un effet significatif sur le développement des propriétés des fibres, mais a un moindre effet sur la quantité des fines et le développement de leur surface spécifique.

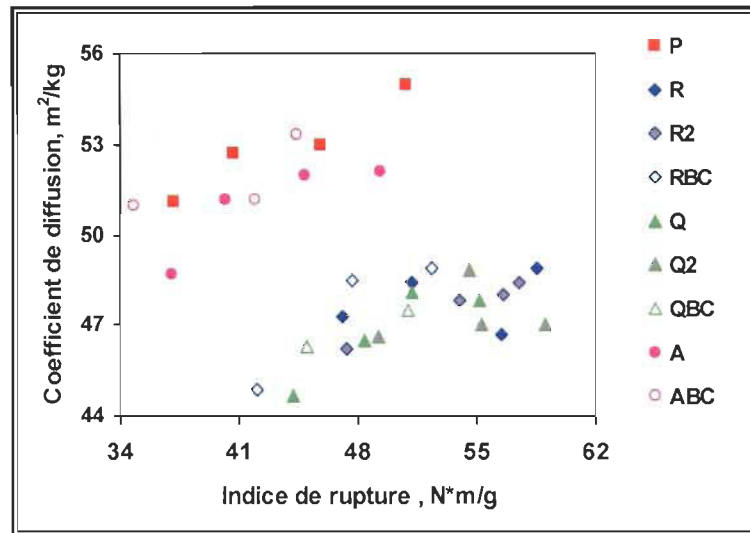


Figure 6.70 Coefficient de diffusion en fonction de l'indice de rupture

6.3.3.2 Papier à partir de mélanges des fractions

Le but du raffinage sélectif des fractions est de tirer les meilleures propriétés papetières possible à un coût énergétique minimum. Afin de réaliser cette possibilité, nous avons fait des recombinaisons (ou mélanges) des fractions selon leurs proportions après le fractionnement et comparé leurs propriétés papetières avec celles de la pâte initiale (P).

Les fractions R, Q et A se comportent différemment lors du raffinage séparé. Les fractions R et Q, toutes deux ayant des fibres longues, ont toujours des propriétés mécaniques supérieures à celles de la pâte A qui contient peu de fibres longues. Mais, lorsqu'elles sont raffinées à basse consistance, les propriétés mécaniques du papier sont souvent plus faibles. En raison de la perte des propriétés mécaniques, le raffinage à basse consistance n'est pas adapté pour ces fractions dans les conditions prévalant dans cette étude. Toutefois, le raffinage à haute ou à basse consistance a moins d'influence sur les propriétés de la fraction A. Le développement des propriétés de la pâte reconstruite est par conséquent dépendant du raffinage employé sur les fractions obtenues du fractionnement. Afin de maintenir un meilleur indice de rupture, un raffinage à haute consistance en deux stades est recommandé pour raffiner les fractions R et Q, tandis que

la fraction A peut être raffinée soit à haute ou à basse consistance en un stade de raffinage.

La Figure 6.71 présente la différence de densité entre le papier fait à partir de mélanges des fractions raffinées et celui de la pâte raffinée sans fractionnement. La reconstruction de la fraction longue R raffinée à haute consistance en deux stades avec la fraction courte A1 (sans raffinage) apporte une augmentation de densité, donc une consolidation et une meilleure capacité de liaisons fibre-à-fibre par rapport à la pâte (P) sans fractionnement mais raffinée à haute consistance en un stade. Le raffinage sélectif de la fraction R a donc le potentiel de développer la capacité de liaisons fibre-à-fibre de la pâte entière. Dans le cas où un meilleur bouffant est recherché, ceci représentera cependant un inconvénient.

Pour sa part, le papier fabriqué de la fraction longue plus grossière Q (raffinée à haute consistance en deux stades), de la fraction longue moins grossière A (raffinée à haute consistance en un stade) et de la fraction courte A1 (sans raffinage) ne présente pas de différence en terme de densité. Le raffinage sélectif des fractions longues plus grossières et celles moins grossières obtenues d'une fraction longue avec un fractionnement ne montre pas d'avantage au niveau de la capacité de liaisons fibre-à-fibres de la pâte entière, mais permet de maintenir le bouffant par rapport au papier fait sans fractionnement.

Des propriétés des papiers obtenus à partir des fractions raffinées sont présentées au Tableau 6.7. On constate que le raffinage sélectif réduit la CES de façon significative et augmente le coefficient de diffusion de la pâte entière, mais a moins d'effet sur l'augmentation des propriétés mécaniques. Dans le cas du raffinage après les deux premiers tamis à trous, on peut réduire de 28% la CES, sans perdre l'indice de rupture et, augmenter de 9,1% la densité, de 14% l'absorption d'énergie à la rupture (AER) et de 5,2% le coefficient de diffusion de la lumière par rapport à la pâte raffinées sans fractionnement (P). Dans le cas du raffinage sélectif après les quatre tamis, on peut réduire la CES, augmenter le coefficient de diffusion de la lumière mais en sacrifiant un peu de propriétés mécaniques. On perd environ 5,4% en indice de rupture pour le

raffinage à haute consistance, RHC, 8,5% pour le raffinage à basse consistance, RBC et 3% en indice de déchirure, mais on réduit la CES d'environ 29% pour RHC et de 44% pour RBC.

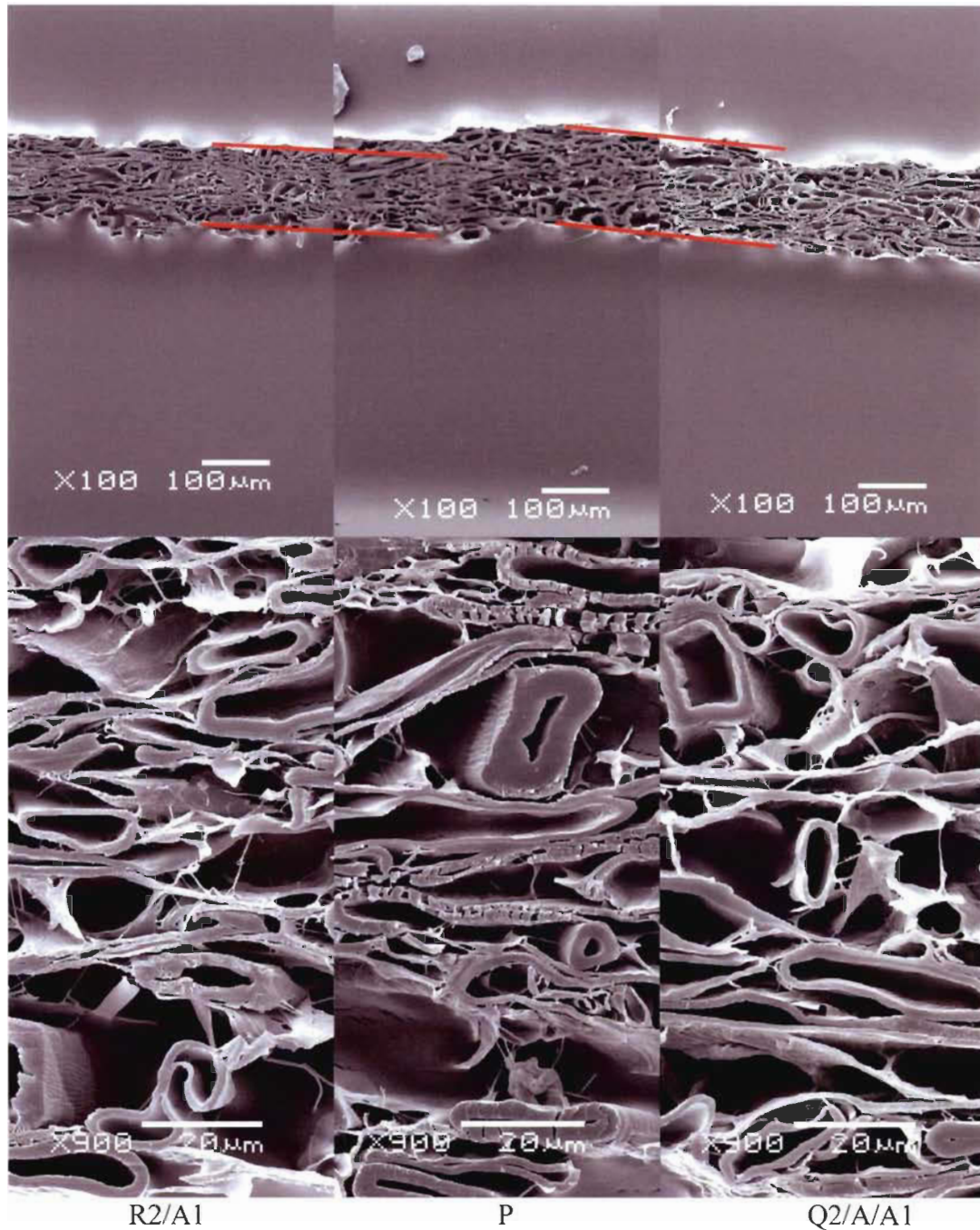


Figure 6.71 Coupes transversales des papiers reconstruits (R2/A1 et Q2/A/A1) et celui du P raffinée, CSF = 100 mL

Tableau 6.7 Les meilleures propriétés des papiers reconstruits et ceux raffinés sans fractionnement (CSF=100mL)

Pâte \ Propriétés	P	R2/A1	Q2/ A/A1	Q2/ABC/A1
Énergie spécifique*, MJ/kg	7,40	5,32 (-28%)	5,03 (-29%)	4,18 (-44%)
Densité, g/cm ³	0,33	0,36 (9,1%)	0,34 (3,0%)	0,32 (-3,0%)
Indice de rupture, N*m/g	45,6	45,7 (0,1%)	43,2 (-5,4%)	41,7 (-8,5%)
AER, J/m ²	38,6	44,0 (14%)	40,5 (5,1%)	38,7 (0,5%)
Indice de déchirure, mN*m ² /g	9,08	9,09 (0,0 %)	9,15 (0,7%)	8,84 (-2,7%)
Indice d'éclatement, kPa*m ² /g	2,72	2,88 (5,7%)	2,70 (-0,9%)	2,51 (-7,8%)
Coefficient de diffusion, m ² /kg	53,5	56,2 (5,2%)	58,4 (9,2%)	57,6 (7,8%)

* : Valeur au deuxième stade, énergie consommée au premier stade n'est pas incluse

6.4 Résumé sur les essais finaux

- Le fractionnement à l'aide d'un panier à trous lisses de 0,25 mm nous permet de fractionner une PTM de premier stade en une fraction de fibres longues (R) et une fraction de fibres courtes (A1). De façon générale, ces fractions correspondent respectivement aux fractions Bauer McNett R48 (fibres retenues sur le tamis de 48 mailles) et P48 (fibres traversant le tamis de 48 mailles).
- Le panier à fentes de 0,10 mm sépare les éléments fibreux selon leur grosseur. Avec ce panier, on obtient à partir de la fraction R une fraction de fibres longues et grossières (Q) et une autre fraction de fibres longues moins grossières (A). Au niveau de la morphologie, les fibres R et Q sont semblables, ce qui pourrait signifier que la pâte Q retient des rejets (bûchettes) tandis que la pâte A se compose des fibres longues bien séparées. On observe également que la fraction Q possède plus de BE par rapport à la pâte A.

- La fraction de fibres longues (R) et la fraction de fibres longues et plus grossières (Q) se comportent de façon semblable au cours du raffinage séparé car elles contiennent des proportions similaires en fibres longues. Cependant, les fractions Q et A se comportent différemment lorsqu'elles sont raffinées séparément et produisent des propriétés papetières dissemblables.
- La fraction Q (plus grossière) possède un haut potentiel à développer ses propriétés et est favorable au développement de la capacité de liaisons par rapport à la fraction A (moins grossière), mais elle consomme plus d'énergie spécifique.
- Le raffinage à basse consistance demande toujours moins d'énergie que le raffinage à haute consistance. L'intensité du raffinage ou la consistance de raffinage a un effet significatif sur le développement des fibres. D'autre part, elle a un moindre effet sur le développement des fines.
- Au cours du raffinage séparé, le raffinage à haute ou à basse consistance a un effet significatif sur les propriétés de Q et R mais a moins d'influence sur A. Afin de maintenir de meilleures propriétés des papiers reconstruits à partir des fractions, un raffinage à haute consistance en deux stades de R et Q est recommandé, tandis que la fraction A peut être raffinée soit à haute ou à basse consistance en un stade de raffinage.
- Le raffinage sélectif des fractions après fractionnement nous permet de réduire la CES de façon significative et d'augmenter le coefficient de diffusion de la pâte entière, mais a moins d'effet sur l'augmentation des propriétés mécaniques. La CES peut être réduite de 28%, le coefficient de diffusion de la lumière peut être augmenté de 5,2% (Figure 6.72), sans perte des propriétés mécaniques (Figure 6.73) dans le cas du raffinage sélectif après les deux premiers tamis à trous. Dans le cas du raffinage sélectif après les quatre tamis, une réduction d'environ 29% (RHC) et 44% (RBC) de la CES est possible, mais il y a risque de sacrifice au niveau des propriétés physiques.

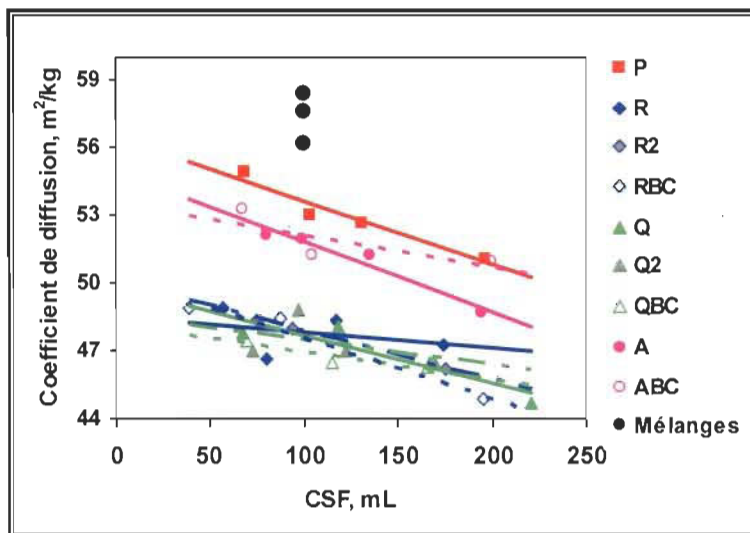


Figure 6.72 Coefficient de diffusion de la lumière en fonction du CSF, incluant les trois meilleurs mélanges

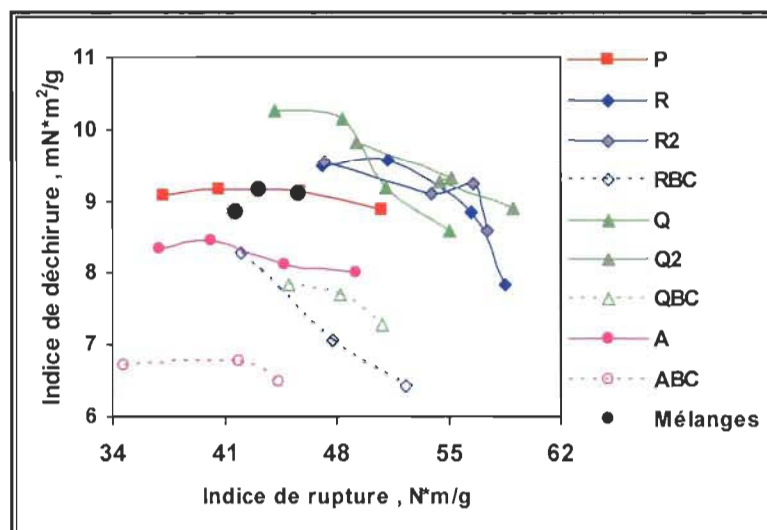


Figure 6.73 Indice de déchirure en fonction de l'indice de rupture, incluant les trois meilleurs mélanges

- Le raffinage sélectif peut être arrêté au stade où on peut acquérir la fraction R. Ceci est plus économique et pratique.

Chapitre 7 - Conclusions

Cette recherche a permis d'étudier le comportement des fibres de fractions obtenues par fractionnement d'une pâte thermomécanique de premier stade et raffinées séparément de façon plus adaptée à chaque fraction. Elle nous a permis de vérifier si un raffinage sélectif des fibres est plus efficace qu'un raffinage conventionnel de la pâte sans fractionnement. Nous avons pu ainsi déterminer la meilleure façon de raffiner des fibres morphologiquement différentes pour obtenir un meilleur produit à un coût énergétique minimal.

En vue de réaliser un raffinage sélectif, une PTM obtenue après le premier stade de raffinage a été fractionnée selon la morphologie des fibres (longueur et grosseur des particules). Ensuite, un raffinage a été exécuté sur chaque fraction obtenue. Dans cette recherche, le fractionnement a été réalisé par des tamis sous pression. Ceci a permis de fractionner les fibres selon leur longueur (panier à trous) ou leur grosseur ou leur diamètre (panier à fentes). Le raffinage a été effectué à pression atmosphérique, en utilisant une unité pilote de raffinage, à basse consistance et à haute consistance en un et deux stades. Ces trois catégories de conditions de raffinage nous ont permis de voir si l'intensité a un impact différent dépendamment de la fraction ou si l'intensité à utiliser est plutôt uniquement fonction de la matière première et du raffineur lui-même.

Au cours du fractionnement, la dimension des ouvertures des paniers influence certainement le passage des fibres au travers des ouvertures et a un effet significatif en terme de résultat de fractionnement (Tableau 7.1). Lorsque les ouvertures sont petites, la distribution des fibres selon leur morphologie (longueur ou grosseur) dans les rejets et l'accepté est différente, amenant une meilleure efficacité de fractionnement. Par la suite, le raffinage sélectif des fibres est plus efficace. Par contre, de larges ouvertures produisent des fibres distribuées selon une courbe statistique (comme celle de L1 et L2 dans les essais préliminaires) causant une faible efficacité de fractionnement et un raffinage sélectif imparfait. Pour cette raison, durant les essais finaux nous avons utilisé un panier à faibles ouvertures (panier à trous de 0,25mm de diamètre) qui agit avec un

effet barrière empêchant le passage des fibres longues. L'étude en détail du processus de fractionnement a été réalisée par un autre étudiant au doctorat, Alexandre Ferluc, parallèlement à cette thèse. Nous nous sommes concentré sur l'étude du raffinage sélectif des fractions.

Notre recherche permet de conclure que le raffinage sélectif des fibres après fractionnement est plus efficace en terme de consommation d'énergie spécifique. Nous avons obtenu une réduction de 28% de la consommation d'énergie au deuxième stade de raffinage constituant la meilleure façon de raffiner les fibres après fractionnement avec les tamis à trous par rapport au raffinage conventionnel (pâte raffinée sans fractionnement). Dans le cas d'un fractionnement en 4 stades avec deux tamis à fentes en positions tertiaire et quaternaire, l'économie peut atteindre 44%. La différence énergétique est déterminée également par la composition ou la morphologie des fibres raffinées, c'est-à-dire par les caractéristiques intrinsèques des fibres, telles que leur longueur et leur grosseur, donc dépend largement de l'efficacité de fractionnement qui est déterminé par les ouvertures des paniers. Afin de réaliser un raffinage sélectif idéal, la prémisse est de choisir un panier convenable qui pourrait faire un fractionnement plus efficacement.

Tableau 7.1 Relations influencées entre les paramètres des essais et les propriétés des pâtes et papiers

	Ouverture des paniers	Efficacité du fractionnement	Raffinage sélectif
Efficacité du fractionnement	++		
Raffinage sélectif		++	
CES			++
Développement des fibres et des fines*			+
Indice de rupture			pas d'effet
Indice de déchirure			pas d'effet
Absorption d'énergie à la rupture			+
Indice d'éclatement			+
Coefficient de diffusion			+

* : au cours du raffinage séparé

+: effet positif

Au cours du raffinage séparé, l'élimination des fines primaires facilite le contact fibre-à-fibre des fibres longues à l'intérieur du raffineur et permet un meilleur développement des fibres et des fines. Quoique le raffinage sélectif soit profitable pour développer les fibres au cours du raffinage séparé, il n'améliore pas les indices de rupture et de déchirure de la pâte entière par rapport au raffinage de la pâte sans fractionnement. Mais, pour le fractionnement avec les deux tamis à trous, il peut augmenter l'absorption d'énergie à la rupture, l'indice d'éclatement et le coefficient de diffusion de la lumière de la pâte entière, de 14%, 5,7% et 5,2% respectivement par rapport au raffinage sans fractionnement.

La consistance et le nombre de stades de raffinage ont également un effet important sur le raffinage, influençant les propriétés des pâtes et papiers (Tableau 7.2). L'utilisation d'une basse consistance a un effet très significatif sur la consommation d'énergie spécifique. Il consomme de 3 à 5 fois moins d'énergie que le raffinage à haute consistance lorsque le raffinage sélectif est utilisé. Toutefois, le raffinage à basse consistance s'accompagne aussi d'un raccourcissement de la longueur des fibres, produisant plus de fibres courtes et réduisant certaines propriétés des fibres. Il en résulte moins de perte d'épaisseur des parois cellulaires, de masse linéique et de fibrillation externe. Le raffinage enlève légèrement la couche S_1 et expose la couche S_2 souvent près des ponctuations, affaiblissant les fibres et les propriétés mécaniques des papiers. Le raffinage à basse consistance a un effet plus marqué sur le raccourcissement des fibres et produit donc plus de fibres courtes, principalement dû à un entrefer faible et une intensité élevée. Comme les fibres courtes remplissent le réseau de fibres longues, cette façon de raffiner peut augmenter légèrement la densité du papier, favorisant les liens inter-fibres mais réduisant le bouffant du papier, ce qui peut être un inconvénient pour certains produits.

Bien que le raffinage à haute consistance demande plus d'énergie que le raffinage à basse consistance, il préserve mieux la longueur des fibres et permet de conserver les propriétés des fibres elles-mêmes. Au cours du raffinage, l'épaisseur des parois et la masse linéique des fibres diminuent, ce qui rend les fibres plus flexibles. L'enlèvement

de la couche S_1 et l'exposition de la couche S_2 se produisent fréquemment. Tous ces phénomènes confèrent plus de fibrillation externe aux fibres et le raffinage développe plus les propriétés de la surface des fibres augmentant leur capacité des liaisons fibre-à-fibre. Après le raffinage, les papiers possèdent de bonnes propriétés telles que l'indice de rupture, l'indice d'éclatement et l'indice de déchirure.

L'augmentation du nombre de stades de raffinage permet de préserver la longueur des fibres et conserve mieux les propriétés des fibres. Elle entraîne une perte plus importante de l'épaisseur des parois et de la masse linéique des fibres par rapport au raffinage en un stade. L'augmentation du nombre de stades de raffinage amène un meilleur développement de la surface des fibres produisant plus de fibrillation externe et conférant une plus haute capacité de liaisons fibre-à-fibre et, produit des pâtes et papiers plus forts. La densité du papier est influencée par les caractéristiques fibreuses, telles que la présence de fibres longues, de fibres courtes et de fines. L'augmentation du nombre de stades de raffinage conserve mieux les fibres longues et produit moins de fibres courtes et de fines. Il en résulte peu d'impact sur la densité du papier mais plus d'énergie spécifique est requise pour le raffinage.

Tableau 7.2 Relations influencées entre les paramètres des essais et les propriétés des pâtes et papiers

	Consistance de raffinage		Nombre de stades de raffinage
	Basse	Haute	
CES	++	-	--
Longueur des fibres	--	+	++
Épaisseur des parois cellulaire	moins d'effet	-	--
Masse linéique	moins d'effet	-	--
Fibrillation externe des fibres	-	+	++
Densité du papier	effet léger	-	peu d'effet
Propriétés physiques du papier	--	+	++
Qualité et quantité des fines*	peu d'effet	peu d'effet	peu d'effet
Coefficient de diffusion*	peu d'effet	peu d'effet	peu d'effet

*: au cours du raffinage séparé

+: effet positif

-: effet négatif

La consistance et le nombre de stades de raffinage ont un effet évident sur la consommation d'énergie spécifique, la coupe des fibres, l'épaisseur des parois, la masse linéique, la fibrillation externe des fibres et la qualité du papier. Cependant au cours du raffinage séparé, à cause de l'élimination des fines primaires par le fractionnement, la consistance et le nombre de stades de raffinage ont peu d'influence sur la qualité et la quantité de fines produites au cours du raffinage séparé, donc influence peu le coefficient de diffusion de la lumière. Comme les fines primaires sont séparées et non raffinées par la suite, il en résulte une augmentation de l'opacité et du coefficient de diffusion de la lumière car on évite de réduire la taille des particules fines. Ces fines n'ont pas de potentiel de développement ou de fibrillation, donc leur enlèvement n'est que totalement bénéfique.

7.1 Contribution à l'avancement des connaissances

Cette recherche nous a permis de mettre en évidence les bénéfices du raffinage sélectif, notamment en regard de la réduction de la consommation d'énergie spécifique. Quoique les résultats présentés soient obtenus par une expérimentation en usine pilote, ils offrent tout de même une référence pour la mise à l'échelle industrielle. Dans cette recherche, 28% d'énergie au deuxième stade de raffinage est économisée avec le fractionnement en deux stades suivi d'un raffinage sélectif, ce qui correspond à une réduction de 14% de l'énergie totale pour l'usine Papier Masson, sans perte de propriétés. Étant donné la portion des coûts de production liée à l'énergie de raffinage, cela représente une avancée majeure.

La recherche permet également d'acquérir de meilleures connaissances du comportement des fibres (fibres plus longues, plus grossières et moins grossières) lors du raffinage. Ces connaissances peuvent conduire à une amélioration technologique du procédé et une nouvelle stratégie de raffinage plus efficace. Le raffinage sélectif s'avérera aussi une meilleure façon d'utiliser les essences de bois actuellement moins utilisées en appliquant un traitement plus adapté à ces types de fibres. En somme, la recherche amènera une nouvelle perspective pour l'industrie papetière.

7.2 Recommandation et perspective

L'intention originelle de la recherche était de séparer les fibres du BP et du BE, puis d'effectuer un raffinage sélectif sur ces deux types de fibres morphologiquement très différentes. Toutefois dans cette étude, le fractionnement réalisé a plutôt séparé les fibres de la pâte initiale selon leur longueur et leur grosseur. La densité des fibres du BP étant relativement basse par rapport à celles du BE, l'hydrocyclone devrait pouvoir fractionner les fibres selon cette propriété bien que l'équipement disponible n'a pas permis de le démontrer. L'optimisation du processus de fractionnement en utilisant les hydrocyclones pourrait être considérée si un équipement plus adéquat était disponible.

L'optimisation du raffinage à basse consistance devrait également être considérée. Dans cette étude, une unité pilote de raffinage CD 300 a été utilisée pour le raffinage à basse consistance. Du point de vue de l'industrie, le raffinage à basse consistance s'effectue à l'aide d'un raffineur conique de type Conflo ou un raffineur double-disques avec un patron de plaques adapté à ce type de raffinage. Il y aurait donc lieu de faire une optimisation du raffinage à basse consistance en utilisant un raffineur plus adapté à cette technologie. Cela pourrait permettre une plus grande économie d'énergie si l'on parvient à contrôler l'effet de coupe sur les fibres en trouvant une meilleure intensité. Il serait sans doute possible dans ce cas de maintenir la qualité des pâtes et papiers.

Le raffinage sélectif à haute consistance en deux stades produit de meilleures propriétés des pâtes et papiers que celui en un stade. Cependant, deux stades de raffinage augmentent la consommation d'énergie. Il serait donc intéressant d'optimiser les plaques de raffineur durant le raffinage sélectif en un stade pour aussi mieux contrôler l'intensité et produire des propriétés des pâtes et papiers comparables à celles obtenues du raffinage en deux stades.

Bibliographie

1. Smook, G. A., "Handbook for Pulp & Paper Technologists", Second Edition, Angus Wilde Publications, USA, Chapter 2: 9-19 (1992).
2. Mark, R. E., Habeger, Jr., C.C., Borch, J. and Bruce Lyne, M., "Handbook of Physical Testing of Paper", Volume 1, Second Edition, Marcel Dekker, New York, USA, Part 3-13: 700-725 (2002).
3. Conseil Canadien des Ministres des forêts, "Rapport 2005 sur l'Approvisionnement en Bois au Canada", http://nfdp.ccfm.org/compendium/harvest/2005_f.php
4. Brill, J. W., "Effects on Wood and Chip Quality on TMP Properties", International Mechanical Pulping Conference, Stockholm, Sweden: 153-161 (1985).
5. Corson, S. R., "Wood Characteristics Influence Pine TMP Quality", Tappi Journal, 74(11): 135-146 (1991).
6. Rudie, A.W., Morra, J., St. Laurent, J.M. and Hickey, K.L., "The Influences of Wood and Fiber Properties on Mechanical Pulping", Tappi Journal, 77(6): 86-90 (1994).
7. Jackson, M., "The Interaction of Wood Species and Wood Quality with the TMP process - A Review", Proceedings of Tappi, Pulping Conference, Book 1, Tappi Press: 455-465 (1998).
8. Hatton, J. V. and Johal, S. S., "Mechanical Pulping of Commercial Thinnings of Six Softwoods from New Brunswick", Pulp and Paper Canada, 97(12): 93-97 (1996).
9. Koran, Z., "Thermomechanical Pulp Properties of White Birch", Wood and Fiber Science, 27(2): 98-104 (1995).

-
10. Law, K. and Valade, J. L., "Fibre Morphology and its Importance to the Paper Properties of Hardwood Chemithermomechanical Pulps", Proceedings of International Symposium on Emerging Technologies of Pulping & Papermaking of Fast-Growing Wood, Guangzhou, China: 66-74 (1998).
 11. Sundholm, J., "Mechanical Pulping", Papermaking Science and Technology, Book 5, Chapter 5: 66-104 (1999).
 12. Panshin, A. J. and De Zeeuw, C., "Structure, Identification, Uses and Properties of the Commercial Woods of the United States and Canada", Textbook of Wood Technology, Volume 1, Third Edition, McGraw-Hill, New York, 705 pages (1970).
 13. Rowell, R. M., "Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites", CRC Press, USA, Chapter 2: 9-33 (2005).
 14. Fengel, D. and Wegener, G., "Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions", W. de Gruyter, New York: 7-25 (1984).
 15. Hatvani, T. G., Evans, R., Kibblewhite, R. P., and Parker, I. H., "Relationships between Tracheid and Kraft Pulp Fibre Transverse Dimensions", 53rd Appita Annual Conference Proceeding, Rotura, New Zealand : 87-94 (1999).
 16. Boyd, J. D., "Relationships between Fibre Morphology, Growth Strains and Physical Properties", Australian Forest Research, 10(4): 337-360 (1980).
 17. Wimmer, R., "Intra-annual Cellular Characteristics and Their Implications for Modeling Softwood Density", Wood Fiber Science, 27(4): 413-420 (1995).
 18. Lai, Y.-Z. and Iwamida, T., "Effects of Chemical Treatments on Ultra-High-Yield Pulping 1. Fiber Separation", Wood Science and Technology, 27: 195-203 (1993).

-
19. Law, K.N., Valade, J.L., and Daneault, C., "Chemimechanical Pulping of Tamarack, (2) Effects of pH and Sodium Sulfitite", *Cellulose Chemistry and Technology*, 23(6): 733-741(1989).
 20. Jones, T.G., and Richardson, J.D., "Relationships between Wood and Chemimechanical Pulping Properties of New Zealand Grown Eucalyptus Nitens Trees", *Appita Journal*, 52(1): 51-56 (1999).
 21. Murton, K.D., Richardson, J.D., Corson, S.R., and Duffy, G.G., 2001. "TMP Refining of Radiata Pine Earlywood and Laterwood Fibres", *Proceedings of International Mechanical Pulping Conference, Helsinki, Finland*: 361-371 (2001).
 22. Paavilainen, L., "The Possibility of Fractionating Softwood Sulfate Pulp According to Cell Thickness", *Appita Journal*, 45(5): 319-326 (1992).
 23. Paavilainen, L., "Influence of Fibre Morphology and Processing on the Paper Making Potential of Softwood Sulphate Pulp Fibres", *Proceedings of Tappi Pulping Conference, Book 2*: 857-867 (1994).
 24. Koljonen, L. and Heikkurinen, A., "Delamination of Stiff Fibres", *Proceedings of International Mechanical Pulping Conference, Ottawa, Canada*: 79-84 (1995).
 25. Stationwala, M. I., Mathieu, J. and Karnis, A., "On the Interaction of Wood and Mechanical Pulping Equipment. Part I: Fibre Development and Generation of Fines", *Journal of Pulp and Paper Science*, 22(5): J155-J160 (1996).
 26. Tyrväinen, J., "Wood and Fibre Properties of Norway Spruce and its Suitability for Thermomechanical Pulping", *Finnish Society of Forest Science*: 8-9 (1995).
 27. Association des Industries Forestières du Québec, "L'industrie des Pâtes et Papiers", *Le Papetier*, 37(1): 4-5 (2001).

-
28. Eöhmer, E., "The Production and Use of Mechanical and Chemimechanical Pulps", Proceedings of International Mechanical Pulping Conference: 5-18 (1985).
 29. Leask, R.A., and Kocurek, M.J., "Mechanical Pulping", Pulp and Paper Manufacture, Third Edition, Joint Textbook Committee of the Paper Industry, Volume 2: 1-17 (1987).
 30. Law, K. and Valade, J. L., "Fibre Morphology and its Importance to the Paper Properties of Hardwood Chemithermomechanical Pulps", Proceedings of International Symposium on Emerging Technologies of Pulping & Papermaking of Fast-Growing Wood, Guangzhou, China: 66-74 (1998).
 31. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction du développement de l'industrie, "Ressources et Industries Forestières – Édition Complète", Portrait Statistique, Édition 2005-2006. http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/stat_edition_complete/complete.pdf .
 32. Johal, S. S. and Hatton, J. V., "Chemimechanical Pulps from Hardwood/Softwood Chip Mixtures", Pulp and Paper Canada, 90(3): 90-98 (1989).
 33. Johal, S. S. and Hatton, J. V., "Chemi-thermomechanical and Thermomechanical Pulps from Trembling Aspen/White Spruce Chip Mixtures", Pulp and Paper Canada, 93(12): 112-117 (1992).
 34. Valade, J. L., Law, K. N. and Lanouette, R., "Upgrading Softwood CTMP by the Use of Hardwood", Pulp and Paper Canada, 94(4): 28-36 (1993).
 35. Wu, M., "Production of Newsprint Furnish from Mixtures of White Birch and Black Spruce", Thèse de doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, 204 pages (2003).

-
36. Zha, Q., "Mise en Pâte à Haut Rendement d'un Mélange Incorporant des Copeaux de Mélèze Hybride et de Bouleau", Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, 76 pages (2005).
 37. Law, K.N., Lapointe, M. and Valade, J.L., "Chemithermomechanical Pulping of Mixtures of Different Species of Hardwoods", *Tappi Journal*, 69(7): 80-83 (1986).
 38. Lanouette, R., Valade, J.L. and Thibault, J., "Optimization of an Alkaline Peroxide Interstage Treatment of Jack Pine (*Pinus banksiana* Lamb.) Using a D-Optimal Design", *the Canadian Journal of Chemical Engineering*, 75(1): 70-78 (1997).
 39. Lanouette, R., Thibault, J. and Valade, J.L., "High-yield Pulping of Jack Pine", *Tappi Journal*, 81(10): 143-149 (1998).
 40. Frazier, W.C. and Williams, G.J., "Reduction of Specific Energy in Mechanical Pulping by Axial Precompression of Wood", *Pulp and Paper Canada*, 83(6): 87-92 (1982).
 41. Puri, V.P. and Higging, H.G., "Possibilities for Reduction of Energy Requirements During Chip Refining", *Appita Journal*, 37(6): 496-501 (1984).
 42. Law, K.N., Lanouette, R. and Yang, K.C., "Effect of Compression on Refining Energy and Pulp Properties of Birch TMP", *Appita Journal*, 53(4): 296-299 (2000).
 43. Law, K.N., Lanouette, R. and Yang, K.C., "A New Approach to Mechanical Pulping – Pretreatment of Chips by Normal-to-grain Compression Prior Refining", *Tappi Journal*, 89(9): 1-12 (2000).
 44. Yan, J. F. and Sinkey, J. D., "Selective Screening and Refining: A Negative Answer to Energy Reduction and Pulp Strength Improvement", *Proceedings of Inter-*

-
- national Symposium on: Fundam, Concepts of Refining, Appleton, Wisconsin, the Institute of Chemistry, September: 76-83 (1980).
45. Laurent, J.M., Rudie, A.W., and Shakhmet, A.R., "Mechanical Pulping by Fraction after Low Energy Refining", Proceedings of Tappi Pulping Conference, Atlanta, USA: 95-99 (1993).
 46. Rowell, R. M., "Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites", CRC Press, USA, Chapter 1: 1-5 (2005).
 47. Kocurek, M. J. and Stevens, C. F. B., "Properties of Fibrous Raw Materials and Their Preparation for Pulping", Pulp and Paper Manufacture, Third Edition, Joint Textbook Committee of the Paper Industry, Volume 1:6-9 (1983).
 48. Stenius, P., "Forest Products Chemistry", Papermaking Science and Technology, Book 3, Chapter 1: 12-57 (2000).
 49. [http://www.afocel.fr/English/>
ProcessEtProduitsQualitepapetiereIntraEspeceArbre.htm](http://www.afocel.fr/English/>ProcessEtProduitsQualitepapetiereIntraEspeceArbre.htm)
 50. Larson, A., "Physiological Consideration of Springwood Summerwood Transition in Red Pine", Forest Science, 6: 110-122 (1960).
 51. Little, C.H.A, and Eidt, D.C., "Effects of Abscisic Acid on Bud-break and Transpiration in Woody Species", Nature, 220: 498-499 (1968).
 52. Rudie, A.W., Morra, J., St. Laurent, J.M. and Hickey, K.L., "The Influences of Wood and Fiber Properties in Mechanical Pulping", Proceedings of Tappi Pulping Conference, Book 1: 163-167 (1993).
 53. Fahne, A., "Plant Anatomy", Fourth Edition, Pergamon Press, Oxford, Toronto, 588 pages (1990).

-
54. Wood, J. R. and Karnis. A., "Towards a Linting-free Newsprint Sheet", *Paperi ja Puu*, 10: 660-673 (1977).
 55. Bégin, B. and Amiri, R., "Expérience avec le Peluchage à l'Usine de Bowater Gatineau", *Prétirées du Congrès Francophone du Papier*, Château Frontenac, Québec : 99-105 (2002).
 56. Shallhorn, P. M. and Heintez, H. U., "Hardwood Vessel Picking in the Offset Printing of Uncoated Fine Papers", *Proceedings of International Printing and Graphic Arts Conference*, Halifax, October 17-20 : 147-158 (1994).
 57. Heintez, H. U. and Shallhorn, P. M., "Hardwood Vessel Picking and the Manufacturing Process", *Pulp and Paper Canada*, 96(11): 28-30 (1995).
 58. Heintez, H. U., "The Diagnosis of Hardwood Vessel Picking in offset prints", *Pulp and Paper Canada*, 108(1): 34-38 (2007).
 59. Khristova, P., Kordsachia, O. and Daffalla. S., "Alkaline pulping of Acacia Seyal", *Tropical Science*, 44: 207-215 (2004).
 60. Fengel, D. and Wegener, G., "Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions", W. de Gruyter, New York: 7-25 (1984).
 61. Murton, K.D., Richardson, J.D., Corson, S.R. and Duffy, G.G., "TMP Refining of Radiata Pine Earlywood and Latewood Fibres", *Proceedings of International Mechanical Pulping Conference*, Helsinki, Finland, Book 2: 361-371 (2001).
 62. Huang, F., Lanouette, R. and Law, K., "Effect of Primary Stage Refining Temperature on Fibre and Paper Properties of Jack Pine TMP", *Preprints of PAPTAC 92nd Annual Meeting*, Montreal, Canada, Book A: A421-A426 (2006).

-
63. Rehmat, T., and Branion, R., "Fibre Fractionation in Hydrocyclones", Preprints of 81st Annual Meeting, Technical Section, CPPA, Montreal, Canada, Book B: B105-B125 (1995)
 64. Wakelin, R. F. and Corson, S. R., "TMP Long Fibre Fractionation with Pressure Screens", Proceedings of International Mechanical Pulping Conference, Ottawa, Canada: 257-265 (1995).
 65. Meltzer, F. P., "Fractionation: Basics, Development, and Application", Progress in Paper Recycling, 7(3): 60-66 (May, 1998).
 66. Kure, K. A., Dahlqvist, G., Ekström, J. and Helle, T., "Hydrocyclone Separation, and reject refining of thick-walled mechanical pulp fibres", Nordic Pulp and Paper Research Journal, 14(2): 100-104, 110 (1999).
 67. Park, S., Venditti, R. A., Jameel, H. and Pawlak, J. J., "The Effect of Fibre Properties on Fibre Fractionation Using a Hydrocyclone", Journal of Pulp and Paper Science, 31(3): 132-137 (2005).
 68. Vomhoff, H. and Grundström, K. J., "Fractionation of a Bleached Softwood Pulp and Separate Refining of the Earlywood- and Latewood-Enriched Fractions", Das Papier: T17-T21 (2003).
 69. Reme, P. A., and Johnson, P. O., "Changes Included in Early- and Latewood Fibres by Mechanical Pulp Refining", Nordic Pulp and Paper Research Journal, 14(3):256-262 (1999).
 70. Reme, P. A. and Helle, T., "Quantitative Assessment of Mechanical Fibre Dimensions during Defibration and Fibre Development", Journal of Pulp and Paper Science, 27(1): 1-7 (2001).

-
71. Paavilainen, L., "Influence of Morphological Properties of Softwood Fibres on Sulphate Pulp Fibre and Paper Properties", Proceedings of International Paper Physics Conference: 383-395 (1991).
 72. Eckert, W. F., Masliyah, J. H. and Afacan, A., "Fractionation of Softwood TMP by Flotation", Tappi Journal, 80(5): 210-216 (1997).
 73. Eckert, W. F., Afacan, A. and Masliyah, J. H., "Fractionation of Wood Pulps by Continuous Flotation", Tappi Journal, 83(8): 93 (2000).
 74. Allison, B. J. and Olson, J., "Optimization of Multiple Screening Stages for Fibres Length Fractionation: Two-Stage Case", Journal of Pulp and Paper Science, 26(3): 113-119 (2000).
 75. Olson, J., Roberts, N., Allison, B. and Gooding, R.W., "Fibre Length Fractionation Caused by Pulp Screening", Journal of Pulp and Paper Science, 24 (12): 393-397 (1998).
 76. Khanbaghi, M., Allison, B.J., Olson, J.A. and Backström, J., "A Dynamic Model of Pressure Screen Hydraulics", Journal of Pulp and Paper Science, 27 (4): 124-129 (2001).
 77. Riese, J. W., Spiegelberg, H. L. and Kellenberger, S., "Mechanism of Screening: Dilute Suspension of Stiff Fibres at Normal Incidence", Tappi Journal, 52(5): 895-903 (1969).
 78. Beaulieu, S., Karnis, A., Wild, D. J. and Wood, J. R., "Domtar Installs TMP at Donnacona Newsprint Mill", Pulp and Paper Canada, 78(3): 59-65 (1977).
 79. Wakelin, R. F., "Prediction of Fractionation Efficiency for Pressure Screens", Appita Journal, 50(4): 205-300 (1997).

-
80. Niinimäki, J., Dahl, Q., Hautala, J. and Kuopanportti, H., "Effects of the Pressure Difference over the Screen Basket on the Performance of a Pressure Screen", *Tappi Journal*, 82(4): 176-180 (1999).
 81. Paul, S. T., Duffy, G. G. and Chen, X. D., "Viscosity Control as a New Way to Improve Pressure Screen Performance", *Tappi Journal*, 83(9): 61 (2000).
 82. Wakelin, R. F. and Paul, T. S., "Effects of Some Process Variables on Screen Fractionator Performance", *Appita Journal*, 54(4): 357-363 (2001).
 83. Karnis, A., "Pulp Fractionation by Fibre Characteristics", *Paperi Ja Puu*, 79(7): 480-487 (1997).
 84. Rehmat, T., and Branion, R. M. R., "Fibre Fractionation in Hydrocyclone", *Preprints of PAPTAC 81st Annual Meeting, Montreal, Canada, Book B: B105-B125* (1995).
 85. Statie, E., Salcudean, M., Gartshore, I. and Bibeau, E., "A Computational Study of Particle Separation in Hydrocyclone", *Journal of Pulp and Paper Science*, 28(3): 84-92 (2002).
 86. Eöhmer, E., "The Production and Use of Mechanical and Chemimechanical Pulps", *Proceedings of International Mechanical Pulping Conference: 5-18* (1985).
 87. Hu, S., "Development of High Yield Pulping", '97 Nanjing International Symposium on High Yield Pulping Proceedings (Chinese Academy of Forestry): 1-16, (1997).
 88. Petit-Conil, M., Robert, A. and Pierrard, J. M., "Fundamental Principles of Mechanical Pulping from Softwoods and Hardwoods", *Cellulose Chemistry and Technology*, 31(1-2): 93-104 (1997).

-
89. Mackie, D. M. and Taylor, J. S., "Review of the Production and Properties of Alphabet Pulps", *Pulp and Paper Canada*, 89(2): 58-66 (1988).
 90. Stationwala, M. I. and Karnis, A., "Pulp Grinding - A New Method for Producing Mechanical Pulp", *Tappi Journal*. 73(12): 187-195 (1990).
 91. Sundholm, J., "Can We Reduce Energy Consumption in Mechanical Pulping", *Proceedings of the 18th International Mechanical Pulping Conference*, Oslo, Norway: 133-142 (1993).
 92. Karnis, A., "The Mechanism of Fibre Development in Mechanical Pulping", *Journal of Pulp and Paper Science*, 20(10): 280-288 (1994).
 93. Page, D.H., "The Beating of Chemical Pulps -- the Action and Effects", *Fundamentals of Papermaking, Transactions of the Ninth Fundamental Research Symposium Held at Cambridge: September*, Mechanical Engineering Publications, Volume 1:1-38 (1989).
 94. Law, K., "A New Insight into Chip Refining", *Appita Journal*, 53(5): 393-397 (2000).
 95. Miles, K. B. and May, W. D., "The Flow of Pulp in Chip Refiners", *Journal of Pulp and Paper Science*, 16(2): J63-J72 (1990).
 96. Hietanen, S. and Ebeling, K., "Fundamental Aspects of the Refining Process", *Paperi ja Puu*, 72(2): 158-170 (1990).
 97. Miles, K. B., "A Simplified Method for Calculating the Residence Time and Refining Intensity in a chip refiner", *Paperi ja Puu*, 73(9): 852-857 (1991).
 98. Karnis, A., "High-consistency Refining of Bleached Sulfate Pulps", *Tappi Journal*, 72(6): 97-102 (1989).

-
99. Strand, B., "Quality Control of High Consistency Refiners", Proceedings of International Mechanical Pulping Conference, Stockholm, Sweden: 127-132 (1997).
 100. Eriksen, O. and Hammar, L., "Refining Mechanisms and Development of TMP Properties in a Low-Consistency Refiner", Proceedings of International Mechanical Pulping Conference, Fundamentals section, Minneapolis, 14 pages (2007).
 101. Rihs, J., "Low Consistency Refining – Theory vs Practice", Third International Refining Conference, Atlanta, USA, Volume 1, Paper 10, 14 pages (1995).
 102. Musselman, R., Letarte, D. and Simard, R., "Third Stage Low Consistency Refining of TMP of TMP for Energy Savings and Quality Enhancement", 4th International Refining Conference, Palazzo della Fonte, Fiuggi, Italy, Paper 9, 7 pages (1995).
 103. Braaten, K. R., "Fibre and Fibril Properties versus Light Scattering and Surface Smoothness for Mechanical Pulps", Pulp and Paper Canada, 101(5): T122-T126 (2000).
 104. Law, K. N., "Revisiting the Properties of Thermomechanical Pulp", Revue ATIP, 58(2): 11–17 (2004).
 105. Law, K. N., "An Autopsy of Refiner Mechanical Pulp", Pulp and Paper Canada, 106(1): 37–40 (2005).
 106. Corson, S. R., "Development of TMP Fibre and Pulp Quality", Appita Journal, 49(5): 309-312, 324 (1996).
 107. Brindley, C., Corson, S., Juvonen, K. and Wakelin, R., "Effects of Long Fibre Enhancement on Radiata Pine Toplog Newsprint", Appita Journal, 50(5): 381-386 (1997).

-
108. Dickson, A. R., Stuart R Corson, S. R. and Dooley, N. J., "Fibre Collapse and De-Collapse Determined by Cross-Sectional Geometry", Proceedings of International Mechanical Pulping Conference, Session 5: Fibre characterization, the 6th paper, 4 pages (2005).
 109. Reme, P. A, Johnsen, P.O. and Helle, T., "Fibre Characteristics of some Mechanical Pulp Grades", Nordic Pulp and Paper Research Journal, 13(4): 263-268 (1998).
 110. Kure, K. A., "Fibre Development during Mechanical Pulp Refining", Journal of Pulp and Paper Science, 23(1): J28-J33 (1997).
 111. Fuglem, G., Kure, K-A, Løbben, O.P. and Helle, T., "Full Scale Comparison of TMP Fibre Properties – RTS and Conventional Conditions", Preprints of PAPTAC 86th Annual Meeting, Montreal, Canada, Book C: C187-C191 (2000).
 112. Law, K., "Refining Earlywood and Latewood – a Difficult Balance", Preprints of PAPTAC 91st Annual Meeting, Montreal, Canada, Book B: B247-B252 (2005).
 113. Forgacs, O.L., "The Characterization of Mechanical Pulps", Pulp and Paper Magazine Canada, 64(3): T89-T118 (1963).
 114. Page, D.H., "A Theory for the Tensile Strength of Paper", Tappi Journal, 52(4): 674-681 (1969).
 115. Wegner, T.H., "Improve Strength in High-Yield Pulps through Chemical Treatment", Tappi, 65(8): 103-109 (1982).
 116. Stationwala, M.I., Miles, K.B. and Karnis, A. "The Effect of First-Stage Refining Conditions on Properties and Energy Consumption", Journal of Pulp and Paper Science, 19(1): J12-J18 (1993).

-
117. Sundholm, J., "Mechanical Pulping", Papermaking Science and Technology, Book 5, Chapter 7: 157-221 (1999).
 118. Ferluc, A., Lanouette, R., Bousquet, J. P., Bussière, S.; "Optimum Refining of TMP Pulp by Fractionation after the First Refining Stage"; Proceedings of International Mechanical Pulping Conference, Fiber Characteristics section, Minneapolis, 11 pages (2007).
 119. Ferluc, A., Lanouette, R., Bousquet, J.-, P., Bussière, S.; "Optimization of TMP Process and Pulp Quality by means of Primary Pulp Fractionation"; Preprints of PAPTAC 94th Annual Meeting, Montreal, Canada, Book B: B489-B496 (2008).
 120. Ikiz, Y., Rust, J., Trussel, J. and Jasper, W., "Fiber Length Measurement by Image Processing" Textile Research Journal, 71: 905-910 (October, 2001).
 121. Clark, J. d'A., "Pulp Technology and Treatment for Paper", Second Edition, Miller Freeman, San Francisco, California, Section III, Chapter 17: 451-502 (1985).
 122. Seth, R. S., "The measurement and Significance of Fines" Preprints of PAPTAC 88th Annual Meeting, Montreal, Canada, Book C: C93-C101 (2002).
 123. Bently, R. G., Scudamore, P., and Jack, J. S., "A Comparison between Fibre Length Measurement Methods" Pulp and Paper Canada, 95(4):41-45 (1994).
 124. Huang, F., "The Mechanism of Rupture of Early- and Latewood in Refining", Thèse de doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières: 201 pages (2006).
 125. Sundström, L., Brodin, A., Hartler, N., "Fibrillation and its Importance for the Properties of Mechanical Pulp Fiber Sheets", Nordic Pulp and Paper Research Journal, 8(4): 379-383 (1993).

-
126. Seth, R. S. "Fiber Quality Factors in Papermaking (2): Importance of Fiber Coarseness", *Materials Interactions Relevant to Pulp, Paper, and Wood Industries, Materials Research Society Symposium Proceedings Series, Pittsburgh, Volume 197: 143-161 (1990).*
 127. Label, R.G., Nobleza, G.C. and Paquet, R. "Water Retention Value Indicates Machine Runnability of Pulp", *Pulp & Paper Canada, 80(5):T135-T140 (1979).*
 128. Clark, J. D'A, "Freeness Fallacies and Facts", *Tappi Journal, 53(1): 108-113 (1970).*
 129. Paavilainen, L., "Importance of Particle Size - Fibre Length and Fines – for the Characterization of Softwood Kraft Pulps", *Paperi ja Puu, 72(5): 516-526 (1990).*
 130. Marton, R. and Robie, J. D., "Characterization of Mechanical Pulps by a Settling Technique", *Tappi Journal, 52(12): 2400-2406 (1969).*
 131. Luukko, K., "Fines Quantity and Quality in Controlling Pulp and Paper Quality", *Proceedings of International Mechanical Pulping Conference, 67-75 (1999).*
 132. Law, K., N., Balatinecz, J., J., Garceau, J., J., "A Technique for Making Oriented Fiber Sheet", *Tappi Journal, 57(12): 153-154 (1974).*
 133. Dykstra, M., J., "A Manual of Applied technical for Biological Electron Microscopy", *Plenum Press, New York: 38-42 (1993).*
 134. Ellis, A., E., "Corrected Formulation for Spurr Low Viscosity Embedding Medium Using the Replacement Epoxide ERL 4221", *Microscopy and Microanalysis, 12(2): 288-289 (2006)*

-
135. Williams, G., J., Drummond, J., G., "Preparation of large sections for the microscopical study of paper structure", Proceedings of TAPPI Papermakers Conference, San Francisco, California: 517-523 (1994).
136. Brecht, W. and Klemm, K., "The Mixture of Structures in a Mechanical Pulp as a Key to the Knowledge of its Technological Properties", Pulp and Paper Magazine of Canada, 54(1): 72-80 (1953).
137. Giertz, H.W., "Basic Wood Material Properties and their Significance in Mechanical Pulping", Proceedings of International Mechanical Pulping Conference, Helsinki, Volume V: 37-51 (1977).
138. Kangas, H. and Kleen, M., "Surface Chemical and Morphological Properties of Mechanical Pulp Fines", Nordic Pulp and Paper Research Journal, 19(2): 191-199 (2004).
139. Patrick, K. L., "Modern Mechanical Pulping in the Pulp and Paper Industry", Miller Freeman Publications, San Francisco, California, Chapter 35:154-156 (1990).
140. Law, K. N., "Rethinking Chip Refining", 54th Appita Annual Conference Proceeding, Melbourne, Australia, Volume 1: 101-106 (2000).
141. Szwarcztajn, E. and Przybysz, K., "Investigations on Changes in the Properties of Recycled Pulps Fractions" Cellulose Chemistry and Technology, 10(6): 737-749 (1976).
142. Law, K. N., Yang K. C. and Valade, J. L., "Fibre Development in Thermomechanical Pulping: Comparison between Black Spruce and Jack Pine", Preprints of CPPA 83rd Annual Meeting, Montreal, Canada, Book B: B113-B127 (1997).

-
143. Law, K., Kokta, B. V. and Mao, C. B., "Effect of Temperature on Compression Properties of Wood and Fibre Failures – A Problem Implication of Screw-Pressing of Chips in TMP", Preprints of PAPTAC 92nd Annual Meeting, Montreal, Canada, Book A: A429-A434 (2006).
 144. Laivins, G. V. and Scallan, A. M., "The Influence of Drying and Beating on the Swelling of Fines", *Journal of Pulp and Paper Science*, 22(5): J178-J184 (1996).
 145. Mohlin, U.B., "Fibre Development during Mechanical Pulp Refining", *Journal of Pulp and Paper Science*, 23(1): J28-J33 (1997).
 146. Hawes, J. M. and Doshi, M. R., "The Contribution of Different Types of Fines to the Properties of Handsheets Made from Recycled Paper", *Recycled Paper Technology – an Anthology of Published Papers*, Atlanta, USA: 253-262(1994).
 147. Kangas, H. and Kleen, M., "Surface Chemical and Morphological Properties of Mechanical Pulp Fines", *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 19(2):191-199 (2004).
 148. Lindholm, C. A., "Comparison of some Papermaking Properties of Groundwood, Pressure Groundwood and Thermomechanical Pulp by Means of Pulp Fractions: (2) Fines Fractions", *Paperi ja Puu*, 62(12): 803-808(1980).

Annexe A - Observation au MEB des fines (P200)

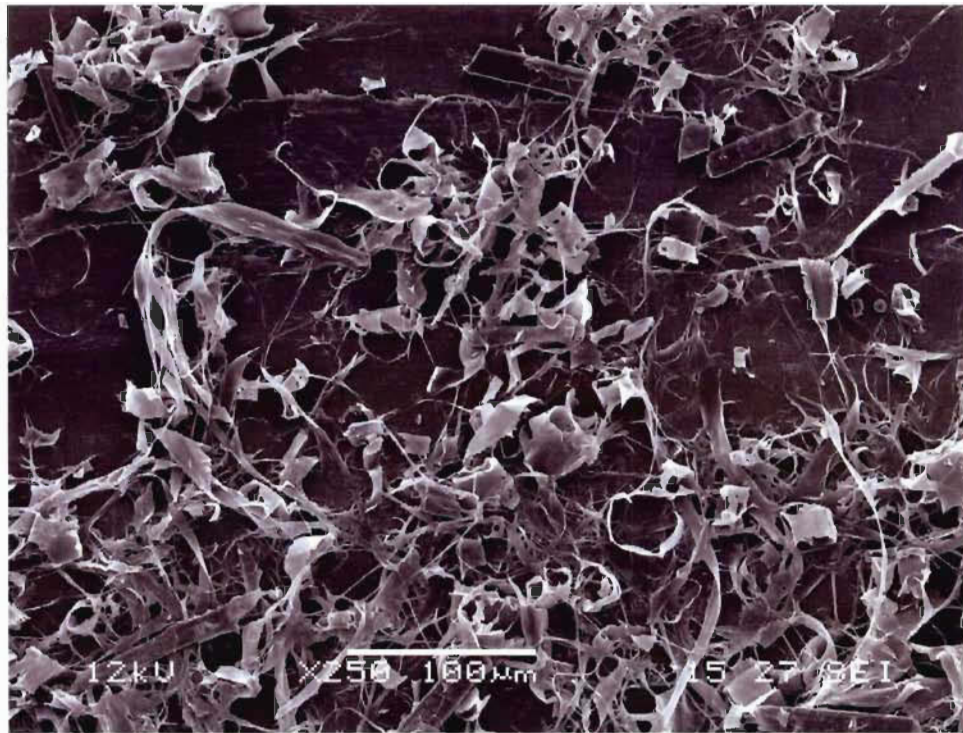


Figure A-0.1 Vue générale des fines (P200) de la pâte P (CSF de la pâte = 100 mL)

Un grand nombre des fines sont les fines primaires contenant en grande partie des parenchymes et les couches externes et produisant moins de fibrillation.

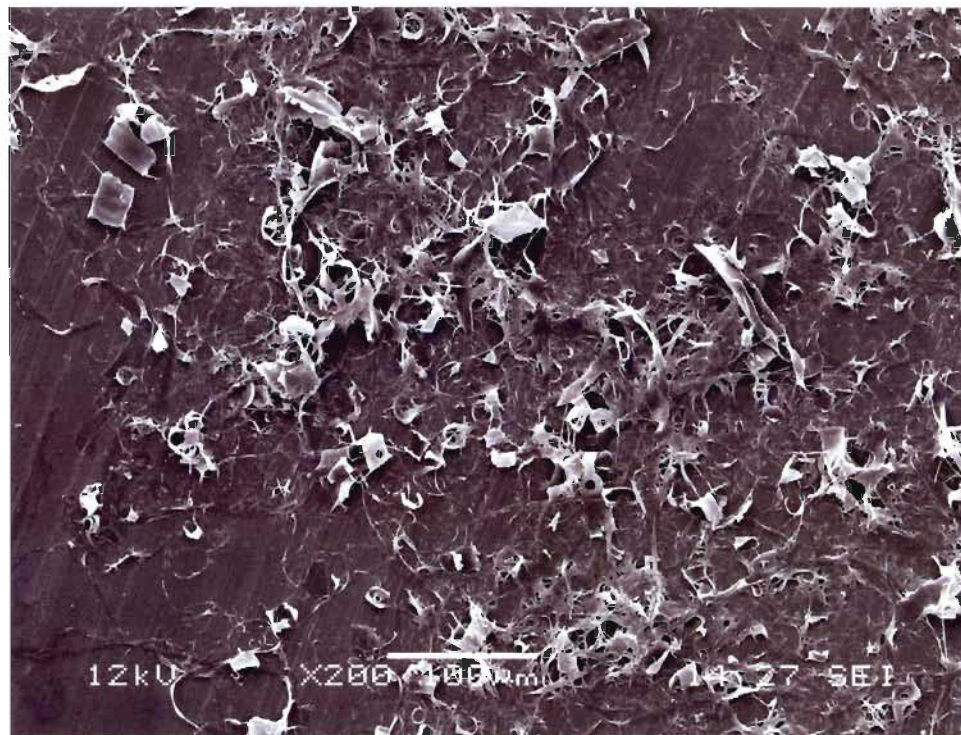


Figure A-0.2 Vue générale des fines (P200) de la pâte R2 (CSF de la pâte = 100 mL)

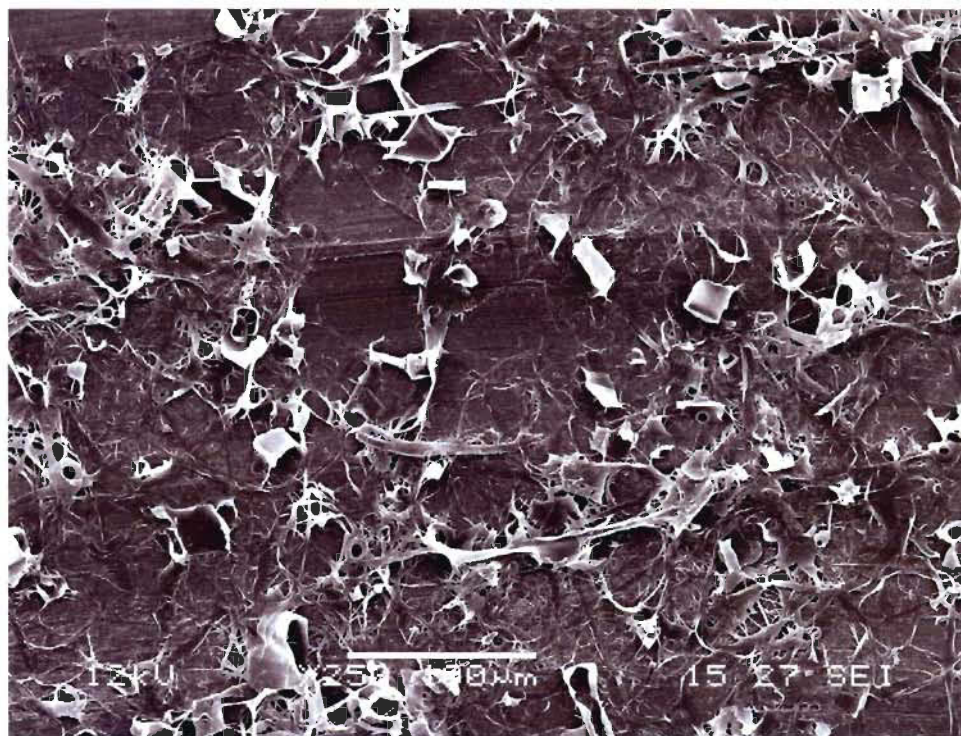


Figure A-0.3 Vue générale des fines (P200) de la pâte R2 (CSF de la pâte = 100 mL)

Fibrillations des fines sont évidentes, peu de fines primaires



Figure A-0.4 Vue générale des fines (P200) de la pâte Q2 (CSF de la pâte = 100 mL)

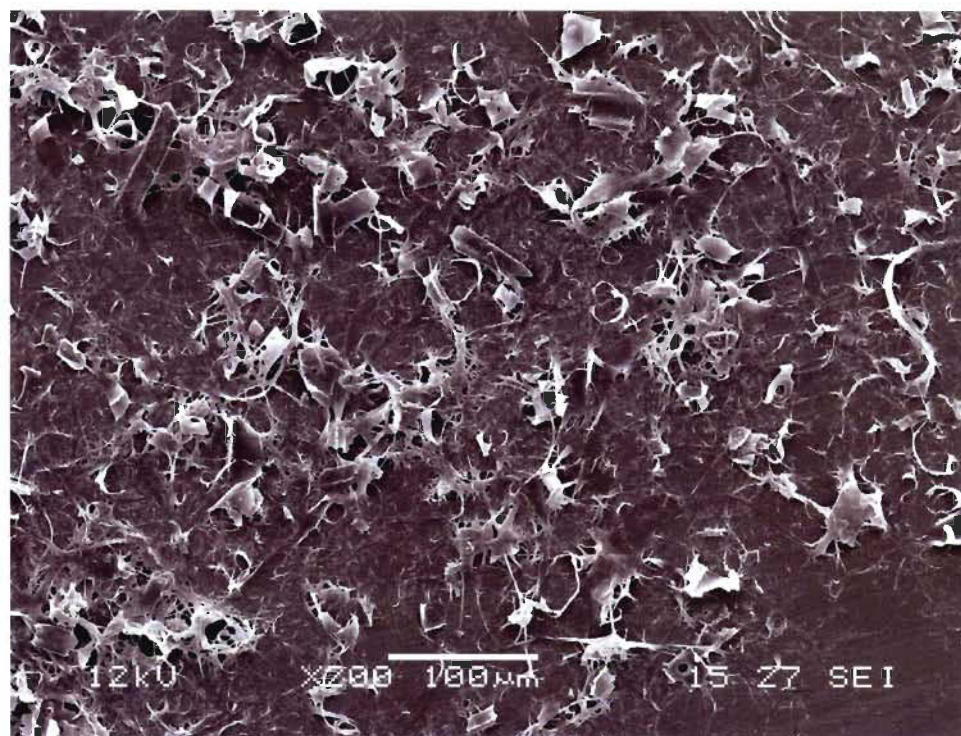


Figure A-0.5 Vue générale des fines (P200) de la pâte QBC (CSF de la pâte = 100 mL)

Fibrillations des fines sont évidentes, peu de fines primaires

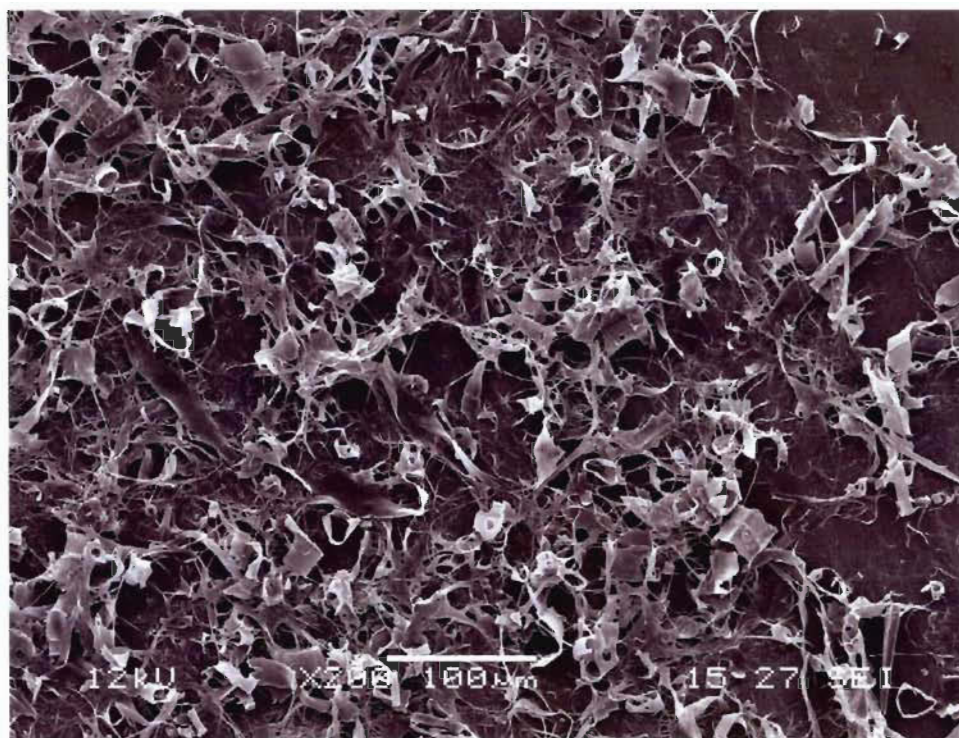


Figure A-0.6 Vue générale des fines (P200) de la pâte A (CSF de la pâte = 100 mL)

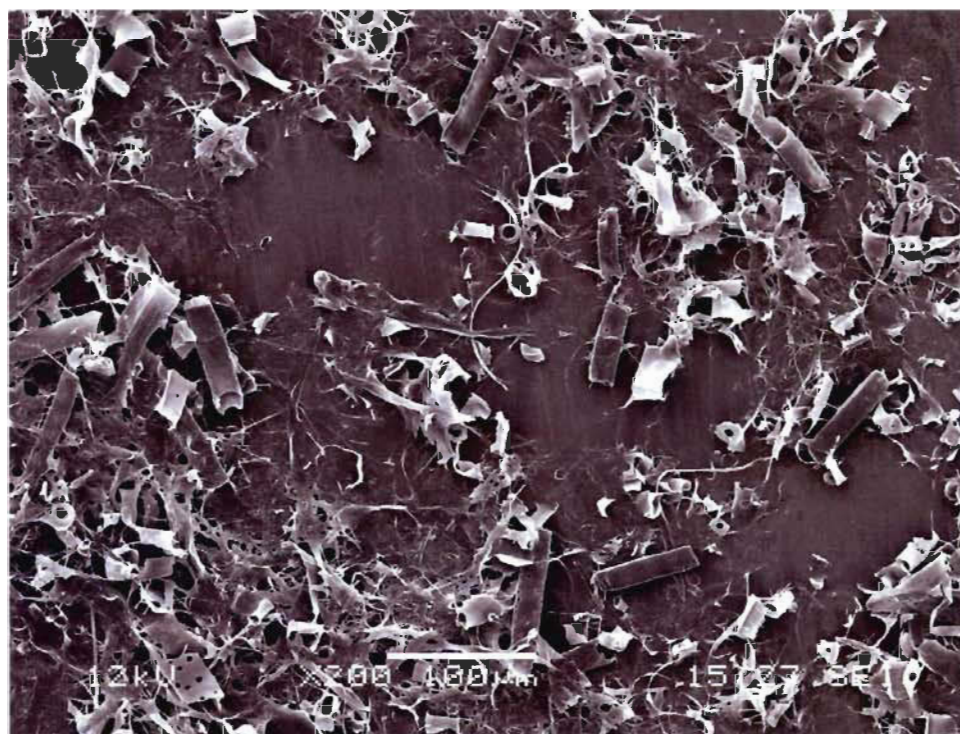


Figure A-0.7 Vue générale des fines (P200) de la pâte ABC (CSF de la pâte = 100 mL)

Fibrillations des fines sont évidentes, peu de fines primaires

Annexe B - Publication

- **Refining of Long Fibre Fractions after Fractionation**

Article présenté au 94^{ième} Congrès Annuel de l'Association Technique des Pâtes et Papiers du Canada (ATPPC), Montréal, Février 2008

- **High and Low Consistency Refining of Long Fibre Fractions after Fractionation**

Affiche présentée au 94^{ième} Congrès Annuel de l'ATPPC, Montréal, Février 2008

REFINING OF LONG FIBRE FRACTIONS AFTER FRACTIONATION

Quanqing Zha, Robert Lanouette, Kwei-Nam Law

Centre Intégré en Pâtes et Papiers,
Université du Québec à Trois-Rivières,
C.P.550, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7

Jean-Pierre Bousquet

Metso Paper Inc.
Sylvain Bussières

Papier Masson Inc.

Corresponding author: robert.lanouette@uqtr.ca

ABSTRACT

In this work, a primary-stage black spruce TMP was fractionated into long and short fibre fractions using two-stage screening. The long fraction (secondary reject) was further fractionated with a two-stage slot screen to obtain earlywood and latewood enriched fractions. These fractions were refined to evaluate the efficiency of fractionation in order to improve the overall pulp quality. We observed that refining consistency, number of refining stages and the fraction itself influenced the refining behavior of the long fibre fractions. The latewood-enriched fraction had a better fibre development potential than the earlywood-enriched fraction but it required higher energy consumption. Low consistency refining consumed less refining energy but it led to lower mechanical properties. Separate refining could reduce refining energy and increase handsheet's light scattering coefficient. Recombination of these refined fractions indicated that energy saving without too much strength loss is possible.

INTRODUCTION

Albeit the mechanical pulping technology has been greatly developed during the last 60 decades or so [1, 2], there are little recent advance in this area. We are presently at a turning point of raw material utilization: the virgin forest is declining and the wood supply depends more and more on secondary forest or from plantations, which often leads to lower wood quality in comparison to the wood supply from virgin growth. As a result, the paper industry is facing serious technological challenges and major technological renovations must be done as soon as possible to allow the industry to use the less desirable species, and increase the paper quality of traditional wood species.

Owing to different chemical composition and morphology between species, wood fibres have a significant effect on TMP quality [3, 4, 5, 6]. Wood species determine largely the final properties of papers [7, 8]. In refining, earlywood (EW) and latewood (LW) fibres respond differently to mechanical action [9, 10, 11, 12, 13]. Consequently, final paper properties could be controlled by a proper refining technique according to the

morphological characteristics of fibres. Separate refining of EW or LW chips has a good research value but little practicability for the industry. Selective refining of long fibres [14, 15, 16] showed that it could improve the mechanical, optical and printing properties of paper. Therefore, fractionation of a TMP after the first refining stage to obtain EW-enriched and LW-enriched long fibre fractions and separate refining of these fractions might prove to be of interest. The selective refining of these long fractions might be a promising way to save refining energy and to improve the quality of these less developed long fibres. Furthermore, it could enhance the quality of the whole pulp after recombining these refined fractions [17].

EXPERIMENTAL

Fractionation

A primary stage black spruce TMP (P) taken from Papier Masson Inc. was the basic material for this study. The principle of fractionation is to split the pulp into two or more fractions by their fibre morphologies. A round-hole screen and a slot-screen were selected for the fractionation (Figure 1. Fractionation process1).

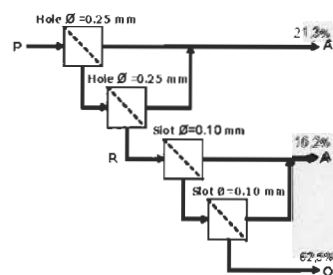


Figure 1. Fractionation process

The small aperture basket of the first two round-hole screens fractionated the fibres according to their length into long (R) and short (A1) fibre fractions. These two round-hole screens were effective extracting the Bauer McNett P48 fraction. The next two slot screens allow coarse and less flexible fibres retained as reject (Figure 2. Coarseness and cell wall thickness distribution of unrefined fraction). Therefore, they fractionated the long fibres (R) into two subsequent fractions: A (EW-enriched fraction) and Q (LW-enriched fraction). A mass balance of latewood/earlywood fibres for R28, R48 and R100 fractions is presented by Ferluc et al[18]. The fibre nature of the fractions will be examined microscopically and will not be discussed here.

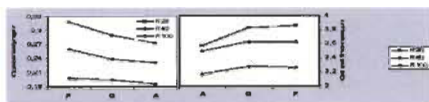


Figure 2. Coarseness and cell wall thickness distribution of unrefined fraction

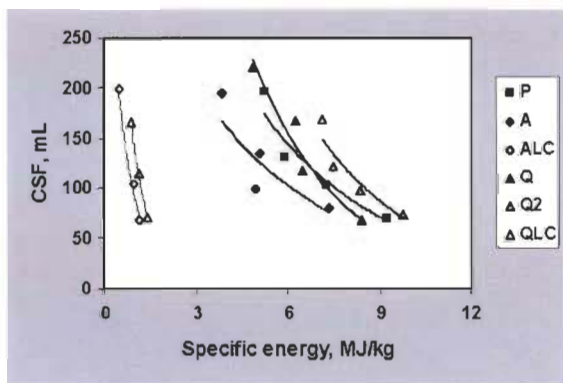
Refining

Refining was performed using a pilot unit (Sunds Defibrator CD300, Metso Inc.) at atmospheric pressure. Fraction A was refined at low consistency (LCR, ~5%) and a one-stage high consistency (HCR, ~20%) while the fraction Q was refined at low consistency, or in one or two stages at high consistency. For the sake of comparison, we also refined the original pulp P in a single stage at high consistency (~20%), corresponding to that of a usual process. Due to its low freeness (un-measurable value), the fraction A1 was not refined. In each case of refining several pulps were obtained in a freeness range of 50 to 200 mL.

RESULTS AND DISCUSSION

Fibre properties

In LCR, the refiner plate gap was 0.20-0.25 mm. The LCR always required less refining energy compared with the HCR (Figure 3. CSF as a function of specific energy) but produced shorter fibres and a rapid fibre length reduction (Figure 4. Fibre length as a function of CSF). However, the effect of HCR was relatively mild because at high consistency, the contacts between fibres and refiner bars was reduced [19], which allows a better preservation of fibre length. Refining intensity had a great effect on fibre length cutting. Generally, the LCR consumed about half of the refining energy required by the HCR. Meanwhile, the increase in refining stages could also contribute to the preservation of fibre length but it raised the energy consumption by 20%.



B482

Figure 3. CSF as a function of specific energy

- P: Initial pulp P with one-stage HCR
- A: Fraction A with one-stage HCR
- ALC: Fraction A with multiple-stage LCR
- Q: Fraction Q with one-stage HCR
- Q2: Fraction Q with two-stage HCR
- QLC: Fraction Q with multiple-stage LCR

EW and LW fibres responded differently to refining. Due to their large diameter and thin cell wall, the EW fibres are more flexible and less resistant to mechanical collapse. In refining, they were broken more easily with little fibrillation and, therefore, required more energy to reduce its CSF to a desired level in comparison to the LW fibres [20, 21]. In fact, the EW fibres absorbed the majority of refining energy in the early stage of refining [5], probably during the initial fibres separation stage. When compared with the LW-enriched fraction, the EW-enriched fraction consumed less energy in a separate refining after the first refining stage (Figure 3. CSF as a function of specific energy).

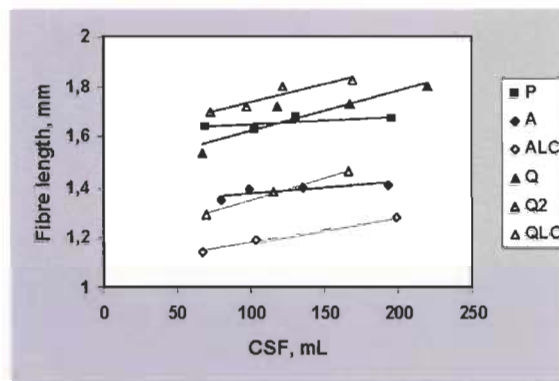


Figure 4. Fibre length as a function of CSF

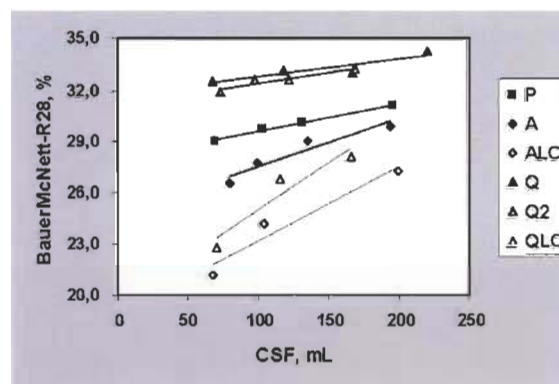


Figure 5. Bauer McNett R28 fraction as a function of CSF

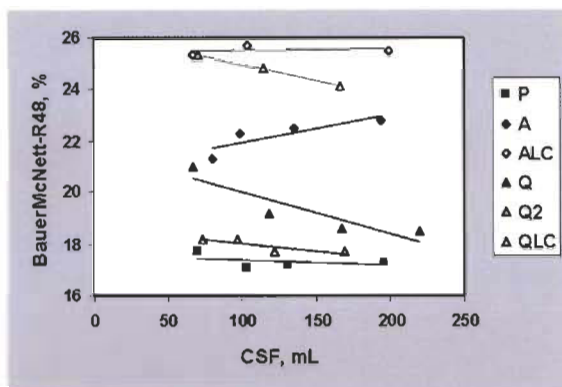


Figure 6. Bauer McNett R48 fraction as a function of CSF

Evidently, LCR produced less R28 fraction but more R48 and R100 fractions than the other refining consistencies (Figure 5. Bauer McNett R28 fraction as a function of CSF, Figure 6. Bauer McNett R48 fraction as a function of CSF and Figure 7. Bauer McNett R100 fraction as a function of CSF). In LCR the refining intensity is high, having high impact on fibre shortening. Meanwhile, Figure 6. Bauer McNett R48 fraction as a function of CSF shows that the R48 content in the pulps did not always decrease in relation with the drop of CSF. This could be due to the fact that a portion of the fragments peeled off from the R28 remained in the R48 fraction. Similar explanation may be applied to the R100 fraction (Figure 7. Bauer McNett R100 fraction as a function of CSF). These unpredicted peeled off fragments would influence undoubtedly more or less some refining behaviours regarding to the fibres themselves: like fibre length reduction, coarseness reduction, cell wall thickness reduction, etc. The resulted deviation could be seen in the following paragraph.

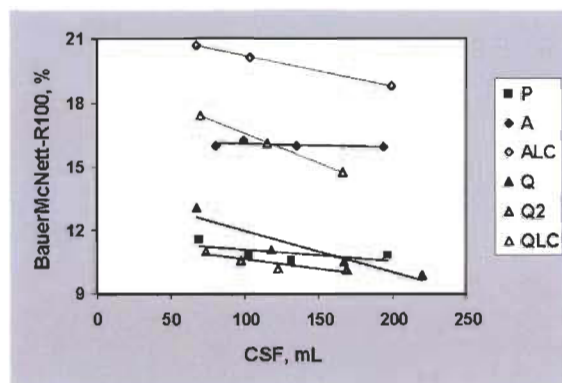


Figure 7. Bauer McNett R100 fraction as a function of CSF

In refining, the mechanical work shortens fibre, diminishes fibre's cell wall thickness or coarseness, and so on. The reduction rate on cell wall thickness is related to the fibrillation

effect while the reduction rate on fibre length is more related to cutting effect. Since we want high fibrillation with low cutting, the upper left zone of the graph is the best and the slope has to be high to represent more peeling than cutting. For the R28 fraction, the relation between cell wall thickness reduction rate and fibre length reduction rate was similar for the two long fractions and the initial pulp (Figure 8. Cell wall thickness reduction rate of R28 as a function of fibre length reduction rate of R28). Refining consistencies changed the relation level, but seldom changed their trends. The level of fibre length reduction and cell wall thickness diminution of R28 fraction was influenced by the refining consistency and the number of refining stage. However, there existed certain regular patterns among these data.

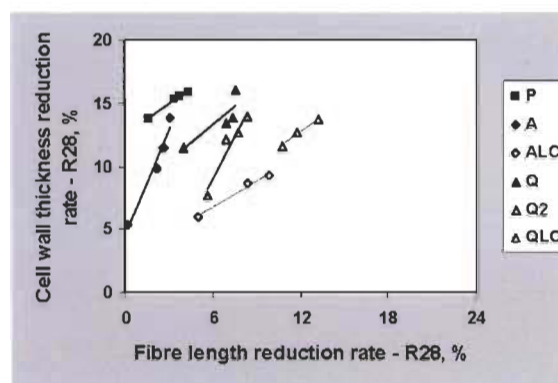


Figure 8. Cell wall thickness reduction rate of R28 as a function of fibre length reduction rate of R28

Low consistency produced a higher cutting level even if they also contributed to cell wall peeling. Compared with the other two pulps (P and Q), the reduction rates of cell wall thickness of A at high consistency is interesting. When we applied energy to this fraction, we produced a very high slope, so a great peeling effect with little fibre length loss. This fraction seemed to be very receptive to refining and represented a good place to put energy.

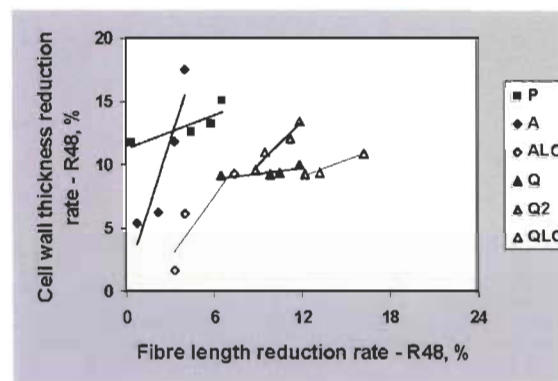


Figure 9. Cell wall thickness reduction rate of R48 as a function of fibre length reduction rate of R48

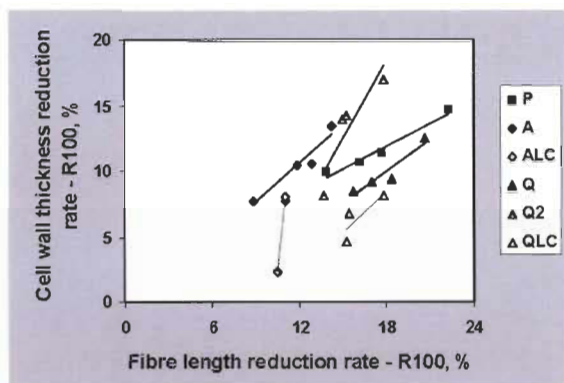


Figure 10. Cell wall thickness reduction rate of R100 as a function of fibre length reduction rate of R100

Figures 8 (R28), 9 (R48) and 10 (R100) show that P and Q had a similar trend. The development of these pulps was similar in terms of cell wall thickness reduction versus fibre length shortening. However, the shorter the fibres the lower was the cell wall thickness reduction and the higher was the shortening effect. For pulps A, R28 and R48 behaved similarly but the R100 lost less cell wall thickness for the same reduction in length. In the case of ALC, the slope increased from R28 to R48 and to R100. The shorter fibres suffered more thickness reduction for the same fibre length reduction. The observed behaviour was similar to those of Q and Q2, but the slope was more pronounced. The reduction in cell wall thickness increased with increasing refining stages. Similar relations between coarseness reduction rate and fibre length reduction rate of the fractions R28, R48 and R100 were also observed (not shown here).

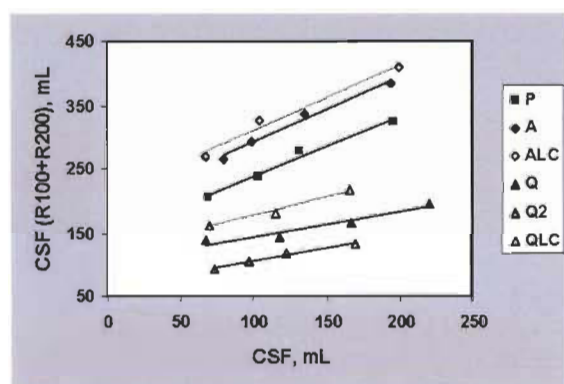


Figure 11. CSF of Bauer McNett fraction (R100 + R200) as a function of CSF of whole pulp

Interestingly, Figure 11. CSF of Bauer McNett fraction (R100 + R200) as a function of CSF of whole pulp shows a similar reduction trend in CSF of the combined fraction of R100 and R200, among the long fractions and initial pulp. Development of the medium fractions had a definite trend, displaying the same decrease tendency in CSF. At a given CSF, the LW-enriched fraction had the lowest CSF for (R100+R200). It appeared that fibrillation occurred more on LW fibres than on EW fibres. The LCR had less effect on fibrillation in comparison to the HCR. Increasing the number of refining stages also increased the level of fibrillation of these medium fractions.

Compared with the fraction enriched in EW fibres, the LW-enriched fraction was more favourable for developing the fines quality (Figure 12. Specific volume by sedimentation (SSV) of fines as a function of fines content), supporting the finding that LW fibres produced most of the secondary fines by peeling of the secondary wall. The refining consistency and the number of refining stages had little influence on the fines quality development. They affected fibre length cutting more than on cell wall peeling.

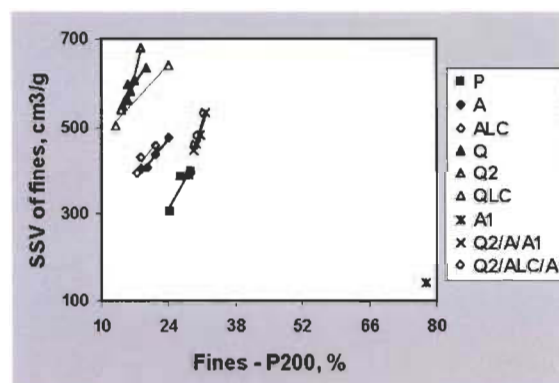


Figure 12. Specific volume by sedimentation (SSV) of fines as a function of fines content

A1: Fraction A1
Q2/A/A1: Recombination Q2, A and A1
Q2/ALC/A1: Recombination Q2, ALC and A1

Fines play an important role in determining the properties of mechanical pulps. The fines could be classified as primary fines and secondary fines. Primary fines are composed of parenchyma cells, ray cells and particles dislodged from fibre surface (lignin-rich flake like particles). The primary fractionation extracted a large proportion of the primary fines out of the whole pulp. They (fines of fraction A1) had a low SSV. After refining, recombination of the fractions had a higher SSV compared with the initial pulp. The primary fines rarely produced fibrillation in refining and their presence in the

pulp would hinder the development of fines in a certain manner.

Handsheet properties

Relation between tear index and tensile index was different among the fractions (Figure 13. Tear index as a function of tensile index). The LW-enriched fraction always had a longer fibre length. In refining, the LW fibres produced more secondary fines which had good fibre-fibre bonding capacity. Compared with P and A, the LW-enriched fraction had superior properties. Nevertheless, the EW-enriched fraction and the initial pulp refined at HCR and/or at LCR maintained the same tear index during the development of the tensile index, which could be interesting since the energy requirement is greatly different. The refining consistency and the number of refining stages influenced the final paper properties. LCR tended to cut fibre and always gave low properties length, which is not useful to develop mechanical properties.

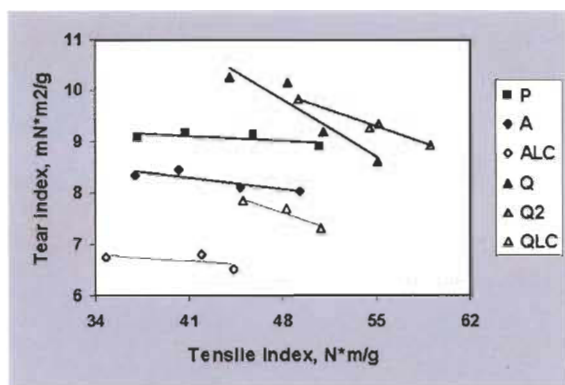


Figure 13. Tear index as a function of tensile index

At a given CSF, the EW-enriched fraction and the initial pulp had the highest light scattering coefficient when compared with the LW enriched fraction (Figure 14. Light scattering coefficient as a function of CSF). This was due to their different fines content (Figure 12. Specific volume by sedimentation (SSV) of fines as a function of fines content). On the other hand, the majority of primary fines were extracted from the reject stream during fractionation, the initial pulp contained no secondary fines which were developed during

additional refining stages. Because of their different chemical and physical structure [21, 22], the two types of fines contributed differently to light scattering coefficient. In fact the primary fines contained little fibrillar elements and yielded higher light scattering power in comparison to the secondary fines which composed mostly of fibrillar components.

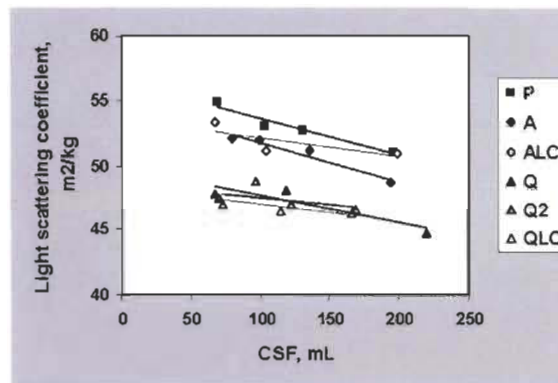


Figure 14. Light scattering coefficient as a function of CSF

Recombination

After separate refining, the two refined long fractions and the fraction A1 (non-refined) were recombined according to their original proportions in the initial pulp. This part is covered more adequately by Ferluc et al. [18]. In separate refining, the EW- and LW-enriched long fibre fractions responded differently and produced dissimilar final paper properties. The LW-enriched fraction always gave higher mechanical properties while the EW-enriched fraction tended to yield lower properties. The LW-enriched fraction developed more easily its quality and when it was refined at LC, the whole pulp's tensile index was very low. However, LCR of the LW-enriched fraction dramatically reduced the energy consumption of the whole pulp. Due to the loss in sheet strength, the LCR was not suitable for the LW-enriched fraction. However, the HCR or the LCR had less influence on the EW-enriched fraction. As shown in Table I, separate refining reduced the energy consumption, increased the optical property and decreased sheet strength. Refining after fractionation improved TEA and scattering coefficient.

Table I. Energy savings and pulp quality obtained from different strategies of primary pulp fractionation [18]

		Ref.	QR HC2 A2 HC		QR HC2 A2 LC	
Freeness	mL	100	100	80	100	80
Specific energy ⁽¹⁾	MJ/kg	7.40	5.03 (-29%)	5.91 (-20%)	4.18 (-44%)	5.04 (-32%)
Tensile index	N.m/g	45.6	43.2 (-5.4%)	45.6 (-0.1%)	41.7 (-8.5%)	44.5 (-2.4%)
TEA	J/m ²	38.6	40.5 (5.1%)	45.7 (18.4%)	38.7 (0.5%)	42.9 (11%)
Tear index	mN.m ² /g	9.08	9.15 (0.7%)	8.81 (-5.9%)	8.84 (-2.7%)	8.47 (-6.7%)
Burst index	kPa.m ² /g	2.72	2.70 (-0.9%)	2.88 (3.0%)	2.51 (-7.8%)	2.74 (0.6%)
Scattering Coeff.	m ² /kg	53.5	58.4 (9.2%)	59.4 (11.1%)	57.6 (7.8%)	58.7 (9.8%)

(1) Second stage

(2) Values in brackets indicates difference with reference (whole pulp refined to 100 mL CSF)

To maintain acceptable tensile index of the whole pulp after separate refining, a two-stage HCR was recommended for the LW-enriched fraction and a one-stage HCR or LCR for the EW-enriched fraction. In such a situation, there were about 5.4% and 8.5% loss in tensile index, about 3% loss in tear index for LCR and about 29% and 44% saving in refining energy, respectively. To keep the tensile strength the freeness could be reduced to 80 mL. In this case we would expect 2.4% loss in tensile index, close to 6% reduction in tear and 20% to 32% energy saving, depending on the refining consistency.

CONCLUSION

In separate refining the EW- and LW-enriched long fibre fractions behaved differently. Their refining behaviors are influenced by the refining consistency, the number of refining stages and the fibre fraction itself. The LW-enriched fraction possesses a greater potential for developing mechanical properties but requires higher energy consumption. Compared to the HCR, the LCR demands less refining energy but produces lower mechanical properties of handsheet.

Combination of the two separately refined long fractions with the initial unrefined short fraction suggests that separate refining could reduce refining energy and increase handsheet's light scattering coefficient and TEA. Hence, energy saving

without too much loss in strength is possible. To minimize the loss in mechanical properties and maximize the savings in refining energy, we recommend a two-stage HCR for the LW-enriched fraction and a one-stage HCR or LCR for the EW-enriched fraction. In this case we can expect about 2.4% loss in tensile index, close to 6% tear reduction and 20% to 32% energy saving, depending on the refining consistency.

ACKNOWLEDGMENT

We thank Alain Marchand and Pierre Gendron for their assistance in the experimental works. Our thanks also go to the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada for funding this research through a collaborative research and development grant.

REFERENCES

1. EÖHMER, E., "The Production and Use of Mechanical and Chemimechanical Pulps", International Mechanical Pulping Conference: 5-18 (1985).
2. LEASK, R.A., and KOCUREK, M.J., "Mechanical Pulping", Pulp and Paper Manufacture, Third Edition, Joint Textbook Committee of the Paper Industry, Volume 2: 1-17(1987).
3. BRILL, J. W., "Effects on Wood and Chip Quality on TMP Properties", International Mechanical Pulping Conference, Stockholm, Sweden: 153-161 (1985).
4. CORSON, S. R., "Wood Characteristics Influence Pine TMP Quality", Tappi Journal, 74(11): 135-146(1991).
5. RUDIE, A.W., MORRA, J., ST. LAURENT, J.M. and HICKEY, K.L., "The Influences of Wood and Fibre Properties on Mechanical Pulping", Tappi Journal, 77(6): 86-90(1994).
6. JACKSON, M., "The Interaction of Wood Species and Wood Quality with the TMP process - A Review", 1998 Tappi Processions, Pulping Conference, Book 1, Tappi Press, 455-465 (1998).
7. KORAN, Z., "Thermomechanical Pulp Properties of White Birch", Wood and Fibre Science, 27(2): 98-104 (1995).
8. HATTON, J. V. and JOHAL, S. S., "Mechanical Pulping of Commercial Thinnings of Six Softwoods from New Brunswick", Pulp and Paper Canada, 97(12): 93-97 (1996).
9. KOLJONEN, L. and HEIKKURINEN, A., "Delamination of Stiff Fibres", International Mechanical Pulping Conference, Ottawa, Canada: 79-84 (1995).
10. REME, P.A., and JOHNSON, P.O., "Changes Included in Early- and Latewood Fibres by Mechanical Pulp Refining", Nordic Pulp and Paper Research Journal, 14(3):256-262 (1999).
11. REME, P. A. and HELLE, T., "Quantitative Assessment of Mechanical Fibre Dimensions during Defibration and Fibre Development", Journal of Pulp and Paper Science, 27(1): 1-7 (2001).
12. LAW, K., "Mechanical Behavior of Early- and Latewood under Compression Load", International Mechanical Pulping Conference, Helsinki, Finland, Book 1: 159-166 (2001).
13. LAW, K., "Refining Earlywood and Latewood - a Difficult Balance", PAPTAC 91st Annual Meeting, Book B, Montreal, Canada: B247-B252 (2005).
14. CORSAON, S. R. and LEE, M. J., "Radiata Pine TMP Requires Effective Long Fibre Enhancement for Good Printability", Appital Journal, 43(4): 277-282 (1990).
15. CORSON, S. R., RICHARDSON, J. D., MURTON, K. D. and FOSTER, R. S., "Light Scattering Coefficient of Radiata Pine Mechanical Pulps Varies with Wood and Process Type", Appital Journal, 44(3): 184-190 (1991).

16. CORSON, S. R., WAKELIN, R. F. and LLOYD, M. D., "TMP Furnish Development Strategies for Contrasting Fibre Types", International Mechanical Pulping Conference, Ottawa, Canada: 189-195 (1995).
17. FERLUC, A., LANOUILLE, R., BOUSQUET, J.-P. and BUSSIÈRES, S., "Optimum Refining of TMP Pulp by Fractionation after the First Refining Stage", International Mechanical Pulping Conference, 6-9 May, 11 pages (2007).
18. FERLUC, A., LANOUILLE, R., BOUSQUET, J.-P. and BUSSIÈRES, S., "Optimization of TMP Process and Pulp Quality by Means of Primary Pulp Fractionation", PAPTAC 94th Annual Meeting, Montreal, Canada (2008).
19. KARNIS, A., "High-consistency Refining of Bleached Sulfate Pulps", Tappi Journal, 72(6): 97-102(1989).
20. IWAMIDA, T. and LAI, Y. Z., "Role of Fibre Morphology in Mechanical Pulping", International Symposium on Wood and Pulping Chemistry, Vancouver, Canada: 73-75 (1985).
21. MURTON, K.D., RICHARDSON, J.D., CORSON, S.R. and DUFFY, G.G., "TMP Refining of Radiata Pine Earlywood and Latewood Fibres", International Mechanical Pulping Conference, Helsinki, Finland, Book 2: 361-371(2001).
22. HAWES, J. M. and DOSHI, M. R., "The Contribution of Different Types of Fines to the Properties of Handsheets Made from Recycled Paper", Recycled Paper Technology - an Anthology of Published Papers, Atlanta, USA: 253-262(1994).
23. KANGAS, H. and KLEEN, M., "Surface Chemical and Morphological Properties of Mechanical Pulp Fines", Nordic Pulp and Paper Research Journal, 19(2):191-199 (2004).

High and low consistency refining of long fibre fractions after fractionation



Quanqing Zha, Robert Lanouette and Kwei-Nam Law
 CIPP, Université du Québec à Trois-Rivières
 Jean-Pierre Bousquet, Metso Paper Inc.
 and Sylvain Bussi eres, Papier Masson inc.

INTRODUCTION

In refining earlywood (EW) and latewood (LW) fibres respond differently to the mechanical actions [1-5] due to their differences in morphology [6-8]: EW fibre has large lumen diameter and thin cell wall while LW fibre has small lumen diameter and thick cell wall. Because of this they influence differently the final products properties [9-12]. Additionally, refining consistency may play an important role in influencing their refining behaviour [13-15]. Therefore, the final paper properties could be controlled by optimizing the proportions these two types of fibre in the pulp or by a proper refining technique according to the morphological characteristics of fibre. In this work we first fractionated a primary TMP into three fractions: (a) short and fines, (b) EW-enriched and (c) LW-enriched fractions. Separate refining was performed on the last two fractions (b and c).

EXPERIMENTAL

I. Fractionation:

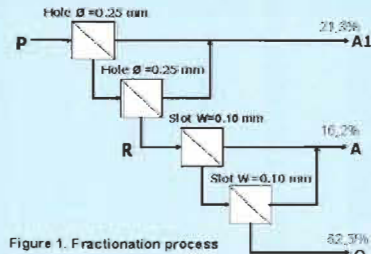


Figure 1. Fractionation process

II. Refining:

Pilot unit (CD300, Metso Inc.)
 Atmospheric pressure
 HCR (high consistency): ~20%-30%
 LCR (low consistency): ~5%

RESULTS

Table 1. Bauer McNett fractions BEFORE refining

%	R14	R28	R48	R100	R200	P200
P	17.3	31.2	17.9	8.6	4.7	20.3
Q	31.2	36.6	17.9	7.4	2.6	4.3
A	6.5	32.3	25.5	15.5	7.6	12.6

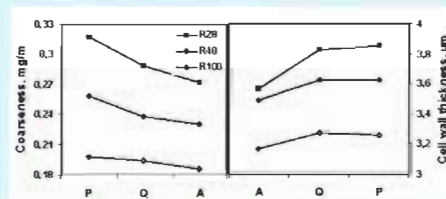


Figure 2. Coarseness and Cell wall thickness of unfractionated fractions

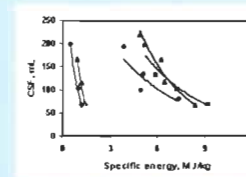


Figure 3. CSF vs. Specific energy

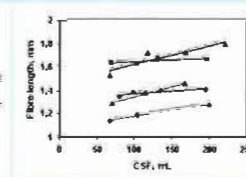


Figure 4. Fibre length vs. CSF

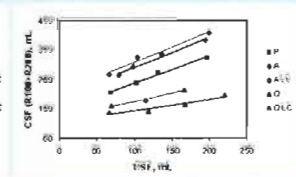


Figure 5. CSF of short fibre vs. CSF of whole pulp

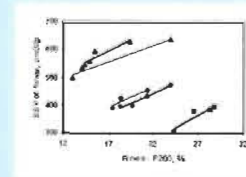


Figure 6. Specific volume by sedimentation (SSV) vs. fines content

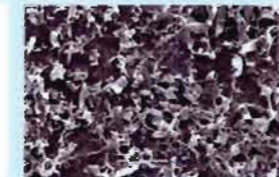


Figure 7. P200 SEM micrograph of fraction A1

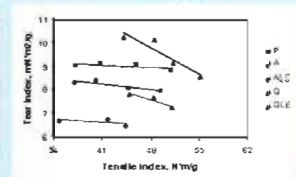


Figure 8. Tear index vs. tensile index

CONCLUSION

1. The EW- and LW-enriched fractions behave differently in separate refining. These differences are attributed to refining consistency and their intrinsic characteristics.
2. The LW-enriched fraction has a greater potential for developing mechanical properties but requires higher energy consumption, in comparison to the EW-enriched fraction.
3. The LCR demands less refining energy but it tends to cut fibres and gives lower mechanical properties of handsheet.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was financially supported the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada.

REFERENCES

1. Koljonen, L. and Heikkurinen, A., International Mechanical Pulping Conference, Ottawa, Canada: 79-84 (1995).
2. Reme, P. A., and Johnson, P. O., Nordic Pulp and Paper Research Journal, 14(3):256-262 (1999).
3. Reme, P. A. and Helle, T., Journal of Pulp and Paper Science, 27(1): 1-7 (2001).
4. Law, K., International Mechanical Pulping Conference, Helsinki, Finland, Book 1: 159-166 (2001).
5. Law, K., PAPTAC 91st Annual Meeting, Book B, Montreal, Canada: B247-B252 (2005).
6. Smook, G. A., "Handbook for Pulp & Paper Technologists", Second Edition, Angus Wilde Publications, USA (1992).
7. Panshin, A. J. and De Zeeuw, C., "Structure, Identification, Uses and Properties of the Commercial Woods of the United States and Canada", Textbook of Wood Technology, Third Edition, Volume 1, McGraw-Hill, New York (1970).
8. Rowell, R. M., "Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites", CRC Press, USA (2005).
9. Paavilainen, L., Appita Journal, 45(5): 319-326 (1992).
10. Paavilainen, L., Tappi Pulp Conference, Book 2: 857-867 (1994).
11. Koljonen, L. and Heikkurinen, A., International Mechanical Pulping Conference, Ottawa, Canada: 79-84 (1995).
12. Law, K. and Valade, J. L., Intl. Symp. on Emerging Technologies of Pulping & Papermaking of Fast-Growing Wood, Guangzhou, China: 66-74 (1998).
13. Hietanen, S. and Ebeling, K., Paperi ja Puu, 72(2): 158-170 (1990).
14. Miles, K. B., Paperi ja Puu, 73(9): 852-857 (1991).
15. Karnis, A., Tappi Journal, 72(6): 97-102 (1989).