

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

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

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DU DOCTORAT EN GÉNIE PAPETIER

PAR
ALEXANDRE FERLUC

RAFFINAGE OPTIMAL DES PÂTES THERMOMÉCANIQUES
PAR FRACTIONNEMENT

JUIN 2008

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.

Avant-propos

L'optimisation des pâtes thermomécaniques a donné lieu au cours des vingt dernières années à un intense effort de recherche axé principalement sur le raffinage à haute consistance. A ce jour, il semble que de nouveaux axes de recherche doivent être explorés pour donner un nouveau souffle à l'amélioration de ces pâtes. Nous nous proposons ici d'étudier l'un d'eux, à savoir le fractionnement de la pâte après le stade primaire de raffinage dans le but d'appliquer sélectivement un second stade de raffinage permettant de développer chaque fraction de manière indépendante. Une optimisation de la qualité de la pâte finale, qui consiste au mélange des fractions obtenues après raffinage, en est l'objectif ultime avec éventuellement une réduction de la consommation d'énergie. En effet, le raffinage sélectif des fractions dont le potentiel de développement de propriétés papetières présente un intérêt, évitera de raffiner des fibres qui ont déjà atteint leur plein potentiel papetier au cours du stade primaire de raffinage et évitera également de dépenser de l'énergie dans un stade de raffinage ultérieur au risque de produire une dégradation des fibres.

Remerciements

Je remercie très sincèrement Dr. Robert Lanouette qui a supervisé cette recherche et apporté un support constant à mon travail à l'UQTR et au Centre Intégré en Pâtes et Papiers (CIPP).

Je remercie également le personnel technique du CIPP et tout spécialement M. Alain Marchand et M. Pierre Gendron pour leurs conseils et leur aide dans la réalisation des tests de laboratoire et les essais de raffinage en usine pilote. De même, je remercie M. Gaston Michaud pour son aide dans la réalisation des essais de fractionnement en usine pilote et Dr. Agnès Lejeune, pour l'étude des fibres par microscopie électronique à balayage. Leur connaissance et leur expérience ont largement contribué à mener cette étude à terme dans les meilleures conditions.

Je tiens à remercier M. Jean-Pierre Bousquet (Metso Inc.) et M. Sylvain Bussière (Papiers White Birch Inc.) qui ont toujours répondu très exhaustivement à mes questions et apporté une aide précieuse. Je tiens également à remercier Dr. Luc Laperrière pour son aide dans l'usage du logiciel CADSIM Plus et Dr. Kwei-Nam Law pour ses conseils dans l'analyse microscopique des fibres.

Je remercie les étudiants qui ont participé aux essais en usines pilotes, à la fabrication de formettes et à la caractérisation des pâtes en laboratoire : Elysa Raminosoa, Françoise Nanga, Guillaume Magnan et Sana Walid.

Je souhaite également exprimer ma gratitude au Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) pour leur support financier.

Finalement, je remercie mon épouse et mes enfants pour leur support inconditionnel durant cette étude qui a signifiée pour eux de grands changements et des efforts de patience et d'adaptation.

Résumé

Le besoin de pâtes mécaniques de meilleure qualité découle d'une exigence toujours croissante sur la qualité des papiers et la nécessité de maintenir des prix compétitifs. Les propriétés recherchées ne sont pas les mêmes pour tous les types de papiers. Ceci constitue un aspect multifacétique qui implique une approche spécifique. De plus, la pression croissante pour la protection de l'environnement implique un mécanisme d'amélioration constante des procédés orienté vers la réduction des émissions polluantes, la réduction de la consommation d'énergie et la substitution des sources d'énergie fossile par des sources renouvelables ainsi que l'amélioration de la gestion des ressources naturelles.

Dans le domaine des papiers à usage graphique, on assiste à une tendance orientée vers l'utilisation de plus en plus grande de pâte thermomécanique en remplacement des pâtes chimiques afin de réduire les coûts de fabrication. L'opacité, la résistance mécanique et la rugosité jouent ici un rôle important. En effet, ces papiers étant de faible grammage, la pâte doit apporter une très bonne opacité et requiert donc un coefficient de diffusion élevé. La feuille doit également posséder des propriétés mécaniques qui lui permettent de résister aux exigences des procédés d'impression à haute vitesse. De plus, la feuille doit présenter une faible rugosité qui permettra une impression de qualité et une perméabilité contrôlée pour éviter la migration des solvants des encres ou des liants de couches dans le cas des papiers couchés. Dans le domaine des cartons pour emballage à base de pâte mécanique, la rigidité est une propriété essentielle des boîtes fabriquées à partir de ces cartons afin de garantir une bonne tenue. Cette rigidité est conférée par la pâte mécanique de la couche interne. La cohésion interne joue également un rôle important dans la mesure où la feuille ne doit pas se délaminer durant le procédé de conversion où les efforts mécaniques sont élevés, notamment lors du pliage. Dans le cas de papiers à base de fibres recyclées, le nombre de recyclage déjà subi par la pâte joue un rôle important. Le besoin d'amélioration de la qualité des pâtes à base de caisses de carton recyclées croît en raison de la dégradation progressive de cette matière première en Amérique du Nord due à la pression environnementale pour la réutilisation des vieux papiers et la réduction de l'utilisation des pâtes chimiques.

L'amélioration des pâtes est donc une nécessité présente dans tous les domaines de production papetière et le fractionnement représente une orientation intéressante. Dans le cas du papier journal mais aussi d'autres sortes de papiers et cartons, on constate que l'amélioration de la qualité de la pâte présente trois aspects principaux : le développement des fibres longues, rigides et résistantes qui génèrent la matrice principale de la feuille, la préservation des fibres courtes tout en développant leur capacités de cohésion et enfin, la génération de fines, surtout de fines dites secondaires, plus fibrillées et dont la surface spécifique importante leur permet de jouer un rôle important dans la consolidation de la feuille.

Les impacts socio-économiques associés à ces problématiques sont loin d'être négligeables. Le Canada possède une très grande capacité de production qui dépasse de loin ses besoins internes et génère un excédent de poids dans la balance commerciale du pays. D'autre part, de nombreux emplois sont associés au secteur des pâtes et papiers. Il est donc important pour le Canada de conserver sa position dans le marché des pâtes et papiers au niveau mondial et de posséder la capacité de pénétrer de nouveaux marchés.

L'objectif de cette étude consiste à proposer des réponses à certaines de ces problématiques à travers le fractionnement des pâtes thermomécaniques en usage dans la fabrication du papier journal. La pâte, prélevée après le premier stade de raffinage et dite pâte primaire, n'a reçu à ce stade qu'une quantité minimale d'énergie, nécessaire à la séparation des fibres du bois, et possède encore tout son potentiel de développement. Les études antérieures réalisées par d'autres auteurs, font usage, dans leur très grande majorité, de pâte postérieure au stade secondaire de raffinage et pour lesquelles un traitement de fractionnement et de raffinage signifie une consommation additionnelle d'énergie.

L'intérêt du fractionnement des pâtes réside dans deux aspects principaux liés à la morphologie des fibres : d'une part, la distribution de longueur des fibres qui est inhérente à l'espèce et à la croissance des fibres mais qui est également modifiée par le stade primaire de raffinage sous l'effet de la coupe des fibres, et d'autre part, la période de croissance naturelle des fibres dans le bois qui permet de les classer en fibres de bois de printemps et de bois d'été avec une période transitionnelle et qui conditionne leurs dimen-

sions telles que la largeur des fibres et l'épaisseur de paroi. Ces deux aspects sont à la base des propriétés papetières des fibres.

Dans cette étude, la pâte est obtenue de l'usine de Papiers Masson Ltée et est constituée d'un mélange de trois espèces de résineux, l'épinette noire (*Picea mariana*), l'épinette blanche (*Picea glauca*) et le sapin baumier (*Abies balsamea*) ainsi que d'une quantité mineure de tremble (*Populus tremuloides*). Cette pâte est fractionnée en usine pilote à l'aide d'un tamis par des séquences de fractionnement mettant en œuvre différents paniers. L'étude préliminaire de plusieurs types de paniers, à trous et à fentes, et de séquences met en évidence, d'une part le besoin de séparer les fibres de manière efficace sur la base de la longueur et d'autre part, d'obtenir une séparation qui soit consistante avec la composition de la pâte primaire en termes de fibres longues, de fibres courtes et de fines. Finalement, une séquence mettant en œuvre plusieurs tamis en cascade sur les rejets et des paniers à ouvertures de petites dimensions, apporte une réponse satisfaisante.

Le panier à trous de 0,25 mm de diamètre est un bon équipement de fractionnement sur la base de la longueur mais génère un effet barrière qui produit un taux de rejets massique élevé. Par conséquent, il est nécessaire d'employer le taux de rejets volumique le plus bas possible pour obtenir un bilan de masse en accord avec la composition fibreuse de la pâte primaire. Par ailleurs, le taux de rejets volumique doit être suffisamment haut pour éviter le bouchage du tamis et fournir des conditions opérationnelles stables. Dans cette étude, ces conditions sont remplies pour un taux de rejets volumique de 25%. L'usage de tamis équipés de panier à fentes de 0,10 mm de large postérieurement aux tamis à trous permet de fractionner les rejets du tamis secondaire sur la base de l'épaisseur de paroi. Ce tamis produit également un effet barrière, notamment pour la classe R14, mais produit un fractionnement probabiliste pour les classes de fibres plus courtes, qui permet une augmentation significative des fibres de bois d'été dans les rejets et une diminution de ces fibres dans les acceptés.

Le raffinage produit un effet spécifique sur chaque fraction de fibres. L'effet du raffinage dépend du procédé de raffinage employé, que ce soit à haute consistance en un ou deux stades ou à basse consistance, et se traduit par des modifications différentes de la

morphologie des fibres en termes de réduction de longueur et de fibrillation des fibres. Le raffinage à basse consistance produit une coupe importante des fibres, aussi bien dans le cas des fractions de fibres longues que des fractions de fibres courtes. Le raffinage à haute consistance génère moins de coupe des fibres mais une plus grande réduction de l'épaisseur de paroi. La qualité des fines produites lors du raffinage des fibres longues est plus élevée que lorsque celles-ci sont issues du raffinage des fibres courtes, traduisant une plus grande fibrillation des fibres et la génération de fines fibrillaires avec une plus grande capacité de liaison. Le développement des fibres et la qualité des fines est également lié à la composition des fractions en termes de fibres de bois de printemps et de fibres de bois d'été. Les fibres de bois d'été sont naturellement en plus grande quantité dans la fraction de fibres longues que dans la fraction de fibres courtes car elles possèdent une plus grande résistance aux effets de raffinage du stade primaire. Ces fibres présentent une épaisseur de paroi plus importante qui leur confère une plus grande résistance mécanique, une plus grande capacité à supporter le délaminage de la paroi et donc un potentiel élevé de génération de fines. Les fibres de bois de printemps ont une épaisseur de paroi moindre et la présence de ponctuations de grande dimension créent des points faibles et contribuent à leur fragilité.

Le développement des propriétés de la pâte recombining est par conséquent dépendant du raffinage appliqué sur les fractions de pâte. Le fait de retirer les fibres courtes et les fines puis de les réintroduire dans la pâte recombining sans raffinage permet de conserver leur propriété de diffusion de la lumière. Les fibres longues requièrent cependant un traitement de raffinage plus important afin d'obtenir un niveau de développement global identique à celui de la pâte entière raffinée, ce qui se traduit par une longueur moyenne des fibres égale ou plus courte et par une réduction de la résistance à la déchirure. La meilleure qualité des fines contribue cependant à la fabrication de feuille avec une plus grande capacité à supporter les déformations induites par des efforts de traction ou d'éclatement. Ceci se traduit par un allongement à la rupture, une absorption d'énergie de traction et une résistance à l'éclatement plus élevés que celle de la pâte entière raffinée lorsque les fractions de fibres sont raffinées à haute consistance, et notamment lorsque les fibres longues sont raffinées en deux stades.

Le raffinage séparé des fibres longues et des fines génère une réduction de la consommation d'énergie de l'ordre de 28% sur le second stade qui signifie une réduction d'énergie d'environ 16% par rapport à un procédé conventionnel de fabrication de pâte TMP pour papier journal. Le fractionnement des rejets en une fraction de fibres longues enrichie en fibres de bois d'été et d'une fraction de fibres courtes contenant moins de fibres de bois d'été permet une réduction d'énergie additionnelle surtout dans le cas où la fraction de fibres courtes est raffinée à basse consistance. La qualité de la pâte finale est cependant sensiblement réduite et un raffinage à basse intensité, tel que le raffinage à haute consistance en deux stades, est requis pour préserver la qualité de la pâte recombienée.

Cette étude permet donc de proposer une nouvelle stratégie de mise en pâte TMP à travers l'implémentation d'une opération de fractionnement après le raffineur primaire. Ce fractionnement peut être composé de deux tamis équipés de paniers à trous de faible diamètre en cascade ou bien de quatre tamis en cascade, les deux premiers tamis étant équipé de paniers à trous, les deux derniers, de paniers à fentes de faible largeur. Dans le premier cas, seul les rejets sont raffinés, ce qui permet d'économiser un raffineur par rapport au procédé TMP conventionnel. Dans le deuxième cas, les rejets finaux sont raffinés à haute consistance et les acceptés des tamis à fentes sont raffinés à haute ou à basse consistance.

Mots Clés

TMP, fibres de bois de printemps, fibres de bois d'été, fractionnement, tamis, hydrocyclone, raffinage, simulation de procédé, pâte reconstituée

Keywords

TMP, earlywood, latewood, fractionation, pressure screen, hydrocyclone, refining, process simulation, recombined pulp

Table des Matières

| | |
|--|-------|
| Avant-propos..... | i |
| Remerciements..... | ii |
| Résumé..... | iii |
| Mots Clés | vii |
| Keywords..... | vii |
| Table des Matières | viii |
| Liste des Figures | xiv |
| Liste des Tableaux..... | xxii |
| Liste des Équations | xxvii |
| Liste des Abréviations..... | xxxii |
| Chapitre 1 - Problématique industrielle | 33 |
| 1.1 Introduction..... | 33 |
| 1.2 Amélioration de la qualité de la pâte thermomécanique..... | 35 |
| 1.3 Impact environnemental | 36 |
| 1.4 Proposition de recherche..... | 36 |
| 1.4.1 Objectifs de l'étude..... | 37 |
| Chapitre 2 - Revue de la littérature | 38 |
| 2.1 Introduction..... | 38 |
| 2.2 Problématiques associées aux sortes de papiers | 39 |
| 2.2.1 Les papiers à usages graphiques | 39 |
| 2.2.2 Autres sortes de pâtes, papiers et cartons | 43 |
| 2.3 Impacts socio-économiques..... | 46 |
| 2.3.1 Enjeu industriel..... | 46 |
| 2.3.2 Enjeu économique | 49 |

| | |
|---|----|
| Chapitre 3 - Cadre théorique | 50 |
| 3.1 Structure du bois | 50 |
| 3.1.1 Structure macroscopique | 50 |
| 3.1.2 Structure microscopique | 51 |
| 3.1.2.1 Composantes fibreuses..... | 51 |
| 3.1.2.2 Fibres d'été et fibres de printemps | 53 |
| 3.2 Fractionnement | 57 |
| 3.2.1 Relations de base | 58 |
| 3.2.2 Fractionnement par tamisage..... | 59 |
| 3.2.2.1 Approche mathématique du fractionnement | 61 |
| 3.2.2.2 Indices de fractionnement et de performance | 69 |
| 3.2.2.3 Effet des variables du procédé | 73 |
| 3.2.2.4 Conclusion sur le tamisage..... | 77 |
| 3.2.3 Fractionnement par hydrocyclones..... | 78 |
| 3.2.3.1 Mesure de la surface spécifique | 81 |
| 3.2.3.2 Conclusion sur le fractionnement par hydrocyclone | 82 |
| 3.3 Raffinage..... | 83 |
| 3.4 Conclusion | 85 |
| Chapitre 4 - Méthodologie | 87 |
| 4.1 Expérimentation..... | 87 |
| 4.2 Planification | 87 |
| 4.3 Matériel et préparation..... | 89 |
| 4.4 Caractérisation de la pâte primaire | 89 |
| 4.4.1 Caractéristiques de la pâte de premier stade..... | 89 |
| 4.4.2 Comportement au raffinage | 89 |
| 4.5 Fractionnement | 90 |
| 4.5.1 Équipements | 90 |
| 4.5.1.1 Stratégie de contrôle..... | 90 |
| 4.5.1.2 Mode opératoire | 90 |
| 4.5.2 Modélisation des tamis | 91 |
| 4.6 Raffinage..... | 94 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 4.6.1 | Mode opératoire..... | 94 |
| 4.6.1.1 | Raffinage à haute consistance | 94 |
| 4.6.1.2 | Raffinage à basse consistance | 95 |
| 4.7 | Reconstitution de la pâte..... | 96 |
| 4.7.1 | Correction des erreurs de bilan..... | 96 |
| 4.7.2 | Estimation des caractéristiques papetières..... | 99 |
| 4.8 | Caractérisation des pâtes..... | 100 |
| 4.8.1 | Caractéristiques papetières | 100 |
| 4.8.1.1 | Indice d'égouttage | 101 |
| 4.8.1.2 | Classage des fibres | 101 |
| 4.8.1.3 | Volume spécifique de sédimentation des fines | 103 |
| 4.8.2 | Analyse optique | 104 |
| 4.8.2.1 | Appareil FQA..... | 104 |
| 4.8.2.2 | Appareil MWT | 106 |
| 4.8.2.3 | Microscopie électronique | 113 |
| 4.8.3 | Caractérisation des formettes..... | 116 |
| 4.8.3.1 | Caractéristiques des feuilles de laboratoire..... | 118 |
| 4.9 | Analyse statistique | 119 |

Chapitre 5 - Résultats et discussion (1) – Comportement de la pâte primaire au

| | | |
|---------|---|-----|
| | raffinage..... | 120 |
| 5.1 | Caractéristiques de la pâte primaire..... | 120 |
| 5.1.1 | Analyses microscopiques des fibres | 120 |
| 5.1.1.1 | Dimensions et formes des sections de fibres..... | 121 |
| 5.1.1.2 | Taux de fibres de bois de printemps et de bois d'été..... | 127 |
| 5.2 | Comportement au raffinage | 129 |
| 5.2.1 | Propriétés de la pâte raffinée | 131 |
| 5.2.1.1 | Énergie spécifique de raffinage..... | 131 |
| 5.2.1.2 | Classage Bauer McNett..... | 131 |
| 5.2.1.3 | Rejets Pulmac..... | 134 |
| 5.2.1.4 | Longueur des fibres..... | 134 |
| 5.2.2 | Propriétés des feuilles de laboratoire..... | 135 |

| | | |
|--|---|-----|
| 5.2.2.1 | Propriétés physiques..... | 135 |
| 5.2.2.2 | Propriétés optiques | 139 |
| 5.3 | Conclusion | 141 |
| Chapitre 6 - Résultats et discussion (2) – Essais préliminaires de fractionnement..... | | 142 |
| 6.1 | Fractionnement | 142 |
| 6.1.1 | Expérimentation..... | 142 |
| 6.1.2 | Performance de fractionnement..... | 148 |
| 6.1.2.1 | Taux de rejets, taux d'épaississement | 148 |
| 6.1.2.2 | Indice de fractionnement..... | 153 |
| 6.1.2.3 | Efficacité de séparation des fibres..... | 155 |
| 6.1.3 | Caractéristiques des pâtes fractionnées | 157 |
| 6.1.3.1 | Indice d'égouttage | 158 |
| 6.1.3.2 | Longueur des fibres..... | 160 |
| 6.1.3.3 | Volume spécifique des fines | 162 |
| 6.2 | Modélisation des tamis | 163 |
| 6.2.1 | Taux de rejets massique..... | 163 |
| 6.2.2 | Probabilité de rétention..... | 164 |
| 6.3 | Raffinage..... | 165 |
| 6.3.1 | Fractions raffinées | 165 |
| 6.3.2 | Propriétés de fractions raffinées | 166 |
| 6.4 | Recombinaison de la pâte entière | 170 |
| 6.4.1 | Proportions de mélanges..... | 170 |
| 6.4.2 | Qualité de la pâte reconstituée | 170 |
| 6.4.2.1 | Sélection des mélanges | 170 |
| 6.4.2.2 | Procédé de raffinage des fractions | 172 |
| 6.4.2.3 | Prédictions des propriétés des mélanges | 175 |
| 6.4.2.4 | Énergie spécifique de raffinage..... | 177 |
| 6.4.2.5 | Potentiel de développement | 179 |
| 6.5 | Conclusions..... | 180 |
| 6.5.1 | Fractionnement | 180 |
| 6.5.2 | Raffinage..... | 181 |
| 6.5.3 | Propriétés de la pâte reconstituée | 181 |

| | |
|---|-----|
| Chapitre 7 - Résultats et discussion (3) – Fractionnement avec des ouvertures de petites dimensions..... | 183 |
| 7.1 Introduction..... | 183 |
| 7.2 Étude du panier à trous de 0,25 mm de diamètre..... | 183 |
| 7.2.1 Plan d'étude | 183 |
| 7.2.2 Résultats..... | 185 |
| 7.2.2.1 Analyse de variance et covariance du modèle | 185 |
| 7.2.2.2 Pression différentielle..... | 186 |
| 7.2.2.3 Différence d'indice d'égouttage..... | 188 |
| 7.2.2.4 Taux de passage | 190 |
| 7.2.2.5 Conclusion du plan d'expérience | 191 |
| 7.2.2.6 Diamètre optimum des trous | 192 |
| 7.3 Séquence de fractionnement | 194 |
| 7.3.1 Efficacité de fractionnement..... | 195 |
| 7.3.2 Bilan de masse des fractions..... | 198 |
| 7.3.3 Bilan de masse des fibres de BP et de BE | 199 |
| 7.4 Raffinage..... | 201 |
| 7.5 Recombinaison de la pâte | 202 |
| 7.5.1 Modèle prédictif des propriétés physiques | 202 |
| 7.5.2 Énergie spécifique de raffinage | 204 |
| 7.5.3 Propriétés physiques et optiques..... | 206 |
| 7.5.3.1 Procédés de raffinage | 207 |
| 7.5.3.2 Distribution de l'énergie spécifique | 213 |
| 7.6 Conclusions..... | 216 |
| 7.6.1 Stratégies de raffinage | 217 |
| 7.6.2 Procédé TMP | 218 |
| Chapitre 8 - Conclusions | 221 |
| 8.1 Réduction de la consommation d'énergie..... | 222 |
| 8.2 Qualité des pâtes | 223 |
| 8.3 Contributions à l'avancement des connaissances | 225 |
| 8.4 Recommandations et perspectives | 227 |

| | |
|---|-----|
| Bibliographie | 229 |
| Annexe A - Résultats expérimentaux – Essais préliminaires | 251 |
| Annexe B - Résultats expérimentaux – Fractionnement avec de petites ouvertures | 278 |
| Annexe C - Macro ImageJ | 305 |
| Annexe D - Publications | 307 |

Liste des Figures

| | | |
|------------|--|----|
| Figure 1.1 | Schéma du procédé de mise en pâte thermomécanique de l'usine Papiers Masson Ltée | 34 |
| Figure 1.2 | Comparaison des moyennes d'absorption de l'énergie de traction du papier produit par Papier Masson Ltée au cours de différentes périodes de l'année et pour différents taux de production | 35 |
| Figure 2.1 | Effet de l'amélioration de la fraction de fibres longues sur l'indice de résistance à la traction et la perméabilité à l'air d'une pâte thermomécanique de pin Radiata de 80 mL CSF | 42 |
| Figure 2.2 | Production et consommation apparente de papier journal dans le monde et en Amérique du Nord de 1965 à nos jours..... | 47 |
| Figure 2.3 | Relation entre le Produit Intérieur Brut per capita et la consommation apparente de papier journal dans le monde en 2005..... | 47 |
| Figure 2.4 | Consommation apparente de papier journal des principaux pays consommateurs de 1965 à nos jours..... | 48 |
| Figure 2.5 | Production de papier journal des principaux pays producteurs de 1965 à nos jours | 48 |
| Figure 3.1 | Sections de (a) tronc d'épinette blanche (<i>Picea glauca</i>) et (b) de sapin (<i>Abies balsamea</i>) montrant les cernes de BP en clair et de BE en foncé | 51 |
| Figure 3.2 | Section d'un tronc de résineux de quatre ans d'âge montrant les sections transversale (haut), radiale (droite) et tangentielle (gauche)..... | 52 |
| Figure 3.3 | Représentation schématique de la structure du bois (a) et de la paroi cellulaire (b) d'une fibre lignocellulosique..... | 52 |
| Figure 3.4 | Sections transversale (a) ($\times 100$), radiale (b) ($\times 200$) et tangentielle (c) ($\times 200$) de bois de sapin (<i>Picea abies</i>) | 54 |
| Figure 3.5 | Profils schématiques des ponctuations (a) auréolées, (b) semi- auréolées et (c) simples | 55 |
| Figure 3.6 | Convention de représentation pour un tamis sous pression et un hydrocyclone et définition des indices communément utilisés..... | 58 |
| Figure 3.7 | Diagramme de cause à effet du procédé de fractionnement par tamis sous pression..... | 60 |
| Figure 3.8 | Schéma d'un élément de section d'un tamis sous pression indiquant les débits volumiques et massiques autour d'un volume de contrôle..... | 62 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Figure 3.9 | Les appareils Kajaani FS-300 (Metso Automation) et Fiber Quality Analyzer (Optest Equipment Inc.) | 66 |
| Figure 3.10 | Quelques profils commerciaux de paniers à fentes | 75 |
| Figure 3.11 | Diagramme de cause à effet du procédé de fractionnement par hydrocyclones | 79 |
| Figure 3.12 | Diagramme de cause à effet du procédé de raffinage | 83 |
| Figure 4.1 | Schéma général de l'expérimentation..... | 88 |
| Figure 4.2 | Photographie du tamis Black Clawson modèle 8-P (à gauche) et de l'intérieur de la cuve montrant le rotor à deux lames (à droite). | 90 |
| Figure 4.3 | Comparaison des prédictions d'efficacité de séparation selon le modèle utilisé, pour une fraction acceptée et une fraction rejetée, à partir des indices W_i et P_i obtenus à un taux de rejets volumique de 40%..... | 93 |
| Figure 4.4 | Raffineur Metso CD300 installé au CIPP..... | 94 |
| Figure 4.5 | Modèle d'énergie de raffinage en fonction de l'indice d'égouttage utilisé pour estimer l'énergie de raffinage à basse consistance dans le raffineur CD300 | 95 |
| Figure 4.6 | Comparaison entre les valeurs de correction du bilan de masse et des valeurs de réconciliation | 99 |
| Figure 4.7 | Image de fibres (à gauche) d'une pâte thermomécanique prise par l'appareil MWT (à droite) pour la mesure d'épaisseur de paroi par analyse d'image..... | 106 |
| Figure 4.8 | Fenêtre d'analyse des fibres (à gauche) et graphiques statistiques (à droite) du logiciel d'analyse d'images | 108 |
| Figure 4.9 | Dimensions d'une section transversales de fibre (à gauche) et observation longitudinale par microscopie optique (à droite)..... | 109 |
| Figure 4.10 | Schéma du mode préparatoire pour l'observation de sections transversales de fibre par microscopie électronique à balayage | 114 |
| Figure 5.1 | Épaisseur de paroi des fibres de BP et de BP en fonction de la largeur des fibres, mesurées sur sections transversales de fibres..... | 122 |
| Figure 5.2 | Distribution de l'épaisseur de paroi des fibres de BP et de BE | 123 |
| Figure 5.3 | Épaisseur de paroi des fibres de BP et de BP en fonction de la largeur des fibres, mesurées sur micrographies obtenues avec l'appareil MWT..... | 124 |
| Figure 5.4 | Comparaison des distributions de largeurs de fibres de BE et de BP mesurées sur micrographies MWT et sur sections de fibres obtenues par microscopie électronique | 124 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figure 5.5 | Comparaison des distributions des épaisseurs de paroi des fibres de BE et de BP mesurées sur micrographies MWT et sur sections de fibres obtenues par microscopie électronique | 125 |
| Figure 5.6 | Comparaison des méthodes de mesure de largeur (a) et d'épaisseur de paroi (b) des fibres sur micrographies MWT et sur sections de fibres obtenues par microscopie électronique | 125 |
| Figure 5.7 | Distribution des valeurs de facteur de forme pour les fibres de BP et de BE et sections transversales caractéristiques ($\times 400$)..... | 126 |
| Figure 5.8 | Épaisseur de paroi des fibres de BP et de BP en fonction du paramètre..... | 127 |
| Figure 5.9 | Relation entre la masse linéique moyenne et le taux massique de fibres de BE..... | 129 |
| Figure 5.10 | Épaisseur de paroi (a) et largeur de fibres (b) des BP et de BE dans chaque fraction Bauer McNett..... | 129 |
| Figure 5.11 | Courbes de raffinage de deuxième stade à haute consistance pour la pâte primaire..... | 131 |
| Figure 5.12 | Fractions Bauer McNett en fonction de l'indice d'égouttage, (a) fraction R14, (b) fraction R28, (c) fraction R48, (d) fraction R100, (e) fraction R200, (f) fraction P200..... | 133 |
| Figure 5.13 | Taux de rejets Pulmac en fonction de l'indice d'égouttage..... | 134 |
| Figure 5.14 | Évolution de la longueur moyenne pondérée en longueur des fibres en fonction l'indice d'égouttage (à gauche) et de l'énergie spécifique de raffinage (à droite) | 135 |
| Figure 5.15 | Évolution de l'indice de rupture au cours du raffinage, en fonction de l'indice d'égouttage (à gauche) et en fonction de l'énergie spécifique (à droite)..... | 137 |
| Figure 5.16 | Évolution de l'indice de déchirure au cours du raffinage, en fonction de l'indice d'égouttage (à gauche) et en fonction de l'énergie spécifique (à droite) | 138 |
| Figure 5.17 | Relation entre l'indice d'éclatement et l'indice de rupture pour la pâte primaire au cours du raffinage..... | 138 |
| Figure 5.18 | Évolution au cours du raffinage de l'indice d'éclatement (à gauche) et de l'absorption d'énergie de rupture (à droite) en fonction de l'indice d'égouttage..... | 139 |
| Figure 5.19 | Évolution de la blancheur au cours du raffinage en fonction de l'indice d'égouttage (à gauche) et de l'énergie spécifique de raffinage (à droite)..... | 140 |
| Figure 5.20 | Évolution du coefficient de diffusion au cours du raffinage en fonction de l'indice d'égouttage (à gauche) et de l'énergie spécifique de raffinage (à droite) | 140 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figure 6.1 | Schéma du procédé de fractionnement (a) : Tamis à trous (P1 et P2) et hydrocyclones (P2 et S1)..... | 143 |
| Figure 6.2 | Schéma du procédé de fractionnement (b) : Tamis à trous (P1 et S1), tamis à fentes (P2 et S2) et hydrocyclone (P3)..... | 143 |
| Figure 6.3 | Schéma du procédé de fractionnement (c) : Tamis à trous (P1 et S1), tamis à fentes (P2 et S2) | 143 |
| Figure 6.4 | Photographies des paniers à trous lisses (a) et à fentes profilées (b) utilisés sur le tamis 8-P | 144 |
| Figure 6.5 | Évolution du taux de rejets massique en fonction du taux de rejets volumique pour les différents paniers et l'hydrocyclone | 148 |
| Figure 6.6 | Évolution du taux d'épaississement en fonction du taux de rejets volumique pour les différents paniers et l'hydrocyclone | 149 |
| Figure 6.7 | Inverse du taux d'épaississement en fonction du taux de rejets volumique pour les différents paniers | 150 |
| Figure 6.8 | Régressions linéaires permettant de déterminer le taux de passage en régime d'écoulement en mélange | 152 |
| Figure 6.9 | Influence du taux de rejets volumique sur le taux de passage | 153 |
| Figure 6.10 | Indice de fractionnement Q des fractions Bauer McNett pour les différents paniers | 154 |
| Figure 6.11 | Indice de fractionnement Q des fractions Bauer McNett pour l'hydrocyclone..... | 155 |
| Figure 6.12 | Efficacité de rejet en fonction du taux de rejets massique pour le panier à trous de 1,20 mm de diamètre à une consistance d'alimentation de 1% | 156 |
| Figure 6.13 | Efficacité de séparation le panier à trous de 1,20 mm de diamètre à différentes consistances d'alimentation..... | 157 |
| Figure 6.14 | Efficacité de séparation pour les différents paniers à une consistance d'alimentation de 1%..... | 157 |
| Figure 6.15 | Fibres de pâte de premier stade observées au microscope électronique à balayage (×150) | 162 |
| Figure 6.16 | Probabilité de rétention des fractions Bauer McNett pour les différents paniers utilisés lors des essais en usine pilote..... | 163 |
| Figure 6.17 | Comparaison du taux de rejets massique estimé par le modèle en fonction de taux de rejets massique mesuré..... | 163 |
| Figure 6.18 | Évolution de l'indice d'égouttage au cours du raffinage pour les différentes fractions (HC1 = haute consistance en 1 stade, HC2 = haute consistance en 2 stades, P = pâte primaire)..... | 167 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Figure 6.19 | Évolution de la longueur moyenne pondérée des fibres au cours du raffinage pour la fraction S1 (HC1 = haute consistance en 1 stade, HC2 = haute consistance en 2 stades, BC = basse consistance, P = pâte primaire) | 167 |
| Figure 6.20 | Évolution de la longueur moyenne pondérée des fibres au cours du raffinage pour la fraction A (HC = haute consistance, BC = basse consistance, P = pâte primaire) | 168 |
| Figure 6.21 | Évolution du coefficient de diffusion de la lumière au cours du raffinage pour les fractions S1 et A (HC = haute consistance, BC = basse consistance, P = pâte primaire) | 168 |
| Figure 6.22 | Évolution de l'indice de déchirure au cours du raffinage pour les fractions S1 et A (HC = haute consistance, BC = basse consistance, P = pâte primaire) | 169 |
| Figure 6.23 | Effet du procédé de raffinage des fractions sur l'indice de rupture – Séquence (c) (les étiquettes indiquent le procédé de raffinage et le niveau de raffinage des fractions de fibres longues S1 et S2 respectivement, conformément au plan d'expérience indiqué dans le tableau 6.16)..... | 173 |
| Figure 6.24 | Effet du procédé de raffinage des fractions sur l'indice de rupture – Séquence (b) (les étiquettes indiquent le procédé de raffinage des fractions S1, S2 et A respectivement : 0 = basse consistance, 1 = haute consistance en un stade, 2 = haute consistance en deux stades)..... | 175 |
| Figure 6.25 | Effet du procédé de raffinage des fractions sur l'indice de déchirure – Séquence (b) (les étiquettes indiquent le procédé de raffinage des fractions S1, S2 et A respectivement : 0 = basse consistance, 1 = haute consistance en un stade, 2 = haute consistance en deux stades)..... | 175 |
| Figure 6.26 | Relation entre l'énergie spécifique de raffinage et l'indice de résistance à la déchirure (les étiquettes indiquent le procédé de raffinage des fractions S1, S2 et A respectivement : 0 = BC, 1 = HC1, 2 = HC2, les ellipses correspondent au lieu des points fournis par le modèle dans les conditions de raffinage spécifiées)..... | 178 |
| Figure 6.27 | Relation entre l'énergie spécifique de raffinage des fractions et l'indice de résistance à la rupture (les étiquettes indiquent le procédé de raffinage des fractions S1, S2 et A respectivement : 0 = BC, 1 = HC1, 2 = HC2, les ellipses correspondent au lieu des points fournis par le modèle dans les conditions de raffinage spécifiées) | 179 |
| Figure 6.28 | Potentiel de développement de l'indice de rupture..... | 180 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figure 7.1 | Comparaison des termes diagonaux de la matrice de variance-covariance | 186 |
| Figure 7.2 | Comparaison entre mesures et valeurs prédites par le modèle de pression différentielle (a) et écart-type des résidus (b) pour chaque série d'essais | 187 |
| Figure 7.3 | Fractions Bauer McNett moyennes et écart-type des acceptés du tamis pour différents taux de fibres longues | 189 |
| Figure 7.4 | Droites de corrélation pour la détermination du taux de passage (a) et valeurs du taux passage (b) pour chaque série d'essais | 190 |
| Figure 7.5 | Distribution de longueur moyenne pondérée en longueur des fibres de chaque classe Bauer McNett de la pâte primaire | 193 |
| Figure 7.6 | Courbes de l'indice Q normalisé pour les paniers à trous de 0,25 mm et de 1,20 mm en fonction de la longueur moyenne des fibres des classes du Bauer McNett (a) et interpolations du diamètre de trous requis pour une longueur critique de fibre de 1,075 mm (b)..... | 194 |
| Figure 7.7 | Schéma du procédé de fractionnement à 4 stades en cascade sur les rejets..... | 195 |
| Figure 7.8 | Classification Bauer McNett des fractions obtenues avec deux tamis (a) et avec quatre tamis (b) | 196 |
| Figure 7.9 | Indice d'égouttage des fractions de pâtes | 197 |
| Figure 7.10 | Efficacité de rejet (a) et indice de fractionnement Q normalisé (b) des paniers à trous et à fentes pour chaque classe Bauer McNett..... | 197 |
| Figure 7.11 | Fractionnement des classes Bauer McNett de la pâte primaire entre les différentes fractions obtenues | 198 |
| Figure 7.12 | Taux en poids de fibre de BE dans chaque fraction de pâte (a) et masse linéique des fibres en fonction du taux de fibres de BE (b) pour les classes R28, R48 et R100 | 200 |
| Figure 7.13 | Comparaison des valeurs d'indice d'égouttage mesurées et prédites | 203 |
| Figure 7.14 | Indice d'égouttage des pâtes recombinaées et de la pâte entière en fonction de l'énergie spécifique – 1 ^{ère} série (en légende : procédé de raffinage de la fraction SR)..... | 204 |
| Figure 7.15 | Indice d'égouttage des pâtes recombinaées et de la pâte entière en fonction de l'énergie spécifique – 2 ^{ième} série (en légende : procédé de raffinage des fractions QR et A2 respectivement)..... | 204 |
| Figure 7.16 | Indice d'égouttage des pâtes recombinaées et de la pâte entière en fonction de l'énergie spécifique – 2 ^{ième} série (en légende : procédé de raffinage de la fraction A2 et niveau d'énergie)..... | 205 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figure 7.17 | Absorption de l'énergie de traction en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 1 ^{ère} série..... | 208 |
| Figure 7.18 | Indice de résistance à la rupture par traction en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 1 ^{ère} série..... | 208 |
| Figure 7.19 | Allongement à la rupture en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 1 ^{ère} série | 209 |
| Figure 7.20 | Indice de résistance à l'éclatement en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 1 ^{ère} série..... | 209 |
| Figure 7.21 | Indice de résistance à la déchirure en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 1 ^{ère} série..... | 209 |
| Figure 7.22 | Longueur moyenne pondérée des fibres en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 1 ^{ère} série..... | 210 |
| Figure 7.23 | Coefficient de diffusion de la lumière en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 1 ^{ère} série..... | 210 |
| Figure 7.24 | Absorption de l'énergie de traction en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 2 ^{ième} série..... | 211 |
| Figure 7.25 | Indice de résistance à la rupture par traction en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 2 ^{ième} série..... | 211 |
| Figure 7.26 | Allongement à la rupture en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 2 ^{ième} série | 211 |
| Figure 7.27 | Indice de résistance à l'éclatement en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 2 ^{ième} série..... | 212 |
| Figure 7.28 | Indice de résistance à la déchirure en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 2 ^{ième} série..... | 212 |
| Figure 7.29 | Longueur moyenne pondérée des fibres en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 2 ^{ième} série..... | 212 |
| Figure 7.30 | Coefficient de diffusion de la lumière en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 2 ^{ième} série..... | 213 |
| Figure 7.31 | Absorption de l'énergie de traction à différents niveaux d'énergie spécifique – 2 ^{ième} série..... | 214 |
| Figure 7.32 | Indice de rupture par traction à différents niveaux d'énergie spécifique – 2 ^{ième} série..... | 214 |
| Figure 7.33 | Allongement à la rupture à différents niveaux d'énergie spécifique – 2 ^{ième} série..... | 215 |
| Figure 7.34 | Indice de résistance à l'éclatement à différents niveaux d'énergie spécifique – 2 ^{ième} série..... | 215 |
| Figure 7.35 | Indice de résistance à la déchirure à différents niveaux d'énergie spécifique – 2 ^{ième} série..... | 215 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figure 7.36 | Longueur moyenne pondérée des fibres à différents niveaux d'énergie spécifique – 2 ^{ième} série | 216 |
| Figure 7.37 | Coefficient de diffusion de la lumière à différents niveaux d'énergie spécifique – 2 ^{ième} série | 216 |
| Figure 7.38 | Schéma du procédé de mise en pâte thermomécanique incorporant le fractionnement avec tamis en cascade après le stade primaire | 219 |
| Figure A.1 | Bilan de masse de la séquence (b) | 274 |
| Figure A.2 | Bilan de masse de la séquence (c) | 275 |
| Figure B.1 | Bilan de masse de la séquence de fractionnement préliminaire à 4 stades | 300 |
| Figure B.2 | Bilan de masse de la séquence de fractionnement finale à 4 stades | 301 |

Liste des Tableaux

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tableau 2.1 | Volumes de production de pâte, papiers et cartons en milliers de tonnes métriques pour l'année 2002 | 49 |
| Tableau 3.1 | Caractéristiques dimensionnelles des trachéides de résineux..... | 56 |
| Tableau 3.2 | Composition du bois en termes de BP et de BE | 57 |
| Tableau 3.3 | Schémas simplifiés de configurations de montage de tamis..... | 61 |
| Tableau 4.1 | Principales caractéristiques des équipements de fractionnement et de raffinage du CIPP | 87 |
| Tableau 4.2 | Méthodes standards et méthodes utiles pour la préparation et la caractérisation des pâtes et formettes de pâte | 101 |
| Tableau 4.3 | Schémas de sections transversales de fibres de BP et de fibres de BE montrant différents degrés de collapsus..... | 111 |
| Tableau 4.4 | Méthodes standards et méthodes utiles pour la préparation et la caractérisation des formettes de pâte..... | 117 |
| Tableau 5.1 | Caractéristiques de la pâte de premier stade de papiers Masson | 120 |
| Tableau 5.2 | Caractéristiques morphologiques des fibres de la pâte primaire mesurées sur sections transversales obtenues par microscopie électronique | 121 |
| Tableau 5.3 | Caractéristiques morphologiques des fibres de la pâte primaire mesurées sur micrographies MWT | 122 |
| Tableau 5.4 | Fractions massiques des fibres de BP et de BE obtenues par comptage sur micrographies MWT..... | 128 |
| Tableau 5.5 | Caractéristiques de la pâte primaire raffinée | 130 |
| Tableau 5.6 | Propriétés mécaniques et optiques des feuilles de laboratoire fabriquées avec la pâte primaire raffinée | 136 |
| Tableau 6.1 | Planification expérimentale des essais pour le procédé (a) | 145 |
| Tableau 6.2 | Planification expérimentale des essais pour le procédé (b) | 146 |
| Tableau 6.3 | Planification expérimentale des essais pour le procédé (c) | 147 |
| Tableau 6.4 | Valeurs du taux de passage obtenues par régression linéaire entre le taux de rejets volumique et l'inverse du taux d'épaississement..... | 150 |
| Tableau 6.5 | Valeurs du taux de passage obtenues par régressions linéaires selon la relation entre W_C et R_w | 152 |
| Tableau 6.6 | Effet de la consistance d'alimentation et du taux de rejets volumiques sur l'indice d'égouttage pour le panier à trous de Ø 1,20 mm | 159 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Tableau 6.7 | Effet de la largeur des fentes et du taux de rejets volumiques sur l'indice d'égouttage pour les paniers à fentes de 0,15 et 0,10 mm de largeur | 159 |
| Tableau 6.8 | Effet du taux de fibres longues et du taux de rejets volumiques sur l'indice d'égouttage pour l'hydrocyclone | 159 |
| Tableau 6.9 | Effet de la consistance d'alimentation et du taux de rejets volumiques sur la longueur des fibres pour le panier à trous de Ø 1,20 mm..... | 161 |
| Tableau 6.10 | Effet de la largeur des fentes et du taux de rejets volumiques sur l'indice d'égouttage pour les paniers à fentes de 0,15 et 0,10 mm de largeur | 161 |
| Tableau 6.11 | Effet du taux de fibres longues et du taux de rejets volumiques sur l'indice d'égouttage pour l'hydrocyclone | 161 |
| Tableau 6.12 | Volume spécifique des fines dans les différents débits des équipements de fractionnement – Procédé (b)..... | 162 |
| Tableau 6.13 | Modèles de probabilité de rétention pour le panier à trous de Ø 1,20 mm (les seuils de rejet sont indiqués entre parenthèses)..... | 164 |
| Tableau 6.14 | Proportions massiques de mélanges des procédés de fractionnement (b) et (c)..... | 170 |
| Tableau 6.15 | Mélanges sélectionnés pour la séquence de fractionnement (b)..... | 171 |
| Tableau 6.16 | Mélanges sélectionnés pour la séquence de fractionnement (c) | 172 |
| Tableau 6.17 | Effets du type de raffinage et du niveau de raffinage des fractions sur les propriétés de la pâte reconstituée – Séquence (c) | 174 |
| Tableau 6.18 | Modèles prédictifs des propriétés des mélanges..... | 177 |
| Tableau 6.19 | Optimum de développement des propriétés physiques de la pâte reconstituée à un indice d'égouttage de 100 mL..... | 180 |
| Tableau 7.1 | Plan d'expérience du tamis à trous de 0,25 mm de diamètre | 184 |
| Tableau 7.2 | Recodage de la consistance d'alimentation à partir des valeurs réelles obtenues lors de l'expérimentation..... | 185 |
| Tableau 7.3 | Matrice de variance-covariance $(X^T.X)^{-1}$ du plan d'expérience | 186 |
| Tableau 7.4 | Effets des variables du procédé de fractionnement sur divers paramètres de tamisage | 188 |
| Tableau 7.5 | Effets des variables du procédé de fractionnement sur la différence d'indice d'égouttage à différents taux de fibres longues | 190 |
| Tableau 7.6 | Effets des variables du procédé de fractionnement sur divers paramètres de tamisage et sur les probabilités de rétention de Wahren pour chaque fraction Bauer McNett | 192 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Tableau 7.7 | Distribution des fibres de BP et de BE au cours du procédé de raffinage, en pourcentage en poids de la pâte entière | 199 |
| Tableau 7.8 | Modèles prédictifs des propriétés des mélanges..... | 203 |
| Tableau 7.9 | Légende utilisée dans les figures 7.24 à 7.30 | 210 |
| Tableau 7.10 | Légende employée dans les figures 7.31 à 7.37 | 214 |
| Tableau 7.11 | Tableau comparatif de plusieurs stratégies de raffinage en termes d'énergie spécifique de raffinage et de propriétés physiques | 218 |
| Tableau A.1 | Conditions d'opération pour la séquence (a) | 251 |
| Tableau A.2 | Conditions d'opération pour la séquence (b)..... | 252 |
| Tableau A.3 | Conditions d'opération pour la séquence (c) | 253 |
| Tableau A.4 | Fractions Bauer McNett des pâtes – Séquence (a) | 254 |
| Tableau A.4 | Fractions Bauer McNett des pâtes – Séquence (a) – suite | 255 |
| Tableau A.5 | Fractions Bauer McNett des pâtes – Séquence (b) | 256 |
| Tableau A.6 | Fractions Bauer McNett des pâtes – Séquence (c) | 257 |
| Tableau A.7 | Propriétés des pâtes – Séquence (a)..... | 258 |
| Tableau A.8 | Propriétés des pâtes – Séquence (b)..... | 259 |
| Tableau A.9 | Propriétés des pâtes – Séquence (c)..... | 259 |
| Tableau A.10 | Propriétés de la fraction S1 raffinée à haute consistance en 1 stade – Séquence (b)..... | 260 |
| Tableau A.11 | Propriétés de la fraction S1 raffinée à haute consistance en 2 stades – Séquence (b)..... | 261 |
| Tableau A.12 | Propriétés de la fraction S1 raffinée à basse consistance – Séquence (b)..... | 262 |
| Tableau A.13 | Propriétés de la fraction S2 raffinée à haute consistance en 1 stade – Séquence (b)..... | 263 |
| Tableau A.14 | Propriétés de la fraction S2 raffinée à haute consistance en 2 stades – Séquence (b)..... | 264 |
| Tableau A.15 | Propriétés de la fraction S2 raffinée à basse consistance – Séquence (b)..... | 265 |
| Tableau A.16 | Propriétés de la fraction A raffinée à haute consistance en 1 stade – Séquence (b)..... | 266 |
| Tableau A.17 | Propriétés de la fraction A raffinée à basse consistance – Séquence (b)..... | 267 |
| Tableau A.18 | Propriétés de la fraction S1 raffinée à haute consistance en 1 stade – Séquence (c)..... | 268 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Tableau A.19 | Propriétés de la fraction S1 raffinée à basse consistance – Séquence (c)..... | 269 |
| Tableau A.20 | Propriétés de la fraction S2 raffinée à haute consistance en 1 stade – Séquence (c)..... | 270 |
| Tableau A.21 | Propriétés de la fraction S2 raffinée à basse consistance – Séquence (c)..... | 271 |
| Tableau A.22 | Propriétés de la fraction A raffinée à haute consistance en 1 stade – Séquence (c)..... | 272 |
| Tableau A.23 | Propriétés de la fraction A raffinée à basse consistance – Séquence (c)..... | 273 |
| Tableau A.24 | Propriétés des mélanges – Séquence (b) | 276 |
| Tableau A.25 | Propriétés des mélanges – Séquence (c) | 277 |
| Tableau B.1 | Conditions d’opération des essais de fractionnement avec le tamis à trous de 0,25 mm de diamètre | 278 |
| Tableau B.2 | Fractions Bauer McNett – Essais 1501 à 1509 | 279 |
| Tableau B.3 | Fractions Bauer McNett – Essais 1601 à 1609 | 280 |
| Tableau B.4 | Fractions Bauer McNett – Essais 1701 à 1709 | 281 |
| Tableau B.5 | Fractions Bauer McNett – Essais 1801 à 1809 | 282 |
| Tableau B.6 | Longueur moyenne des fibres, masse linéique et taux de fines mesurés avec l’appareil FQA sur la fraction R28 des rejets | 283 |
| Tableau B.7 | Longueur moyenne des fibres, masse linéique et taux de fines mesurés avec l’appareil FQA sur la fraction R48 des rejets | 284 |
| Tableau B.8 | Longueur moyenne des fibres, masse linéique et taux de fines mesurés avec l’appareil FQA sur la fraction R100 des rejets | 285 |
| Tableau B.9 | Longueur moyenne des fibres, masse linéique et taux de fines mesurés avec l’appareil FQA sur la fraction R200 des rejets | 286 |
| Tableau B.10 | Conditions d’opération pour la séquence de fractionnement à 4 stades en cascade sur les rejets..... | 287 |
| Tableau B.11 | Propriétés des pâtes | 287 |
| Tableau B.12 | Fractions Bauer McNett des pâtes fractionnées | 288 |
| Tableau B.13 | Comptage et caractéristiques morphologique des fibres de BP et des fibres de BE..... | 289 |
| Tableau B.14 | Longueur moyenne des fibres, masse linéique et taux de fines mesurés avec l’appareil FQA sur la fraction R28 et R48..... | 290 |
| Tableau B.15 | Longueur moyenne des fibres, masse linéique et taux de fines mesurés avec l’appareil FQA sur la fraction R100 et R200..... | 291 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Tableau B.16 | Propriétés de la fraction SR raffinée à haute consistance en 1 stade..... | 292 |
| Tableau B.17 | Propriétés de la fraction SR raffinée à haute consistance en 2 stades..... | 293 |
| Tableau B.18 | Propriétés de la fraction SR raffinée à basse consistance | 294 |
| Tableau B.19 | Propriétés de la fraction QR raffinée à haute consistance en 1 stade..... | 295 |
| Tableau B.20 | Propriétés de la fraction QR raffinée à haute consistance en 2 stades | 296 |
| Tableau B.21 | Propriétés de la fraction QR raffinée à basse consistance..... | 297 |
| Tableau B.22 | Propriétés de la fraction A2 raffinée à haute consistance en 1 stade..... | 298 |
| Tableau B.23 | Propriétés de la fraction A2 raffinée à basse consistance | 299 |
| Tableau B.24 | Propriétés des mélanges obtenus par recombinaison des fractions SR et A1 | 302 |
| Tableau B.25 | Propriétés des mélanges obtenus par recombinaison des fractions QR, A2 et A1 – 1 ^{ère} partie | 303 |
| Tableau B.26 | Propriétés des mélanges obtenus par recombinaison des fractions QR, A2 et A1 – 2 ^{ème} partie | 304 |

Liste des Équations

| | |
|---|-------------------|
| $R_v = \frac{Q_r}{Q_f}$ | Éq. 3.1 59 |
| $R_w = \frac{M_r}{M_f} = \frac{Q_r C_r}{Q_f C_f}$ | Éq. 3.2 59 |
| $T_R = \frac{C_r}{C_f} = \frac{R_w}{R_v}$ | Éq. 3.3 59 |
| $P = \frac{C_s}{C_u}$ | Éq. 3.4 62 |
| $T_R = R_v^{P-1}$ | Éq. 3.5 63 |
| $R_w = R_v^P$ | Éq. 3.6 63 |
| $P = \frac{\ln R_w}{\ln R_v}$ | Éq. 3.7 63 |
| $\frac{1}{T_R} = P + (1 - P)R_v$ | Éq. 3.8 63 |
| $E_R^i = \frac{Q_r C_r X_r^i}{Q_f C_f X_f^i}$ | Éq. 3.9 64 |
| $P_i = \frac{\ln R_w + \ln \frac{X_r^i}{X_f^i}}{\ln R_v}$ | Éq. 3.10 64 |
| $E_R^i = R_v^{P_i}$ | Éq. 3.11 64 |
| $P(l) = \frac{C_s(l)}{C_u(l)}$ | Éq. 3.12 65 |
| $e(l) = R_v^{P(l)}$ | Éq. 3.13 65 |
| $N = \sum_{i=0}^{i=143} n_i$ | Éq. 3.14 65 |
| $p(l_i) = \frac{n_i}{N\Delta}$ | Éq. 3.15 66 |

$$P(l_i) = \frac{C_a^n \cdot p_a(l_i)}{C_f^n \cdot p_f(l_i)} = \frac{C_a^n \cdot n_{ia} \cdot N_f}{C_f^n \cdot n_{if} \cdot N_a} \quad \text{Éq. 3.16 66}$$

$$P_e = \frac{v_s W}{v_u l} \quad \text{Éq. 3.17 67}$$

$$P(l) = \begin{cases} \frac{P_e}{2mk} & \text{si } P(l) < \frac{1}{2} \\ 1 - \frac{mk}{2P_e} & \text{si } P(l) \geq \frac{1}{2} \end{cases} \quad \text{Éq. 3.18 67}$$

$$P(l) = e^{-\left(\frac{l}{\lambda}\right)^\beta} \quad \text{Éq. 3.19 67}$$

$$Q_i = 1 - \frac{X_a^i}{X_r^i} \quad \text{Éq. 3.20 69}$$

$$E_i = \frac{R_w}{1 - Q_i(1 - R_w)} \quad \text{Éq. 3.21 70}$$

$$W_i = 1 - \frac{C_a X_a^i}{C_r X_r^i} \quad \text{Éq. 3.22 70}$$

$$W_C = \frac{T_R - 1}{T_R - R_w} \quad \text{Éq. 3.23 70}$$

$$E_i = \frac{R_v}{1 - W_i(1 - R_v)} \quad \text{Éq. 3.24 70}$$

$$FI = 1 - \frac{X_I}{X_{II}} \quad \text{Éq. 3.25 71}$$

$$\Phi = E_L - E_S \quad \text{Éq. 3.26 72}$$

$$E_L = R_v^{PL} \quad \text{Éq. 3.27 72}$$

$$E_S = R_v^{PS} \quad \text{Éq. 3.28 72}$$

$$\alpha = 1 - \frac{P_L}{P_S} \quad \text{Éq. 3.29 72}$$

$$E_L = E_S^{1-\alpha} \quad \text{Éq. 3.30 72}$$

$$SSA = \frac{2}{\rho \alpha} \quad \text{Éq. 3.31 81}$$

$$SSA_{ext} = \frac{1}{t} + \frac{1}{D-t} \quad \text{Éq. 3.32..... 81}$$

$$CRI = 1000 \cdot \left(\frac{t}{D} \right)^3 \quad \text{Éq. 3.33..... 82}$$

$$X_r^i = X_f^i \frac{E_i}{R_w} \quad \text{Éq. 4.1 92}$$

$$X_a^i = X_f^i \frac{1 - E_i}{1 - R_w} \quad \text{Éq. 4.2 92}$$

$$\sum_i X_f^i \frac{E_i}{R_w} = 1 \quad \text{Éq. 4.3 92}$$

$$R_w = \sum_i X_f^i E_i \quad \text{Éq. 4.4 93}$$

$$E = \begin{cases} K_1(CSF_0 - CSF_L) + K_2(CSF_L - CSF) & \text{si } CSF < CSF_L \\ K_1(CSF_0 - CSF) & \text{si } CSF \geq CSF_L \end{cases} \quad \text{Éq. 4.5 96}$$

$$MBE = \frac{Q_f C_f - (Q_a C_a + Q_r C_r)}{Q_f C_f + Q_a C_a + Q_r C_r} \quad \text{Éq. 4.6 97}$$

$$\hat{C}_f = C_f (1 - MBE) \quad \text{Éq. 4.7 97}$$

$$\hat{C}_{a,r} = C_{a,r} (1 + MBE) \quad \text{Éq. 4.8 97}$$

$$Min(\Delta) = \sum_{i=0}^n \left[\frac{Q_f \hat{C}_f X_f^i - (Q_a \hat{C}_a X_a^i + Q_r \hat{C}_r X_r^i)}{Q_f \hat{C}_f X_f^i + Q_a \hat{C}_a X_a^i + Q_r \hat{C}_r X_r^i} \right]^2 \quad \text{Éq. 4.9 98}$$

$$P = p_{S1} \cdot p_{S1} + p_{S2} \cdot p_{S2} + p_A \cdot p_A \quad \text{Éq. 4.10 99}$$

$$CSF = CSF_{S1}^{PS1} \cdot CSF_{S2}^{PS2} \cdot CSF_A^{PA} \quad \text{Éq. 4.11 100}$$

$$V_s = \frac{V}{P} \quad \text{Éq. 4.12 104}$$

$$L_a = \frac{\sum_i n_i l_i}{\sum_i n_i} \quad L_w = \frac{\sum_i n_i l_i^2}{\sum_i n_i l_i} \quad L_{ww} = \frac{\sum_i n_i l_i^3}{\sum_i n_i l_i^2} \quad \text{Éq. 4.13 105}$$

$$C = \frac{M}{NL_a} \quad \text{Éq. 4.14 106}$$

$$d = K \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad \text{Éq. 4.15 109}$$

$$C = p_E C_E + p_P C_P \quad \text{Éq. 4.16..... 111}$$

$$C = \rho A \quad \text{Éq. 4.17..... 111}$$

$$\omega_{P,E} = p_{P,E} \frac{C_{P,E}}{C} \quad \text{Éq. 4.18..... 112}$$

$$\omega_P = \frac{1}{1 + \frac{p_E A_E}{p_P A_P}} \quad \text{Éq. 4.19..... 112}$$

$$\omega_E = \frac{1}{1 + \frac{p_P A_P}{p_E A_E}} \quad \text{Éq. 4.20..... 112}$$

$$\omega_t = \frac{A_p}{P_{moy}} \quad \text{Éq. 4.21..... 115}$$

$$FC = \frac{4\pi A_t}{p^2} \quad \text{Éq. 4.22..... 115}$$

$$Z = 100 \frac{4\pi A_p}{P_{moy}^2} \quad \text{Éq. 4.23..... 115}$$

$$W_t = \sqrt{\frac{A_p}{100.4\pi}} \sqrt{Z} \quad \text{Éq. 5.1..... 127}$$

$$C_u = wC_f + (1-w)C_r \quad \text{Éq. 6.1..... 150}$$

$$P = \frac{C_a}{wC_f + (1-w)C_r} \quad \text{Éq. 6.2..... 151}$$

$$C_a = C_f \frac{1 - R_v T_R}{1 - R_v} \quad \text{Éq. 6.3..... 151}$$

$$P = \frac{1 - R_v T_R}{1 - R_v} \frac{1}{w + (1-w)T_R} \quad \text{Éq. 6.4..... 151}$$

$$\frac{1}{w + (1-w)T_R} = P + (1-P) \frac{R_v}{1 - w(1 - R_v)} \quad \text{Éq. 6.5..... 151}$$

$$w = 1 - \frac{C_a}{C_r} \quad \text{Éq. 6.6..... 151}$$

$$w = \frac{T_R - 1}{T_R - R_w} \quad \text{Éq. 6.7..... 151}$$

$$\frac{1}{W_c + (1 - W_c)T_R} = P + (1 - P)R_w \quad \text{Éq. 6.8 152}$$

$$W_i = A_0 + B_1 C_f + B_2 R_v \quad \text{Éq. 6.9 164}$$

$$\ln(Y) = d + \sum_i p_i \left[a_i \ln(E_i) + b_i \ln(CSF_i) + c_i \ln(IR_i) \right] \quad \text{Éq. 6.10 176}$$

$$Q_{Ni} = \frac{X_r^i - X_a^i}{X_r^i + X_a^i} \quad \text{Éq. 7.1 193}$$

$$\omega_E = \frac{1}{1 + \frac{p_P Z_E}{p_E Z_P} \left(\frac{W_{tP}}{W_{tE}} \right)^2} \quad \text{Éq. 7.2 199}$$

Liste des Abréviations

| | |
|----------|--|
| TMP | Pâte thermomécanique |
| PGW | Pâte mécanique de meule pressurisée |
| OCC | Pâte de caisses de carton recyclées |
| DBO | Demande biologique en oxygène |
| CSF | Indice d'égouttage canadien |
| ETA | Absorption de l'énergie de traction |
| FQA | Appareil d'analyse optique des fibres « Fiber Quality Analyzer » (Optest Equipment Inc.) |
| MorFi | Système d'analyse de la Morphologie des Fibres (Techpap/CTP) |
| MWT | Appareil d'analyse d'épaisseur de paroi « MorFi Wall Thickness » (TechPap/CTP) |
| tmss | Tonne métrique de pâte sèche (100 % de siccité) ou « anhydre » |
| tmsa | Tonne métrique de pâte sèche à l'air (90% de siccité) |
| PIB | Produit intérieur brut |
| ForeSTAT | Bases de données statistiques des produits forestiers de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture |
| CPPP | Conseil des Produits des Pâtes et Papiers (Canada) |
| CIFQ | Conseil de l'industrie forestière du Québec (Canada) |
| FMI | Fond Monétaire International |
| ONU | Organisation des Nations Unies |
| BP | Bois de printemps |
| BE | Bois d'été |
| LTM | Microscopie optique à transmission de lumière |
| SEM | Microscopie électronique à balayage |
| CLSM | Microscopie confocale à balayage laser |
| CIPP | Centre Intégré en Pâtes et Papiers |
| ATPPC | Association Technique des Pâtes et Papiers du Canada |
| TAPPI | Association Technique de l'Industrie des Pâtes et Papiers (États-Unis) |
| SV | Volume spécifique des fibres |
| R_v | Taux de rejets volumique |
| R_w | Taux de rejets massique |
| T_R | Taux d'épaississement |
| V_p | Vitesse de passage au travers des ouvertures |
| S_p | Surface de passage totale du panier |
| W_t | Épaisseur de paroi |
| D | Largeur ou diamètre des fibres |
| SSA | Surface spécifique apparente des fibres |
| CRI | Indice de résistance au collapsus ou indice de « collapsabilité » |
| Z | Paramètre Z caractérisant la section transversale de la paroi des fibres |
| FC | Facteur de forme ou circularité de la section transversale des fibres |
| BC | Raffinage à basse consistance |
| HC1 | Raffinage à haute consistance en un stade |
| HC2 | Raffinage à haute consistance en deux stades |

Chapitre 1 - Problématique industrielle

1.1 Introduction

Depuis l'an 2000, date de la mise en service de ces nouveaux investissements dans la ligne de pâte thermomécanique (Figure 1.1), Papier Masson Ltée a augmenté progressivement sa capacité de production de papier journal de 640 tmsa/j à plus de 800 tmsa/j à ce jour [1]. Cependant cette augmentation génère des difficultés croissantes pour le maintien de la qualité de la pâte thermomécanique, notamment au cours de certaines périodes de l'année (Figure 1.2) : pour un même taux de production, la qualité de la pâte, en termes d'absorption d'énergie de traction, est différente de la moyenne annuelle. Papier Masson Ltée considère en effet que l'absorption d'énergie de traction est un paramètre particulièrement significatif de la qualité de leur produit fini. En été, la pâte présente une meilleure qualité alors que celle-ci est plus faible en hiver. Ces difficultés peuvent être liées à plusieurs sources de variabilité des procédés mais aussi à la qualité de la matière première, par exemple, la variation dans la durée de stockage des copeaux ou encore des origines géographiques différentes au cours de l'année pour les rondins de bois à partir desquels sont fabriqués les copeaux. En effet, pour une même essence d'arbre, des conditions de croissances différentes en termes de climat et de type de sol peuvent générer des différences dans la qualité du bois produit [2, 3].

Le projet de recherche repose donc sur le besoin d'amélioration de la qualité de la pâte thermomécanique au cours de certaines périodes de l'année afin de maintenir une qualité constante du produit final. Il dépend aussi de certaines restrictions en ce qui concerne le nouveau procédé à mettre en œuvre, notamment, ne pas générer d'impact négatif sur l'environnement qui impliquerait de nouveaux investissements pour le traitement des effluents liquides.

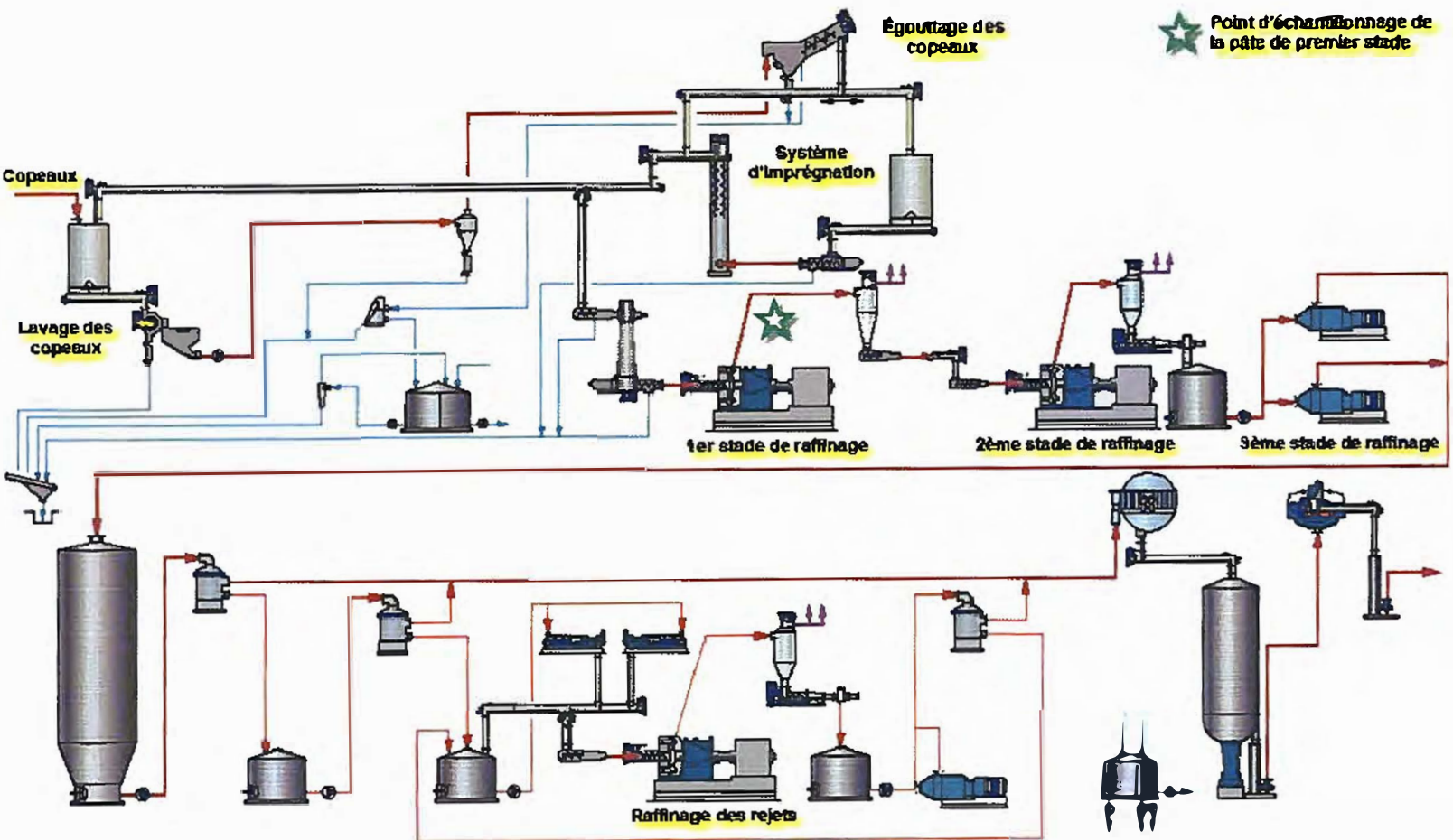


Figure 1.1 Schéma du procédé de mise en pâte thermomécanique de l'usine Papiers Masson Lüté [4]

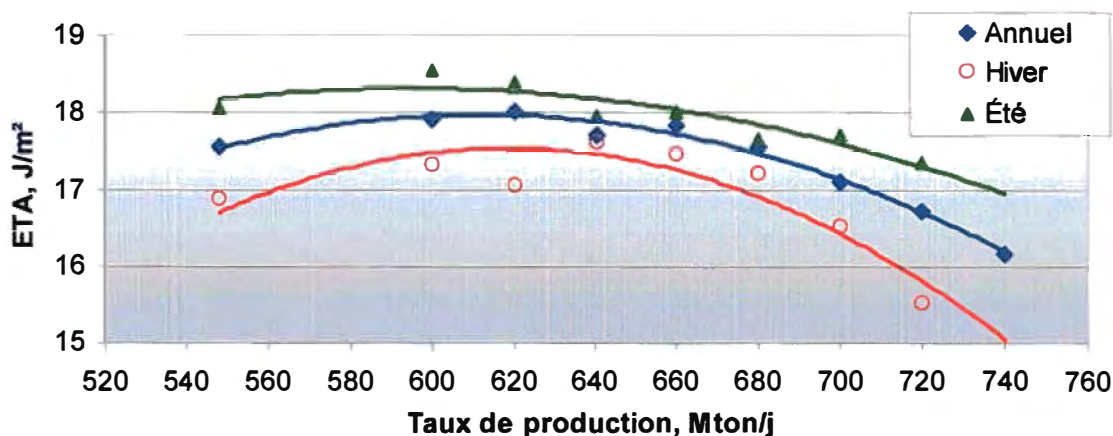


Figure 1.2 Comparaison des moyennes d'absorption de l'énergie de traction du papier produit par Papier Masson Ltée au cours de différentes périodes de l'année et pour différents taux de production [4]

1.2 Amélioration de la qualité de la pâte thermomécanique

Chaque augmentation de production de la ligne de pâte thermomécanique résulte en une diminution de la qualité de la pâte. Pour un stade de raffinage donné, lorsque la capacité des raffineurs en termes d'énergie de raffinage est utilisée en totalité, une augmentation de production se traduit nécessairement par une réduction de l'énergie spécifique de raffinage. La fenêtre d'opération des raffineurs se trouve réduite pour affronter toute variation de qualité. Cette situation est bien illustrée pour l'usine de Papier Masson Ltée par la figure 1.2 ci-dessus. Ceci rend de plus en plus critique toute variation annuelle de la qualité des matières premières. En effet, celle-ci se traduit par une nécessité de réduire la cadence de production afin que la pâte mécanique présente la qualité requise pour que le produit fini respecte à son tour le cahier des charges auquel il est soumis. Pour l'usine, ceci signifie également une baisse de la production, un manque à gagner et éventuellement une augmentation des délais de livraison.

D'autre part, le procédé doit également permettre de répondre à l'évolution constante du produit fini. Beaucoup d'usines se voient ainsi forcées de remplacer une partie de leur pâte à haut rendement par des pâtes de renforcement, telles que les pâtes Kraft dont le coût élevé constitue une difficulté importante pour maintenir une position compétitive.

1.3 Impact environnemental

La ligne de pâte thermomécanique actuelle ne met pas en œuvre de traitement chimique afin de ne pas augmenter la DBO dans les effluents liquides. La station d'épuration des effluents est dimensionnée pour ce cas de figure et Papier Masson Ltée ne souhaite pas augmenter la capacité de traitement de sa station de traitement des effluents. Ceci implique que tout traitement chimique, tel que l'imprégnation des copeaux avant le raffinage ou l'utilisation d'un réactif durant ou après le raffinage, doit être exclu.

D'autre part, un traitement chimique aurait un impact sur les propriétés optiques de la pâte, dont notamment une réduction de l'opacité et du coefficient de diffusion de la lumière. Or l'opacité est une caractéristique importante pour la fabrication de papier journal.

1.4 Proposition de recherche

Le fractionnement des pâtes associé à un traitement spécifique des fractions est un procédé utilisé pour diverses sortes de papiers, telles que les papiers d'emballage pour carton ondulé, les papiers super-calandrés ou encore les papiers couchés légers afin de sélectionner certains types de fibres pour un usage spécifique ou encore pour réduire la quantité de pâte de renforcement.

Dans le cas des pâtes thermomécaniques, le fractionnement intervient notamment dans le cas du classage des refus pour réaliser un raffinage postérieur. Ce procédé de classage intervient après les deux stades de raffinage principaux et son objectif est de retirer les fibres longues et les bûchettes. Il est généralement sous-dimensionné pour un fractionnement adéquat de l'ensemble de la pâte et il serait difficile de réaliser un raffinage des fractions pour que les usines soient capables de pousser plus loin ce développement sans investissement significatif.

Le fractionnement répond également à une difficulté bien connue du raffinage des fibres papetières, à savoir, le raffinage adapté des fibres en fonction de leurs caractéristiques morphologiques. En effet, le développement des fibres à parois épaisses exige bien sou-

vent un raffinage plus rigoureux afin de fibriller leur paroi. Mais ce raffinage produit un dommage excessif aux fibres à parois minces et provoque leur coupe ou le clivage de la paroi. Le raffinage de la pâte entière consiste donc en un compromis entre le traitement des divers types de fibres.

La possibilité d'appliquer de l'énergie de raffinage sur plusieurs fractions de pâtes et de les développer sélectivement nécessite de réaliser le fractionnement le plus tôt possible dans le procédé de mise en pâte. Dans le cas contraire, la quantité d'énergie à apporter se trouvera limitée par rapport à la consommation du procédé conventionnel ou bien signifiera une augmentation d'énergie de raffinage, ce qui n'est pas souhaitable dans la majorité des cas. Afin de disposer d'une marge de manœuvre plus ample en ce qui concerne le raffinage, il est donc souhaitable que le fractionnement soit effectué sur la pâte primaire, c'est-à-dire sur la pâte produite par le premier stade de raffinage.

1.4.1 Objectifs de l'étude

De cette proposition de recherche, il découle plusieurs objectifs qui peuvent être classés en deux objectifs principaux et plusieurs objectifs spécifiques. Les objectifs principaux sont : obtenir une réduction de l'énergie spécifique de raffinage pour un même niveau de développement et maintenir ou améliorer la qualité de la pâte.

Cette approche implique des objectifs plus spécifiques liés au fractionnement et au raffinage : obtenir un fractionnement efficace sur la base de la longueur des fibres avec notamment la création d'une fraction de fibres longues et d'une fraction de fibres courtes, vérifier la possibilité de fractionner sur la base de la nature des fibres en termes de BP et de BE, finalement déterminer les conditions de raffinage des fractions permettant d'accomplir au mieux les objectifs principaux. Dans le cadre du fractionnement, deux hypothèses sont posées : d'une part, que le fractionnement par tamis est basé essentiellement sur la longueur des fibres, d'autre part que les fibres de BE dans la pâte primaire sont concentrées dans les fractions R14, R28 et R48 en raison de leur plus longueur plus élevées et de leur paroi plus épaisse. La vérification de ces hypothèses constitue également un objectif de cette recherche.

Chapitre 2 - Revue de la littérature

2.1 Introduction

Le besoin de pâtes mécaniques de meilleure qualité découle d'une exigence toujours croissante sur la qualité des papiers fabriqués à partir de ces pâtes et la nécessité de maintenir des prix compétitifs. Ces aspects de qualité de produit fini et de compétitivité revêtent en fait plusieurs aspects. En effet, la qualité des papiers doit répondre à plusieurs exigences : d'une part, le développement des techniques d'impression et de transformation qui sont toujours plus rapides et soumettent les papiers à des contraintes physiques plus élevées mais aussi à l'utilisation des pâtes mécaniques dans des grades de papiers où auparavant des pâtes chimiques étaient employées. Depuis plusieurs années, une tendance s'est développée vers l'utilisation de pâtes mécaniques dans la fabrication de papiers à valeur ajoutée afin de réduire les coûts de matières premières [5]. D'autre part, la compétitivité est la conséquence d'un marché arrivé à maturité dans les pays développés et où les producteurs n'ont d'autres alternatives que la baisse des prix ou la fermeture de leurs sites de production mais aussi la conséquence de l'apparition de pays émergents, essentiellement en Asie et Amérique du Sud, qui profitent d'une situation socio-économique favorable et de ressources forestières à croissance rapide.

En fonction des types de papiers, les propriétés recherchées sont différentes. Pour le papier journal, par exemple, la résistance à la traction et l'opacité sont des propriétés essentielles alors que dans le cas des cartons multicouches composés de pâte mécanique dans les couches internes et de pâte kraft dans les couches externes, la rigidité et l'épaisseur deviennent les paramètres clés [6]. Ceci met en évidence un premier aspect multifacétique qui implique une approche spécifique.

D'autre part, et comme bien d'autres industries, la pression croissante pour la protection de l'environnement implique un mécanisme d'amélioration constante des procédés orienté vers la réduction des émissions polluantes, la réduction de la consommation

d'énergie, la substitution des sources d'énergie fossile par des sources renouvelables, et enfin, l'amélioration de la gestion des ressources naturelles.

2.2 Problématiques associées aux sortes de papiers

2.2.1 Les papiers à usages graphiques

Il s'agit de papiers de faible grammage essentiellement à base de pâte mécanique et éventuellement, en faible quantité, de pâte Kraft ou de pâte de vieux papiers désencrés, tels que les couchés légers, les papiers super-calandrés et le papier journal. La tendance actuelle est orientée vers l'utilisation de plus en plus grande de pâte thermomécanique en remplacement des pâtes chimiques afin de réduire les coûts de fabrication.

L'opacité, la résistance mécanique et la rugosité jouent ici un rôle important. En effet, ces papiers étant de faible grammage, la pâte doit apporter une très bonne opacité et requiert donc un coefficient de diffusion élevé. La feuille doit également posséder des propriétés mécaniques qui lui permettent de résister aux exigences des procédés d'impression à haute vitesse. Finalement, la feuille doit présenter une faible rugosité de surface qui permettra une impression de qualité et une perméabilité contrôlée pour éviter la migration des solvants des encres ou des liants de couches dans le cas des papiers couchés. Ces propriétés sont essentiellement contrôlées par la fraction de fibres longues de la pâte [6]. En effet les fibres longues créent la matrice sur laquelle les fibres plus courtes vont s'agglomérer pour finalement constituer la feuille. Plus cette matrice est résistante et plus la feuille est résistante mais en même temps, les fibres longues, plus grossières et moins flexibles augmentent la rugosité de la feuille. Il en découle donc un intérêt d'améliorer spécifiquement la fraction de fibres longues, afin d'augmenter la flexibilité des fibres et la capacité des fibres à créer des liaisons entre elles. Il est d'ailleurs pratique courante de raffiner séparément les rejets lors du procédé de mise en pâte thermomécanique ; ce stade permet l'élimination des débris de bois, des amas de fibres et des bûchettes de copeaux. Corson [7, 8] souligne que les fibres longues issues du raffinage des rejets contribuent à la consolidation de la feuille et d'autre part, que les fines produites par le raffinage des rejets améliorent également la qualité de la feuille.

On remarque en effet que les fibres longues possèdent une paroi plus épaisse, ce qui leur confère une surface spécifique inférieure que celle des fibres à paroi mince [9]. Lors de travaux plus récents, Corson *et al.* [10] montrent que le rôle des fines dans la qualité de la feuille doit être pondéré selon que les fines sont des fines primaires, c'est-à-dire issues du premier stade de raffinage et donc arrachées de la surface de la fibre ou bien des fines secondaires, c'est-à-dire issues de raffinage ultérieur et provenant de la paroi secondaire. Les fines primaires possédant une forme floconneuse et un taux de lignine plus élevé, ont une capacité de diffusion plus importante. Les fines secondaires en contrepartie ont une forme plus fibrillaire, une plus grande capacité de liaison et une capacité de diffusion de la lumière plus faible, en raison de leur teneur en cellulose plus élevée et de leur surface spécifique plus grande. Le rapport entre les fines secondaires et les fines primaires doit donc être pris en compte parmi les paramètres de fractionnement.

La rugosité et le peluchage sont des propriétés très sensibles à la présence de fibres longues à la surface du papier. La diminution du lustre, l'augmentation de la rugosité ainsi que l'apparition de fibres à la surface de la feuille sont des phénomènes liés à l'application d'eau lors de procédés postérieurs au séchage et au calandrage de la feuille comme par exemple le couchage ou l'impression à base d'eau, dans le cas des procédés Offset ou flexographiques [11]. L'eau provoque la rupture de liaisons, le relâchement de tensions générées lors du séchage et du calandrage et le gonflement des fibres [12, 13, 14]. Ce problème est en général critique dans les cas des papiers super-calandrés en raison de la plus grande quantité de tensions accumulées dans la feuille. Les fibres ont tendance à reprendre la forme qu'elles avaient avant d'avoir été écrasées par la calandre. Des études de fractionnement ont été menées dans le but d'utiliser une caisse de tête multi-jets [15], soit en deux jets pour les machines avec table de formation, la fraction de fibres longues est injectée sur le côté toile et la fraction de fibres courtes sur le côté feutre, soit en trois jets pour les machines double toile, la fraction de fibres courtes est employée pour les couches externes et la fraction de fibres longues pour la couche interne. Dans ce dernier cas, le plus intéressant parce qu'il correspond au développement des machines modernes à vitesse élevée, on observe une nette amélioration de la rigidité de la feuille lorsqu'elle est stratifiée même après calandrage. On observe également une

diminution de la rugosité et du peluchage, ce qui se traduit par une meilleure imprimabilité.

Il est également possible d'améliorer la fraction de fibres longues par sulfonation et raffinage à haute consistance. Law [16] souligne que la grande majorité des fibres (60%) produites par le procédé de raffinage mécanique ne se développent pas suffisamment et constate que le simple fait de retirer les couches externes ligneuses de la paroi des fibres, sans traitement chimique, n'est pas suffisant pour développer tout le potentiel de liaison des fibres. La sulfonation avant le raffinage permet de ramollir la surface des fibres et donc de développer encore plus certaines propriétés lors du raffinage [17] : lorsque la pâte est raffinée sans fractionnement, on observe un développement moindre et une coupe plus importante des fibres, par contre, après sulfonation et raffinage de la fraction de fibres longues, la pâte recombinaée présente une résistance à la traction plus élevée, plus élevée encore qu'avec raffinage de la fraction de fibres longues sans sulfonation (Figure 2.1). Mao *et al.* [18] proposent non seulement de réaliser une sulfonation avant le raffinage, mais également de soumettre les copeaux à un cycle de compression-décompression en sens radial afin de provoquer une séparation plus précoce des fibres de BP et des fibres de BE. Ils espèrent que les fibres de BE absorberont mieux l'énergie lors du raffinage et préserveront les fibres de BP, générant ainsi une meilleure distribution de l'énergie. Dans une autre optique, Winberg *et al.* [19] proposent de traiter les rejets de TMP par sulfonation et obtiennent une amélioration significative de la pâte recombinaée autant du point de vue des propriétés mécaniques que de la texture de la feuille. Ainsi, ils notent une augmentation de la résistance à la rupture par traction, mais aussi de la compressibilité des fibres et de la cohésion interne, ce qui permet une meilleure qualité de surface de la feuille. Par contre, la sulfonation des rejets provoque une baisse des propriétés optiques, notamment du coefficient de diffusion, et également une légère diminution de la résistance à la déchirure.

L'effet de la sulfonation est également notable lors du calandrage où l'on constate que les propriétés d'imprimabilité présentent un comportement similaire (test d'absorption d'huile, densité d'impression, demande en encre). Par contre, du point de vue des propriétés optiques et plus spécifiquement du coefficient de diffusion et de l'opacité, Cor-

son *et al.* [17] notent que la pâte dont la fraction de fibres longues a seulement été raffinée présente de meilleurs résultats que la pâte dont la fraction de fibres longues a été sulfonée et raffinée.

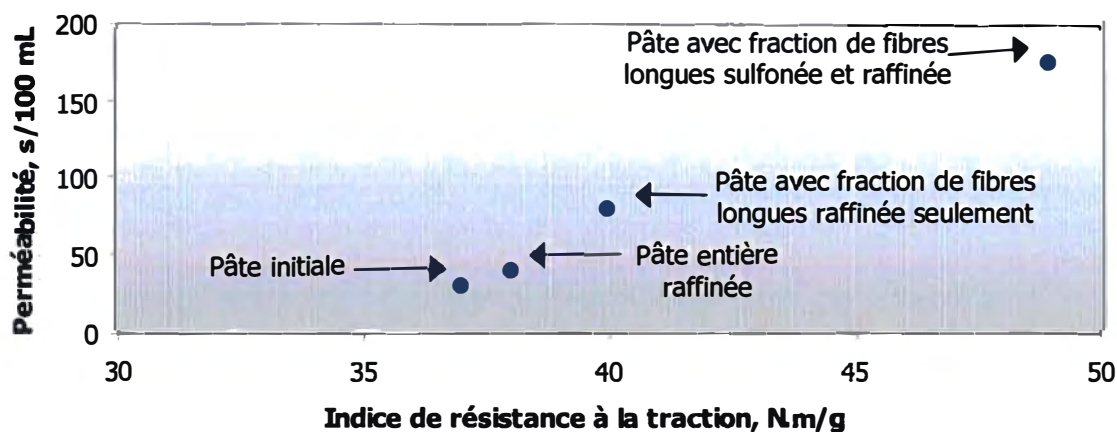


Figure 2.1 Effet de l'amélioration de la fraction de fibres longues sur l'indice de résistance à la traction et la perméabilité à l'air d'une pâte thermomécanique de pin Radiata de 80 mL CSF (adapté de [17])

Corson *et al.* [20, 21, 22] utilisent du bois mature et du bois juvénile de pin Radiata pour obtenir des pâtes de masses linéiques différentes. Ils montrent que le développement des fibres lors du raffinage est différent selon la masse linéique et la longueur des fibres et que des améliorations peuvent être obtenues en raffinant séparément les fibres longues et les fibres courtes. Le comportement au fractionnement est également différent pour chaque type de pâte. Cependant, dans leur étude, les conditions de fractionnement ne sont pas les mêmes pour toutes les pâtes et ont été modifiées (diamètre des perforations et profils, vitesse de rotor) pour éviter des taux d'épaississement trop élevés qui auraient pu provoquer un bouchage du tamis. Il est donc difficile de relier les conditions du fractionnement aux améliorations de qualité obtenue. D'autre part, dans cette étude, seule la fraction R14 a présenté une sélectivité significative, ce qui permet d'apparenter ce fractionnement à un stade de raffinage de rejets.

2.2.2 Autres sortes de pâtes, papiers et cartons

Les vieux papiers ont généré un intérêt précoce pour le procédé de fractionnement. En général, le fractionnement des fibres recyclées consiste à produire une fraction de fibres longues et une fraction de fibres courtes. La fraction de fibres longues est ensuite raffinée puis les deux fractions sont recombinaées. Les propriétés physiques, optiques et superficielles de la pâte recombinaée sont comparées à celle de la pâte initiale raffinée avec la même énergie spécifique. Les résultats dépendent fortement de la qualité de la matière première utilisée. Le nombre de recyclage déjà subi par la pâte joue un rôle important [23]. Le besoin d'amélioration de la qualité des pâtes à base d'OCC croît en raison de la dégradation progressive de cette matière en Amérique du Nord. En effet la pression environnementale pour la réutilisation des vieux papiers et la réduction de l'utilisation des pâtes chimiques qui en découle, amènent ces matières premières à ressembler de plus en plus aux OCC d'Europe où le taux de recyclage est plus élevé [24, 25].

Dès 1984, Bliss [26, 27] rapporte des essais de fractionnement avec des hydrocyclones sur des pâtes de vieux papiers mélangés afin d'en améliorer la résistance à la traction. Scudlik et Gottsching [28] utilise un tamis sous pression pour améliorer la résistance à la compression de papiers pour carton ondulé à base de vieux papiers (couverture et cannelure) et obtiennent des économies d'énergie en ne raffinant que la fraction de fibres longues. Ils obtiennent des économies d'énergie supplémentaires en raffinant à haute consistance et en milieu alcalin. Plus récemment, Vinson *et al.* [29] obtiennent des résultats similaires en associant des tamis sous pression avec un banc d'hydrocyclones afin d'augmenter l'efficacité de fractionnement. Eul *et al.* [30] proposent de séparer une pâte désencrée en une fraction de fibres longues et une fraction de fibres courtes et obtiennent des gains de blancheurs de 7 à 10 points avec un blanchiment de la fraction de fibres longues au peroxyde d'hydrogène tout en réduisant la consommation d'agent de blanchiment de 30 à 60% par rapport au blanchiment de la pâte entière. D'autres essais et travaux, réalisés à échelle industrielle [31] ou de laboratoire [32], présentent des résultats similaires. Mansito *et al.* [33] proposent d'utiliser le fractionnement pour faire un meilleur usage possible de chaque fraction : à partir des caractéristiques de fractions d'OCC, ils déterminent que la fraction de fibres longues présente de meilleures proprié-

tés de résistance et est donc plus adéquate pour la fabrication de carton et papier d'emballage alors que la fraction de fibres courtes, qui possède des propriétés de drainabilité plus pauvres, est plus adéquate pour la fabrication de carton multicouche. Abubakr *et al.* [34] déterminent que le nombre de recyclages est plus préjudiciable pour les fibres courtes que pour les fibres longues. Waterhouse et Liang [35] s'intéressent aux propriétés des fines dans les pâtes d'OCC. La fraction de fibres longues est raffinée à divers degrés de raffinage et les fines générées dans cette fraction, dites fines secondaires, sont extraites du reste de la pâte avec un tamis de 200 mailles par pouce (Britt Jar) puis traitées à la soude avec différents dosages. Ils trouvent que le traitement à la soude des fines secondaires a un effet significatif sur les propriétés de résistance mécanique et sur la drainabilité de la pâte. Une étude récente [36] sur des pâtes d'OCC montre cependant que la pâte recombining après fractionnement et raffinage de la fraction de fibres longues ne présente pas nécessairement des propriétés de résistance meilleures que celles de la pâte initiale raffinée entièrement mais, de même que dans les études précédentes, il y a économie d'énergie.

Dans le domaine des pâtes chimiques, Forbes [37] propose en 1987 l'usage du fractionnement par tamis sous pression pour séparer les fibres longues des fibres courtes des pâtes Kraft. Paavilainen [38] propose de séparer les fibres de BP à parois minces des fibres de BE à parois plus épaisses d'une pâte Kraft de feuillus à l'aide d'un hydrocylone, du fractionneur Johnson, ou encore, de l'appareil de Jacquelin. Le fractionneur Johnson et l'appareil de Jacquelin sont des appareils de laboratoire. Le premier est constitué d'un disque horizontal muni de conduites en hélice de section rectangulaire. La pâte est introduite au centre du disque et la rotation provoque le déplacement des fibres vers la périphérie. Le principe de fractionnement de l'appareil est basé sur le fait que lorsque la pâte s'écoule en régime bouchon dans une conduite, les particules se déplacent radialement vers le centre de la conduite avec une vitesse dépendante de la relation entre la taille de la particule et le diamètre de la conduite. L'appareil de Jacquelin est constitué de cuiviers tournant à un angle de 35° avec l'horizontale. La pâte est introduite dans les cuiviers et mise en rotation pour provoquer la floculation. Le principe de cet appareil repose sur le fait que les fibres de BP ont tendance à rester en suspension alors

que les fibres de BE ont une plus grande tendance à former des floccs. L'hydrocyclone donne une meilleure performance et permet d'augmenter la concentration de fibres de BE jusqu'à 74% dans les rejets alors qu'elle était de 20% dans la pâte initiale. L'appareil de Jacquelin et le fractionneur Johnson donne des performances inférieures, ce dernier produisant également un fractionnement par longueur. Sloane [39] utilise différentes configurations de tamis sous pression pour étudier l'efficacité du fractionnement sur des pâtes Kraft de pin Radiata. Plusieurs facteurs sont étudiés : type de panier (trous lisses et fentes profilées), vitesse du rotor et vitesse de passage dans les ouvertures. Karnchanapoo *et al.* [40] s'intéressent plus particulièrement aux propriétés physiques des feuilles de papiers obtenues après fractionnement au classeur Bauer McNett d'une pâte Kraft blanchie non raffinée d'eucalyptus. Ils en concluent que la qualité de la pâte ne peut pas être définie sur la seule base de la longueur moyenne des fibres. Vomhoff et Grundström [41] fractionnent une pâte Kraft blanchie de feuillus à l'aide d'un banc d'hydrocyclones pour séparer une fraction de fibres longues enrichie en fibres de BE et une fraction de fibres courtes enrichie en fibres de BP. Ces fractions sont ensuite raffinées avec un raffineur conique à différents niveaux d'énergie. Ils trouvent que la caractéristique qui permet de mieux distinguer ces fractions est l'épaisseur de paroi des fibres. Les feuilles obtenues avec chaque fraction raffinée possèdent des propriétés très différentes. Afin d'étudier l'effet de la morphologie des fibres sur le blanchiment Panula-Ontto *et al.* [42] fractionnent une pâte Kraft écrue de feuillus avec des hydrocyclones puis réalisent un blanchiment de chaque fraction. Lorsque l'épaisseur de paroi augmente, ils trouvent que la consommation d'agent de blanchiment augmente pour une même augmentation de blancheur (dioxyde de chlore, ozone) ou réduction de l'indice Kappa (oxygène, peroxyde d'hydrogène) pour un taux en fines constant. Le taux de fines, augmente la consommation d'agent de blanchiment, notamment dans le cas du peroxyde d'hydrogène. Après fractionnement avec des hydrocyclones d'une pâte Kraft blanchie de résineux, Laine *et al.* [43] observent que le raffinage génère plus de fibrillation sur les fibres de BE à paroi épaisse, ce qui produit, en contrepartie, une réduction de l'épaisseur de paroi.

Dans le domaine du papier tissu, la douceur est une propriété essentielle. Vinson [44] dépose une licence pour protéger une méthode de production de pâte chimique avec des longueurs de fibres et des masses linéiques différentes par un fractionnement en deux stades faisant intervenir des tamis sous pression et des hydrocyclones.

2.3 Impacts socio-économiques

Le secteur des pâtes et papiers au Canada est soumis à une compétition importante au niveau mondial et de nouvelles contraintes environnementales. C'est un secteur qui emploie également un nombre important de personnes. Le développement des pâtes constitue un moyen essentiel pour affronter les enjeux soulevés par cette industrie.

2.3.1 Enjeu industriel

L'enjeu le plus important pour toute industrie est définitivement de maintenir, voire d'accroître ses parts de marché afin d'assurer sa pérennité et sa rentabilité. L'industrie papetière est actuellement sujette à une très forte compétitivité aussi bien au niveau national qu'international, associée à une pression croissante pour la protection de l'environnement et une pression économique due à la hausse des coûts de l'énergie. Dans le domaine du papier journal, la consommation mondiale n'a cessé de croître au cours des quarante dernières années en dépit de variations ponctuelles. En Amérique du Nord notamment, la consommation apparente de papier journal (Figure 2.2) a amorcé une baisse depuis la fin des années 80, baisse qui est significative d'un marché arrivé à maturité et qui entraîne soit la fermeture des sites de production, soit leur reconversion vers des sortes à plus forte valeur ajoutée [45]. Il est probable cependant que l'émergence de pays en voie de développement soutienne la consommation pendant plusieurs décennies.

La corrélation entre le PIB per capita et la consommation de papier et carton par pays [46] est une caractéristique bien connue de l'économie mondiale. Cette relation existe également avec la consommation de papier journal (Figure 2.3). L'augmentation du PIB per capita dans les pays en voie de développement fait fortement présager une augmentation de la consommation de papier dans ces pays.

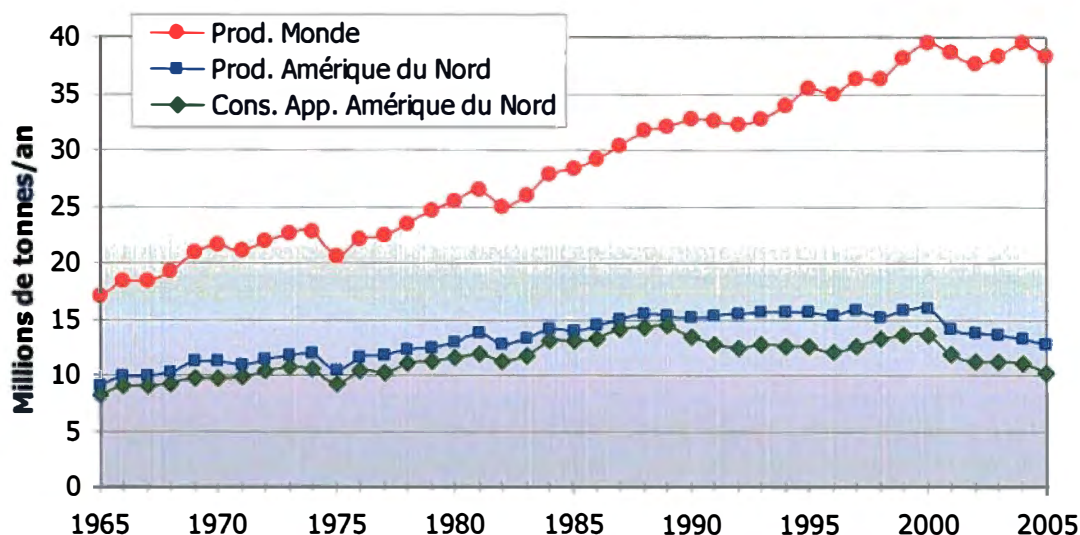


Figure 2.2 Production et consommation apparente de papier journal dans le monde et en Amérique du Nord de 1965 à nos jours [47]

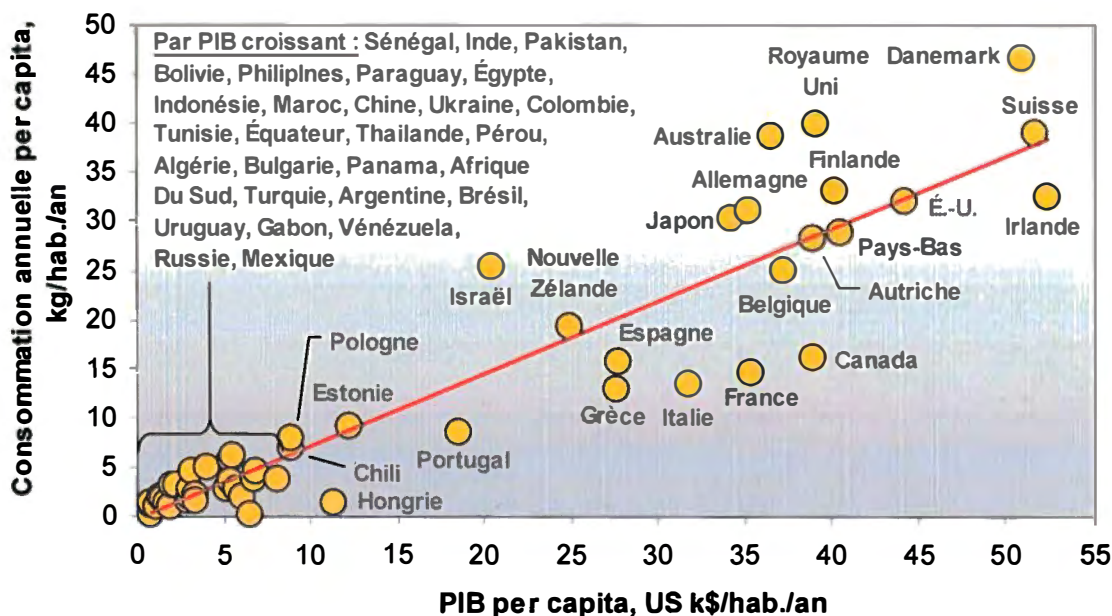


Figure 2.3 Relation entre le Produit Intérieur Brut per capita et la consommation apparente de papier journal dans le monde en 2005 [47, 48, 49]

L'accroissement de la consommation de la Chine au cours des dix dernières années illustre bien cet aspect, consommation qui représente toutefois le tiers de celle des États-Unis alors que sa population est 5 à 6 fois plus grande (Figure 2.4). Cependant, à ce jour, la croissance de l'Asie et de l'Europe n'a pas contrebalancé le déclin de la consommation

en Amérique du Nord. Cette redistribution des grands centres de consommation dans le monde, présente et future, montre également que les entreprises canadiennes doivent constamment rechercher de nouveaux marchés et pénétrer les marchés des pays en voie de développement. Ces pays ont naturellement tendance à développer leur production interne (Figure 2.5). Le Canada doit donc s'appuyer sur sa capacité de production de produits de qualité et sur son expertise, fruit de sa longue présence dans le domaine et d'un effort de recherche constant.

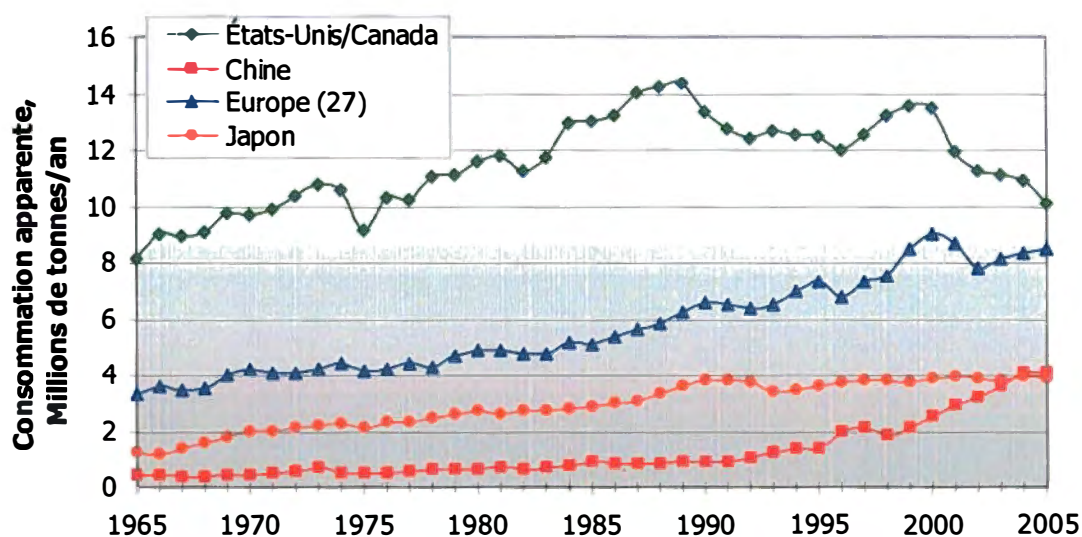


Figure 2.4 Consommation apparente de papier journal des principaux pays consommateurs de 1965 à nos jours [47]

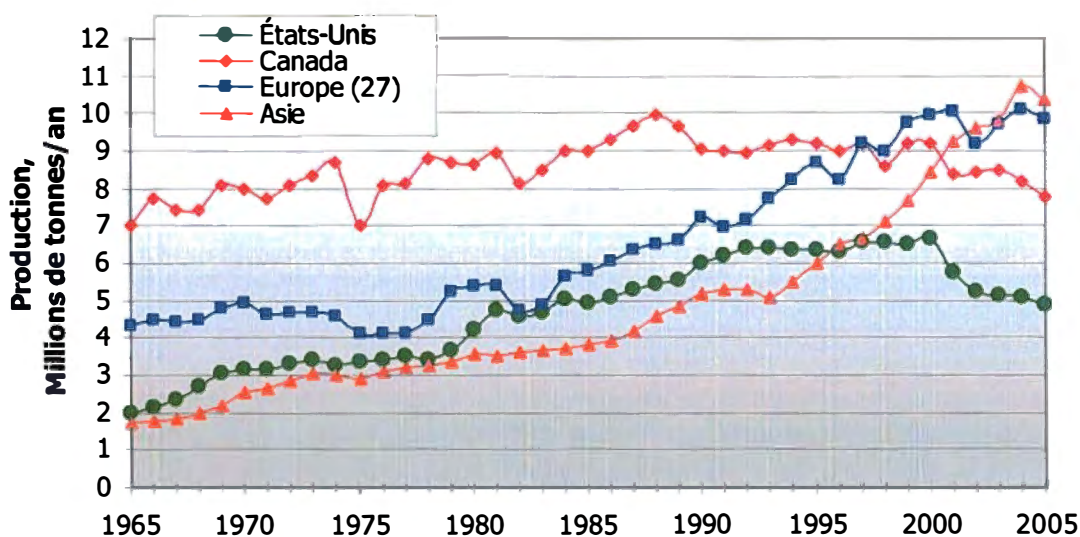


Figure 2.5 Production de papier journal des principaux pays producteurs de 1965 à nos jours [47]

2.3.2 Enjeu économique

L'industrie papetière canadienne d'une capacité de production élevée (Tableau 2.1) est très fortement exportatrice dans le domaine des pâtes et papiers et génère un excédent important dans la balance commerciale du pays, notamment grâce aux volumes de production de papier journal mais aussi de pâtes commerciales dont 7% seulement est constitué de pâtes à haut rendement. Le Canada et le Québec ont donc naturellement intérêt à préserver et à développer cette source de devises.

Tableau 2.1 Volumes de production de pâte, papiers et cartons en milliers de tonnes métriques pour l'année 2002 [50]

| | Monde | Canada | Québec | États-Unis |
|--------------------|--------------|---------------|---------------|-------------------|
| Pâtes commerciales | 133 000 | 10 381 | 1 464 | 7 678 |
| Papier journal | 37 680 | 8 465 | 3 726 | 5 248 |
| Papiers et cartons | 324 649 | 20 226 | 8 529 | 81 792 |

Cependant, bien que l'industrie canadienne ait été longtemps la première au monde, autant en terme de volume de production qu'en terme de qualité, ce n'est plus le cas aujourd'hui et récupérer cette place de chef de file face à l'émergence de la Chine ou aux pays scandinaves s'avèrera une tâche difficile qui requiert des efforts de recherche axés sur la réduction des coûts et l'amélioration de la qualité. En terme de qualité, il s'agit non seulement du produit fini, papier journal ou autre, mais aussi des pâtes mécaniques en tant que telles, dans la mesure où ces pâtes à haut rendement sont de plus en plus sollicitées pour la fabrication de produits à valeur ajoutée. Cette tendance traduit le remplacement progressif de la production de papiers traditionnels par des sortes à plus haute valeur ajoutée dans les usines canadiennes.

Chapitre 3 - Cadre théorique

3.1 Structure du bois

Les propriétés des fibres dépendent à la fois de l'essence d'arbre et de la structure du bois. Les essences d'arbre sont séparées en deux grands ensembles : les conifères ou résineux qui font partie de la classe des gymnospermes et les feuillus qui font partie de la classe des angiospermes. Du point de vue papetier, ces groupes se différencient essentiellement par la densité du bois, la longueur des fibres et leur taux de lignine. La structure du bois revêt également une grande importance en raison de l'hétérogénéité de ses composants liée aux cycles de croissance de l'arbre.

Dans la suite de l'exposé, seules les caractéristiques des résineux seront présentées et seront illustrées essentiellement par l'épinette blanche (*Picea glauca*), l'épinette noire (*Picea mariana*) et le sapin baumier (*Abies balsamea*) qui constituent les principales essences employées dans la fabrication des pâtes de cette étude.

3.1.1 Structure macroscopique

L'observation d'une section de tronc d'arbre (Figure 3.1) présente une alternance d'anneaux concentriques clairs et sombres qui traduisent les cycles de croissance du bois et mettent en évidence une croissance dans le sens radial, le bois le plus récent se trouvant sur l'anneau de croissance extérieur [51]. Dans les zones tempérées, la croissance a lieu durant les saisons de printemps et d'été, ce qui donne lieu à des différences anatomiques importantes et donc à des fibres ou trachéides qui sont morphologiquement différentes et possèdent des propriétés papetières spécifiques [52]. Ainsi les fibres dont la croissance a lieu au printemps sont appelées fibres de bois de printemps (BP) alors que les fibres dont la croissance a lieu en été sont appelées fibres de bois d'été (BE). Dans les zones non tempérées, c'est-à-dire tropicales ou subtropicales, cette dénomination n'a pas lieu d'être. La croissance des arbres a lieu tout au long de l'année [53]. Cependant, des anneaux de croissance moins marqués peuvent être observés et sont associées à la saison sèche et à la saison humide.



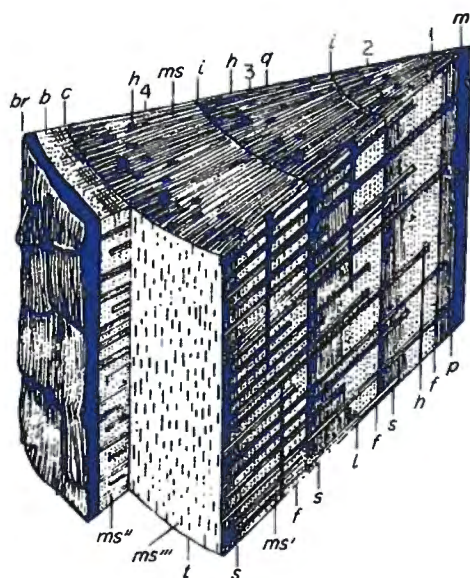
Figure 3.1 Sections de (a) tronc d'épinette blanche (*Picea glauca*) et (b) de sapin (*Abies balsamea*) montrant les cernes de BP en clair et de BE en foncé [54]

3.1.2 Structure microscopique

L'étude de la structure du bois met en évidence trois principaux plans (figure 3.2) : la section transversale, perpendiculaire au sens des fibres, la section radiale, parallèle au sens des fibres et finalement le plan tangentiel qui définit une surface parallèle aux anneaux de croissance. Dans chacun de ses plans, les composants du bois peuvent être observés [53, 55, 56].

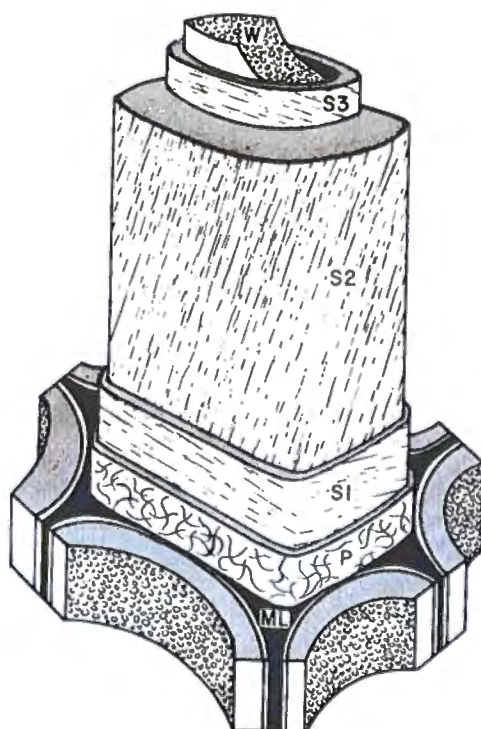
3.1.2.1 Composantes fibreuses

La croissance des fibres se produit au niveau du méristème, une fine couche de tissus possédant des fibres capables de se diviser, située entre le phloème ou écorce interne et le xylème ou bois. La mitose cellulaire donne lieu à des cellules filles qui croissent vers l'extérieure et qui ont elles-mêmes la capacité de se diviser. L'ensemble des couches cellulaires où se déroule l'activité méristématique, constitué de cellules mères du phloème et de cellules mères du xylème est appelé cambium [53]. En Amérique du Nord et en Scandinavie la croissance a lieu essentiellement de mai à septembre. Au début de cette période, l'arbre a besoin d'une grande quantité d'eau ; dans les résineux, des trachéides de BP peu colorées, à paroi relativement fine et à large lumen se développent.



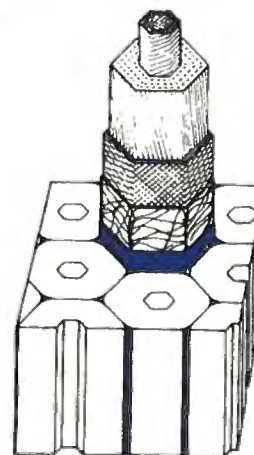
| <u>Légende :</u> | |
|------------------|---------------------------------------|
| <i>i</i> | anneaux de croissance (1, 2, 3, 4) |
| <i>m</i> | bois de cœur |
| <i>f</i> | bois de printemps |
| <i>s</i> | bois d'été |
| <i>c</i> | cambium |
| <i>b</i> | écorce interne |
| <i>br</i> | écorce externe |
| <i>h</i> | canaux résinifères |
| <i>ms</i> | rayon ligneux (vue trans- versale) |
| <i>ms'</i> | vue radiale |
| <i>ms''</i> | vue radiale dans l'écorce interne |
| <i>ms'''</i> | vue tangentielle |

Figure 3.2 Section d'un tronc de résineux de quatre ans d'âge montrant les sections transversale (haut), radiale (droite) et tangentielle (gauche) [55]



(b)

| <u>Légende :</u> | |
|------------------|-------------------------------------|
| <i>ML</i> | lamelle mitoyenne |
| <i>P</i> | paroi primaire |
| <i>S1</i> | paroi secondaire externe |
| <i>S2</i> | paroi secondaire intermé- diaire |
| <i>S3</i> | paroi secondaire interne |
| <i>W</i> | paroi verruqueuse |



(a)

Figure 3.3 Représentation schématique de la structure du bois (a) [57] et de la paroi cellulaire (b) [51] d'une fibre lignocellulosique

Par la suite, lorsque le taux de croissance de l'arbre diminue, les trachéides de BE, plus colorées et à paroi plus épaisse, se développent [51]. Le bois de résineux est essentiellement constitué de trachéides de différentes morphologies, de canaux résinifères verticaux, présents principalement dans le BP, de rayons ligneux et de cellules de parenchyme. Certaines essences telles que les sapins (*Abies*) possèdent très peu ou pas de canaux résinifères. Dans le sens horizontal, le bois est traversé par des rayons ligneux qui sont connectés aux trachéides par des ponctuations [55, 58]. Les trachéides de BP ainsi que les rayons ligneux verticaux remplissent essentiellement la fonction de transport de fluides dans le sens vertical alors que les trachéides de BE remplissent un rôle essentiellement mécanique de support de la structure de l'arbre. Les rayons ligneux horizontaux assurent le transport de l'eau et des nutriments dans le sens horizontal depuis et vers le parenchyme qui joue le rôle de stockage des nutriments [59].

3.1.2.2 Fibres d'été et fibres de printemps

En raison des différences liées à leur croissance, les fibres de BP et les fibres de BE possèdent des caractéristiques morphologiques propres en termes de longueur, de largeur et d'épaisseur de paroi mais aussi au niveau de la présence et de la taille des ponctuations. Ces différences sont facilement observables au microscope optique (Figure 3.4).

Ces caractéristiques induisent des propriétés différentes du point de vue papetier et influent notamment sur la masse linéique, la flexibilité, les propriétés optiques mais aussi sur leur comportement au raffinage [46]. Elles permettent également de définir plusieurs critères pour déterminer la nature des fibres dans une suspension de pâte par observation au microscope optique.

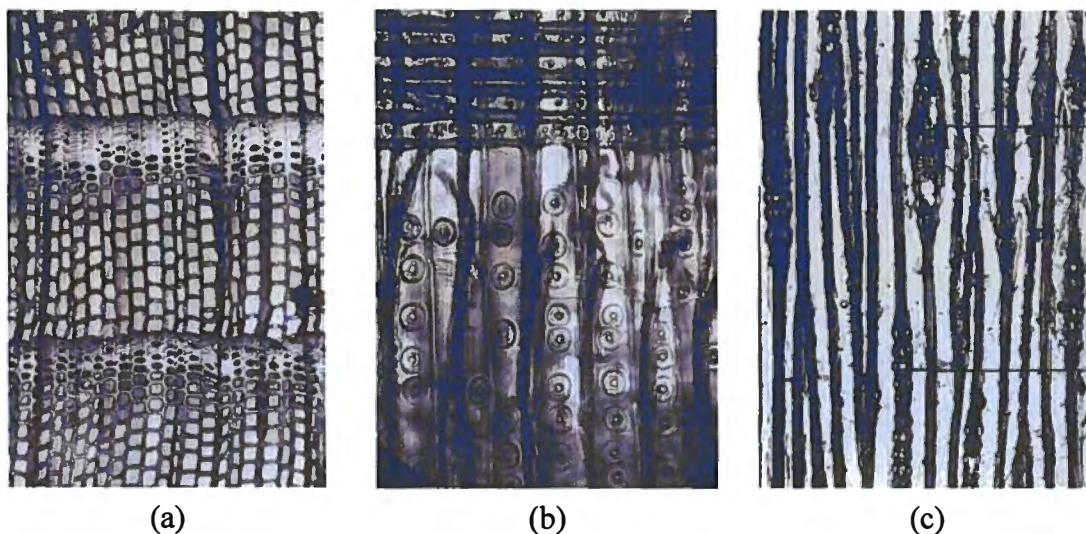


Figure 3.4 Sections transversale (a) ($\times 100$), radiale (b) ($\times 200$) et tangentielle (c) ($\times 200$) de bois de sapin (*Picea abies*) [55]

3.1.2.2.1 Longueur des fibres

La longueur des fibres dépend des essences, des conditions climatiques, géographiques et de la nature du sol où l'arbre s'est développé. Lorsque le climat est plus froid, les arbres poussent plus lentement et les fibres sont plus longues. Lorsque la croissance de l'arbre est rapide, les fibres sont plus courtes. La longueur des fibres des résineux varie entre 3 et 5 mm. Dans le cas de l'épinette et du sapin, elle est de l'ordre de 3,5 mm en moyenne [60]. Au cours d'une même année cependant, la longueur des fibres augmente pendant toute leur période de croissance, elle est minimum au début du printemps et atteint son maximum à la fin de l'été. Les fibres de BP sont donc plus courtes que les fibres de BE [55].

3.1.2.2.2 Dimensions transversales

La section transversale des fibres est de forme générale rectangulaire et est constituée des différentes parois des fibres et du lumen, les fibres formant un empilement ordonné dans le sens radial (Figure 3.3). Les dimensions transversales présentent de grandes différences entre le BP et le BE (Figure 3.4a). Bien que la largeur dans le sens tangentiel soit sensiblement la même pour les fibres de BP et de BE, la largeur dans le sens radial est nettement plus faible dans le BE.

On note également que la transition du BP au BE est progressive. Celle-ci dépend à la fois de l'essence et des conditions climatiques. Pendant la transition, les fibres acquièrent progressivement les caractéristiques morphologiques du BE. Par contre, il n'existe pas de transition entre le BE d'un cycle de croissance et le BP du cycle suivant. L'épaisseur de paroi des fibres est également notablement différent entre le BP et le BE. Ainsi le lumen des fibres de BE est considérablement plus petit que celui des fibres de BP. La variation de l'épaisseur de paroi est également progressive pendant la période de transition. Les dimensions transversales des essences employées dans cette étude sont résumées dans le tableau 3.1. Selon l'origine des fibres, leur mode de préparation et la méthode d'observation, ces dimensions peuvent présenter de grandes différences.

3.1.2.2.3 Ponctuations

Les ponctuations ou plasmodesmes varient dans leur forme et dans leur nombre entre les fibres de BP et les fibres de BE [53, 60, 61]. Elles constituent une ouverture dans la paroi des fibres au travers de laquelle les fluides peuvent circuler et se présentent sous la forme d'un disque. Il existe trois principaux types de ponctuations : les ponctuations auréolées, les ponctuations semi-auréolées et les ponctuations simples (Figure 3.5).

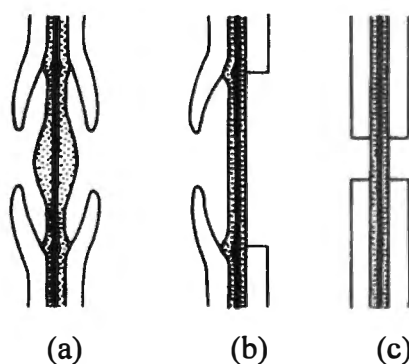


Figure 3.5 Profils schématisques des ponctuations (a) auréolées, (b) semi-auréolées et (c) simples [51]

Les ponctuations auréolées sont constituées d'une membrane centrale, issue de la lamelle mitoyenne et de la paroi primaire, autour de laquelle la paroi secondaire de la fibre forme une auréole qui a la capacité de bloquer la circulation des fluides. Les ponctuations simples sont des perforations entre des fibres adjacentes. Les ponctuations semi-

auréolées sont en fait la combinaison entre une ponctuation simple et une ponctuation auréolées et existent principalement au contact entre une trachéide et une cellule de parenchyme [55, 56]. Les ponctuations auréolées sont facilement observables et reconnaissables à la surface des fibres par microscopie optique (Figure 3.4b). Elles sont nettement plus nombreuses et plus grandes sur les fibres de BP que sur les fibres de BE [61, 63].

Tableau 3.1 Caractéristiques dimensionnelles des trachéides de résineux

| Essences / types de fibre | | Largeur | Épaisseur de paroi | Diamètre des ponctuations auréolées |
|---------------------------|---------|-----------------------------------|---|-------------------------------------|
| | | µm | µm | µm |
| Épinette noire | Moyenne | 23 ^a | 2,3 ^a – 1,45 ^c – 3,6 ^d | – |
| | BP | 36 ^b – 38 ^c | 3,3 ^d – 2,78 ^e | 16,4 ^b |
| | BE | 18 ^b – 14 ^e | 4,9 ^d – 4,09 ^e | 9,0 ^b |
| Épinette blanche | Moyenne | 27 ^a | 1,7 ^a – 1,36 ^c | – |
| | BP | 30 ^a | 1,6 ^a | – |
| | BE | – | – | – |
| Sapin baumier | Moyenne | 28 ^a | 2,1 ^a | – |
| | BP | – | – | – |
| | BE | – | – | – |

Notes : ^a Scallan *et al.*, 1974 [62] (sections transversales de bois / SEM)

^b Koran, 1977 [63] (sections tangentielles de bois / LTM)

^c Jang *et al.*, 1998 [64] (pâte kraft non raffinée / CLSM)

^d Tchepel *et al.*, 2006 [65] (pâte TMP fraction R28 / CLSM)

^e Law *et al.*, 2006 [66] (pâte TMP fractions R14, R28 et R48 / LTM)

3.1.2.2.4 Analyse quantitative

La composition du bois en termes de BP et de BE varie d'une essence à l'autre, d'un spécimen à l'autre et également d'un anneau de croissance à l'autre. Les anneaux de croissance extérieurs, les plus récents, ont une densité plus élevée que les anneaux plus anciens. Un minimum est cependant atteint puis la densité augmente de nouveau vers le centre du tronc. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces variations dans le sens radial : les conditions météorologiques, la concurrence de la végétation avoisinante mais surtout le vieillissement du cambium qui produit une densification importante des tissus lors de la transition au bois de cœur en raison de l'arrêt de l'activité végétative des cellules [67].

Plusieurs méthodes existent pour déterminer les proportions de chaque type de fibre. La méthode la plus utilisée repose sur l'analyse densitométrique du bois et la détermination des volumes de bois constitués de BP et de BE par mesure directe des dimensions des anneaux de croissance. Ces informations permettent d'évaluer les proportions en masse de fibres de BP et de fibres de BE dans le bois (Tableau 3.2).

Tableau 3.2 Composition du bois en termes de BP et de BE

| Essences / types de bois | | Fraction en volume | Masse volumique | Fraction en masse** |
|----------------------------|----------|--------------------|-------------------|---------------------|
| | | % | kg/m ³ | % |
| Épinette noire [68, 69] | Moyenne* | — | 442 | — |
| | BP | 75,3 | 384 | 65,5 |
| | BE | 24,7 | 619 | 34,5 |
| Épinette blanche [70] | Moyenne* | — | 341 | — |
| | BP | 85,5 | 308 | 77,1 |
| | BE | 14,5 | 538 | 22,9 |
| Sapin baumier [71, 72] | Moyenne* | — | 356 | — |
| | BP | 88,2 | 334 | 82,6 |
| | BE | 11,8 | 525 | 17,4 |

Notes : * moyennes pour le bois (BE et BP confondus)

** valeurs calculées

3.2 Fractionnement

Le fractionnement peut être effectué par des tamis sous pression et des hydrocyclones, ce sont les équipements communément utilisés dans l'industrie pour des opérations d'épuration des pâtes : les tamis sont employés pour retirer les bûchettes tandis que les hydrocyclones sont employés pour retirer des impuretés telles que le sable, les particules d'écorce de bois, etc. Cependant, ces équipements peuvent être utilisés également pour discriminer les fibres selon différents critères et donc réaliser des opérations de fractionnement. La figure 3.6 introduit les représentations typiques de ces équipements ainsi que les conventions de notations des différents débits qui circulent au travers.

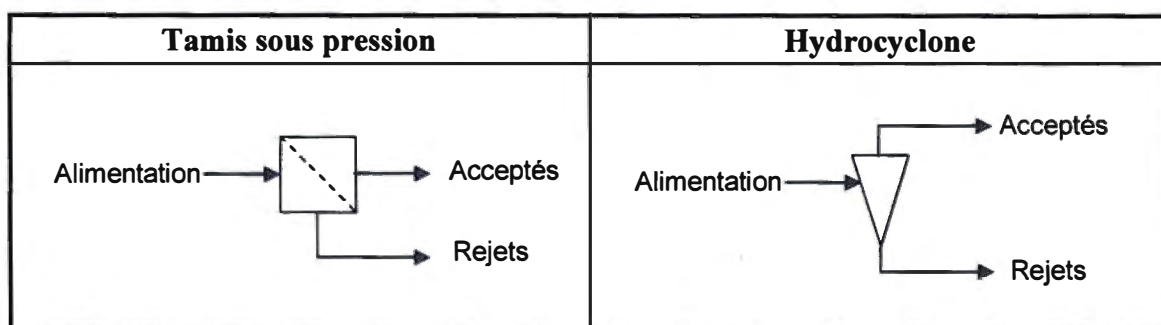


Figure 3.6 Convention de représentation pour un tamis sous pression et un hydrocyclone et définition des indices communément utilisés

D'autres appareils possèdent la capacité de réaliser du fractionnement, comme le filtre à disque avec pulvérisation (« Spray disc ») [73] ou encore les cellules de flottation [74, 75, 76]. Ils reposent souvent sur des principes de séparation similaires mais ne sont pas aussi répandus dans l'industrie pour cette application [24, 77]. De nouveaux procédés ont également été étudiés tel que le lavage par élutriation en phase liquide [78], le fractionneur à cône rotatif ou encore l'hydrocyclone à air injecté [79]. Récemment, Green et Wong [80] ont développé un hydrodynamomètre à cuve rotative (« RTH ») afin d'étudier le comportement hydrodynamique des fibres en fonction de leur forme (courbure et tortuosité), notamment la vitesse de sédimentation et le coefficient de trainée. Krogerus et Fagerholm [79] ont montré qu'un tube est également capable de fractionner les fibres sur la base de leur longueur, essentiellement en raison des différences de vitesse d'écoulement au niveau de la couche limite à proximité de la paroi du tube.

3.2.1 Relations de base

Les taux de rejets sont les paramètres les plus communément utilisés pour caractériser le fractionnement, aussi bien pour les tamis sous pression que pour d'autres équipements de fractionnement. Ils peuvent être basés soit sur les débits volumiques, soit sur les débits massiques de suspension fibreuse.

Le taux de rejets volumique est défini comme étant le rapport entre le débit volumique de rejets et le débit volumique d'alimentation (Éq. 3.1).

$$R_v = \frac{Q_r}{Q_f} \quad \text{Éq. 3.1}$$

Où $Q_{f, r}$ = Débit volumique d'alimentation et de rejets

De manière similaire, le taux de rejets massique est défini comme étant le rapport entre le débit massique de rejets et le débit massique d'alimentation :

$$R_w = \frac{M_r}{M_f} = \frac{Q_r C_r}{Q_f C_f} \quad \text{Éq. 3.2}$$

Où $M_{f, r}$ = Débits massiques d'alimentation et de rejets

$C_{f, r}$ = Consistances de l'alimentation et des rejets

Le taux d'épaississement est défini comme étant le rapport entre la consistance des rejets et la consistance d'alimentation :

$$T_R = \frac{C_r}{C_f} = \frac{R_w}{R_v} \quad \text{Éq. 3.3}$$

Pour chaque configuration de tamis mais aussi d'hydrocyclone, il existe une valeur maximum du taux d'épaississement au delà de laquelle le panier colmate [81] provoquant le bouchage du tamis ou, dans le cas de l'hydrocyclone, le bec de rejets se bouche.

3.2.2 Fractionnement par tamisage

Le tamisage repose essentiellement sur deux principes de fonctionnement : la probabilité de passage des fibres à travers les ouvertures et le calibrage par taille [82]. En effet, le panier constitue une barrière physique au passage des fibres. Cependant la taille des ouvertures étant en général trop grande pour empêcher que les fibres ne passent au travers, ce sont les conditions de l'écoulement dans le tamis qui conditionnent le passage des fibres. Les paramètres influençant le fractionnement sont indiqués dans la figure 3.7 ci-dessous et peuvent être regroupés autour de trois grandes classes : les propriétés de la pâte, les caractéristiques mécaniques du tamis associées au panier et au rotor et finalement les conditions opératoires qui conditionnent le régime d'écoulement dans le tamis. Tous ces paramètres affectent la probabilité de passage des fibres. Ainsi deux types de

fractionnement peuvent être différenciés : le fractionnement par probabilité et le fractionnement par effet barrière.

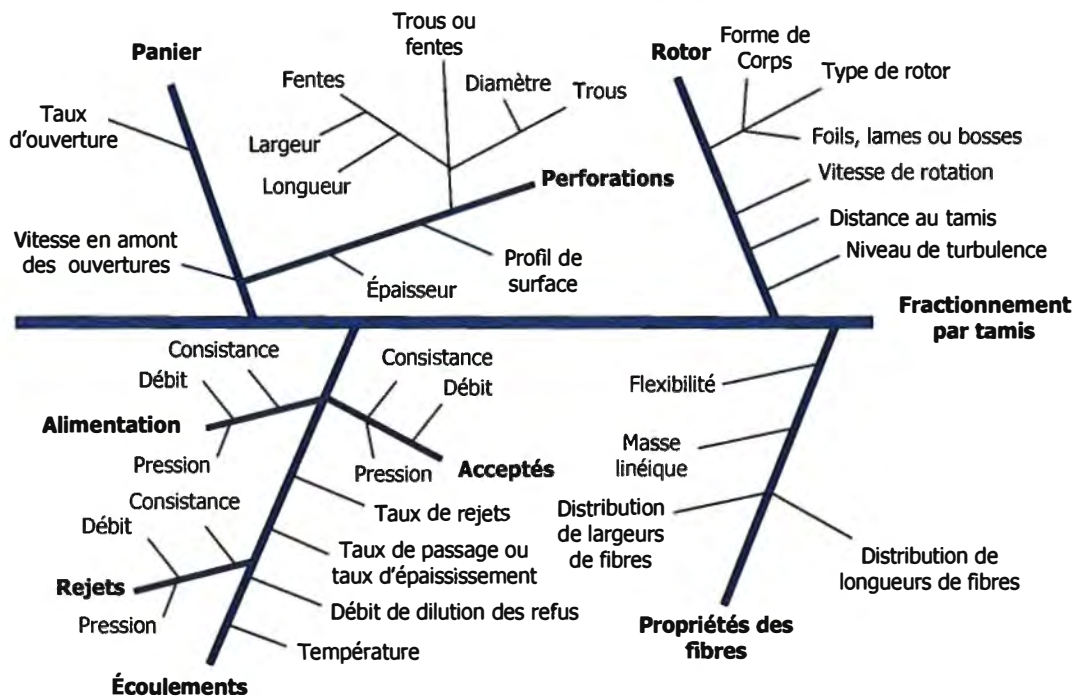


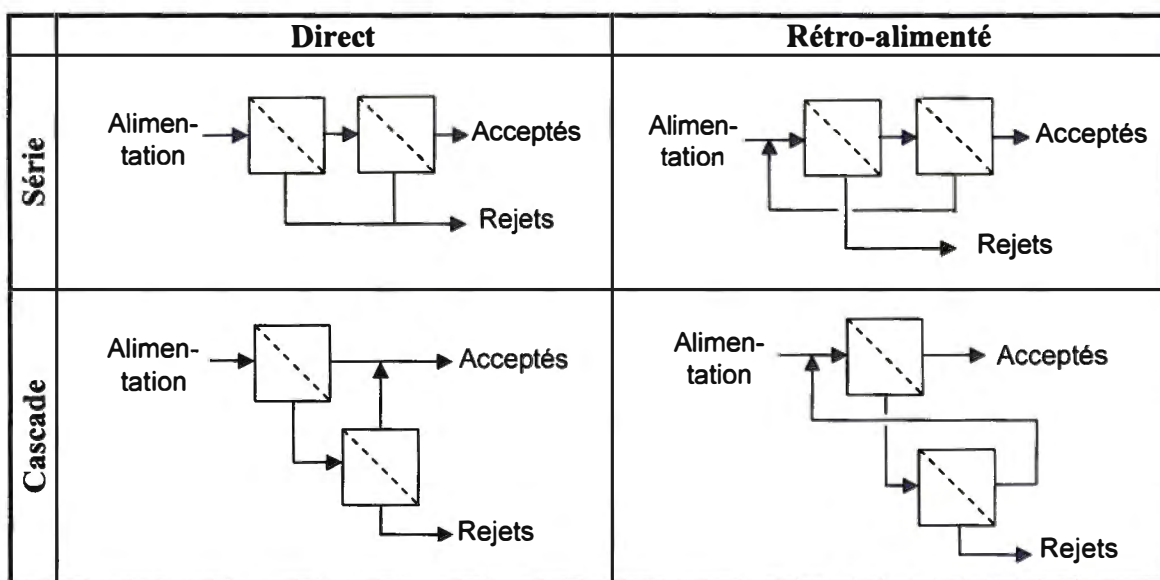
Figure 3.7 Diagramme de cause à effet du procédé de fractionnement par tamis sous pression

Gooding et Kerekas [83] puis Yu et DeFoe [84] montrent, à l'aide d'une caméra vidéo à haute vitesse, que ces paramètres affectent la manière dont les fibres approchent les ouvertures du panier et influent sur les phénomènes de formation du matelas fibreux à la surface du panier. Ils observent également [85] qu'avec de faibles vitesses, de l'ordre de 1 m/s, les fibres maintiennent la même forme que dans la suspension fibreuse. Avec des vitesses élevées, de l'ordre de 6 m/s, les fibres se déforment et commencent à tourner dans l'écoulement. Dans le cas de paniers profilés, aussi bien à trous qu'à fentes, des vortex se forment dans l'écoulement et ces vortex guident les fibres vers les ouvertures, ce qui favorise le passage des fibres. Lawryshyn et Kuhn [86] illustrent l'effet de la flexibilité des fibres sur leur passage au travers des ouvertures à l'aide de simulations numériques de l'écoulement de suspensions fibreuses. D'autre part, le rotor, qui définit l'amplitude, la fréquence et la forme des pulsations de pression, provoque la destruction du matelas fibreux. Dans certain cas, il peut même empêcher la formation du matelas

fibreux. Comme règle générale, une augmentation du débit au travers des perforations se traduit par un sacrifice de l'efficacité de séparation [87]. À l'aide de simulation numérique, Dong *et al.* [88] mettent en évidence que le profil des fentes favorisent grandement le passage des fibres, surtout dans le cas de contour incliné. Ces résultats concordent avec les observations réalisées auparavant.

Dans le cas où plusieurs tamis sont utilisés, en cascade, en série ou en parallèle (Tableau 3.3), la stratégie adoptée incorpore de nouveaux paramètres qui s'ajoutent à ceux de chaque tamis. En effet, chaque tamis ne possède pas nécessairement la même configuration et ne travaille pas sous les mêmes conditions d'opération. D'autre part, les caractéristiques de la pâte alimentant chaque tamis seront spécifiques à la stratégie choisie.

Tableau 3.3 Schémas simplifiés de configurations de montage de tamis



3.2.2.1 Approche mathématique du fractionnement

3.2.2.1.1 Taux de passage

A partir de 1986, Gooding et Kerekes [89, 90, 91] élaborent un modèle mathématique afin de caractériser la séparation des contaminants des fibres et de prévoir les changements de consistance dans un tamis. Ce modèle, qui donne naissance au taux de passage P , permet également de décrire la performance de fractionnement. Le taux de passage caractérise la probabilité des fibres de passer au travers des ouvertures.

$$P = \frac{C_s}{C_u}$$

Éq. 3.4

Où C_s = Consistance de la pâte dans la fente
 C_u = Consistance de la pâte en amont de la fente

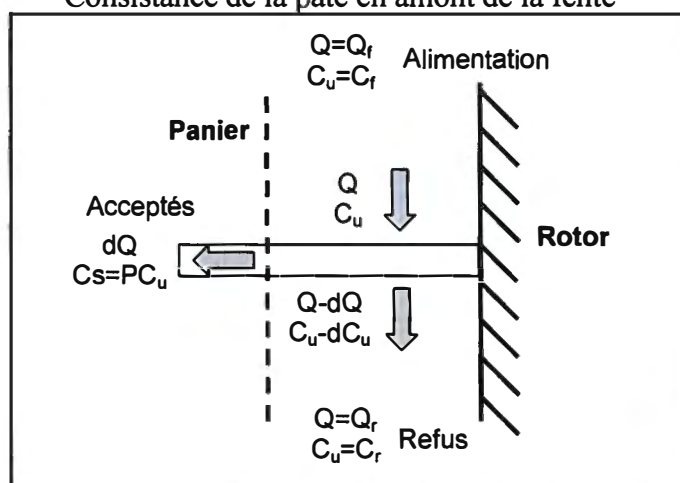


Figure 3.8 Schéma d'un élément de section d'un tamis sous pression indiquant les débits volumiques et massiques autour d'un volume de contrôle [92]

Le taux de passage caractérise l'effet du tamis vis-à-vis du classement des fibres : une valeur du taux de passage égale à zéro signifie un effet barrière alors que des valeurs comprises entre 0 et 1 sont caractéristiques d'un classement par probabilité. Exceptionnellement, des valeurs supérieures à 1 peuvent être rencontrées. C'est le cas notamment lorsqu'une plus grande quantité de matière que de fluide passe au travers du panier. Cette situation se produit dans le cas de l'épuration inverse [93].

Régime d'écoulement bouchon

De la relation ci-dessus (Éq. 3.4) et en réalisant un bilan de masse sur un élément de volume correspondant à une section transversale d'un tamis sous pression autour d'une ouverture (Figure 3.8), on peut établir les relations pour le taux d'épaississement (Éq. 3.5) et pour le taux de rejets massique (Éq. 3.6) en fonction du taux de passage et du taux de rejets volumique.

$$T_R = R_v^{P-1} \quad \text{Éq. 3.5}$$

$$R_w = R_v^P \quad \text{Éq. 3.6}$$

Où R_v = Taux de rejets volumique
 P = Taux de passage

Ces relations sont basées sur l'hypothèse d'un mélange parfait dans le sens radial, de telle manière que la consistance est uniforme dans une section transversale du tamis, et d'absence de mélange dans le sens axial c'est-à-dire que l'écoulement est de type bouchon. Le taux de passage est alors postulé comme constant tout le long du panier. Des relations ci-dessus, on peut déduire une relation qui permet de calculer P (Éq. 3.7).

$$P = \frac{\ln R_w}{\ln R_v} \quad \text{Éq. 3.7}$$

Régime d'écoulement en mélange

L'écoulement en mélange correspond au cas où la consistance à l'intérieur du panier est uniforme. Cette situation est favorisée par une forte agitation à l'intérieur du panier sous l'effet du rotor, notamment dans le cas de rotor lames ou à ailettes et par un espace plus important entre le rotor et le panier, ce qui permet la formation de turbulences.

La consistance en amont des ouvertures du panier C_u est alors constante. Dans le cas de tamis de faible hauteur, celle-ci peut être considérée égale à la consistance des rejets. La consistance dans les fentes est alors constante et égale à la consistance des acceptés. En utilisant les bilans de volume et de masse et les définitions du taux de rejets volumiques et du taux d'épaississement, le taux de passage peut être exprimé sous la forme suivante, ce qui permet de mettre en évidence une relation linéaire entre l'inverse du taux d'épaississement et le taux de rejets volumique [91, 93].

$$\frac{1}{T_R} = P + (1 - P)R_v \quad \text{Éq. 3.8}$$

Pour des tamis de hauteur plus élevée, la consistance dans le panier ne peut plus être considérée égale à la consistance des rejets, elle peut être éventuellement considérée égale à la moyenne entre la consistance d'alimentation et la consistance des rejets [94].

3.2.2.1.2 Taux de passage des fractions

Le taux de passage P_i pour une fraction i particulière peut être calculé de manière similaire à partir du taux de rejets massique pour cette fraction, lequel correspond à l'efficacité de rejet définie par :

$$E_R^i = \frac{Q_r C_r X_r^i}{Q_f C_f X_f^i} \quad \text{Éq. 3.9}$$

Où $Q_{f,r}$ = Débit volumique de pâte
 $C_{f,r}$ = Consistance de la pâte
 $X_{f,r}$ = Fractions massiques

On obtient ainsi l'expression de P_i (Éq. 3.10).

$$P_i = \frac{\ln R_w + \ln \frac{X_r^i}{X_f^i}}{\ln R_v} \quad \text{Éq. 3.10}$$

Où $X_{f,r}$ = Fractions massiques

Cette expression peut être réécrite sous la forme :

$$E_R^i = R_v^{P_i} \quad \text{Éq. 3.11}$$

L'indice P_i représente le taux de passage d'une fraction vers les acceptés. Bien souvent, il est préférable de caractériser le fractionnement en fonction des fractions séparées préférentiellement vers les rejets. L'indice $1-P_i$ peut alors être utilisé. Quand la séparation vers les rejets est parfaite, P_i est nul et $1-P_i$ est égal à 1, alors que lorsque la séparation vers les acceptés est parfaite, P_i tend vers $+\infty$ et $1-P_i$ tend vers $-\infty$. En absence de séparation, P_i est égal au taux de passage de la pâte.

3.2.2.1.3 Passage des fibres en fonction de la longueur

Le modèle du taux de passage a ensuite été développé par Olson *et al.* [95, 96] afin de caractériser le passage de certaines classes de fibres au travers d'une ouverture dans un tamis. Pour des classes de fibres définies par longueur, le taux de passage $P(l)$ des fibres de longueur l (c'est-à-dire de longueur comprise dans l'intervalle $[l, l+dl]$) est défini par la consistance des fibres de longueur l qui passent à travers l'ouverture divisée par la consistance des fibres de longueur l en amont de l'ouverture.

$$P(l) = \frac{C_s(l)}{C_u(l)} \quad \text{Éq. 3.12}$$

On peut établir la relation entre l'efficacité de rejet des fibres de longueur l , le taux de passage et le taux de rejets volumique :

$$e(l) = R_v^{P(l)} \quad \text{Éq. 3.13}$$

Où $P(l)$ = Taux de passage de la composante fibreuse de longueur l

A partir des distributions de longueurs dans des échantillons de pâte à l'alimentation, aux rejets et aux acceptés, on peut calculer le taux de passage et les efficacités de rejet correspondants. Par exemple, les appareils Kajaani FiberScan [97] fournissent un histogramme de 144 classes dont la longueur moyenne des fibres est égale à $l_i = 0,01 + i\Delta$ (en millimètres) où i est compris entre 0 et 143 et Δ est égal à 0,05 mm.

Le nombre total de fibres analysées est donc égal à :

$$N = \sum_{i=0}^{i=143} n_i \quad \text{Éq. 3.14}$$

Où n_i = Nombre de fibres dans la classe i

Et la distribution de longueur de fibre dans l'échantillon peut être estimée sur la base d'intervalles discrets par la relation suivante (Éq. 3.15).

$$p(l_i) = \frac{n_i}{N\Delta} \quad \text{Éq. 3.15}$$

Où n_i = Nombre de fibres dans la classe i
 N = Nombre total de fibres analysées dans l'échantillon
 Δ = Longueur de l'intervalle de la classe de longueur

Finalement, le taux de passage de la classe de longueur l_i peut être calculé à partir de la concentration en nombre de fibres dans les échantillons de l'alimentation, des acceptés et des rejets.

$$P(l_i) = \frac{C_a^n \cdot p_a(l_i)}{C_f^n \cdot p_f(l_i)} = \frac{C_a^n \cdot n_{ia} \cdot N_f}{C_f^n \cdot n_{if} \cdot N_a} \quad \text{Éq. 3.16}$$

Où n_i = Nombre de fibres dans la classe i
 N = Nombre total de fibres analysées dans l'échantillon
 C^n = Concentration en nombre des fibres dans l'échantillon

De tels calculs peuvent également être réalisés avec des distributions obtenues avec d'autres appareils, comme l'appareil FQA de Optest [98] ou l'appareil MorFi de Tech-Pap [99]. Ces appareils (Figure 3.9) présentent cependant une résolution insuffisante pour la mesure des fines. Il est donc préférable de retirer les fines du reste de la pâte, surtout si la masse linéique est calculée à partir de la longueur cumulée des fibres de l'échantillon [100].



Figure 3.9 Les appareils Kajaani FS-300 (Metso Automation) et Fiber Quality Analyzer (Optest Equipment Inc.)

Kumar [101] propose de relier les interactions entre les principaux paramètres d'un tamis à fentes à l'aide d'un nombre de pénétration, nombre adimensionnel défini par :

$$P_e = \frac{v_s W}{v_u l} \quad \text{Éq. 3.17}$$

Où v_s = Vitesse moyenne dans la fente
 W = Largeur de la fente
 v_u = Vitesse moyenne en amont de la fente
 l = Longueur de la fibre

Par la suite, Olson et Wherrett [102] établissent un modèle théorique entre le taux de passage et le nombre de pénétration (Éq. 3.18).

$$P(l) = \begin{cases} \frac{P_e}{2mk} & \text{si } P(l) < \frac{1}{2} \\ 1 - \frac{mk}{2P_e} & \text{si } P(l) \geq \frac{1}{2} \end{cases} \quad \text{Éq. 3.18}$$

Où P_e = Nombre de pénétration
 m = Constante reliant le gradient de concentration à proximité du panier en amont de l'ouverture à la longueur de fibre
 k = Constante reliant la vitesse en amont de l'ouverture à la vitesse périphérique du rotor

Ce modèle peut présenter cependant plusieurs difficultés, essentiellement liées à la détermination de la vitesse de l'écoulement en amont de l'ouverture (qui peut éventuellement être assimilée à la vitesse périphérique du rotor) et à la détermination des constantes m et k .

Une autre relation (Éq. 3.19) a été proposée pour représenter les courbes $P(l)$ [103, 104].

$$P(l) = e^{-\left(\frac{l}{\lambda}\right)^\beta} \quad \text{Éq. 3.19}$$

Où λ = Constante représentant une longueur de fibre caractéristique
 β = Constante de forme adimensionnelle propre au tamis

Les courbes $P(l)$ présentent une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux avec $\beta = 1$ pour des paniers à trous et $\beta = 0,5$ pour des paniers à fentes. λ est alors proportionnel à la taille des ouvertures [104, 105].

Le modèle du taux de passage, bien que développé spécifiquement pour le tamisage, peut être utilisé pour caractériser d'autres équipements de fractionnement, tels que le classeur Bauer McNett. Ainsi, Gooding et Olson [106] ont montré que le classeur Bauer McNett est bien corrélé par l'équation ci-dessus pour des valeurs de β proche de l'unité.

Cette approche du fractionnement et les modèles qui en dérivent supposent que le principe du fractionnement repose seulement sur la longueur des fibres, sans prendre en compte des propriétés telles que la masse linéique, la largeur, l'épaisseur de paroi et la flexibilité des fibres. Ces dernières propriétés ont cependant une grande importance, aussi bien au niveau des propriétés des pâtes que de leur comportement au fractionnement [107]. Ainsi, Ämmälä *et al.* [108, 109] montrent que la masse linéique des fibres influe sur le fractionnement pour deux raisons essentiellement. En premier lieu, il existe une corrélation (de type exponentielle) entre la masse linéique et la longueur des fibres. Néanmoins cette dépendance n'explique pas complètement l'effet de la masse linéique. Un deuxième effet est probablement associé à la flexibilité des fibres. En effet, des fibres de masse linéique plus élevée devraient être plus rigides et passer moins facilement au travers des perforations. Ämmälä définit la flexibilité longitudinale des fibres comme l'inverse de la rigidité des fibres. Deux méthodes de mesure de la flexibilité des fibres à l'état humide prédominant [110, 111], cependant aucune de ces méthodes n'est facile à mettre en œuvre, les mesures sont limitées aux fibres longues et présentent une grande variabilité. Plus récemment, Kuhn *et al.* [112] ont proposé un appareil de mesure dynamique pour faciliter ces mesures et éviter la manipulation individuelle des fibres. Petit-Conil *et al.* [113] proposent une caractérisation de la flexibilité des fibres de pâtes TMP et CTMP basée sur le calculs de deux coefficients de corrélation linéaire entre les longueurs moyennes théoriques des fibres des fractions R28, R48, R100 et R200 obtenues au moyen du classeur Bauer McNett et les longueurs moyennes obtenues au moyen d'une mesure optique telle que l'appareil Kajaani ou l'appareil FQA.

3.2.2.2 Indices de fractionnement et de performance

Il est nécessaire de définir un indice de fractionnement pour caractériser la séparation des fibres réalisée par un procédé de fractionnement. Cependant le fractionnement n'est pas une opération simple qui repose sur un critère unique. De plus, le fractionnement affecte plusieurs caractéristiques de la pâte. Il n'est donc pas aisé de définir un indice unique qui permette de caractériser l'ensemble des phénomènes qui se produisent lors d'un fractionnement. De ce fait, plusieurs indices ont été proposés.

3.2.2.2.1 Indice de fractionnement de Nelson

L'indice de Nelson, encore appelé indice Q , a été établi initialement pour caractériser l'efficacité de l'élimination de contaminants dans un tamis sous pression [114, 89, 115, 116] mais il peut être utilisé comme indice de fractionnement et également dans le cas d'hydrocyclones. Cet indice prend en compte les fractions massiques de composantes fibreuses qui représentent un intérêt du point de vue de la séparation.

$$Q_i = 1 - \frac{X'_a}{X'_r} \quad \text{Éq. 3.20}$$

Où $X'_{a,r}$ = Fractions massiques des fibres acceptées et rejetées de la classe i

X'_a et X'_r peuvent être une ou plusieurs fractions obtenues avec le classeur Bauer McNett. Lorsque l'indice Q est nul, cela signifie qu'il n'y a pas de séparation. La pâte acceptée et la pâte rejetée présentent la même concentration pour une classe de fibre donnée. Lorsque l'indice Q est égal à 1, la séparation est parfaite, c'est-à-dire que la composante fibreuse d'intérêt se retrouve entièrement dans les rejets. Des valeurs positives de l'indice Q correspondent à une séparation vers les rejets et des valeurs négatives à une séparation vers les acceptés. La séparation parfaite vers les acceptés est obtenue lorsque X'_r tend vers zéro, l'indice Q tends alors vers $-\infty$.

Sur la base de l'indice Q et avec l'hypothèse d'un fractionnement par probabilité (par opposition au fractionnement par effet barrière), Nelson [89] propose une courbe théori-

que d'efficacité de rejet en fonction du taux de rejets massique qui est généralement bien acceptée et utilisée dans le tamisage.

$$E_i = \frac{R_w}{1 - Q_i(1 - R_w)} \quad \text{Éq. 3.21}$$

Où Q_i = Indice de Nelson

3.2.2.2.2 Probabilité de rétention de Wahren

La probabilité de rétention de Wahren repose sur une définition similaire à celle de l'indice de Nelson et permet d'évaluer l'efficacité de rejet à partir du taux de rejets volumique [117, 118] :

$$W_i = 1 - \frac{C_a X'_a}{C_r X'_r} \quad \text{Éq. 3.22}$$

Où $X'_{a,r}$ = Fraction massique de la composante fibreuse i

$C_{a,r}$ = Consistance de la pâte

Lorsque la séparation est parfaite vers les rejets, W_i est égal à 1 alors que lorsque la séparation est parfaite vers les acceptés, W_i tends vers $-\infty$. Cependant la limite correspondant à l'absence de séparation ne correspond pas à une valeur nulle de W_i mais à une valeur critique W_C qui dépend du taux d'épaississement et du taux de rejets massiques (Éq. 3.23). On montre aisément que cette valeur correspond à la probabilité de rétention de la pâte entière.

$$W_C = \frac{T_R - 1}{T_R - R_w} \quad \text{Éq. 3.23}$$

L'efficacité de rejet peut être calculée à l'aide de la relation ci-dessous :

$$E_i = \frac{R_v}{1 - W_i(1 - R_v)} \quad \text{Éq. 3.24}$$

Où W_i = Probabilité de rétention de Wahren pour la fraction massique i

L'avantage de l'indice de Wahren repose sur le fait qu'il permet de prédire le taux de rejets massique pour des différentes pâtes à partir de la connaissance du comportement de chaque fraction vis-à-vis du fractionnement avec une même configuration. Cependant, bien que l'indice de Wahren soit utile pour un modèle prédictif, l'indice de Nelson reste meilleur pour l'analyse de résultats expérimentaux.

3.2.2.2.3 Indice de fractionnement de Karnis

L'indice de fractionnement proposé par Karnis [77] utilise les valeurs obtenues pour une propriété particulière de la pâte (Éq. 3.25). Cette propriété peut être une propriété caractéristique du mécanisme de fractionnement comme, par exemple la longueur des fibres dans le cas du tamisage, la surface spécifiques des fibres dans le cas du fractionnement par hydrocyclone, des fractions massiques ou encore toute autre propriété d'intérêt. En ce sens, l'indice de Karnis constitue une généralisation de l'indice de Nelson.

$$FI = 1 - \frac{X_I}{X_{II}} \quad \text{Éq. 3.25}$$

Où X_I = Valeur inférieure de la propriété X
 X_{II} = Valeur supérieure de la propriété X

Les indices I et II représentent les fractions de manière à ce que X_I soit inférieur à X_{II} , ainsi FI est toujours compris entre 0 et 1. Lorsqu'il n'y a pas de séparation, X_I et X_{II} sont égaux et FI est nul. Lorsque X_I tends vers 0, c'est-à-dire que les fibres qui possèdent la propriété X se retrouve toutes dans l'autre fraction (acceptés ou rejets), FI tends vers l'unité et représente une séparation parfaite du point de vue de cette propriété.

3.2.2.2.4 Indice de fractionnement d'Olson *et al.*

L'indice de fractionnement ϕ défini par Olson *et al.* [103, 114] repose sur le modèle du taux de passage. Cet indice caractérise le fractionnement par longueur où les fibres sont séparées en deux classes : les fibres longues dont la longueur est supérieure à une longueur seuil l et les fibres courtes dont la longueur est inférieure à cette longueur seuil.

$$\Phi = E_L - E_S \quad \text{Éq. 3.26}$$

Où E_L = Efficacité moyenne de rejet des fibres longues
 E_S = Efficacité moyenne de rejet des fibres courtes

Une valeur nulle signifie qu'il n'y a pas de fractionnement car l'efficacité de rejet des fibres courtes est égale à celle des fibres longues, c'est-à-dire que les fibres courtes et les fibres longues se retrouvent en proportion égales dans les rejets et les acceptés. La séparation parfaite est obtenue lorsque toutes les fibres longues se retrouvent dans les rejets et toutes les fibres courtes dans les acceptés, E_L est alors égale à 1, E_S est nulle et ϕ est égal à 1.

Les efficacités E_L et E_S peuvent être exprimées en fonction du taux de passage des fibres longues et du taux de passage des fibres courtes respectivement :

$$E_L = R_v^{P_L} \quad \text{Éq. 3.27}$$

$$E_S = R_v^{P_S} \quad \text{Éq. 3.28}$$

Où P_L = Taux de passage des fibres longues
 P_S = Taux de passage des fibres courtes

En introduisant le paramètre de fractionnement α défini par la relation ci-dessous,

$$\alpha = 1 - \frac{P_L}{P_S} \quad \text{Éq. 3.29}$$

E_L peut être exprimé en fonction de E_S :

$$E_L = E_S^{1-\alpha} \quad \text{Éq. 3.30}$$

Le paramètre de fractionnement α permet de caractériser l'efficacité de fractionnement du tamis pour une pâte et une configuration particulière de tamis, ce paramètre ayant la propriété d'être indépendant du taux de rejets volumique [115].

3.2.2.3 Effet des variables du procédé

3.2.2.3.1 Taux de rejets volumique

C'est un des paramètres clé du fractionnement par tamisage, associé à la vitesse de passage au travers des ouvertures, il permet de définir les débits d'alimentation, d'acceptés et de rejets. Plus le taux de rejets volumique est élevé et meilleure est la performance du fractionnement.

3.2.2.3.2 Différence de pression

La différence de pression entre l'alimentation et les acceptés n'est pas en soi un paramètre opérationnel dans un tamis sous pression. C'est en fait la résultante de la résistance du panier au passage de la pâte au travers des ouvertures. Niinimäki *et al.* [119] montrent que la différence de pression peut être modélisée par la loi de Darcy en faisant intervenir dans le coefficient de perméabilité une résistance propre au panier et une résistance spécifique au passage des fibres dans les ouvertures.

3.2.2.3.3 Longueur des fibres

La longueur des fibres est un autre paramètre clé du fractionnement par tamisage. Plus les fibres sont longues et plus la probabilité qu'elles soient retenues par le panier et finalement rejetées augmente. Par conséquent, lorsque la fraction de fibres longues augmente dans la pâte à l'alimentation, on observe une augmentation du taux de rejets massique et du taux d'épaississement. Cependant, pour des pâtes avec un taux élevé de fibres longues, on peut observer une baisse de l'efficacité de rejet, surtout dans le cas de panier à fentes fines profilées ("wedge wire"). Ceci laisse penser que les interactions entre fibres aident au passage des fibres longues au travers des fentes [116].

3.2.2.3.4 Consistance d'alimentation

La consistance d'alimentation est un paramètre essentiellement opérationnel et les caractéristiques de fractionnement se maintiennent sur une large plage de consistance en dépit du changement drastique de comportement de la pâte comme fluide en écoulement.

L'augmentation de la consistance permet d'augmenter la production du tamis, cependant, la fenêtre opérationnelle se trouve réduite par le risque de bouchage. En effet, la consistance des rejets augmente proportionnellement à l'augmentation de la consistance d'alimentation [116].

3.2.2.3.5 Température de la pâte

La température influence le fractionnement de plusieurs manières : viscosité de la pâte, formation de flocs et flexibilité des fibres pour l'essentiel. Le taux d'épaississement et l'efficacité de rejet des fibres longues diminuent lorsque la température augmente [116]. L'effet est cependant moins prononcé pour de petites ouvertures. L'augmentation de la viscosité a pour effet d'augmenter la capacité et le débit à travers le tamis et dans un même temps, de réduire le taux d'épaississement [120]. Cet effet est probablement dû à l'augmentation de la force de trainée sur les fibres.

3.2.2.3.6 Taille des ouvertures, profils et vitesse de passage

L'efficacité de rejet des fibres longues augmente avec la diminution de la taille des ouvertures [116]. Dans le cas de tamis perforé, les meilleurs résultats de fractionnement [81, 105, 121] sont obtenus avec les paniers à trous lisses de petit diamètre (0,8 mm et 0,6 mm) à des vitesses de passage de 0,5 à 1 m/s.

L'augmentation de la vitesse de passage conduit à des indices de fractionnement moins bons. Dans le cas de la fraction R48, les indices de fractionnement obtenus ne sont pas satisfaisants même si un maximum est obtenu avec un panier lisse à trous de 0,8 mm. Dans le cas d'un panier profilé (Figure 3.10), l'étude menée avec des fentes de 0,15 mm de largeur indique de meilleurs résultats pour les profils plus petits (0,3 mm). Cependant, les paniers à trous lisses offrent en général de meilleures performances de fractionnement que les paniers à fentes [122]. Julien Saint Amand *et al.* [94, 123] constatent également une amélioration de la performance de fractionnement lorsque la vitesse de passage est réduite, surtout en association avec un rotor à lames longues produisant des pulsations de pression inversées et de grande amplitude.



Figure 3.10 Quelques profils commerciaux de paniers à fentes [89]

3.2.2.3.7 Vitesse de rotation du rotor

L'effet de la vitesse de rotation du rotor sur le taux d'épaississement dépend du type de panier : avec des paniers lisses, le taux d'épaississement se maintient constant et diminue brutalement à basse vitesse de rotation alors qu'avec des paniers profilés, le taux d'épaississement augmente lorsque la vitesse de rotation diminue [124]. Une réduction de la vitesse de rotation du rotor génère également une augmentation de l'efficacité de séparation des fibres longues [116, 123, 125]. Cependant, selon Ämmälä [126], il existe une vitesse de rotation optimale pour laquelle le taux de rejets et l'efficacité de fractionnement sont maximisés. Ceci serait dû à un double effet des micro-turbulences et de pulsations de pression générées par les lames du rotor: d'une part, celles-ci provoquent un mélangeage de la pâte mais d'autre part, elles réduisent la vitesse de la pâte en amont du panier. Or une augmentation de la vitesse des fibres en amont du panier favorise le

fractionnement. Repo *et al.* [127] ont déterminé que les fractions R14 et R28 sont mieux séparées avec une vitesse de rotation basse et que cette différence de séparation se maintient quelque soit le taux de rejets massique. Braaten et Wakelin [121] arrivent à la même conclusion que se soit avec des paniers à trous ou avec des paniers à fentes. Il existe cependant une vitesse minimum critique en deçà de laquelle le risque de bouchage est très grand. En règle générale, Wakelin [81] considère que la vitesse du rotor ne doit pas être inférieure à 20 fois la vitesse de passage dans les ouvertures.

La forme du rotor et le type d'élément déprimogène du rotor joue également un rôle non négligeable. Ces derniers déterminent la forme et l'amplitude des pulsations de pressions [128, 129] et influent fortement sur la capacité du tamis. A vitesse de rotation égale, un rotor à bosses permet un meilleur fractionnement qu'un rotor à lames ou à ailettes [81]. D'autre part, un rotor cylindrique laissant un espace réduit entre le panier et le rotor favorise un écoulement de type bouchon alors qu'un rotor ouvert favorise un régime d'écoulement en mélange [93].

3.2.2.3.8 Stratégie de fractionnement

À travers la modélisation de plusieurs configurations de tamis sous pression basée sur le taux de passage et l'indice de fractionnement d'Olson, Friesen *et al.* [130] déterminent que des tamis avec rétroalimentation offrent de meilleures performances et que des montages en cascades ou en série donnent des performances similaires dans le cas de paniers à trous lisses. Dans le cas de paniers à fentes, les meilleurs résultats sont obtenus avec des tamis en cascade directe (Tableau 3.3). Cependant, ces résultats restent inférieurs à ceux d'un tamis équipé d'un panier à trous. Dans cette étude, réalisée avec une pâte CTMP de résineux, il n'est pas précisé la longueur des fibres qui définit la frontière entre les fibres longues et les fibres courtes. D'autre part, les simulations n'ont pas été contrastées avec des fractionnements réels afin de valider les résultats. Ils doivent donc être considérés seulement comme des guides dans le choix de configuration.

3.2.2.4 Conclusion sur le tamisage

À partir de cette revue de bibliographie, plusieurs conclusions peuvent être émises :

- La performance du fractionnement peut être caractérisée à l'aide de l'indice de Nelson, par contre, la probabilité de rétention de Wahren est plus robuste pour réaliser des prédictions.
- Un fractionnement pratiquement parfait de la fraction R14 est possible avec des paniers à fentes ou avec des paniers à trous et la fraction R28 peut être raisonnablement séparée. Jusqu'à présent, aucun auteur n'a reporté de résultat satisfaisant pour la séparation de la fraction R48. Cependant plus les ouvertures sont fines et meilleure est la séparation au prix de taux d'épaississement élevé et d'une réduction de la fenêtre opérationnelle.
- L'efficacité de rejet des paniers à trous ne dépend pratiquement que du diamètre des trous alors que dans le cas de paniers à fentes, la vitesse de passage et la largeur des fentes affectent le résultat du fractionnement.
- La performance des paniers à trous peut être obtenue avec des paniers à fentes fines. Des trous de petites tailles (0,8 mm ou moins) ou des fentes étroites (0,15 mm ou moins) donnent de meilleurs résultats. De plus, les paniers profilés présentent plus de flexibilité opérationnelle que les paniers lisses mais au prix d'un sacrifice de l'efficacité de fractionnement.
- Un rotor à bosses est préférable à un rotor à lames ou à ailettes du point de vue du fractionnement.
- La vitesse du rotor doit être la plus faible possible mais supérieure à une vitesse critique pour éviter le colmatage. Cette vitesse critique peut être estimée à 20 fois la vitesse de passage au travers des ouvertures.

- Le taux de rejets massique doit être au moins égal à la somme des fractions massiques que l'on souhaite séparer, c'est-à-dire que le bilan massique doit être conséquent avec les fractions massiques des fibres que l'on souhaite séparer.
- L'utilisation de tamis en cascade avec des trous lisses permet d'améliorer significativement l'efficacité de fractionnement.

3.2.3 Fractionnement par hydrocyclones

Dans le cas de fractionnement à l'aide d'hydrocyclones, plusieurs étages montés en cascade sont utilisés, chaque étage étant constitué de plusieurs hydrocyclones en parallèle. Les rejets correspondent alors aux rejets de la dernière étape tandis que l'accepté correspond à l'accepté de la première étape. Des variantes de ce montage typique sont parfois utilisées.

Le mécanisme de fractionnement dans un hydrocyclone repose sur deux principes : la probabilité de passage des fibres dans le débit de refus (ou d'acceptés) et les conditions hydrodynamiques dans le cône de l'hydrocyclone. Outre les caractéristiques des écoulements de l'alimentation, des acceptés et des refus et les propriétés des fibres, qui sont similaires à celles du fractionnement par tamisage, la quantité de variables influençant le fractionnement par hydrocyclones est plus limitée. En effet, par l'absence de pièce en mouvement ou d'élément filtrant, les seuls paramètres qui entrent en ligne de compte sont les caractéristiques physiques du cône [131] où a lieu la séparation des fibres (Figure 3.11).

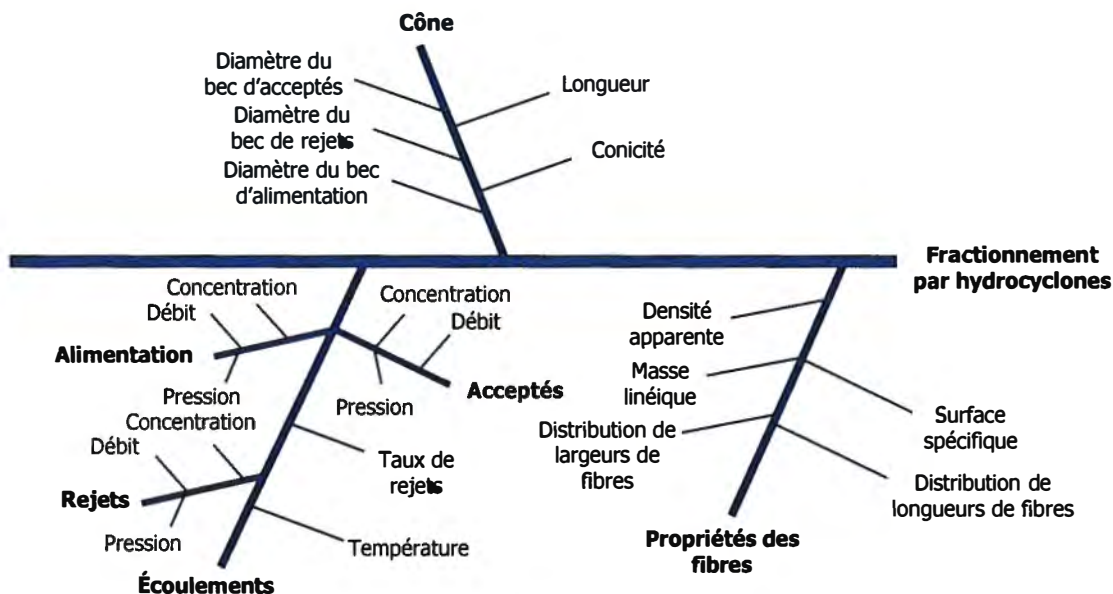


Figure 3.11 Diagramme de cause à effet du procédé de fractionnement par hydrocyclones

Les conditions hydrodynamiques soumettent les fibres à plusieurs forces dont une force centrifuge due au vortex, des interactions entre les fibres et entre les fibres et la paroi de l'hydrocyclone, une force de flottaison et une force de trainée [132, 133]. En raison de l'ensemble de ces forces, la séparation obtenue dépend plus des capacités d'interaction des fibres avec le milieu environnant que de ses caractéristiques morphologiques. La complexité de l'écoulement dans un hydrocyclone a généré un usage extensif d'outils de simulation numérique (« CFD »). Bliss [27] élabore des modèles empiriques avec un succès relatif pour prévoir la qualité des pâtes obtenues. Cependant ces modèles ne permettent pas de prévoir les caractéristiques du fractionnement. Rehmat *et al.* [132] ainsi que Sevilla *et al.* [134] soulignent la difficulté de modéliser l'écoulement multiphasique avec présence d'une phase gazeuse au centre du vortex, ce qui nécessite des hypothèses simplificatrices telles que interactions entre fibres négligeables, fibres rigides ou fibres considérées comme des particules solides indéformables.

Alors que, dans un tamis, la séparation s'effectue essentiellement sur la base de la longueur des fibres, dans un hydrocyclone, la séparation se fait principalement sur la base de la densité apparente puis sur la base de la surface spécifique des fibres dans le cas des pâtes mécaniques et sur la base de la masse linéique dans le cas des pâtes chimi-

ques [77]. Des résultats contradictoires ont été obtenus au regard des distributions de longueur de fibre. Certains n'observent aucune différence [105, 135]. Cependant des différences peuvent apparaître car les fibres à paroi épaisses présentent généralement une surface spécifique réduite. Ainsi, avec un banc d'hydrocyclones Noss Radiclone à deux étages, Kure *et al.* [136] observent que les fibres des rejets présentent une longueur moyenne plus élevée et un indice d'égouttage plus élevé, ce qui est conforme avec l'idée qu'un hydrocyclone tend à rejeter les fibres à faible surface spécifique. Ouellet *et al.* [137] montrent que des hydrocyclones permettent d'améliorer le fractionnement par tamisage, mettant également en évidence la sélectivité sur la base de la surface spécifique des fibres. Ils utilisent à cette fin des tamis équipés de paniers à fentes de 0,25 mm et 0,20 mm de largeur à profil bas sur une pâte thermomécanique pour papier journal prélevées dans le cuvier de latence, c'est-à-dire après le second stade de raffinage. Ho *et al.* [138, 139] observent des différences de longueur entre les acceptés et les rejets sur un banc d'hydrocyclone Bauer 600 Centri-cleaner, aussi bien avec des fibres TMP que des fibres BCTMP. Statie *et al.* [133] et Wang *et al.* [140] déterminent quelques directions générales pour le fractionnement de fibres, notamment que l'efficacité du fractionnement croît avec le diamètre des fibres et que pour des fibres de même diamètre, l'efficacité de fractionnement est plus grande pour les fibres moins denses. A l'aide d'un hydrocyclone Beloit Posiflow, Byrd *et al.* [141] établissent une relation entre les caractéristiques du fractionnement et les conditions d'opération telles que la différence de pression entre l'alimentation et l'accepté, le diamètre du bec de rejet et la pression d'alimentation. Ils trouvent notamment que le débit massique total dépend seulement de la différence de pression. Par contre, le taux de rejets dépend des trois variables et croît avec la différence de pression. En accord avec d'autres études mentionnées auparavant, les rejets présentent des longueurs moyennes de fibres et des masses linéiques légèrement supérieures à celles des acceptés. Avec le même équipement, Park *et al.* [142] trouvent que la vitesse de glissement des fibres est un concept clé dans le fractionnement par hydrocyclone. Quatre facteurs principaux influent sur la vitesse de glissement : l'accélération dans le cône, la forme des fibres caractérisée par le rapport entre le volume et la surface des fibres, la différence de densité entre les fibres et le fluide et le coefficient de traînée.

3.2.3.1 Mesure de la surface spécifique

La surface spécifique des fibres est un paramètre complexe qui prend en compte plusieurs aspects. Il caractérise la surface des fibres en contact avec le milieu et potentiellement susceptible de générer des interactions avec le fluide et avec les autres particules. En ce sens, la nature de la surface des fibres, notamment si elle est cellulosique ou bien lignifiée, joue un rôle important dans la capacité de liaison des fibres. De même, la surface interne du lumen, bien qu'en contact avec le fluide, ne joue pas un rôle identique à celui de la paroi externe de la fibre. Ces considérations en rendent la mesure difficile.

La surface spécifique d'un point de vue géométrique peut être estimée à partir de la connaissance des caractéristiques morphologiques des fibres. Ainsi Braaten [9] calcule la surface spécifique des fibres par le rapport entre la surface totale de la fibre et le poids de la fibre en supposant que la masse volumique de la paroi des fibres est de 1500 kg/m^3 , que les fibres possèdent une forme tubulaire et en ne tenant compte que des surfaces latérales internes et externes des fibres (Éq. 3.31).

$$SSA = \frac{2}{\rho t} \quad \text{Éq. 3.31}$$

Où t = épaisseur de paroi des fibres
 ρ = masse volumique de la paroi des fibres

De manière similaire, Wakelin *et al.* [143] estiment la surface spécifique externe des fibres (Éq. 3.32). Cette expression prend en compte la surface des sections transversales aux extrémités des fibres.

$$SSA_{ext} = \frac{1}{t} + \frac{1}{D - t} \quad \text{Éq. 3.32}$$

Où t = épaisseur de paroi des fibres
 D = diamètre des fibres

Ces estimations considèrent une forme typique pour les fibres et ne tiennent pas compte de la fibrillation, ce qui est relativement acceptable pour les fractions de fibres longues des pâtes thermomécaniques dont les fibres sont peu fibrillées. Elles requièrent, d'autre

part, de mesurer le diamètre et l'épaisseur de paroi des fibres par microscopie, soit manuellement, soit de manière automatique avec des équipements tels que l'appareil FQA (Figure 3.9) pour la largeur des fibres et l'appareil MWT (Figure 4.7) pour l'épaisseur de paroi, ou encore par observation de section de fibres. Plusieurs méthodes d'observation sont utilisées : la microscopie optique à transmission [63, 66, 144], la microscopie confocale à balayage laser [145, 146, 64, 147] ou encore, la microscopie électronique à balayage [62, 148].

Sous l'effet de contraintes de pression et de cisaillement, la section transversale des fibres peut se déformer. L'écrasement qui en résulte dépend des caractéristiques morphologiques, notamment l'épaisseur de paroi et le rapport entre les largeurs radiales et tangentielles des fibres. La capacité des fibres à se collapser peut être évaluée par l'indice de résistance au collapsus transversal [149] à l'aide de la relation suivante :

$$CRI = 1000 \cdot \left(\frac{t}{D} \right)^3 \quad \text{Éq. 3.33}$$

Où t = épaisseur de paroi des fibres
 D = diamètre des fibres

Le facteur 1000 permet d'obtenir des valeurs proches de l'unité étant donné que le diamètre des fibres est de l'ordre de 5 à 10 fois l'épaisseur de paroi. Wood *et al.* [150, 151] utilisent la mesure de turbidité pour évaluer la surface spécifique des fines dans une suspension diluée (0,03%). Cette mesure n'est cependant pas applicable pour des suspensions concentrées ou encore en présence de fibres. Considérant que la surface spécifique joue un rôle important dans la sédimentation des fines, Luukko [152] proposent de contrôler la qualité des fines à l'aide du volume spécifique de sédimentation [153], lequel présente une bonne corrélation avec les propriétés mécaniques telles que l'indice de résistance à la traction d'une feuille préparée avec des fines.

3.2.3.2 Conclusion sur le fractionnement par hydrocyclone

À ce jour, il n'existe pas de théorie largement acceptée pour décrire le principe de séparation d'un hydrocyclone, à part le fait que ce dernier repose en premier lieu sur la densi-

té apparente des fibres puis sur la surface spécifique. Il n'y a pas non plus consensus sur la définition, ni sur la mesure de la surface spécifique : certains utilisent des petits hydrocyclones pour séparer les fibres de surfaces spécifiques différentes, d'autres utilisent le volume spécifique de sédimentation ou encore des calculs basés sur le diamètre et l'épaisseur de paroi des fibres. Cela rend d'autant plus difficile la compréhension des mécanismes de fractionnement dans un hydrocyclone ainsi que la comparaison des résultats obtenus dans différentes études.

3.3 Raffinage

Suite au fractionnement, les fractions obtenues peuvent être raffinées pour développer sélectivement les fibres. Les fractions raffinées sont ensuite mélangées de manière à reconstituer la pâte complète. Plusieurs techniques de raffinage sont envisageables : raffinage à haute consistance (à une consistance de 30% à 40%) ou encore, raffinage à basse consistance (à une consistance de 4 à 6 % environ). Ces techniques dépendent cependant de nombreux paramètres (Figure 3.12) et pas uniquement de la consistance. La séparation par consistance des techniques de raffinage met en évidence non seulement des domaines très différents de consistance mais aussi deux grandes technologies qui emploient chacune des équipements de raffinages spécifiques.

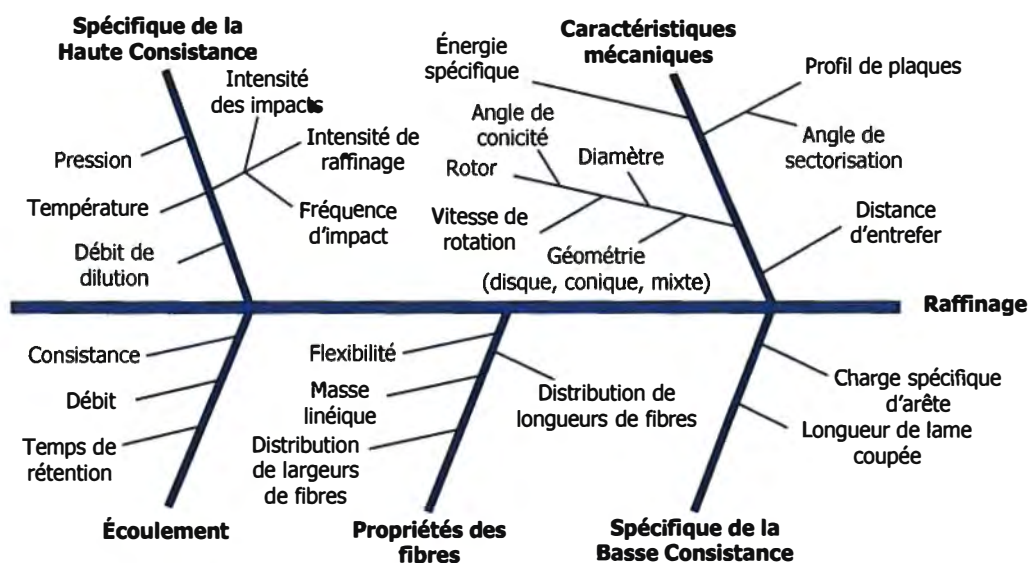


Figure 3.12 Diagramme de cause à effet du procédé de raffinage

Sundström *et al.* [154] et Karnis [155] montrent que, lors du raffinage, non seulement la longueur des fibres diminue mais aussi leur masse linéique. Celle-ci s'accompagne d'une augmentation de la quantité de fines, résultant de délaminares successifs de la paroi, et également de la fibrillation des fibres. Stationwala *et al.* [156, 157] obtiennent des conclusions similaires, cependant, dans le cas de pâte de meule pressurisée, la génération de fines provient plutôt de la coupe des extrémités des fibres que du clivage de la paroi. Reme *et al.* [158] montrent que les fibres de BE à paroi épaisse subissent une diminution plus importante de l'épaisseur de paroi que les fibres de BP à paroi plus fines. Cette diminution se produit surtout au cours des deux premiers stades de raffinage et de manière moins importante au cours du stade tertiaire. Par contre, pour les fibres de BP, la paroi subit un clivage surtout lors du stade primaire. Law [159] précise d'ailleurs que la destruction de la paroi des fibres de BP peut être initiée dès la compression des copeaux dans la presse à vis qui alimente le raffineur. Ces changements de structure de paroi génèrent des propriétés différentes dans la feuille selon le type de fibre, surtout du point de vue de la densité, de la diffusion de la lumière et de la rugosité. Kure *et al.* [136] proposent de séparer les fibres à parois épaisses à l'aide d'hydrocyclones puis de raffiner ces fibres. Ils obtiennent des résultats significatifs avec une augmentation des fibres à paroi épaisse dans les rejets. Ils montrent également qu'il est possible de réduire l'épaisseur de paroi de ces fibres, préjudiciables pour les propriétés de la feuille, par un raffinage à haute consistance aussi bien qu'à basse consistance. L'effet du raffinage sur les fibres longues dépend cependant de l'intensité de raffinage. Tchepel *et al.* [160] trouvent que le raffinage à haute intensité de la fraction de fibres longues produit des fibres plus flexibles mais également que la réduction de longueur de ces fibres est plus prononcées à énergie spécifique égale. Kangas *et al.* [161] mettent en évidence qu'au cours du premier stade de raffinage, environ 60% de la paroi secondaire S2 des fibres est dévoilée, la lamelle mitoyenne, la paroi primaire et la paroi secondaire S1 subissent un clivage produisant des fines floconneuses qui contiennent une grande quantité de lignine. Au cours des stades postérieurs de raffinage, le clivage de la paroi S2 génère des fines plus fibrillées dont la surface est moins lignifiée, plus riche en polysaccharide et donc plus à même de créer des liaisons avec les autres constituants de la pâte. Stationwala *et al.* [162] suggèrent qu'il est possible d'obtenir une même qualité de pâte par un

premier stade à faible énergie spécifique mais à haute intensité suivi par un stade à haute intensité et à basse énergie spécifique, que celle obtenue avec un procédé conventionnel, tout en réduisant la consommation d'énergie de 25%. Par contre, Salmén *et al.* [163] concluent que l'augmentation de l'intensité de raffinage peut être bénéfique en terme de rendement énergétique mais peut mener à la destruction des fibres de BP si on cherche à développer complètement les fibres de BE. Ils suggèrent donc de ne pas raffiner ensemble ces fibres. Ils recommandent en outre de réaliser le raffinage de chaque fraction avec une intensité de raffinage élevée afin de réduire le nombre de cycle de compression et à température élevée afin de ramollir la lignine. Liukkonen *et al.* [164] obtiennent des résultats similaires avec des pâtes TMP et PGW pour la fabrication de couché léger.

Dans le passé, les résultats en termes de consommation énergétique ont été controversés. Cependant, les études les plus récentes convergent vers une économie d'énergie lors du raffinage séparé des fractions par rapport au raffinage de la pâte entière [165], surtout à travers l'utilisation de raffineurs à basse consistance. Hammar *et al.* [166] obtiennent une amélioration de la qualité de la pâte en termes de résistance à la traction et de résistance à la déchirure en raffinant séparément les rejets des tamis et des hydrocyclones à moyenne consistance (18%), la pâte étant obtenue après le deuxième stade de raffinage. Ils soulignent cependant que les économies d'énergie dépendent de la propriété que l'on souhaite optimiser. Dans ce but, Roux *et al.* [167] proposent plusieurs méthodologies permettant d'optimiser le raffinage à basse consistance de pâtes de mélange, méthodologies qui peuvent être adaptées au raffinage à haute consistance.

3.4 Conclusion

Les problématiques du raffinage associées à la spécificité morphologique des différents type de fibres dans la pâte thermomécanique suggèrent que le raffinage séparé de ces types de fibres permet de promouvoir un développement optimal de leurs caractéristiques papetières. Dans ce cadre là, le fractionnement par tamis sous pression est apte à la séparation des fibres de pâtes thermomécaniques, au détriment des hydrocyclones qui, du fait de leur principe de séparation basé sur la surface spécifique des fibres, sont peu

sélectifs dans le cas des pâtes thermomécaniques et d'autant moins dans le cas d'une pâte primaire.

Ceci rejoint également l'objectif poursuivi par Papiers Masson Ltée, à savoir la création d'un procédé optimisant l'usage des raffineurs à haute consistance sans faire intervenir de traitement chimique. La classification des fibres à un stade précoce du procédé de mise en pâte thermomécanique, c'est-à-dire juste après le stade primaire de raffinage, offre une plus grande versatilité dans les étapes de raffinage ultérieures sans générer nécessairement une augmentation de l'énergie spécifique de raffinage.

Chapitre 4 - Méthodologie

4.1 Expérimentation

L'ensemble des essais sont réalisés au CIPP à l'aide des installations de fractionnement et de raffinage en usine pilote et aux laboratoires d'analyse des pâtes et papiers. Les caractéristiques des équipements de l'usine pilote utilisés dans cette recherche sont indiquées dans le tableau 4.1 ci-dessous.

Tableau 4.1 Principales caractéristiques des équipements de fractionnement et de raffinage du CIPP

| Équipement | Caractéristiques | | |
|------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------|
| Tamis 8-P | Rotor | Paniers | |
| | type : ouvert nombre de lame : 2 diamètre : 397 mm hauteur : 200 mm rayon : 100 mm vitesse : 985 tr/min | diamètre : 406 mm hauteur : 258 mm | |
| | | Ouvertures | Surface de passage |
| | | Trous Ø 1,20 mm | 275 cm ² |
| | | Fentes 0,15 mm | 75 cm ² |
| | | Fentes 0,10 mm | 50 cm ² |
| Hydrocyclone HY-80X | Diamètre de base : 3 pouces (76 mm) Becs de rejets : Ø 11/32", Ø 13/32", Ø 15/32" | | |
| Raffineur CD300 | vitesse de rotation : 3600 tr/min diamètre des disques : 300 mm largeur de la zone conique : 60 mm | | |

4.2 Planification

La figure 4.1 présente la méthodologie générale utilisée dans cette étude. Chaque étape est détaillée dans les sections suivantes de ce chapitre.

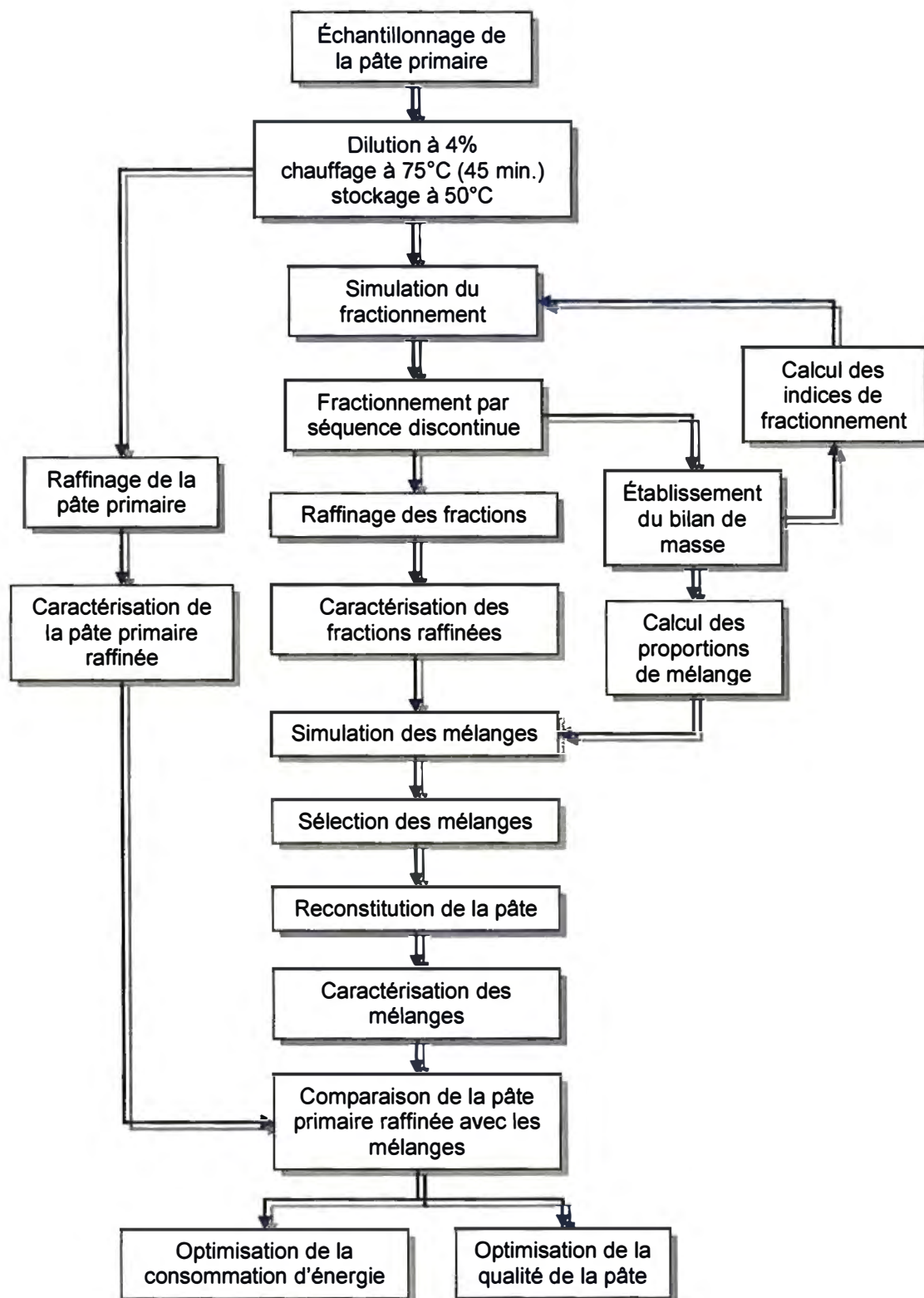


Figure 4.1 Schéma général de l'expérimentation

4.3 Matériel et préparation

La pâte thermomécanique est obtenue de l'usine Papiers Masson Ltée. Cette pâte est produite par une unique ligne Metso d'une capacité de 800 tmsa/jour. Elle est obtenue à partir de copeaux d'épinette noire (*Picea mariana*), d'épinette blanche (*Picea glauca*), de sapin (*Abies balsamea*) ainsi que 'une faible quantité de tremble (*Populus tremuloides*). Les copeaux proviennent de scieries de bois d'œuvre du Québec et de l'Ontario. La ligne TMP est composée de deux raffineurs à haute consistance CD82 équipés de moteur de 32 MW qui constituent les stades primaires et secondaires, de raffineurs à basse consistance Conflo CJ-04 pour le stade tertiaire et d'un raffineur de rejets similaire à ceux du premier et deuxième stade [168]. La pâte est échantillonnée après le premier stade de raffinage (Figure 1.1). La pâte, emballée dans des fûts de carton, est ensuite expédiée à l'usine pilote du CIPP à Trois-Rivières où elle est diluée à 4%, chauffée à une température de 75°C et agitée pendant 45 minutes pour en retirer la latence. La pâte est alors diluée à la consistance requise pour chaque essai. La température lors des essais est maintenue à 50°C environ.

4.4 Caractérisation de la pâte primaire

4.4.1 Caractéristiques de la pâte de premier stade

Plusieurs envois de pâte primaire de l'usine de Papiers Masson Ltée ont été réalisés entre Novembre 2004 et Janvier 2007. Pour chaque envoi, les caractéristiques de la pâte ont été mesurées.

4.4.2 Comportement au raffinage

La pâte primaire est raffinée en usine pilote à haute consistance en un stade afin d'établir une base comparative, qui soit, autant que possible, représentative du procédé industriel, et qui permette de caractériser les propriétés de la pâte recombinaison et la consommation d'énergie de raffinage.

4.5 Fractionnement

4.5.1 Équipements

L'ensemble des essais ont été réalisés à l'aide d'un tamis sous pression Black Clawson modèle 8-P équipé d'un rotor ouvert à deux lames (Figure 4.2) et d'un hydrocyclone Hymac modèle HY-80X.

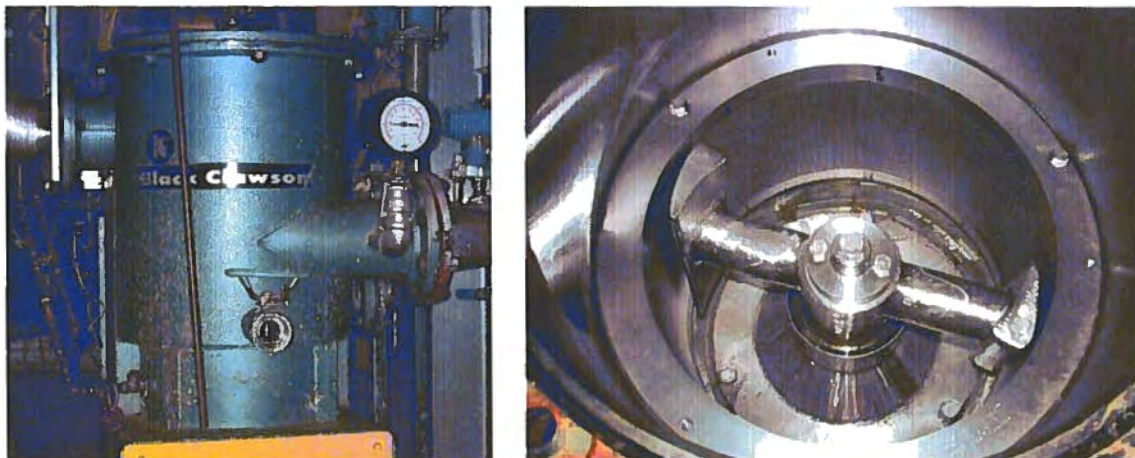


Figure 4.2 Photographie du tamis Black Clawson modèle 8-P (à gauche) et de l'intérieur de la cuve montrant le rotor à deux lames (à droite).

4.5.1.1 Stratégie de contrôle

Le tamis est contrôlé par trois boucles de contrôle automatique : une boucle de contrôle du débit d'alimentation, une boucle de contrôle du débit des rejets et une boucle de contrôle de la pression des acceptés grâce à trois vannes automatiques montées sur les conduites d'alimentation, des acceptés et des rejets.

4.5.1.2 Mode opératoire

Les essais sont réalisés en mode discontinu. La réalisation d'un stade de fractionnement commence en mode de recirculation. Dans ce mode, les débits de rejets et d'acceptés sont retournés au cuvier d'alimentation. Lorsque les paramètres opérationnels sont stabilisés aux valeurs préétablies (débit d'alimentation, taux de rejets volumique, différence de pression), des échantillons sont prélevés sur chacun des débits. Lorsque les acceptés

ou les rejets doivent subir un fractionnement postérieur, les débits d'acceptés et de rejets sont dirigés vers des cuviers séparés et l'ensemble de la pâte est fractionnée. La pâte qui doit ensuite être fractionnée est alors diluée et transférée dans le cuvier d'alimentation pour le stade suivant.

4.5.2 Modélisation des tamis

La simulation de procédé permet de prédire la performance du fractionnement avant de le mettre en œuvre au niveau de l'usine pilote et de sélectionner les conditions qui offrent une meilleure performance de séparation et ainsi de réduire le nombre d'essais. Dans une optique plus générale, elle permet également de prédire la performance de séquences de fractionnement qui ne sont pas reproductibles en usine pilote avec un seul tamis, notamment les procédés avec recirculation.

À l'aide de la probabilité de rétention ou du taux de passage, il est possible de prédire de quelle manière une pâte sera fractionnée connaissant la composition de la pâte à l'alimentation et le taux de rejets volumique.

Conformément aux notations introduites dans la figure 3.6, les notations Q , C et M , affectés des indices f , a et r , sont utilisées pour désigner respectivement le débit volumique, la consistance et le débit massique dans chaque conduite. La pâte est constituée de N fractions massiques notée X_i avec $i \in [1, N]$. Dans le cas des classes du Bauer McNett, il y a 6 fractions. Dans le cas de classes de longueurs de fibres, les appareils Fiberscan et FQA définissent jusqu'à 200 classes de longueurs. Ces classes sont cependant des fractions en nombre et non en masse et il est nécessaire de connaître la masse linéique pour les convertir en fractions massiques.

Des équations de conservation de débits, les équations suivantes peuvent être établies :

- | | | |
|-----|---|--|
| (1) | $Q_a + Q_r = Q_f$ | Bilan volumique |
| (2) | $Q_a C_a + Q_r C_r = Q_f C_f$ | Bilan massique |
| (3) | $Q_a C_a X_a^i + Q_r C_r X_r^i = Q_f C_f X_f^i$ | Bilan massique pour la fraction massique i |

Ces équations reposent sur plusieurs hypothèses : d'une part, que la masse volumique de la pâte est constante, ce qui est acceptable dans la mesure où les essais sont réalisés à température constante, que la pâte se comporte comme un fluide incompressible et que la consistance étant basse, celle-ci n'a pas d'influence significative sur la masse volumique, et d'autre part, que la consistance exprimée en pourcentage, c'est-à-dire en fraction de masse de matière sèche par unité de masse de pâte, est équivalente à la consistance exprimée en masse de matière sèche par unité de volume de pâte. Cette hypothèse est acceptable dans la mesure où les essais sont réalisés à des consistances inférieures à 3%. Dans ce cas, il est aisé de démontrer que l'erreur relative entre ces deux définitions de la consistance est inférieure à 1%, ce qui est inférieur à la précision de la mesure de consistance. Une dernière hypothèse est constituée par le fait que les fractions massiques ne se mélangent pas, ce qui est le cas des fractions obtenues avec le classeur Bauer McNett et des classes de longueurs définies par les appareils tels que l'analyseur FQA.

De la définition de l'efficacité de séparation E_i , on obtient ensuite une relation entre les fractions massique entre l'alimentation et les rejets :

$$X'_r = X'_f \frac{E_i}{R_w} \quad \text{Éq. 4.1}$$

De la relation (3) et en remplaçant $X'_a C_a$ par son expression en fonction de $X'_r C_r$ et de E_i , on obtient une relation entre les fractions massique entre l'alimentation et les acceptés :

$$X'_a = X'_f \frac{1 - E_i}{1 - R_w} \quad \text{Éq. 4.2}$$

Par définition des fractions massiques, la somme de celles-ci est égale à l'unité donc en remplaçant X'_r par l'expression antérieure, on déduit finalement :

$$\sum_i X'_f \frac{E_i}{R_w} = 1 \quad \text{Éq. 4.3}$$

D'où

$$R_w = \sum_i X_f' E_i \quad \text{Éq. 4.4}$$

L'efficacité de rejet E_i peut ensuite être remplacée par son expression en fonction de W_i ou de P_i selon le modèle choisi.

La figure 4.3 montre la différence entre les prédictions d'efficacité réalisées avec la probabilité de Wahren et avec le taux de passage. On constate notamment que pour de faibles valeurs du taux de rejets, le modèle basé sur le taux de passage prédit une efficacité de séparation plus élevée. Cette différence illustre les différences de comportements entre les tamis à régime d'écoulement bouchon modélisés par le taux de passage, et le régime d'écoulement en mélange modélisé par la probabilité de rétention de Wahren. Walmsley *et al.* [93] arrivent à des conclusions similaires cependant ils utilisent l'indice de Nelson dans leur modèle de tamis avec régime d'écoulement en mélange, ce qui ne leur permet pas de relier le taux de rejets massique au taux de rejets volumique. Pour cela, ils doivent faire appel à un taux de passage et utiliser une relation entre le taux de passage et le taux d'épaississement dans le cas du régime d'écoulement en mélange (Éq. 3.8), ce qui est obtenu en supposant que la consistance à l'intérieur du panier est uniforme et égale à la consistance des rejets.

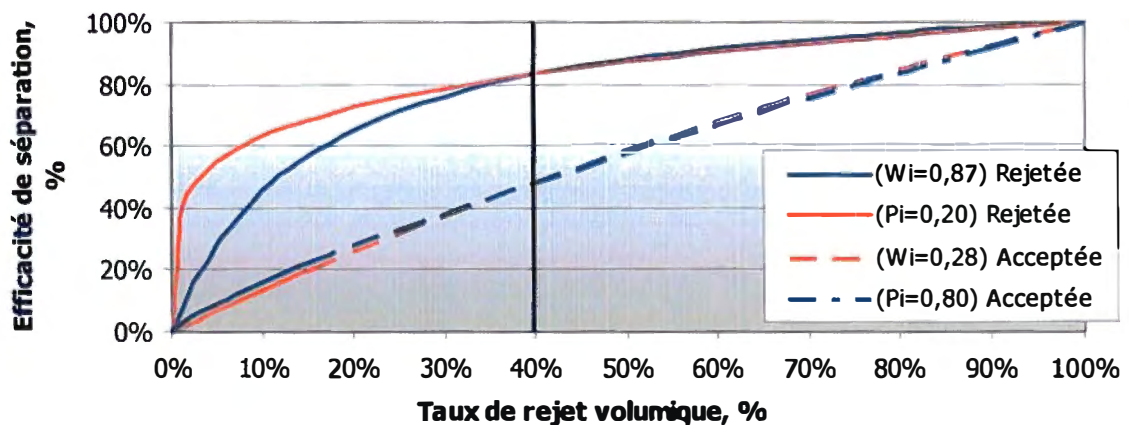


Figure 4.3 Comparaison des prédictions d'efficacité de séparation selon le modèle utilisé, pour une fraction acceptée et une fraction rejetée, à partir des indices W_i et P_i obtenus à un taux de rejets volumique de 40%

Le logiciel CADSim Plus (Aurel Systems Inc.) permet de réaliser ce type de simulation. A cette fin, un module a été développé pour modéliser les tamis en faisant appel aux probabilités de rétention de Wahren de chaque fraction du Bauer McNett.

4.6 Raffinage

Les essais de raffinage sont réalisés à pression atmosphérique à l'aide du raffineur Metso CD300 (Figure 4.4).

4.6.1 Mode opératoire

La pâte est préalablement épaissie par centrifugation à la consistance requise pour le raffinage, entre 20% et 30% pour le raffinage à haute consistance et entre 6% et 10% pour le raffinage à basse consistance.

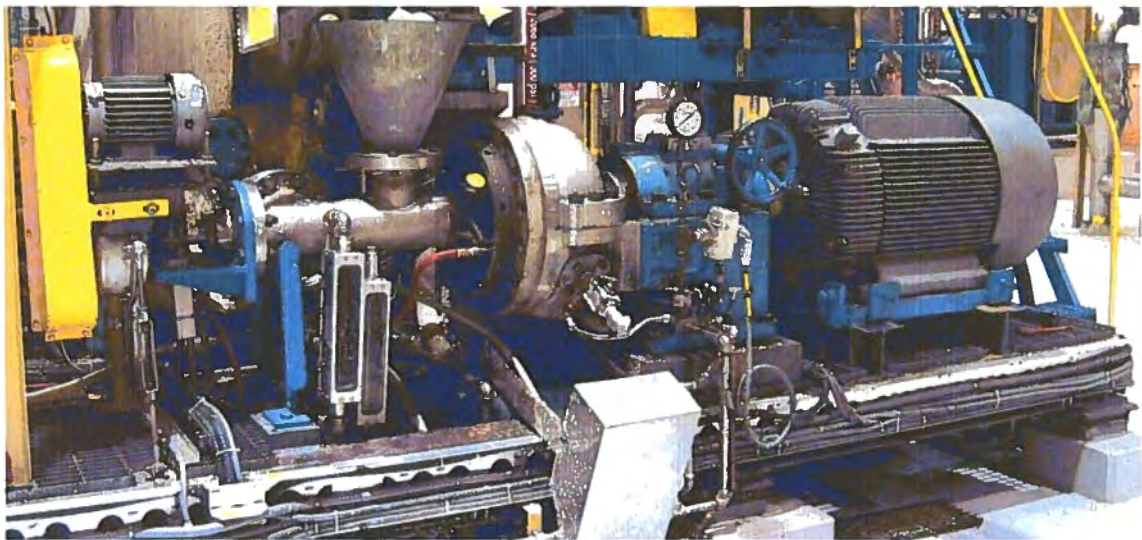


Figure 4.4 Raffineur Metso CD300 installé au CIPP

4.6.1.1 Raffinage à haute consistance

La pâte est introduite dans la presse à vis par l'intermédiaire d'un tapis roulant qui permet de maintenir une alimentation constante. La distance d'entrefer est ajustée à des valeurs décroissantes. Pour chacune de ces valeurs et lorsque la puissance du raffineur est stabilisée, la pâte sortant du raffineur pendant une durée déterminée est conservée puis pesée. Pendant le même temps, la puissance consommée par le moteur est enregist-

trée. Ceci permet de calculer la puissance spécifique reçue par la pâte pendant la durée du raffinage.

4.6.1.2 Raffinage à basse consistance

Le raffinage est donc réalisé en plusieurs passes à entrefer constant. Lors du raffinage à basse consistance, il n'est pas possible de mesurer la quantité d'énergie appliquée car la pâte diluée passe trop rapidement entre les disques. L'énergie spécifique est estimée sur la base d'un modèle de diminution de l'indice d'égouttage dans un raffineur Conflo (Figure 4.5). Ce modèle a été établi à partir de données fournies par Metso.

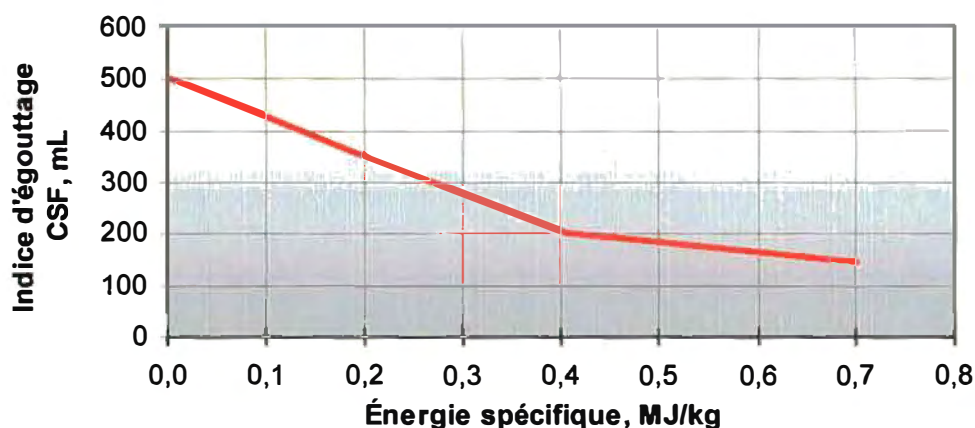


Figure 4.5 Modèle d'énergie de raffinage en fonction de l'indice d'égouttage utilisé pour estimer l'énergie de raffinage à basse consistance dans le raffineur CD300

Ces données permettent d'établir deux droites de régression : une droite pour les pâtes dont l'indice d'égouttage est supérieur à 200 mL et une droite pour la pâte dont l'indice d'égouttage est inférieur à 200 mL. À partir de ces droites, un modèle d'énergie spécifique de raffinage à basse consistance peut en être déduit. Dans le cas d'une pâte dont l'indice d'égouttage initial est différent de 500 mL CSF, il doit être considéré que l'énergie spécifique initiale de cette pâte est nulle, c'est-à-dire que seule la pente de la droite est prise en compte. L'énergie spécifique d'une pâte raffinée à basse consistance est estimée à l'aide de l'équation ci-dessous.

$$E = \begin{cases} K_1(CSF_0 - CSF_L) + K_2(CSF_L - CSF) & \text{si } CSF < CSF_L \\ K_1(CSF_0 - CSF) & \text{si } CSF \geq CSF_L \end{cases} \quad \text{Éq. 4.5}$$

| | | | |
|----|---------|---|---|
| Où | CSF_0 | = | Indice d'égouttage de la pâte non raffinée |
| | CSF_L | = | Indice d'égouttage limite ($CSF_L = 200$ mL) |
| | CSF | = | Indice d'égouttage de la pâte raffinée |
| | K_1 | = | Constante ($K_1 = 1,344$ kJ/kg.mL) |
| | K_2 | = | Constante ($K_2 = 5,327$ kJ/kg.mL) |

4.7 Reconstitution de la pâte

L'objectif des mélanges est de reconstituer la pâte complète en mélangeant les fractions raffinées dans les mêmes proportions que celles obtenues lors du fractionnement et de comparer les propriétés de la pâte reconstituée avec la pâte initiale raffinée à un même niveau de développement en termes d'indice d'égouttage. Un indice d'égouttage de 100 mL a été choisi pour cette étude car c'est une valeur communément utilisée pour la fabrication du papier journal.

4.7.1 Correction des erreurs de bilan

Dans tout procédé, des erreurs de bilan apparaissent entre les grandeurs mesurées à l'entrée et à la sortie des équipements. Ces erreurs proviennent de plusieurs sources : variations propres du procédé, précision des mesures et représentativité de l'échantillonnage. Dans le cas des mesures de débit volumique, le débit d'acceptés n'est pas mesuré car le banc d'essai n'est pas équipé de débitmètre sur la conduite d'acceptés. Ce débit est donc calculé à partir des débits d'alimentation et de rejets. Le bilan volumique ne présente donc pas d'erreur de bilan cependant ces erreurs existent et elles se retrouvent dans les bilans massiques. Dans le cas des bilans massiques, les consistances de l'alimentation, des acceptés et des rejets sont mesurées en laboratoire sur des échantillons de pâtes prélevés ponctuellement au cours de l'essai. Les fractions massiques sont mesurées sur ces mêmes échantillons de pâtes à l'aide du classeur Bauer McNett. Des erreurs de bilans de masse apparaissent donc sur le bilan massique pour la pâte entière mais aussi sur les bilans massiques pour chaque fraction.

L'erreur de bilan de masse est calculée à l'aide de l'équation ci-dessous. Elle correspond à la distance relative entre les débits entrants et sortants et la moyenne de ces débits. Si le débit d'alimentation est supérieur à la somme des débits sortants, l'erreur est positive.

$$MBE = \frac{Q_f C_f - (Q_a C_a + Q_r C_r)}{Q_f C_f + Q_a C_a + Q_r C_r} \quad \text{Éq. 4.6}$$

Où $Q_{f,a,r}$ = Débit volumique d'alimentation, d'acceptés et de rejets

$C_{f,a,r}$ = Consistance d'alimentation, d'acceptés et de rejets

Plusieurs approches sont envisageables pour réconcilier les données. Une première méthode consiste à considérer que les erreurs sont principalement dues aux mesures sur les rejets où la consistance est plus élevée et par conséquent ces mesures présentent une variabilité plus élevée. La consistance des rejets et les fractions massiques sont donc recalculées à partir des mesures sur l'alimentation et les acceptés. L'avantage de cette méthode est sa facilité de mise en œuvre mais elle fait abstraction des données collectées sur les échantillons de rejets et l'ensemble des erreurs est attribué aux rejets, ce qui peut mener, dans certain cas, à des distorsions importantes. Une deuxième approche consiste à considérer que les mesures réalisées à l'alimentation, aux acceptés et aux rejets présentent une variabilité proportionnelle au débit massique. Les erreurs de bilan de masse sont donc réparties à chaque débit au prorata des débits massiques. Cette deuxième approche présente l'avantage de tenir compte de l'ensemble des mesures. Les consistances sont recalculées de la manière suivante :

$$\hat{C}_f = C_f (1 - MBE) \quad \text{Éq. 4.7}$$

$$\hat{C}_{a,r} = C_{a,r} (1 + MBE) \quad \text{Éq. 4.8}$$

Où MBE = Erreur de bilan massique pour la pâte entière

$C_{f,a,r}$ = Consistances d'alimentation, d'acceptés et de rejets

Dans la suite de l'exposé, les bilans de masse présentés sont corrigés par cette dernière méthode. Cette correction a un impact sur les valeurs calculées de taux de rejets massi-

que, de taux d'épaississement et d'efficacité de rejet mais pas sur les indices de fractionnement de Nelson ou de Wahren.

Une approche globale de réconciliation des erreurs des bilans massiques de la pâte et des fractions du Bauer McNett peut également être considérée dans le cadre d'une réconciliation des données expérimentales pour un système bilinéaire en régime permanent [169]. La fonction de minimisation peut alors être exprimée par la relation suivante :

$$Min(\Delta) = \sum_{i=0}^n \left[\frac{Q_f \hat{C}_f X_f^i - (Q_a \hat{C}_a X_a^i + Q_r \hat{C}_r X_r^i)}{Q_f \hat{C}_f X_f^i + Q_a \hat{C}_a X_a^i + Q_r \hat{C}_r X_r^i} \right]^2 \quad \text{Éq. 4.9}$$

- Où $Q_{f,a,r} =$ Débits volumiques d'alimentation, d'acceptés et de rejets
 $\hat{C}_{f,a,r} =$ Consistances corrigées selon les équations 4.7 et 4.8
 $X_{f,a,r}^i =$ Fractions massiques des classes de fibres (1 si $i=0$)
 $n =$ Nombre de classes de fibres

Le problème se résume ainsi en la détermination d'une valeur ε de l'erreur de bilan de masse qui minimise la fonction de minimisation et qui intervient dans cette fonction par l'intermédiaire des consistances corrigées.

La figure 4.7 présente la relation entre les valeurs de correction obtenues par l'équation 4.6 et les valeurs de réconciliation ε pour différents équipements de fractionnement et montre que ces dernières sont très similaires, ce qui indique que les erreurs de bilans de masse sont essentiellement dues à la variabilité des mesures de débits et de consistance et non au mesure des fractions massiques des classes du Bauer McNett. Ceci justifie le choix de correction mentionné précédemment. Ce choix garantit également que les valeurs de taux de rejets massique calculées à l'aide des consistances corrigées sont inférieures à 1.

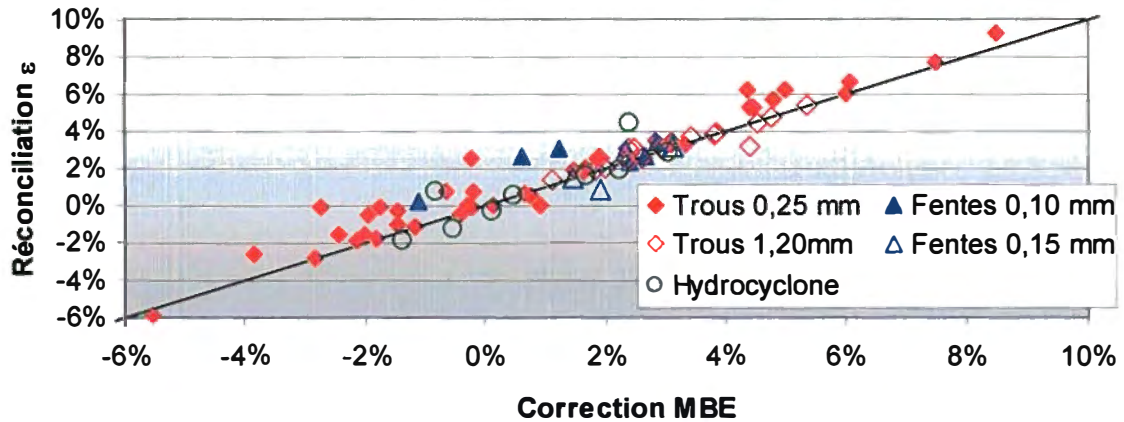


Figure 4.6 Comparaison entre les valeurs de correction du bilan de masse et des valeurs de réconciliation

4.7.2 Estimation des caractéristiques papetières

La quantité de mélanges étant potentiellement élevée, une simulation numérique préalable est faite en calculant les propriétés des mélanges par combinaisons linéaires avec les propriétés des pâtes affectées des proportions de mélanges.

$$P = p_{S1} \cdot P_{S1} + p_{S2} \cdot P_{S2} + p_A \cdot P_A \quad \text{Éq. 4.10}$$

Où p_X = Proportions de pâte X dans le mélange
 P_X = Propriété de la pâte X

Cette méthode n'est pas nécessairement applicable à toutes les propriétés des pâtes. Par exemple, les coefficients d'absorption et de diffusion K et S sont connus pour leur linéarité vis-à-vis des proportions de mélanges. Par contre, ce n'est pas le cas pour l'indice d'égouttage, pour la blancheur ou encore les indices de résistances mécaniques comme l'indice de résistance à la déchirure. Ces estimations ont seulement pour objectif d'indiquer la tendance de la qualité de la pâte recombinaisonnée mais pas de prédire les propriétés de cette pâte.

Dans le cas de l'indice d'égouttage, Partanen et Koivo [170] montrent que l'indice d'égouttage d'un mélange de pâte peut être évalué à l'aide de la relation ci-dessous (Éq. 4.11). Qian [171] a utilisé cette relation pour simuler le procédé de mise en pâte CTMP et montré qu'elle est applicable sur une large plage de valeurs.

$$CSF = CSF_{S1}^{PS1} . CSF_{S2}^{PS2} . CSF_A^{PA} \quad \text{Éq. 4.11}$$

Où p_X = Proportions en masse de pâte X dans le mélange
 CSF_X = Indice d'égouttage de la pâte X

Certains mélanges ont été sélectionnés sur la base de cette simulation numérique parmi ceux présentant un potentiel d'amélioration des propriétés mécaniques du mélange par rapport à la pâte initiale raffinée. Des feuilles de laboratoires ont été fabriquées à partir de ces mélanges et ont été testées en laboratoire.

4.8 Caractérisation des pâtes

Afin de caractériser les propriétés des pâtes, les caractéristiques des fibres et leur aptitude à la formation de la feuille, les procédures présentées ci-dessous ont été employées. Les méthodes standards, lorsqu'elles existent, sont indiquées dans les tableaux 4.2 et 4.4. Les normes et méthodes employées sont celles de l'industrie des pâtes de l'Amérique du Nord. Ces tableaux indiquent les méthodes canadiennes ainsi que les méthodes TAPPI équivalentes ou analogues

4.8.1 Caractéristiques papetières

Les caractéristiques suivantes sont mesurées sur les pâtes : indice d'égouttage, distribution de longueur des fibres, classage Bauer McNett et classage Pulmac.

Lors des essais de fractionnement, la masse linéique et l'épaisseur de paroi des fibres sont mesurées sur les fractions R28, R48 et R100. Ces mesures ne peuvent pas être réalisées sur les classes R14 et R200. Les fibres de la classe R14 ont tendance à boucher les conduites des appareils FQA et MWT. La fraction R200 introduit une incertitude importante dans la mesure de la masse linéique par l'appareil FQA, les fibres de cette fraction étant en fait des fragments de fibres. Pour cette même raison, l'appareil MWT a des difficultés à trouver des sites de mesure d'épaisseur de paroi sur les fibres de la classe R200.

Tableau 4.2 Méthodes standards et méthodes utiles pour la préparation et la caractérisation des pâtes et formettes de pâte

| Méthodes | ATPPC | TAPPI (méthodes analogues) |
|--|--|--|
| Élimination de la latence | C.8P rév.1997 – Élimination de la latence par désintégration à chaud (Méthode Domtar) | T 262 sp-96 – Preparation of mechanical pulps for testing |
| Consistance | D.16 rév.1993 – Détermination de la concentration en pâte | T 240 om-93 – Consistency (concentration) of pulp suspensions |
| Égouttage | C.1 rév.1994 – Détermination de l'indice d'égouttage | T 227 om-99 – Freeness of pulp (Canadian standard method) |
| Classage Bauer McNett | C.5U – Classification des fibres (Méthode Bauer McNett) | T 233-cm-95 – Fiber length of pulp by classification |
| Classage Pulmac | C.12P rév.2003 – Classage des pâtes en laboratoire (Appareil Pulmac) | T 274 sp-97 – Laboratory screening of pulp (MasterScreen – type instrument) |
| Longueur des fibres par mesure optique | B.4P rév.98 – Détermination de la longueur des fibres de pâte et de papier à l'aide d'un analyseur optique automatisé à la lumière polarisée | T 271 om-98 – Fiber length of pulp and paper by automated optical analyser using polarized light |

4.8.1.1 Indice d'égouttage

L'indice d'égouttage canadien est couramment utilisé pour caractériser le degré de raffinement des pâtes mécaniques. En fait, cet indice caractérise le passage de l'eau au travers du matelas fibreux qui se forme lors de la filtration de la pâte au travers d'une grille à maille fine. Cet indice caractérise la capacité des fibres à flocculer et à former une barrière qui va permettre le passage plus ou moins rapide de l'eau. Il est à la fois dépendant de la distribution de longueur des fibres mais aussi du niveau de développement de leurs propriétés mécaniques et donc du degré de raffinage. En effet, la capacité des fibres à former des floccs dépend de trois principaux effets du raffinage : l'hydratation de la paroi des fibres, la fibrillation de la surface des fibres et la coupe des fibres qui produit une réduction de leur longueur.

4.8.1.2 Classage des fibres

Le classage des fibres consiste à séparer les fibres en plusieurs classes de longueur à l'aide de mailles métalliques.

4.8.1.2.1 Appareil Bauer McNett

Le classage par l'appareil Bauer McNett est une méthode communément utilisée pour caractériser la distribution de longueur des fibres. Cet appareil réalise un classage en cinq fractions grâce à une série de 5 mailles de plus en plus fines. La série utilisée dans cette étude est celle habituellement employée pour les pâtes mécaniques : R14, R28, R48, R100 et R200. Les fibres les plus longues et les plus rigides sont retenues par la maille R14. Plus les fibres sont courtes et flexibles et plus elles passent facilement au travers des mailles successives jusqu'à ce qu'elles soient arrêtées par l'une d'elle. Finalement, les fibres qui sont trop petites passent au travers de la dernière maille. Par différence entre la masse de pâte initialement introduite et la masse des fractions récupérées, la quantité de fines qui passe au travers de la maille R200 peut être calculée. Cette fraction, notée P200, permet de caractériser le contenu en fines. Les fines sont constituées de fragments de fibre de forme floconneuse ou fibrillaire et permettent de renforcer le réseau fibreux lors de la formation de la feuille.

Dans cette étude, l'appareil Bauer McNett est utilisé pour caractériser la distribution de longueur des fibres mais aussi pour extraire les fractions R28, R48 et R100 sur lesquelles des mesures additionnelles sont réalisés avec des appareils de mesures optiques (FQA, MWT).

4.8.1.2.2 Classeur de rejets Pulmac

Le classeur Pulmac est habituellement utilisé pour caractériser le pourcentage en masse de bûchettes, c'est-à-dire les fibres qui n'ont pas été complètement séparées et qui constituent des amas fibreux rigides. Ces constituants de la pâte sont généralement considérés comme des impuretés. Dans un procédé de mise en pâte TMP classique, les bûchettes sont séparées de la pâte par des tamis sous pression et traitées dans le raffineur de rejets.

4.8.1.3 Volume spécifique de sédimentation des fines

Le volume spécifique de sédimentation des fibres mesure le volume occupé par une quantité déterminée de fibre après décantation. Ce volume dépend de la surface spécifique et fournit une indication importante relative au niveau de développement des fines, de leur forme, floconneuse ou fibrillaire, et de leur composition, cellulosique ou lignifiée. En effet, plus une fine possède de surface spécifique et plus elle est capable de se lier à des molécules d'eau et de former des particules colloïdales, ce qui lui permet de réduire sa masse volumique apparente et d'occuper un volume plus important que son volume propre. Cette capacité de liaison est d'autant plus grande que la surface exposée est composée de cellulose et non de lignine qui est hydrophobe. Ainsi les fines floconneuses provenant du délaminage de la lamelle mitoyenne et de la paroi primaire des fibres auront un volume spécifique de sédimentation plus faible que celui des fines produites par la fibrillation de la paroi secondaire.

La méthode de mesure est similaire à celles décrites par Marton *et al.* [153] et par Luukko [152] et se compose de deux étapes principales : la recollection des fines et la décantation. Les fines sont préalablement extraites de la pâte à l'aide de l'appareil Dynamic Draining Jar (DDJ) de 2 litres équipé d'une toile de 200 mailles par pouce. Les fines sont extraites de 10 g de pâtes diluée à une consistance de 0,2% à 0,3% avec de l'eau déminéralisée et introduite dans le DDJ par volumes de 1,5 L environ. La pâte dans le DDJ est agitée pendant 2 minutes puis la vanne de purge est ouverte. Les fines qui passent au travers de la toile sont collectées et laissées à décanter pendant 24 heures. Le volume d'eau surnageant est ensuite siphonné puis les fines sont concentrées par centrifugation à 6000 tour/min jusqu'à obtenir une consistance minimum de 0,4%. Environ 0,15 g de fines sont ensuite échantillonnées, traitées avec une solution de Na_2SO_4 à 120 mg/L et de CaCl_2 à 30 mg/L puis le pH est ajusté entre 6 et 6,5 afin d'éviter la floculation des fines. La suspension est alors introduite dans un cylindre gradué de 100 mL, désaérée par le vide et laissée à décanter pendant 24 heures. Après décantation, le volume des fines décantées est lu sur le cylindre gradué avec une précision de 1 mL. Le contenu du cylindre gradué est ensuite filtré puis séché pour mesurer le poids de fines.

Pour chaque échantillon, trois mesures sont effectuées. Le volume spécifique est alors calculé par la relation suivante :

$$V_s = \frac{V}{P} \quad \text{Éq. 4.12}$$

Où V = Volume des fines décantées
 P = Masse de fines

4.8.2 Analyse optique

4.8.2.1 Appareil FQA

L'appareil FQA (« Fiber Quality Analyzer », Optest Equipment Inc.) est un appareil d'analyse optique utilisé pour mesurer la longueur des fibres [98], la masse linéique [172], la courbure et les cassures ou replis des fibres [173].

Le principe de mesure repose sur une caméra digitale qui prend une série d'image au fur et à mesure que les fibres sont introduites dans le champ d'observation dans un courant d'eau entre deux plaques transparentes planes. Les fibres sont illuminées par une source de lumière polarisée circulairement afin d'améliorer le contraste et la détection du contour des fibres. Les images sont ensuite analysées automatiquement par un ordinateur.

4.8.2.1.1 Longueurs des fibres

Les fibres mesurées par le FQA sont classées par classe de longueur qui contient le nombre de fibres dont la longueur est comprise dans un intervalle de longueur déterminé. Ce classement constitue la distribution de longueur des fibres et à partir de cette distribution, trois longueurs moyennes peuvent être calculées : la longueur moyenne arithmétique, L_a , la longueur moyenne pondérée en longueur, L_w , et la longueur moyenne pondérée en poids, L_{ww} [98].

$$L_a = \frac{\sum_i n_i l_i}{\sum_i n_i} \quad L_w = \frac{\sum_i n_i l_i^2}{\sum_i n_i l_i} \quad L_{ww} = \frac{\sum_i n_i l_i^3}{\sum_i n_i l_i^2} \quad \text{Éq. 4.13}$$

Où n_i = nombre de fibres dans la classe i
 l_i = longueur des fibres de la classe i

Cette triple définition traduit le fait qu'il n'y a pas de consensus sur la détermination de la longueur moyenne des fibres dans un échantillon. En général, la définition adoptée dépend de l'usage qui en est fait et de la nature des fibres de l'échantillon. Ainsi, dans le cas où la distribution de longueur est relativement uniforme, la longueur moyenne arithmétique est bien adaptée. Dans le cas des fibres papetières, ce n'est généralement pas le cas : la pâte est constituée d'un grand nombre de fines de très faible longueur qui ont un rôle mineur dans la masse de l'échantillon par rapport à celui des fibres longues. Dans ce cas, la longueur moyenne pondérée en longueur est mieux adaptée. Cette définition repose sur l'hypothèse selon laquelle la masse linéique des fibres est constante. La longueur moyenne pondérée en poids est basée sur l'hypothèse selon laquelle la masse linéique est proportionnelle à la longueur. Bien que l'on constate que la masse linéique augmente généralement avec la longueur des fibres, la longueur moyenne pondérée en longueur est souvent considérée comme plus représentative et permet de meilleures prédictions du potentiel des fibres [174].

4.8.2.1.2 Masse linéique des fibres

La masse linéique des fibres correspond à la mesure de la masse de fibre par unité de longueur. Comme nous l'avons vu auparavant, la masse linéique des fibres peut varier pour plusieurs raisons dont notamment la nature des fibres, c'est-à-dire s'il s'agit de fibres de BP ou de fibres de BE, mais aussi le traitement auxquelles elles ont été soumises. En effet, pendant le raffinage, la masse linéique diminue en raison des effets de délamination de la paroi des fibres.

Un échantillon de masse connue est introduit dans l'appareil FQA puis la longueur de chacune des fibres est mesurée. Ceci permet de connaître la longueur totale cumulée des

fibres correspondant à la masse de l'échantillon. La masse linéique peut alors être calculée (Éq. 4.14).

$$C = \frac{M}{NL_a} \quad \text{Éq. 4.14}$$

Où M = masse des fibres anhydres
 L_a = longueur moyenne arithmétique des fibres
 N = nombre total de fibres

4.8.2.2 Appareil MWT

L'appareil MWT (« MorFi Wall Thickness », Techpap) est un appareil d'analyse optique utilisé pour mesurer l'épaisseur de paroi des fibres [175, 176].



Figure 4.7 Image de fibres (à gauche) d'une pâte thermomécanique prise par l'appareil MWT (à droite) pour la mesure d'épaisseur de paroi par analyse d'image

L'appareil est constitué d'une cellule d'observation dans laquelle des fibres sont introduites automatiquement par une pompe depuis un b cher contenant l'échantillon de  te. Les fibres sont retenues dans la cellule grâce à une grille métallique constituée de fentes de 75 microns de largeur approximativement et de fils de 25 microns de largeur. Les parois latérales de la cellule sont composées de verre transparent et permettent l'observation à l'aide d'un microscope à transmission couplé à une caméra digitale. Du coté opposé au microscope, la cellule est illuminée par une source de lumière blanche. La résolution des images est de l'ordre de 0,5 microns par pixel.

Un cycle de mesure commence par la purge de la cellule, puis l'échantillon de pâte est injecté dans la cellule. Un courant d'eau passe au travers de la grille et maintient les fibres collées à la grille. Une image est alors prise par la caméra digitale et envoyée à l'ordinateur pour analyse. La cellule est de nouveau purgée pour la prise d'image suivante. La cellule comporte deux entrées, une entrée pour l'échantillon au dessus de la grille et une entrée d'eau pour la purge à contre courant de la grille, et deux sorties, une sortie au dessus de la grille pour l'évacuation des fibres après la prise d'image et une sortie au dessous de la grille pour le courant d'eau servant à plaquer les fibres sur la grille. L'ensemble est piloté par un logiciel qui réalise également l'analyse des images. Les images peuvent être conservées pour une analyse postérieure.

4.8.2.2.1 Épaisseur de paroi des fibres

L'épaisseur de paroi des fibres est une caractéristique morphologique importante. Elle a une influence sur le comportement mécanique des fibres mais aussi sur les propriétés physico-chimiques. Ainsi les fibres à paroi épaisse sont plus rigides que les fibres à paroi mince mais elles possèdent une surface spécifique moins grande et donc une capacité de liaison moins grande. La mesure de l'épaisseur de paroi permet donc d'acquérir des informations sur les comportements de fibres lors du fractionnement.

Les échantillons de pâtes des essais de fractionnement sont fractionnés à l'aide du classeur Bauer McNett. Les fractions R28, R48, R100 et R200 sont conservées à l'état humide puis analysées. Pour chacune de ces fractions, un échantillon dilué à une consistance de 3 mg/L environ est introduit dans un bécher de 500 mL. Les fibres sont séparées par agitation puis maintenues en suspension par l'injection de bulles d'air. Pour chaque échantillon, l'appareil réalise une série de 50 images. Un histogramme des mesures d'épaisseur de paroi est alors produit et l'épaisseur moyenne est calculée par le logiciel d'analyse d'image. Pour des motifs statistiques, quatre séries de mesures ont été réalisées pour chaque échantillon de pâte, soit un total de 160 à 200 images par échantillon.

4.8.2.2.2 Taux de fibres de printemps et de fibres d'été

Les différences morphologiques entre les fibres de BP et les fibres de BE conditionnent fortement le développement des fibres au raffinage et leur comportement au fractionnement. La connaissance de la quantité de chaque type de fibres et de leurs caractéristiques morphologiques propres revêt donc un intérêt important [107]. Les méthodes les plus couramment rencontrées pour mesurer les dimensions transversales des fibres consistent à observer des sections transversales de fibres, soit par microscopie optique, soit par microscopie confocale à balayage laser, soit encore par microscopie électronique à balayage. Ces méthodes requièrent une préparation longue et minutieuse liée essentiellement à la fixation des fibres dans une résine [177]. Les fibres doivent être alignées dans une direction précise afin que les coupes au microtome fournissent des sections transversales de fibres.

Une nouvelle approche est proposée ici. Cette méthode fait usage des images prises par l'appareil MWT pour la mesure d'épaisseur de paroi des fibres, ce qui réduit considérablement le temps de préparation des échantillons. Les images prises par l'appareil MWT sont conservées pour les fractions R28, R48 et R100 puis analysées manuellement afin de compter les fibres de BP et les fibres de BE. Les fractions R200 ne sont pas analysées car les fibres sont trop endommagées pour pouvoir les identifier en termes de BP et de BE. Sur chaque type de fibre, l'épaisseur de paroi et la largeur des fibres sont mesurées à l'aide d'un logiciel (Figure 4.8).

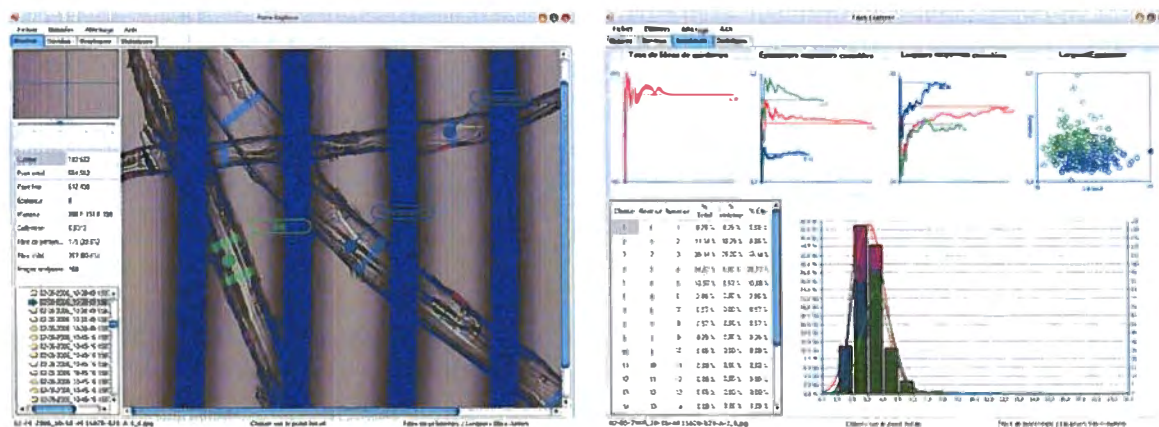


Figure 4.8 Fenêtre d'analyse des fibres (à gauche) et graphiques statistiques (à droite) du logiciel d'analyse d'images

Le logiciel permet de réaliser les mesures sur les images et les calculs statistiques pour chaque type de fibre. Les largeurs de fibres et épaisseurs de paroi sont calculées par la distance euclidienne entre pixels (Éq. 4.15) corrigée par un coefficient d'étalonnage.

$$d = K\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad \text{Éq. 4.15}$$

Où K = Constante d'étalonnage
 x_1, x_2 = abscisses des pixels délimitant le segment à mesurer
 y_1, y_2 = ordonnées des pixels délimitant le segment à mesurer

La constante d'étalonnage est obtenue en mesurant une distance connue dans le champ d'observation, soit la distance entre deux fils de la grille qui est de 100 microns. La constante est de l'ordre de 0,5 microns par pixels. Les images ayant une taille de 1024×768 pixels, elles correspondent à un champ d'observation de 512×384 microns environ.

Deux modes de mesures sont possibles : la mesure directe de l'épaisseur de paroi et la mesure de la largeur de la fibre et de la largeur du lumen, l'épaisseur de paroi est alors calculée comme étant la moitié de la différence entre la largeur de la fibre et la largeur du lumen (figure 4.9). Cette dernière méthode est préférable car elle permet de relier la largeur des fibres à l'épaisseur de paroi.

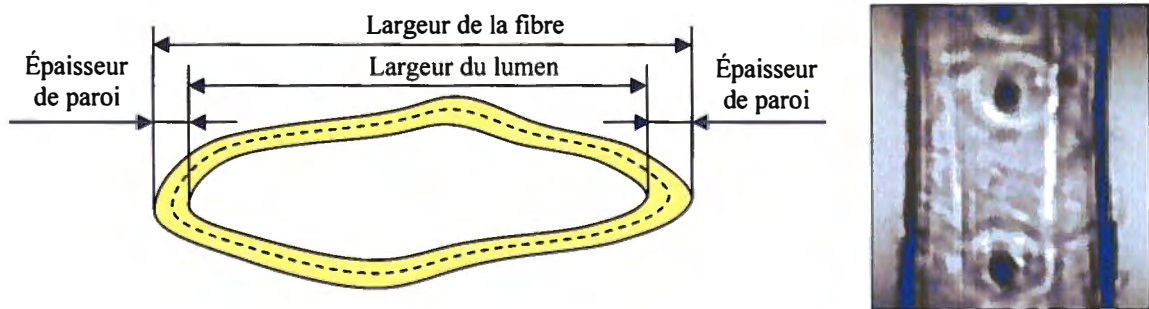


Figure 4.9 Dimensions d'une section transversales de fibre (à gauche) et observation longitudinale par microscopie optique (à droite)

Les fibres de BP et les fibres de BE sont identifiées à partir des caractéristiques morphologiques décrites au §3.1.2.2. Ces caractéristiques permettent d'établir trois critères principaux :

- les présences de ponctuations auréolées et leur taille, les fibres de BP contiennent une grande quantité de ponctuation auréolées de grande taille alors que les fibres de BE en sont pratiquement dénuées et lorsqu'elles sont présentes, elles sont de tailles réduites,
- l'épaisseur de paroi des fibres de BE est plus grande que celle des fibres de BP et confère un aspect plus foncé alors que les fibres de BP sont plus transparentes,
- la largeur des fibres de BE est généralement plus faible de celle des fibres de BP, ce d'autant plus que les fibres de BP ont tendance à collapser sur la grille alors que les fibres de BE ont plutôt tendance à conserver leur forme originale.

Les fibres de transition ne sont pas comptées séparément car il est difficile d'établir des critères précis permettant de les discriminer des fibres de BP et des fibres de BE, d'autant plus que cette période de transition donne lieu à une évolution morphologique des fibres très progressive. Les fibres de transition sont par conséquent classées dans l'un ou l'autre des deux types de fibres en fonction des caractéristiques morphologiques avec lesquelles elles sont le mieux apparentées.

Les proportions en nombre sont obtenues à partir du comptage des fibres de BP et des fibres de BE. Il est cependant plus intéressant de connaître les proportions en masse. Celles-ci ne peuvent pas être déterminées de manière simple à partir des proportions en nombre car il est nécessaire de connaître la masse de chaque type de fibre. Considérant un bilan de masse sur une longueur unitaire de fibres, la masse linéique de la pâte peut être exprimée en fonction des taux en nombre de fibres de BP et de fibres de BE (Éq. 4.16).


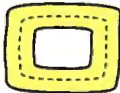
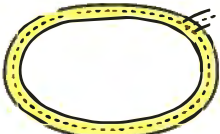
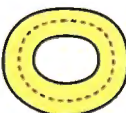






$$C = p_E C_E + p_P C_P$$

Éq. 4.16

Où $p_{P,E}$ = taux en nombre de fibres de BP et de fibres de BE
 $C_{P,E}$ = masse linéique des fibres de BP et des fibres de BE

La masse des fibres peut être obtenue pour chacune des fractions (R28, R48 et R100) à partir de la longueur moyenne des fibres et considérant une forme géométrique spécifique pour les fibres de BP et les fibres de BE. Plusieurs formes sont envisageables pour la section transversale des fibres (Tableau 4.3).

Tableau 4.3 Schémas de sections transversales de fibres de BP et de fibres de BE montrant différents degrés de collapsus

| Fibre de BP | Fibre de BE | Forme |
|---|---|-----------------------|
|  |  | Rectangulaire |
|  |  | Arrondie |
|  |  | Aplatie |
|  |  | Partiellement écrasée |
|  |  | Écrasée |

La masse linéique peut alors être obtenue de l'équation suivante :

$$C = \rho A$$

Éq. 4.17

Où ρ = masse volumique de la paroi des fibres
 A = aire de la section transversale des fibres

Finalement, les taux massiques de fibres de BP et de fibres de BE peuvent être définis à partir du bilan de masse établie précédemment (Éq. 4.16) et calculés à l'aide des équations suivantes :

$$\omega_{P,E} = p_{P,E} \frac{C_{P,E}}{C} \quad \text{Éq. 4.18}$$

Où $p_{P,E}$ = taux en nombre de fibres de BP et de fibres de BE
 $C_{P,E}$ = masse linéique des fibres de BP et des fibres de BE
 C = masse linéique de la pâte

En remplaçant la masse linéique de la pâte par son expression en fonction des masses linéiques des fibres de BP et des fibres de BE (Éq. 4.16), et finalement, en supposant que les masses volumiques des parois des fibres de BE et des fibres de BP sont égales, les taux massiques peuvent être exprimés par les relations ci-dessous :

$$\omega_P = \frac{1}{1 + \frac{p_E A_E}{p_P A_P}} \quad \text{Éq. 4.19}$$

$$\omega_E = \frac{1}{1 + \frac{p_P A_P}{p_E A_E}} \quad \text{Éq. 4.20}$$

La connaissance de ces masses volumiques n'est ainsi pas requise. Leur mesure est en effet difficile. La valeur de 1500 kg/m³ est couramment utilisée pour la cellulose cristalline anhydre. Dans le cas des fibres, la masse volumique à considérer est en fait la masse volumique apparente puisque la paroi des fibres est hydratée. Sa valeur est comprise entre la masse volumique de l'eau pure et celle de la cellulose anhydre. Les différentes couches de la paroi des fibres contiennent également de la lignine en quantité variable. Dans le cas des pâtes TMP, une grande partie de la lamelle mitoyenne et de la paroi primaire, couches dont le contenu en lignine est le plus élevé, est retirée au raffinage, la rupture ayant lieu principalement entre la paroi primaire et la paroi secondaire lors du défibrage.

Ce mode de calcul ne tient également pas compte de la fibrillation à la surface des fibres. La fibrillation des fibres est en effet relativement faible dans le cas de la pâte primaire. Cela est bien vérifié par l'observation microscopique où on constate une fibrillation pratiquement nulle des fibres de BE et très réduite sur les fibres de BP.

4.8.2.3 Microscopie électronique

L'analyse microscopique de fibres est réalisée dans le but d'évaluer la quantité de fibres de BP et de BE et de déterminer la forme générale des fibres. Pour mener à bien cette étude, les caractéristiques des fibres sont mesurées par analyse d'image de micrographies de sections transversales de fibres. Les fibres sont classées en fibres de BP et de BE sur la base de critères morphologiques tels que l'épaisseur de paroi et la largeur des fibres.

La procédure de préparation est décrite par la figure 4.10. Les fibres sont préalablement classées au classeur Bauer McNett et les fractions R14, R28, R48 et R100 sont récupérées. Pour chaque fraction, les fibres sont alignées par la méthode proposée par Law *et al.* [178]. Les fibres sont ensuite progressivement déshydratées par un mélange eau-éthanol avec une concentration croissante en éthanol puis finalement rincées à l'éthanol pur. Les fibres sont alors imprégnées avec une résine [177], moulées dans des moules en silicone puis placées à l'étuve à 60°C pendant 12 à 24 heures jusqu'à durcissement de la résine. Une composition modifiée de la résine a été utilisée afin d'obtenir une faible viscosité [179] en raison du remplacement de l'époxyde ERL 4206 hautement toxique par l'époxyde ERL 4221 qui est moins toxique mais possède un poids moléculaire plus élevé.

Les blocs de résine sont taillés et lissés au 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 [180]. Les observations sont effectuées à l'aide du microscope électronique à balayage JSM-5500 (JEOL Ltd.) du laboratoire de microscopie électronique du CIPP.

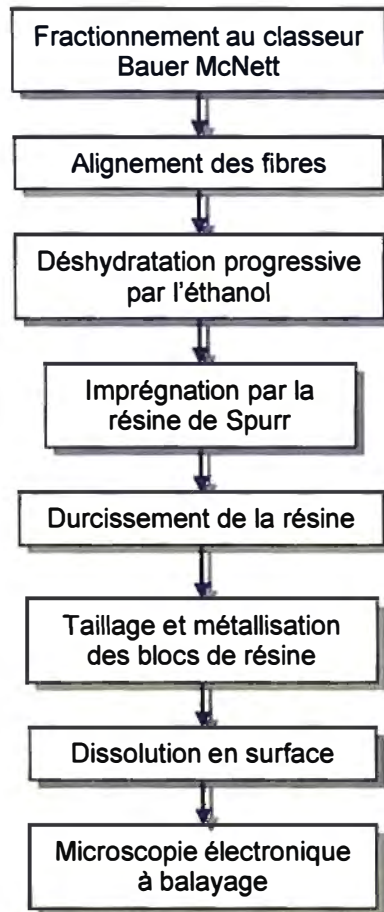


Figure 4.10 Schéma du mode préparatoire pour l'observation de sections transversales de fibre par microscopie électronique à balayage

Les sections des fibres sont ensuite extraites des micrographies par détournage puis sont mesurées à l'aide d'un logiciel capable de déterminer la surface et le périmètre des sections de fibres [181]. Une macro-commande a été écrite (Annexe C) pour ce logiciel afin de calculer automatiquement la surface transversale et le périmètre extérieur de la paroi et du lumen de chaque fibre. Le périmètre moyen est calculé par la moyenne entre le périmètre extérieur de la fibre et le périmètre du lumen qui est également le périmètre intérieur de la paroi. L'épaisseur moyenne de la paroi est ensuite calculée à l'aide de la relation ci-dessous (Éq. 4.21).

$$\omega_t = \frac{A_p}{P_{moy}} \quad \text{Éq. 4.21}$$

Où A_p = Aire de la surface transversale de la paroi

P_{moy} = Périmètre moyen de la section transversale de la paroi

Le facteur de forme circulaire FC et le paramètre Z [182, 64, 158] permettent de caractériser la forme générale de la section des fibres. Ils sont calculés à l'aide des relations ci-dessous.

$$FC = \frac{4\pi A_t}{P^2} \quad \text{Éq. 4.22}$$

Où A_t = Aire de la surface transversale totale de la fibre (paroi et lumen)

P = Périmètre extérieur de la section transversale de la fibre

$$Z = 100 \frac{4\pi A_p}{P_{moy}^2} \quad \text{Éq. 4.23}$$

Où A_p = Aire de la surface transversale de la paroi

P_{moy} = Périmètre moyen de la section transversale de la paroi

Cette définition du paramètre Z est légèrement différente de la définition couramment rencontrée où le périmètre extérieur est utilisé au lieu du paramètre moyen. Cette définition offre cependant deux avantages importants : d'une part, les valeurs obtenues permettent de mieux discriminer les fibres de BP des fibres de BE, d'autre part, cette définition permet d'établir une relation simple entre le paramètre Z modifié (Éq. 4.23), l'épaisseur de paroi (Éq. 4.21) et le périmètre moyen. Cette définition se rapproche ainsi du quotient de Mork [143] pour lequel des valeurs supérieures à 1 indiquent des fibres de BE sur la base de la règle de Mork [183, 184]. Cette règle établit que la transition entre le BP et le BE se produit au moment où l'épaisseur de la paroi commune à deux trachéides est supérieure à la moitié de la largeur du lumen. Cependant cette règle a été

énoncée pour l'observation de section de bois et non pour celle de fibres individualisées ayant subi des contraintes de défibrage et de raffinage.

4.8.3 Caractérisation des formettes

La contribution des fibres dans la feuille de papier est fortement dépendante de leur morphologie et de leur développement lors du raffinage. Les fibres longues sont généralement plus rigides et possèdent moins de surface spécifique, ce qui leur confère une aptitude plus réduite à la création de liaison inter-fibres [7]. Au contraire, les fibres courtes, et à plus forte raison les fines, sont plus flexibles et ont une surface spécifique plus élevée, ce qui les rend plus aptes à la formation de liaisons [9]. Grâce à leur longueur, les fibres longues permettent de créer un réseau fibreux. Les fibres courtes jouent un rôle de consolidation et de colmatage du réseau fibreux. Elles assurent ainsi la cohésion de la feuille. Les propriétés de la feuille, notamment les propriétés de résistance mécaniques, sont fortement dépendantes à la fois de la résistance des fibres et de la cohésion du réseau fibreux.

Afin de caractériser ces propriétés pour la pâte, des formettes sont fabriquées et testées par des essais de résistance mécanique et des mesures de propriétés optiques. Les méthodes standards employées sont indiquées dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 Méthodes standards et méthodes utiles pour la préparation et la caractérisation des formettes de pâte

| Méthodes | ATPPC | TAPPI (méthodes analogues) |
|-------------------------------|---|---|
| Préparation des formettes | C.4 rév.1997 – Préparation des formettes de pâte destinées aux essais physiques C.5 rév.1993 – Préparation des formettes de pâte destinées aux essais optiques | T 205 sp-95 – Forming handsheets for physical tests of pulp T218 sp-97 – Forming handsheets for reflectance testing of pulp (Büchner funnel procedure) |
| Conditionnement des formettes | A.4 rév.2003 – Conditionnement des formettes de pâtes, de papier et de cartons pour essais en atmosphère de référence | T 402 sp-98 – Standard conditioning and testing atmospheres for paper, board, pulp handsheets, and related products |
| Essais physiques | D.12 rév.1991 – Essais physiques des formettes de pâte | T 220 om-98 – Physical testing of pulp handsheets |
| Résistance à la traction | D.34 rév.1996 – Détermination du comportement à la traction des papiers et cartons (méthode à vitesse constante d'allongement) | T 494 om-96 – Tensile properties of paper and paperboard (using constant rate of elongation apparatus) |
| Résistance à l'éclatement | D.8 rév.1993 – Détermination de la résistance à l'éclatement du papier | T 403 om-97 – Bursting strength of paper |
| Résistance au déchirement | D.9 rév.1993 – Détermination de la résistance au déchirement du papier, du carton et des formettes | T 414 om-98 – Internal tearing resistance of paper (Elmendorf-type method) |
| Blancheur | E.1 rév.1990 – Détermination du degré de blancheur des pâtes, papiers et cartons | T 452 om-98 – Brightness of pulp, paper, and paperboard (directional reflectance at 457 nm) |
| Opacité | E.2 rév.1993 – Détermination de l'opacité du papier | T 425 om-96 – Opacity of paper (15/d geometry, illuminant A/2°, 89% reflectance backing and paper backing) T 519 om-96 – Diffuse opacity of paper (d/0° paper backing) |
| Couleur | E.5 rév.1993 – Mesure de la couleur des pâtes, papiers et cartons à l'aide d'un réflectomètre à trois filtres à éclairage diffus (0°) | T 527 om-94 – Color of paper and paperboard (d/0° geometry) |
| Diffusivité, absorbance | | T 1214 sp-98 – Interrelation of reflectance, R_0 ; reflectivity, R_∞ ; TAPPI opacity, $C_{0.89}$; scattering, S ; and absorption, K |

4.8.3.1 Caractéristiques des feuilles de laboratoire

L'objectif de la caractérisation des formettes est double : d'une part caractériser les propriétés de la pâte primaire raffinée à haute consistance en un stade et d'autre part caractériser les propriétés des pâtes reconstituées après fractionnement et raffinage sélectif des fractions. Les propriétés des formettes de pâte primaire permettent d'établir une référence pour le procédé TMP classique dans les conditions de raffinage de l'usine pilote pour le deuxième stade. Les propriétés des formettes de pâte reconstituées sont comparées à cette référence.

4.8.3.1.1 Propriétés physiques

Les propriétés physiques suivantes sont mesurées :

- la résistance à la rupture par traction (longueur de rupture, absorption d'énergie de traction, allongement à la traction) à l'aide d'un extensomètre Instron 4201 à vitesse d'étirement constante et équipé d'une jauge de contrainte de 50 kgF (490 N),
- la résistance à l'éclatement à l'aide d'un appareil Mullen Tester de B.F. Perkins équipé d'un détecteur d'éclatement TMI Series 400 Tester,
- la résistance à la déchirure à l'aide d'un déchiromètre à balancier ProTear Elmendorf Tearing Tester de Thwing-Albert Instrument Co.

4.8.3.1.2 Propriétés optiques

Les propriétés optiques suivantes sont mesurées l'aide d'un spectrophotomètre Technidyne ColorTouch PC Model ISO :

- blancheur et opacité,
- couleur (espace colorimétrique CIELAB),
- coefficients de Kubelka-Munk (absorption K, diffusion S).

4.9 Analyse statistique

L'analyse statistique des séries de données est réalisée à l'aide du logiciel JMP 6.0 de SAS Institute Inc. Un seuil de significativité de 5% correspondant à un intervalle de confiance de 95% est utilisé tout au long de l'étude. Les moyennes des séries de données sont comparées par analyse de variance à l'aide du test de Student lorsque les séries sont normalement distribuées et dans le cas inverse, à l'aide des tests non-paramétriques de Wilcoxon (2 séries) et de Kruskal-Wallis (plus de 2 séries). La normalité est testée à l'aide du test de Shapiro-Wilk.

Chapitre 5 - Résultats et discussion (1) – Comportement de la pâte primaire au raffinage

5.1 Caractéristiques de la pâte primaire

Quatre envois de pâte primaire de l'usine de Papiers Masson Ltée ont été réalisés entre Novembre 2004 et Janvier 2007. Pour chaque envoi, les caractéristiques de la pâte sont indiquées dans le tableau 5.1. On peut observer que la pâte a subi une évolution au cours du temps liée très probablement à une modification de la stratégie de raffinage de l'usine [1]. On observe notamment une hausse de l'indice d'égouttage associée à une augmentation de la quantité de fibres longues (classes R14 et R28) qui traduisent une réduction de l'énergie spécifique de raffinage au stade primaire au cours du temps, associée à l'augmentation du rythme de production de l'usine.

Tableau 5.1 Caractéristiques de la pâte de premier stade de papiers Masson

| | | Unités | Nov. 2004 | Mai 2005 | Jan. 2006 | Jan. 2007 |
|---------------------------------------|-------------|--------|-----------|----------|-----------|-----------|
| Indice d'égouttage | | mL | 548 | 586 | 587 | 635 |
| Fractions Bauer McNett | R14 | % | 16,8 | 18,3 | 16,5 | 20,0 |
| | R28 | % | 30,9 | 28,7 | 28,7 | 32,0 |
| | R48 | % | 19,9 | 19,1 | 20,9 | 17,1 |
| | R100 | % | 9,8 | 9,3 | 10,6 | 8,6 |
| | R200 | % | 5,7 | 5,6 | 5,4 | 4,2 |
| | P200 | % | 16,9 | 19,0 | 17,9 | 18,1 |
| L_w (FQA) | | mm | 1,68 | 1,55 | 1,66 | 1,83 |

5.1.1 Analyses microscopiques des fibres

L'analyse microscopique des fibres est réalisée dans le but de caractériser la forme et les dimensions transversales des fibres, notamment, diamètre, périmètre et épaisseur de paroi. Les fibres de la pâte primaire échantillonnée en Janvier 2007 sont séparées au Bauer McNett et les fractions R14, R28, R48 et R100 sont analysées. La fraction R200 est omise car les fibres sont trop courtes pour pouvoir être alignées.

5.1.1.1 Dimensions et formes des sections de fibres

L'objectif de cette partie est de présenter les caractéristiques morphologiques des fibres de BE et de BP à travers plusieurs paramètres mais aussi de présenter les différences entre les mesures obtenues avec les différentes méthodes de microscopie employées dans cette étude.

Les mesures réalisées et les paramètres obtenus à partir de ces mesures sont résumées dans le tableau 5.2 pour les mesures par microscopie électronique et dans le tableau 5.3 pour les mesures effectuées sur micrographies de fibres obtenues avec l'appareil MWT. Pour chacun des échantillons de BP et de BE analysés séparément, les mesures sont distribuées selon une loi normale.

Tableau 5.2 Caractéristiques morphologiques des fibres de la pâte primaire mesurées sur sections transversales obtenues par microscopie électronique

| Classe | | R14 | | R28 | | R48 | | R100 | | Total | |
|-------------------|------------|------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|
| Type | | BP | BE | BP | BE | BP | BE | BP | BE | BP | BE |
| Nombre de mesures | | 69 | 49 | 31 | 33 | 57 | 26 | 41 | 21 | 198 | 129 |
| $W_t^{(1)}$ | Moyenne | 2,57 | 4,74 | 2,40 | 4,07 | 2,46 | 4,77 | 2,63 | 3,92 | 2,52 | 4,44 |
| | Ecart-type | 0,56 | 1,23 | 0,43 | 1,16 | 0,59 | 1,05 | 0,65 | 0,89 | 0,57 | 1,17 |
| $D^{(2)}$ | Moyenne | 36,7 | 33,4 | 35,8 | 32,5 | 40,3 | 33,6 | 37,7 | 29,1 | 37,8 | 32,5 |
| | Ecart-type | 9,95 | 7,89 | 8,52 | 9,42 | 10,14 | 8,65 | 9,77 | 8,92 | 9,83 | 8,66 |
| $Z^{(3)}$ | Moyenne | 40,3 | 89,0 | 37,9 | 82,2 | 35,1 | 87,9 | 40,2 | 81,1 | 38,4 | 85,8 |
| | Ecart-type | 12,6 | 33,8 | 9,84 | 39,0 | 15,3 | 25,5 | 11,8 | 19,2 | 13,0 | 31,7 |
| $FC^{(4)}$ | Moyenne | 0,65 | 0,72 | 0,67 | 0,72 | 0,62 | 0,73 | 0,62 | 0,75 | 0,64 | 0,73 |
| | Ecart-type | 0,12 | 0,09 | 0,10 | 0,10 | 0,14 | 0,10 | 0,11 | 0,11 | 0,13 | 0,10 |

Notes :

⁽¹⁾ Épaisseur de paroi des fibres, μm

⁽²⁾ Diamètre des fibres, mm

⁽³⁾ Paramètre Z modifié (Éq. 4.23)

⁽⁴⁾ Facteur de forme ou circularité (Éq. 4.22)

Tableau 5.3 Caractéristiques morphologiques des fibres de la pâte primaire mesurées sur micrographies MWT

| Classe | | R14 ⁽¹⁾ | | R28 | | R48 | | R100 | | Total | |
|-------------------------------|------------|--------------------|------|-------|------|-------|------|------|------|-------|------|
| Type | | BP | BE | BP | BE | BP | BE | BP | BE | BP | BE |
| Nombre de mesures | | 33 | 53 | 71 | 55 | 66 | 42 | 56 | 48 | 226 | 198 |
| W _t ⁽²⁾ | Moyenne | 3,25 | 4,97 | 3,45 | 5,08 | 3,08 | 4,94 | 3,25 | 4,96 | 3,26 | 4,99 |
| | Ecart-type | 0,73 | 1,04 | 0,59 | 0,96 | 0,58 | 0,74 | 0,60 | 0,85 | 0,62 | 0,91 |
| D ⁽³⁾ | Moyenne | 36,7 | 31,0 | 40,3 | 28,9 | 36,0 | 27,5 | 32,7 | 24,0 | 36,6 | 28,0 |
| | Ecart-type | 12,6 | 9,64 | 10,76 | 7,08 | 10,92 | 6,93 | 9,71 | 5,61 | 11,16 | 7,91 |

Notes : ⁽¹⁾ Micrographies obtenues par microscopie optique à transmission

⁽²⁾ Épaisseur de paroi des fibres, μm

⁽³⁾ Diamètre des fibres, μm

5.1.1.1.1 Largeurs et épaisseurs de paroi

La largeur des fibres présente une dispersion élevée, avec un écart-type relatif de l'ordre de 27% autant pour les fibres de BP que les fibres de BE, et s'étend sur une plage de 16 à 76 microns pour les fibres de BP et de 16 à 60 microns pour les fibres de BE (Figure 5.1).

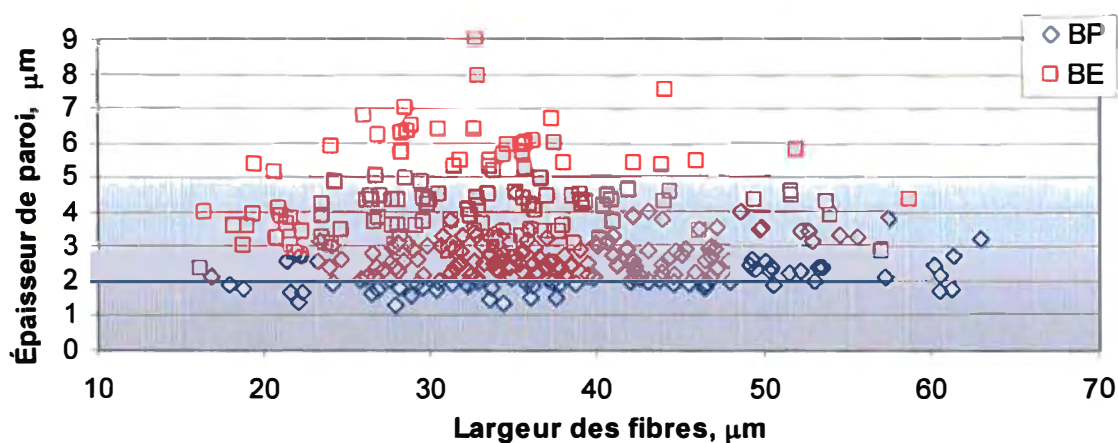


Figure 5.1 Épaisseur de paroi des fibres de BP et de BE en fonction de la largeur des fibres, mesurées sur sections transversales de fibres

Cette dispersion est due, d'une part, aux différentes espèces de bois représentées dans la pâte, et d'autre part, à la déformation subie par les fibres lors du stade primaire de raffi-

nage. Les fibres de BP sont naturellement plus larges que les fibres de BE pour une espèce donnée et, en raison de leur plus faible épaisseur de paroi, elles ont tendance à subir une plus grande déformation lorsqu'elles sont soumises à des forces d'écrasement et de cisaillement, ce qui explique que celles-ci soient en moyenne plus larges que les fibres de BE.

L'épaisseur de paroi des fibres présente également une dispersion élevée, avec des écarts-types relatifs de l'ordre de 23 et 26% en moyenne, pour les fractions de fibres de BP et de BE respectivement. Mais, à la différence de la largeur des fibres, l'épaisseur de paroi des fibres de BP et de BE s'étend sur des intervalles avec une intersection réduite. Ainsi les fibres de BP ont des épaisseurs de paroi comprises entre 1,3 et 4,6 microns alors que pour les fibres de BE, l'épaisseur de paroi est comprise entre 2,3 et 9,0 microns (Figure 5.2).

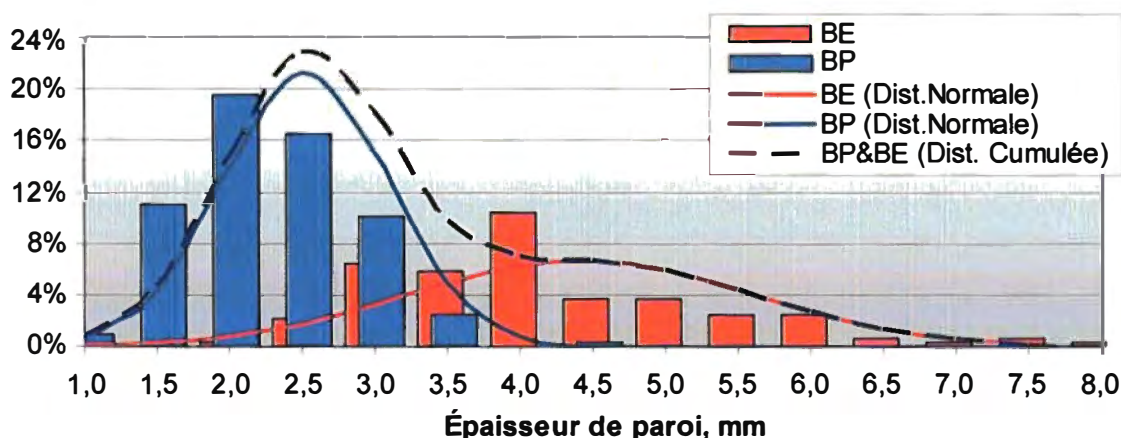


Figure 5.2 Distribution de l'épaisseur de paroi des fibres de BP et de BE

L'intersection entre ces intervalles traduit la présence de fibres de transition. Sur des micrographies de section transversales, il n'est pas possible de définir d'autre critère que l'épaisseur et l'aspect général de la section transversale pour déterminer le type de fibre. La présence de ponctuation, notamment, ne peut pas être vérifiée. Ceci explique la transition relativement brusque entre les fibres de BP et de BE. On peut également observer que cette limite dépend de la largeur des fibres et que plus la largeur de la fibre est élevée et plus l'épaisseur limite entre les fibres de BP et de BE est grande. Cette observation est également vérifiée avec les mesures réalisées sur des micrographies au MWT

(Figure 5.3). Ceci reflète très probablement la croissance simultanée des fibres en largeur et en épaisseur de paroi.

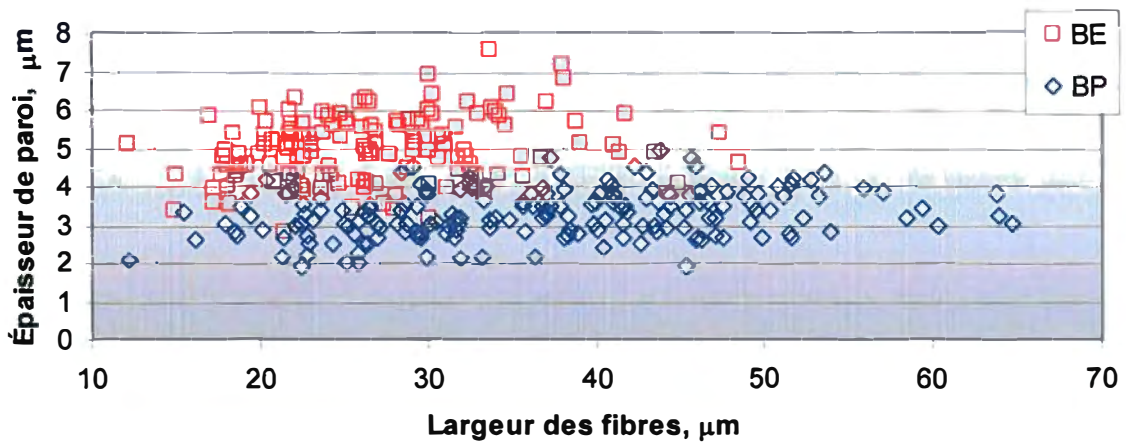


Figure 5.3 Épaisseur de paroi des fibres de BP et de BP en fonction de la largeur des fibres, mesurées sur micrographies obtenues avec l'appareil MWT

Il est à noter que la mesure de largeur de fibres réalisées sur sections transversales n'est pas exactement équivalente à celle réalisée sur micrographie MWT. Dans le premier cas, il s'agit de la plus grande distance entre deux points du périmètre extérieur alors que dans le deuxième cas, il s'agit de la largeur de la fibre dans la position avec laquelle celle-ci s'est déposée sur la grille de l'appareil MWT (Figure 5.6a). Cette dernière mesure est donc plus petite, surtout dans le cas des fibres de BE qui sont moins collapsées (Figure 5.4).

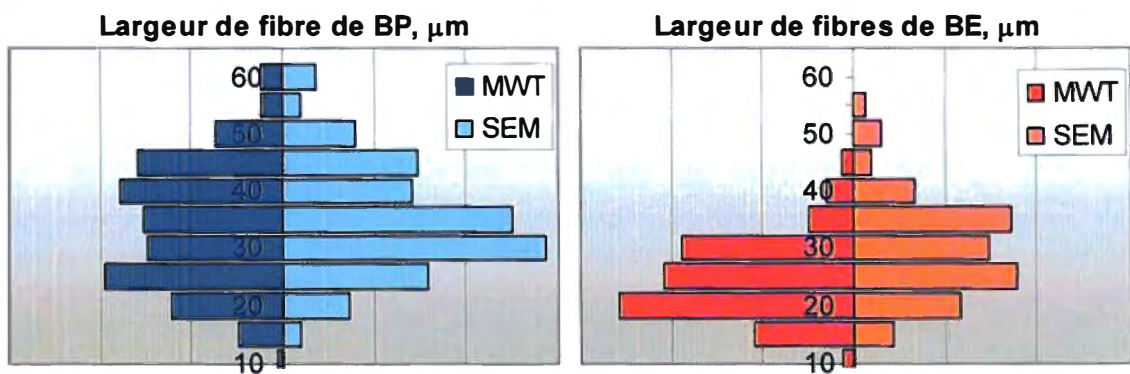


Figure 5.4 Comparaison des distributions de largeurs de fibres de BE et de BP mesurées sur micrographies MWT et sur sections de fibres obtenues par microscopie électronique

Dans le cas de l'épaisseur de paroi, les mesures effectuées sur micrographies MWT présentent également des différences avec celles effectuées sur sections transversales. Dans le cas des fibres de BP, comme dans le cas des fibres de BE, les valeurs sont décalées de 25% en moyenne (Figure 5.5).

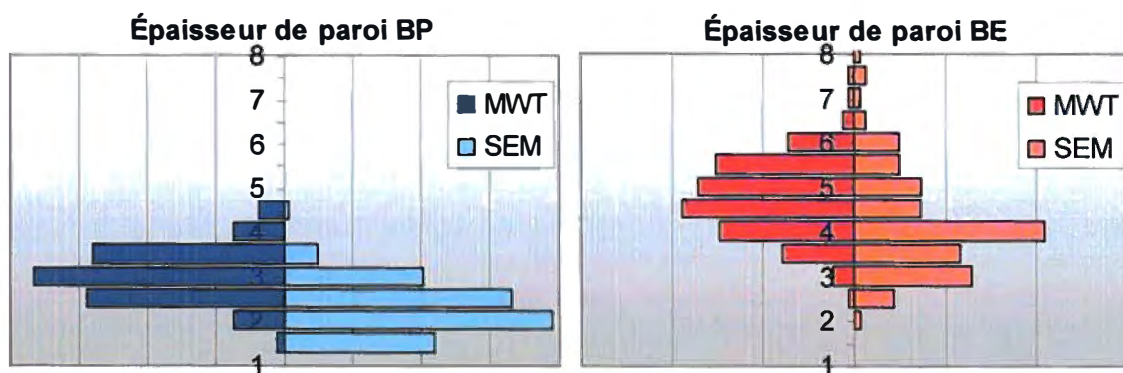


Figure 5.5 Comparaison des distributions des épaisseurs de paroi des fibres de BE et de BP mesurées sur micrographies MWT et sur sections de fibres obtenues par microscopie électronique

Ces différences peuvent s'expliquer par plusieurs raisons : d'une part, sur les sections transversales, l'épaisseur mesurée est une moyenne sur tout le périmètre de la fibre alors que dans le cas du MWT, la mesure est réalisée sur les bords de la fibre qui correspondent très souvent à une zone de courbure de la paroi et d'autre part, la paroi pouvant être inclinée, la mesure correspond à la projection de la paroi dans le plan d'observation (Figure 5.6b).

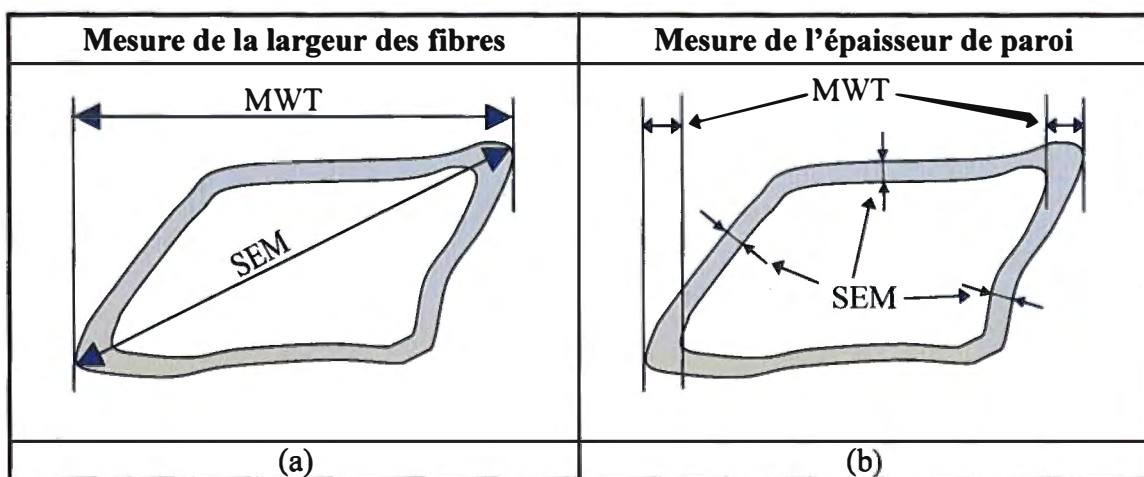


Figure 5.6 Comparaison des méthodes de mesure de largeur (a) et d'épaisseur de paroi (b) des fibres sur micrographies MWT et sur sections de fibres obtenues par microscopie électronique

5.1.1.1.2 Facteur de forme, paramètre Z

Le facteur de forme FC (Éq. 4.22) caractérise la forme générale d'une section transversale de fibre en comparant la surface totale de la section, lumen inclus, avec celle d'un cercle de périmètre égal. Des valeurs proches de 1 indiquent que la forme de la section est circulaire alors que des valeurs proches de 0 indiquent que la section est collapsée. Dans le cas des fibres, la valeur de FC ne peut être inférieure à un seuil minimum correspondant à la surface transversale de la paroi, ce qui correspond à une fibre entièrement collapsée.

Les fibres de BE de la pâte primaire présentent en moyenne des facteurs de forme plus élevées que ceux des fibres de BP (Figure 5.7), ces dernières ayant une paroi plus fines, elles ont plus tendance à se collapsier sous l'effet des contraintes subies lors du défibrage et du raffinage. D'autre part, les fibres de BP ont originellement un rapport entre la largeur tangentielle et la largeur radiale plus élevé que les fibres de BE or, plus ce rapport est faible est plus le facteur de forme est faible.

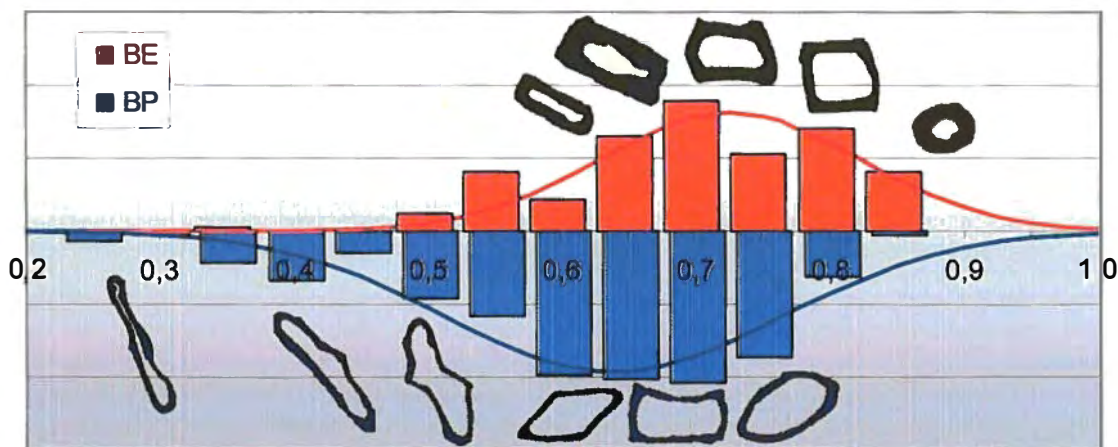


Figure 5.7 Distribution des valeurs de facteur de forme pour les fibres de BP et de BE et sections transversales caractéristiques ($\times 400$)

Le paramètre Z modifié (Éq. 4.23) caractérise plus spécifiquement la forme de la paroi des fibres. L'interprétation de ce paramètre est plus complexe que celle du facteur de forme circulaire. L'aire de la section transversale de la paroi est proportionnelle à la masse linéique. Le paramètre Z est donc d'autant plus grand que la fibre possède une masse linéique élevée et que le périmètre moyen de la paroi est faible, c'est-à-dire que

l'épaisseur de paroi est grande. En éliminant le périmètre moyen dans l'expression du paramètre Z , on peut exprimer l'épaisseur de paroi sous la forme suivante (Éq. 5.1).

$$W_t = \sqrt{\frac{A_p}{100.4\pi}} \sqrt{Z} \quad \text{Éq. 5.1}$$

Où A_p = Aire de la surface transversale de la paroi

Cette expression montre que les courbes de valeur mesurée d'épaisseur de paroi en fonction du paramètre Z sont des courbes paraboliques. Celles-ci dépendent de la surface transversale de la fibre et donc de la masse linéique (Figure 5.8). Ces courbes sont comprises entre deux courbes paraboliques limites correspondant aux valeurs minimums et maximums de la section transversale de paroi et qui correspondent respectivement à des valeurs de 90 et de 600 μm^2 dans le cas de la pâte primaire. Elles délimitent ainsi une zone dans laquelle les fibres de BP et de BE occupent des zones séparées avec une transition progressive autour de la valeur de 55.

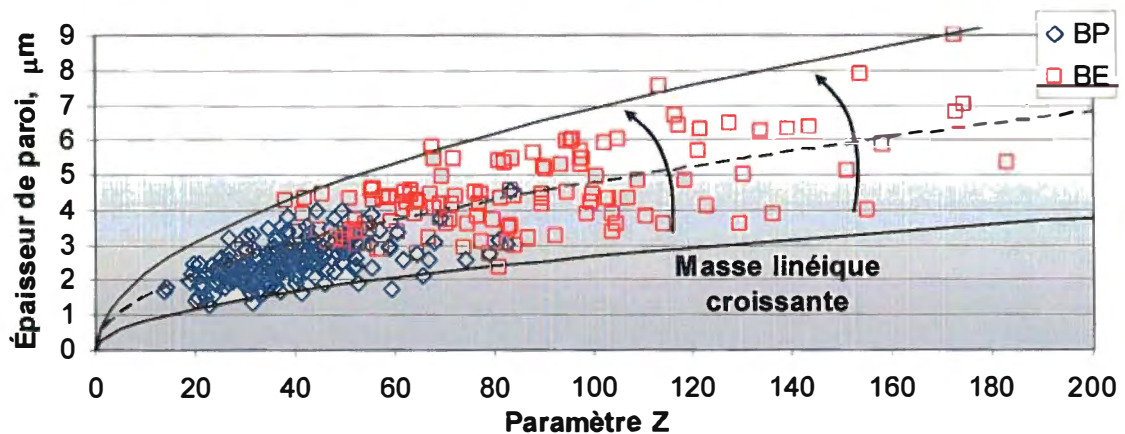


Figure 5.8 Épaisseur de paroi des fibres de BP et de BE en fonction du paramètre

5.1.1.2 Taux de fibres de bois de printemps et de bois d'été

Les comptages effectués sur les micrographies MWT sont indiqués dans le tableau 5.4. Afin de déterminer les fractions massiques en fibres de BP et de BE dans chacune des classes Bauer McNett, la forme des fibres est caractérisée par une valeur moyenne du paramètre Z modifié. Ces valeurs sont indiquées dans le tableau 5.2. Elles sont utilisées

pour calculer la surface transversale des fibres de BP et de BE en fonction du paramètre Z et de l'épaisseur de paroi (Éq. 4.21 et Éq. 4.23) et par suite, les fractions massiques (Éq. 4.19 et Éq. 4.20).

Tableau 5.4 Fractions massiques des fibres de BP et de BE obtenues par comptage sur micrographies MWT

| | | Unités | R14 ⁽¹⁾ | R28 | R48 | R100 | R200 |
|------------------------------------|----|--------|--------------------|-------|-------|-------|------|
| Fraction massique | | % | 20,0 | 32,0 | 17,1 | 8,6 | 4,2 |
| Longueur des fibres (L_w , FQA) | | mm | — | 2,33 | 1,45 | 0,78 | 0,36 |
| Masse linéique (FQA) | | mg/m | — | 0,297 | 0,240 | 0,188 | ~ |
| Nombre de fibres | BP | — | 118 | 131 | 193 | 241 | — |
| | BE | — | 156 | 104 | 87 | 81 | — |
| Fraction en nombre de fibres | BP | % | 37,8 | 55,7 | 68,9 | 74,8 | — |
| | BE | % | 62,2 | 44,3 | 31,1 | 25,2 | — |
| Fraction massique de fibres | BP | % | 58,1 | 56,5 | 65,8 | 74,0 | — |
| | BE | % | 41,9 | 43,5 | 34,2 | 26,0 | — |

Note : ⁽¹⁾ Micrographies obtenues par microscopie optique à transmission

Les résultats obtenus montrent que les fractions de fibres longues concentrent la majeure partie de fibres de BE. Ces résultats sont également fortement corrélés avec la masse linéique moyenne de chaque fraction Bauer McNett. Ceci suggère que les variations de masse linéique dans les fractions sont dues en grande partie aux proportions de fibres de BP et de BE (Figure 5.9). Ces proportions ne justifient cependant pas l'ensemble de la variation de la masse linéique. Il est également probable que, au sein de chacune des fractions Bauer McNett, la masse linéique des fibres de BP et de BE soit plus faible dans les fractions de fibres courtes. Ceci est d'ailleurs corroboré par l'évolution de l'épaisseur de paroi et la largeur des fibres : l'épaisseur de paroi des fibres de BE a tendance à diminuer dans les fractions de fibres courtes alors que celle des fibres de BP se maintient constante (Figure 5.10a). De même, la largeur de fibres du BE est plus faible dans les fractions de fibres courtes alors qu'elle n'augmente que faiblement dans le cas du BP (Figure 5.10b). Ces deux paramètres suggèrent donc que la masse linéique des fibres de BE est plus faible dans les fractions de fibres courtes que dans les fractions de fibres longues alors que celle des fibres de BP se maintient constante. Un autre aspect à prendre en compte est la présence de fragments de grande taille de paroi de fibre résultant

très probablement du délaminage de la paroi de certaines fibres. Ces fragments sont pratiquement inexistant dans les fractions de fibres longues mais leur nombre augmente significativement dans la fraction R100 et contribue à la réduction de la masse linéique.

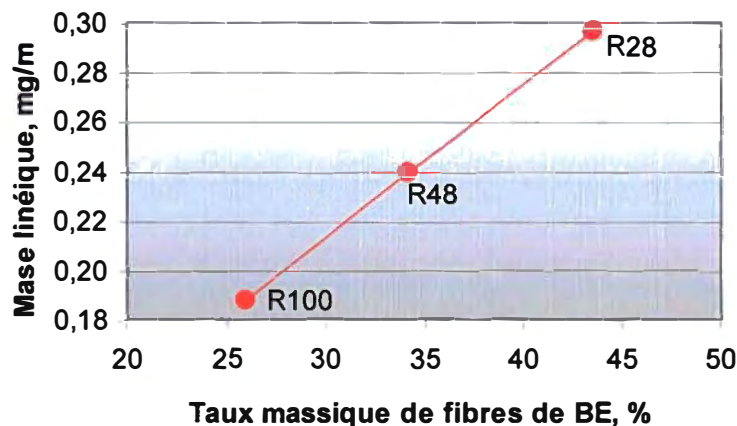


Figure 5.9 Relation entre la masse linéique moyenne et le taux massique de fibres de BE

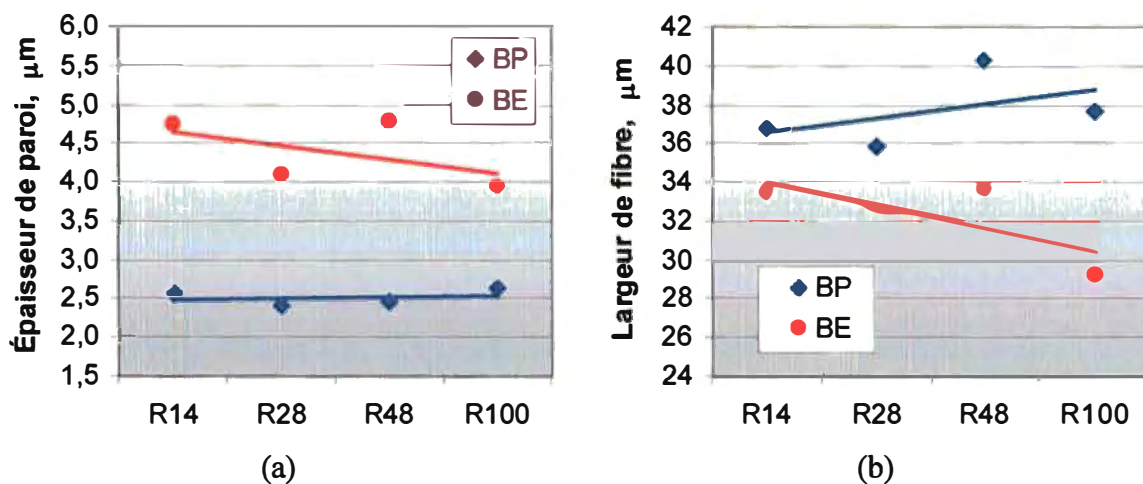


Figure 5.10 Épaisseur de paroi (a) et largeur de fibres (b) des BP et de BE dans chaque fraction Bauer McNett

5.2 Comportement au raffinage

Trois séries de raffinage ont été réalisées avec les pâtes échantillonnées en Mai 2005, Janvier 2006 et Janvier 2007. Les caractéristiques des pâtes raffinées sont indiquées dans le tableau 5.5.

| | | Unités | Mai 2005 | | | | Janvier 2006 | | | | Janvier 2007 | | | |
|---------------------------------|--------------------------|--------|----------|------|------|------|--------------|------|------|------|--------------|-------|-------|-------|
| | | | 4 | 3 | 2 | 1 | 4 | 3 | 2 | 1 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 8,20 | 5,56 | 3,89 | 2,78 | 7,14 | 5,18 | 4,20 | 3,08 | 9,24 | 7,27 | 5,90 | 5,24 |
| Indice d'égouttage | | mL | 40 | 77 | 135 | 425 | 54 | 100 | 139 | 191 | 69 | 103 | 131 | 196 |
| Fractions Bauer McNett | R14 | % | 2,5 | 4,8 | 6,2 | 6,8 | 6,5 | 10,6 | 13,0 | 14,2 | 6,2 | 8,1 | 9,9 | 11,1 |
| | R28 | % | 19,3 | 21,9 | 23,4 | 34,9 | 25,8 | 26,5 | 27,2 | 27,6 | 29,0 | 29,7 | 30,1 | 31,1 |
| | R48 | % | 24,8 | 25,4 | 25,8 | 25,6 | 18,2 | 17,8 | 17,7 | 17,5 | 17,7 | 17,1 | 17,2 | 17,3 |
| | R100 | % | 13,3 | 12,6 | 12,3 | 11,7 | 12,0 | 10,9 | 10,6 | 9,8 | 11,6 | 10,8 | 10,6 | 10,8 |
| | R200 | % | 8,2 | 6,9 | 6,0 | 5,4 | 7,0 | 6,6 | 5,9 | 5,5 | 6,7 | 5,9 | 5,6 | 5,3 |
| | P200 | % | 31,9 | 28,4 | 26,3 | 15,6 | 30,5 | 27,6 | 25,6 | 25,4 | 28,8 | 28,4 | 26,6 | 24,4 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 0,46 | 0,80 | 1,09 | 2,16 | 0,75 | 1,03 | 1,50 | 1,68 | 0,75 | 1,03 | 1,50 | 1,71 |
| Analyse FQA | L _a | mm | 0,68 | 0,72 | 0,75 | 0,75 | 0,62 | 0,68 | 0,68 | 0,72 | 0,738 | 0,739 | 0,762 | 0,764 |
| | L _w | Mm | 1,49 | 1,57 | 1,64 | 1,65 | 1,47 | 1,62 | 1,61 | 1,71 | 1,64 | 1,64 | 1,68 | 1,67 |
| | L _{ww} | mm | 2,09 | 2,18 | 2,29 | 2,29 | 2,13 | 2,33 | 2,31 | 2,45 | 2,25 | 2,26 | 2,30 | 2,28 |
| | Taux de fines, en nombre | % | 36,2 | 35,6 | 34,4 | 34,9 | 41,1 | 39,5 | 39,0 | 38,2 | 37,1 | 36,7 | 35,5 | 35,9 |
| | Taux de fines, en masse | % | 6,56 | 6,09 | 5,62 | 5,68 | 8,05 | 7,08 | 6,92 | 6,45 | 6,12 | 6,04 | 5,65 | 5,71 |

Tableau 5.5 Caractéristiques de la pâte primaire raffinée

5.2.1 Propriétés de la pâte raffinée

5.2.1.1 Énergie spécifique de raffinage

L'évolution de l'indice d'égouttage de la pâte primaire au cours du deuxième stade de raffinage en usine pilote est présentée dans la figure 5.11. Les pâtes de Mai 2005 et de Janvier 2006 ne présentent pas de différence significative du point de vue de l'énergie spécifique de raffinage. Par contre, pour un indice d'égouttage donné, la pâte de Janvier 2007 requiert une plus grande quantité d'énergie de raffinage, ce qui indique que l'énergie spécifique de raffinage lors du premier stade a été moins grande pour cette pâte que pour les pâtes antérieures. Ceci corrobore l'évolution du procédé industriel présentée auparavant.

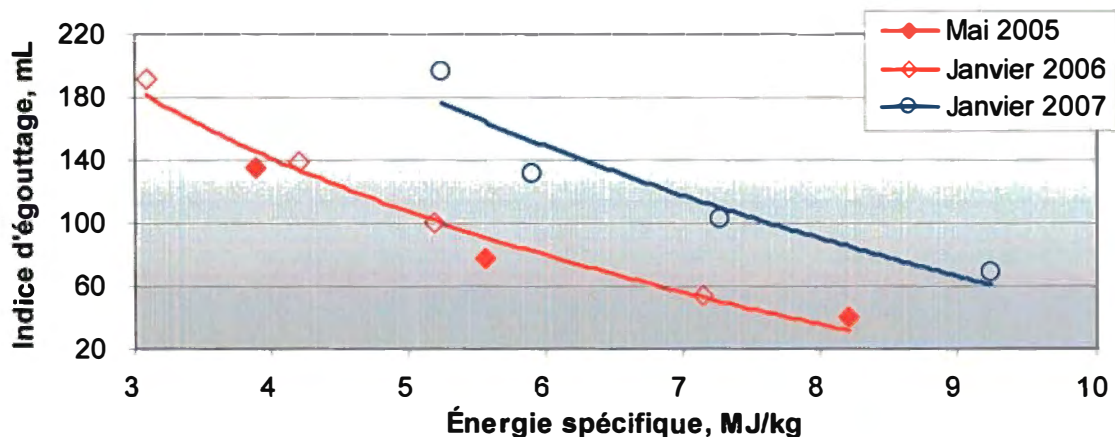


Figure 5.11 Courbes de raffinage de deuxième stade à haute consistance pour la pâte primaire

Ainsi, afin d'obtenir une pâte raffinée avec un indice d'égouttage de 100 mL, il est nécessaire d'appliquer 7,3 MJ/kg à la pâte de Janvier 2007 alors que les pâtes de Janvier 2006 et Mai 2005 requièrent seulement 5,2 MJ/kg, soit une augmentation de 40%.

5.2.1.2 Classage Bauer McNett

La figure 5.12 montre une évolution similaire des fractions Bauer McNett pour les trois pâtes : la fraction R14 diminue fortement alors que la fraction P200 augmente fortement, par contre les fractions R28 et R48 diminuent faiblement et les fractions R100 et R200 augmentent faiblement.

La fraction R14 représente la fraction des fibres qui restent intactes ou qui sont encore liées entre-elles sous forme de bûchettes. L'évolution de cette fraction donne donc un indice important de l'action du raffinage sur les fibres. Ainsi la diminution de cette fraction indique que les fibres subissent un raccourcissement et par conséquent se retrouvent distribuées dans les fractions suivantes. Les fractions R28 et R48, également constituées de fibres longues, subissent une action similaire mais elles reçoivent une contribution de la fraction R14, ce qui explique leur diminution relativement plus faible. Les fractions R100 et R200 constituées de fibres courtes augmentent au cours du raffinage car elles reçoivent les fibres des fractions R14, R28 et R48 qui ont été coupées et dans le même temps, elles sont moins affectées par l'action de raffinage. La fraction P200 est constituée de fines de fibres, c'est-à-dire de fragments de fibres coupées mais également d'éléments de la paroi des fibres qui ont été arrachés soit sous la forme de flocons, soit sous la forme de fibrilles. L'évolution de chacune des fractions lors du raffinage, notamment des fractions R28, R48, R100 et R200, est donc la résultante entre la perte de fibres due à la diminution de longueur et l'apport de fibres et de fines en provenance des fractions de fibres plus longues.

Les trois pâtes se distinguent les unes des autres essentiellement au niveau des fractions de fibres longues R14, R28 et R48. La pâte de Mai 2005 possède plus de fibres dans la fraction R48 mais moins de fibres R14 et R28 que les autres pâtes. Ces différences peuvent être liées à la matière première mais aussi au procédé dans la mesure où le premier stade de raffinage a été modifié en Janvier 2005 par le remplacement des segments de raffinage de la zone plane par des segments d'un nouveau type et par la suite, la production a augmenté progressivement de 725 tmss/j à 800 tmss/j [1]. Ceci explique que, les pâtes de janvier 2006 et 2007 ayant subi un raffinage primaire moins agressif, les fibres longues des fractions R14 et R28 sont plus nombreuses, ces mêmes fibres se trouvant dans la fraction R48 dans la pâte de Mai 2005. Dans les trois cas, et pour un indice d'égouttage de 100 mL, la somme des fractions massiques R14, R28 et R48 est restée constante et représente environ 65% de la pâte.

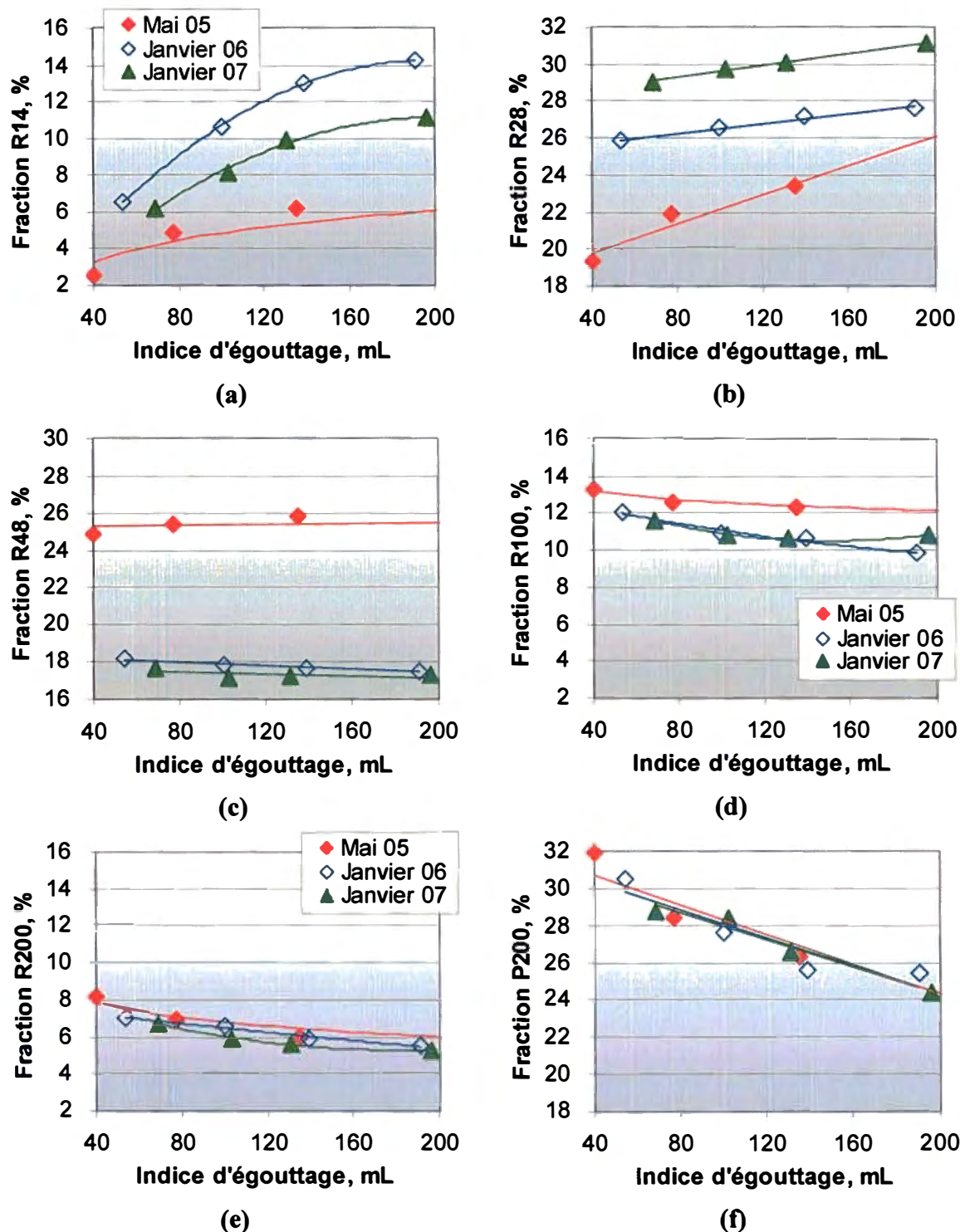


Figure 5.12 Fractions Bauer McNett en fonction de l'indice d'égouttage, (a) fraction R14, (b) fraction R28, (c) fraction R48, (d) fraction R100, (e) fraction R200, (f) fraction P200

5.2.1.3 Rejets Pulmac

La figure 5.13 présente l'évolution du taux de rejets du classeur Pulmac en fonction de l'indice d'égouttage. Les trois pâtes présentent un comportement similaire. Pour la pâte de Mai 2005, la même remarque peut être formulée pour les rejets Pulmac que pour les fractions R14 et R28. Ces rejets sont cependant relativement faibles et représentent 1% en masse pour les trois pâtes raffinées à un indice d'égouttage de 100 mL.

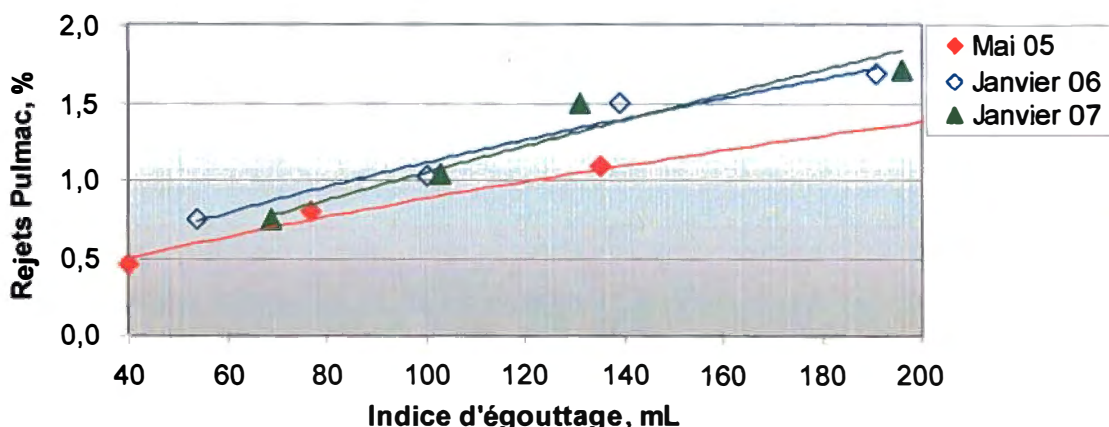


Figure 5.13 Taux de rejets Pulmac en fonction de l'indice d'égouttage

5.2.1.4 Longueur des fibres

De la même manière que les fractions du classeur Bauer McNett, la distribution de longueur des fibres reflète la réponse des fibres aux conditions de raffinage, c'est-à-dire, aux forces de compression et aux contraintes de cisaillement auxquelles elles ont été soumises par l'action conjuguée des barres des segments de raffinage du rotor et du stator lors de leur passage dans l'entrefer.

La figure 5.14 montre l'évolution de la longueur des fibres au cours du raffinage. Les trois pâtes présentent une tendance à la baisse similaire en fonction de l'indice d'égouttage. Par contre, en fonction de l'énergie spécifique de raffinage du deuxième stade, la longueur des fibres de la pâte de Janvier 2007 est moins affectée par le raffinage et a tendance à se maintenir au dessus des autres. Cependant, à un indice d'égouttage de 100 mL, les trois pâtes ont une longueur moyenne similaire, de l'ordre de 1,62 mm.

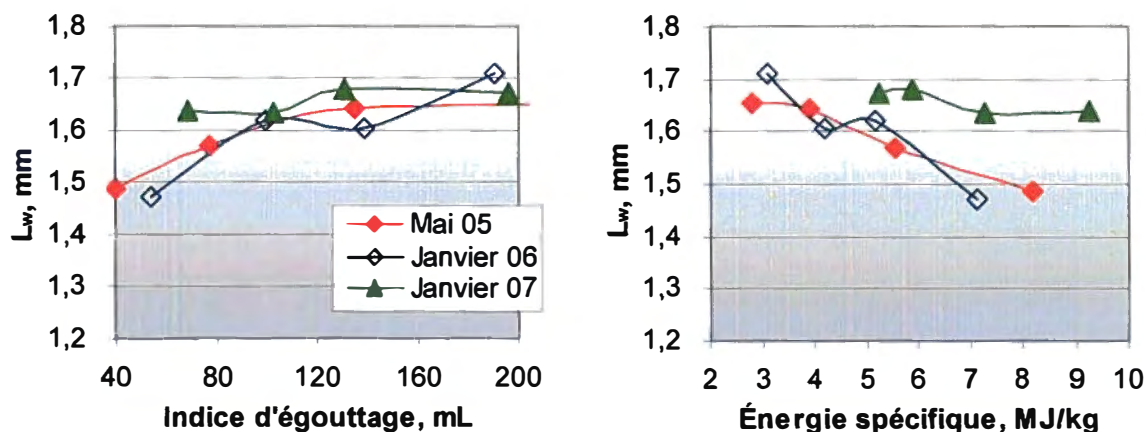


Figure 5.14 Évolution de la longueur moyenne pondérée en longueur des fibres en fonction l'indice d'égouttage (à gauche) et de l'énergie spécifique de raffinage (à droite)

5.2.2 Propriétés des feuilles de laboratoire

5.2.2.1 Propriétés physiques

Les propriétés physiques de la pâte mesurées sur formette sont indiquées dans le tableau 5.6. Les propriétés de résistance mécanique, telles que la résistance à la traction, la résistance à la déchirure et la résistance à l'éclatement, permettent de qualifier la capacité de la pâte à former un réseau fibreux solide à l'aide des fibres longues et à consolider ce réseau à l'aide des fibres plus courtes et des fines. Ces essais ne provoquent pas la rupture des fibres elles-mêmes mais la rupture des liaisons entre les fibres. Ils sont donc fortement influencés par la longueur des fibres, leur niveau de développement et par la quantité et la qualité des fines.

Tableau 5.6 Propriétés mécaniques et optiques des feuilles de laboratoire fabriquées avec la pâte primaire raffinée

| | | Unités | Mai 2005 | | | | Janvier 2006 | | | | Janvier 2007 | | | | |
|----------------------|-------------------------------------|---------------|----------|------|------|------|--------------|------|------|------|--------------|------|------|------|------|
| | | | 4 | 3 | 2 | 1 | 4 | 3 | 2 | 1 | 4 | 3 | 2 | 1 | |
| Indice d'égouttage | | mL | 40 | 77 | 135 | 425 | 54 | 100 | 139 | 191 | 69 | 103 | 131 | 196 | |
| Propriétés physiques | Volume massique | cm³/g | 2,34 | 2,54 | 2,80 | 3,20 | 2,58 | 2,79 | 2,88 | 2,97 | 2,93 | 3,00 | 2,95 | 3,18 | |
| | Masse volumique | g/cm³ | 0,43 | 0,39 | 0,36 | 0,31 | 0,39 | 0,36 | 0,35 | 0,34 | 0,34 | 0,33 | 0,34 | 0,31 | |
| | Indice de rupture à la traction | N.m/g | 55,3 | 49,0 | 41,7 | 33,8 | 50,4 | 44,1 | 43,2 | 39,0 | 50,8 | 45,8 | 40,7 | 37,2 | |
| | Allongement à la rupture | % | 3,10 | 2,61 | 2,26 | 1,84 | 1,99 | 1,78 | 1,85 | 1,84 | 2,32 | 2,09 | 1,81 | 1,80 | |
| | Absorption d'énergie de traction | J/m² | 73,3 | 53,8 | 39,6 | 25,5 | 39,2 | 30,5 | 31,5 | 28,3 | 47,9 | 38,0 | 29,2 | 26,2 | |
| | Indice de résistance à l'éclatement | kPa.m²/g | 3,71 | 3,12 | 2,64 | 1,94 | 2,95 | 2,71 | 2,51 | 2,16 | 3,01 | 2,71 | 2,52 | 2,13 | |
| | Indice de résistance à la déchirure | mN.m²/g | 7,77 | 8,54 | 9,19 | 9,43 | 7,95 | 8,66 | 9,62 | 9,37 | 8,89 | 9,12 | 9,15 | 9,07 | |
| Propriétés optiques | Blancheur | | % | 54,6 | 54,1 | 54,1 | 52,9 | 53,9 | 53,9 | 53,5 | 53,5 | 52,6 | 52,9 | 52,7 | 52,3 |
| | Opacité | | % | 96,5 | 96,2 | 95,3 | 94,8 | 95,9 | 95,4 | 94,9 | 94,4 | 96,1 | 95,4 | 95,7 | 95,2 |
| | Coefficient de diffusion S | | m²/kg | 60,1 | 58,2 | 54,0 | 49,9 | 57,6 | 54,9 | 51,7 | 50,4 | 54,9 | 53,0 | 52,7 | 51,1 |
| | Coefficient d'absorption K | | m²/kg | 4,13 | 3,98 | 3,65 | 3,62 | 4,08 | 3,90 | 3,71 | 3,55 | 4,33 | 4,05 | 4,09 | 4,06 |
| | CIELAB | Luminance L | % | 86,7 | 86,5 | 86,6 | 86,2 | 86,4 | 86,5 | 86,3 | 86,3 | 85,7 | 86,0 | 85,9 | 85,6 |
| | | Composante a* | % | 0,35 | 0,39 | 0,31 | 0,35 | 0,42 | 0,41 | 0,29 | 0,28 | 0,34 | 0,32 | 0,30 | 0,20 |
| | | Composante b* | % | 14,2 | 14,5 | 14,7 | 15,0 | 14,4 | 14,6 | 14,6 | 14,7 | 14,6 | 14,7 | 14,8 | 14,7 |

5.2.2.1.1 Résistance à la rupture

Dans le cas de la résistance à la rupture (Figure 5.15), les trois pâtes présentent un comportement similaire en fonction de l'indice d'égouttage, par contre, la pâte de Janvier 2007 requiert une plus grande quantité d'énergie au deuxième stade pour développer l'indice de rupture à un même niveau.

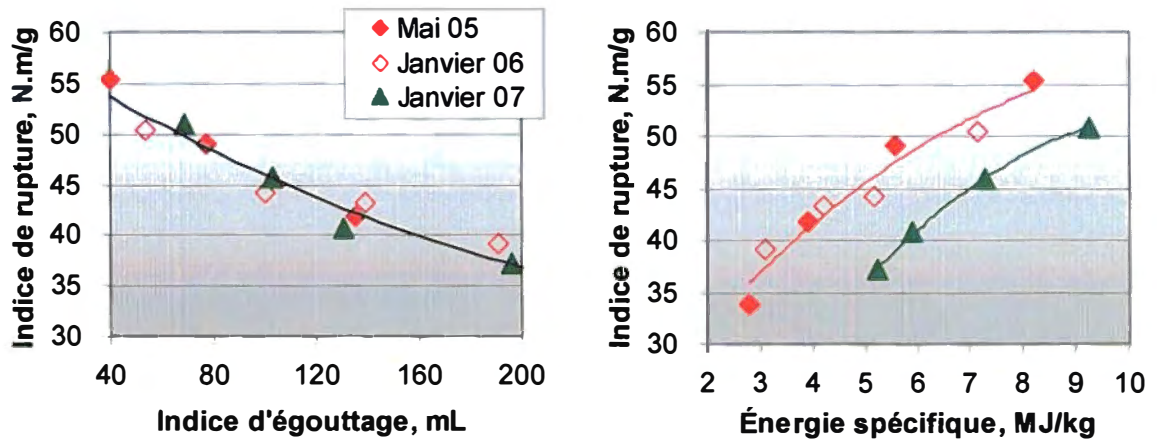


Figure 5.15 Évolution de l'indice de rupture au cours du raffinage, en fonction de l'indice d'égouttage (à gauche) et en fonction de l'énergie spécifique (à droite)

5.2.2.1.2 Résistance à la déchirure

La pâte de Janvier 2007 présente un comportement différent des deux autres pâtes en ce qui concerne la résistance à la déchirure (Figure 5.16). Ceci est probablement dû, à la fois, à la présence en plus grand nombre de fibres longues et au moindre développement de ces fibres lors du premier stade de raffinage. Ceci explique que l'indice de déchirure soit moins sensible à la quantité d'énergie spécifique appliquée au deuxième stade de raffinage.

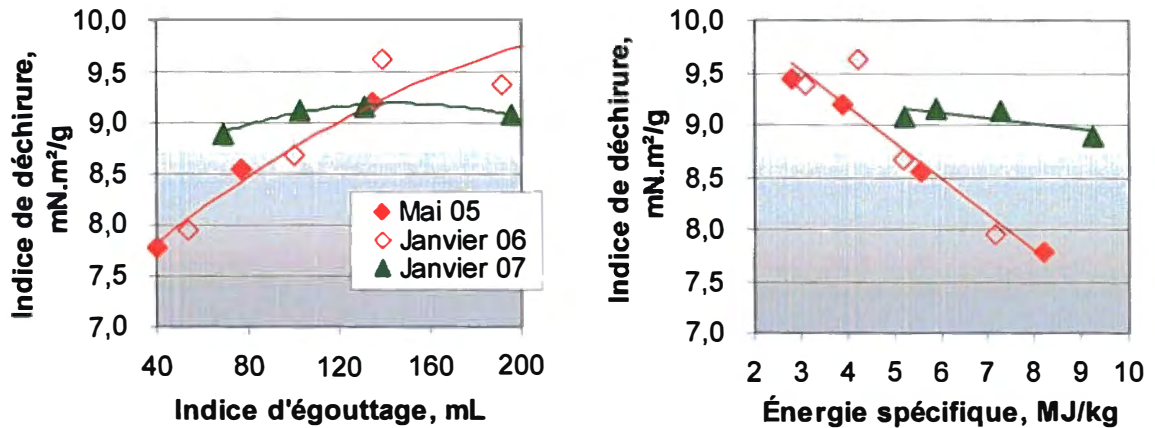


Figure 5.16 Évolution de l'indice de déchirure au cours du raffinage, en fonction de l'indice d'égouttage (à gauche) et en fonction de l'énergie spécifique (à droite)

5.2.2.1.3 Résistance à l'éclatement

L'indice de résistance à l'éclatement est fortement corrélé à l'indice de rupture (Figure 5.17), ce qui montre que, du point de vue de l'indice de résistance à l'éclatement, les trois pâtes présentent un comportement similaire à celui de l'indice de résistance à la rupture et permet de tirer les mêmes conclusions par rapport à l'indice d'égouttage et par rapport à l'énergie spécifique de raffinage.

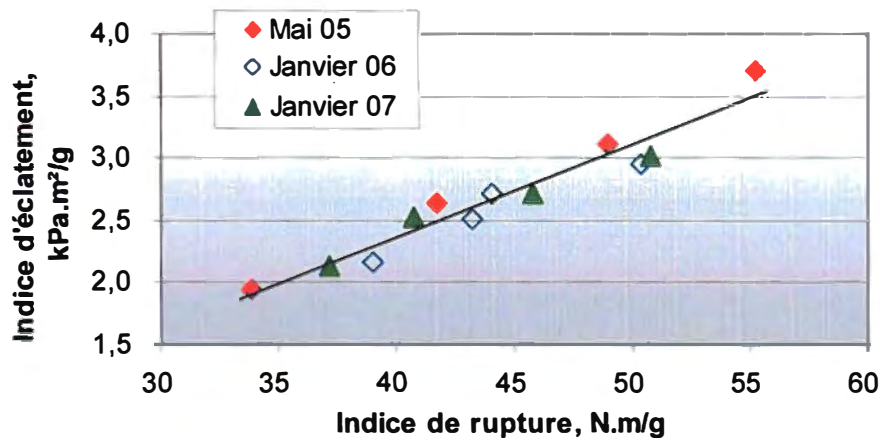


Figure 5.17 Relation entre l'indice d'éclatement et l'indice de rupture pour la pâte primaire au cours du raffinage

On peut néanmoins remarquer que la pâte de Mai 2005 a tendance à se maintenir au-dessus des autres pâtes. Ce phénomène peut être relié à la plus grande présence de fibres de

la fraction R48 dans cette pâte que dans les deux autres pâtes et traduit une meilleure formation du réseau fibreux qui n'est pas détectable avec l'indice de résistance à la rupture. Par contre, l'absorption d'énergie de traction présente la même tendance que l'indice de résistance à l'éclatement (figure 5.18), ces deux propriétés traduisent donc mieux la résistance du réseau fibreux en termes de liaison inter-fibres et sont moins sensibles à la longueur des fibres.

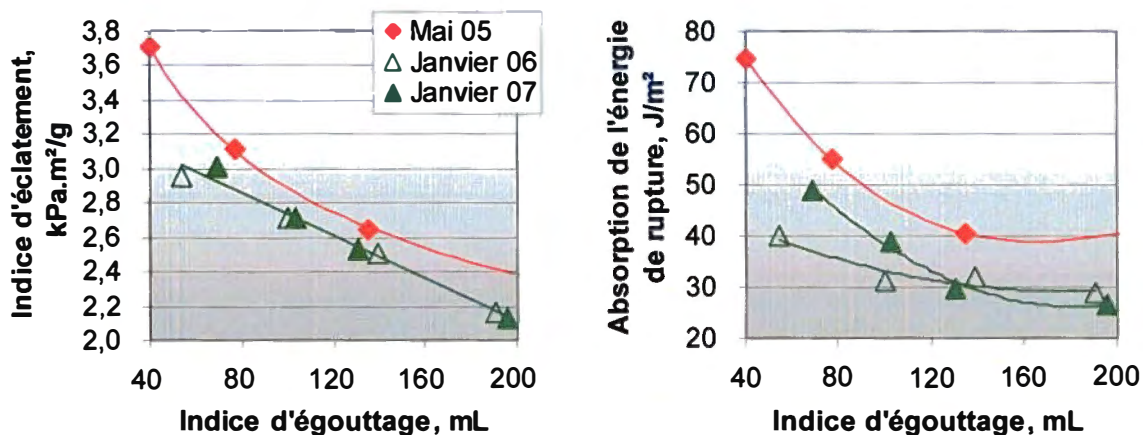


Figure 5.18 Évolution au cours du raffinage de l'indice d'éclatement (à gauche) et de l'absorption d'énergie de rupture (à droite) en fonction de l'indice d'égouttage

5.2.2.2 Propriétés optiques

Les propriétés optiques de la pâte mesurées sur formette sont indiquées dans le tableau 5.6. Les propriétés optiques de la pâte reflètent également les différences de traitement au cours du raffinage. La blancheur augmente au cours du raffinage (Figure 5.19), conséquence de la réduction de la masse linéique des fibres par délaminage ou fibrillation de la paroi des fibres et donc par exposition de la paroi secondaire, plus blanche que la paroi primaire qui contient plus de lignine. L'augmentation de blancheur est aussi due au développement de la capacité de diffusion de la lumière (Figure 5.20), probablement par la génération de fines primaires. Ainsi, au lieu d'être absorbée par les fibres ou renvoyée dans la direction spéculaire, la lumière est diffusée et donc réémise dans toutes les directions de manière plus uniforme. Ces variations restent néanmoins très modestes et des variations inférieures à 1 point de blancheur sur l'ensemble de la courbe de raffinage devraient être considérées en limite de significativité.

La pâte de Janvier 2007 présente une blancheur légèrement plus faible que celle de la pâte de Mai 2005 et Janvier 2006 ainsi qu'un coefficient de diffusion plus faible. Ceci rejoint les observations faites précédemment en ce qui concerne le premier stade de raffinage au cours duquel moins d'énergie spécifique est appliquée pour la pâte de Janvier 2007 que pour les autres pâtes. Les fibres ont donc probablement perdu moins de paroi primaire et contiennent plus de lignine en surface, ce qui réduit à la fois la blancheur et la capacité de diffusion.

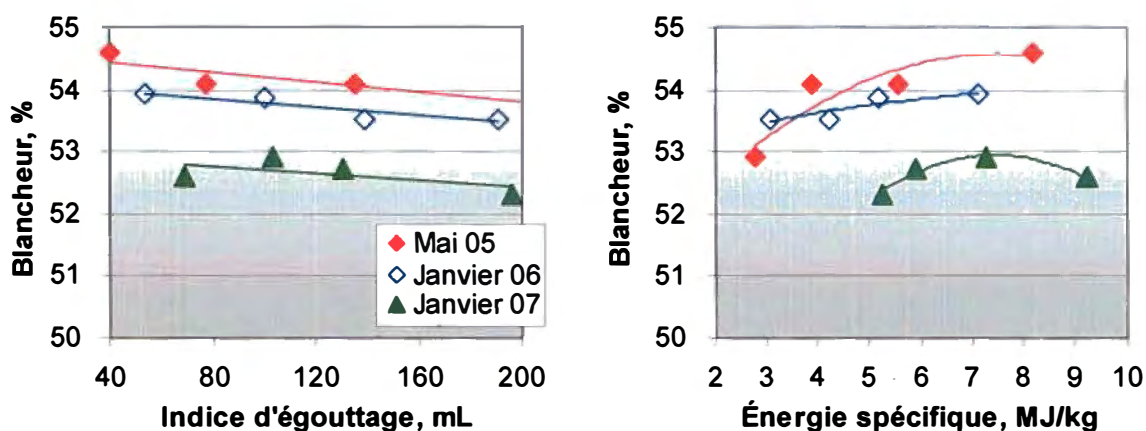


Figure 5.19 Évolution de la blancheur au cours du raffinage en fonction de l'indice d'égouttage (à gauche) et de l'énergie spécifique de raffinage (à droite)

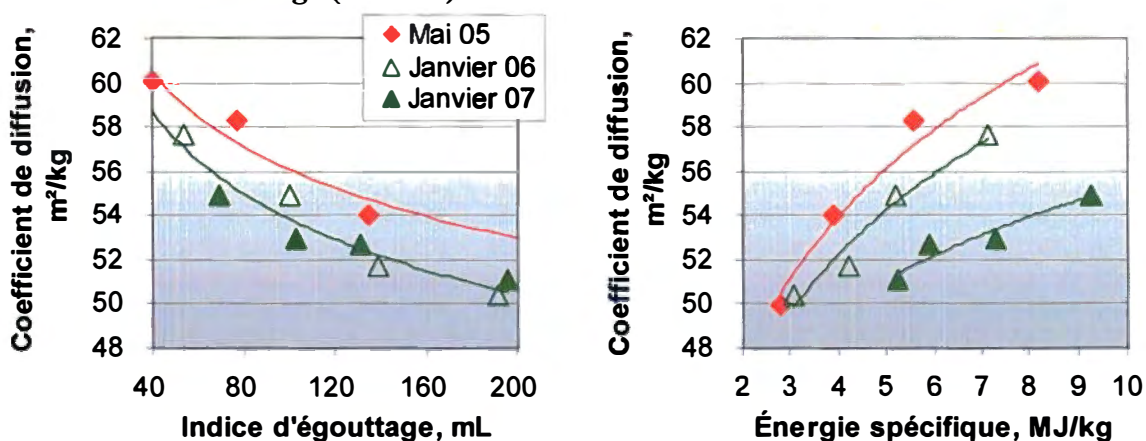


Figure 5.20 Évolution du coefficient de diffusion au cours du raffinage en fonction de l'indice d'égouttage (à gauche) et de l'énergie spécifique de raffinage (à droite)

5.3 Conclusion

Les différences observées entre les échantillons de pâtes primaires reçus de l'usine sont liées essentiellement à l'évolution du procédé de raffinage dans l'usine au cours du temps, évolution due au besoin d'en augmenter la capacité de production tout en maintenant la qualité de la pâte. L'augmentation du taux de production et la réduction de l'énergie spécifique lors du premier stade génèrent la fabrication d'une pâte primaire moins développée du point de vue de ses propriétés physiques, ce qui requiert l'application d'une plus grande quantité d'énergie spécifique dans les stades de raffinage postérieurs pour obtenir une pâte avec un niveau de développement comparable. De ce point de vue, la pâte de Janvier 2007 possède un plus grand potentiel de développement.

Du point de vue du projet de recherche, l'évolution des propriétés de la pâte primaire entre Mai 2005 et Janvier 2007 ne pose pas de problème particulier en ce qui concerne la réalisation des essais et l'analyse des résultats de chaque séquence de fractionnement. Par contre, elle rend plus difficile la comparaison de séquences réalisées pendant des périodes différentes et pour lesquelles les caractéristiques de la pâte primaire diffèrent significativement.

L'analyse des caractéristiques morphologiques des fibres permet de mettre en évidence que les fractions de fibres longues contiennent la majorité des fibres de BE et donc que le fractionnement sur la base de la longueur permet de séparer les fibres également sur la base de leur masse linéique. Elle permet également de montrer que les fibres de premiers stades sont bien individualisées et ont subies peu de dommages conservant une section transversale très proche de celles qu'elles possédaient dans le bois. Dans le cas des fibres de BP dont la paroi est moins épaisse, un écrasement plus important peut être constaté. Il y a cependant peu de fibrillation et le délaminage de la paroi des fibres se traduit par le décollement de fragments sous la forme de plaquettes et génère des fines floconneuses. Par conséquent, les fibres de premier stade présentent peu ou pas de développement de la surface spécifique des fibres par la fibrillation.

Chapitre 6 - Résultats et discussion (2) – Essais préliminaires de fractionnement

6.1 Fractionnement

6.1.1 Expérimentation

Trois séries de fractionnement ont été réalisées de Novembre 2004 à Janvier 2006. Une première série correspond à un procédé (Figure 6.1) composé d'un tamis au stade primaire (P1), un hydrocyclone ou un tamis au deuxième stade primaire et un hydrocyclone au stade secondaire (S1). Une deuxième série correspond à un procédé (Figure 6.2) composé de tamis à trous au premier stade (P1 et S1), de tamis à fentes au deuxième stade (P2 et S2) et un hydrocyclone au troisième stade primaire (P3). Puis une troisième série (Figure 6.3) a été réalisée avec un procédé similaire au procédé (b) mais dans lequel les rejets des deux tamis primaires sont mélangés et traités au deuxième stade.

Chaque séquence a été établie préalablement aux essais avec différents objectifs :

- Dans le cas (a), l'objectif est d'étudier les différences morphologiques des fibres obtenues dans chacune des fractions en fonction des conditions d'opération et des équipements de fractionnement : une fraction enrichie en fibres longues (typiquement les fractions R14, R28 et R48) et une fraction enrichie en fibres courtes (R100, R200 et P200). Dans le stade P2, deux alternatives sont étudiées : soit un tamis à trous, soit un hydrocyclone.
- Dans les cas (b) et (c), l'objectif est de séparer la plus grande partie possible des fibres de BE des fibres de BP en générant trois fractions : une fraction de fibres longues (rejets de S1) majoritairement constituée de fibres de BE, une fraction de fibres courtes (acceptés de P2 + acceptés de S2) contenant essentiellement des fibres de BP et des fines, et une fraction intermédiaire (rejets de S2).

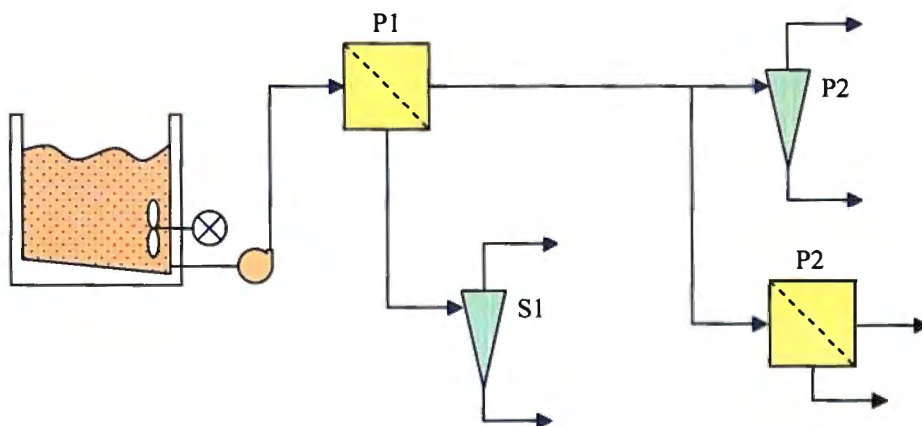


Figure 6.1 Schéma du procédé de fractionnement (a) : Tamis à trous (P1 et P2) et hydrocyclones (P2 et S1)

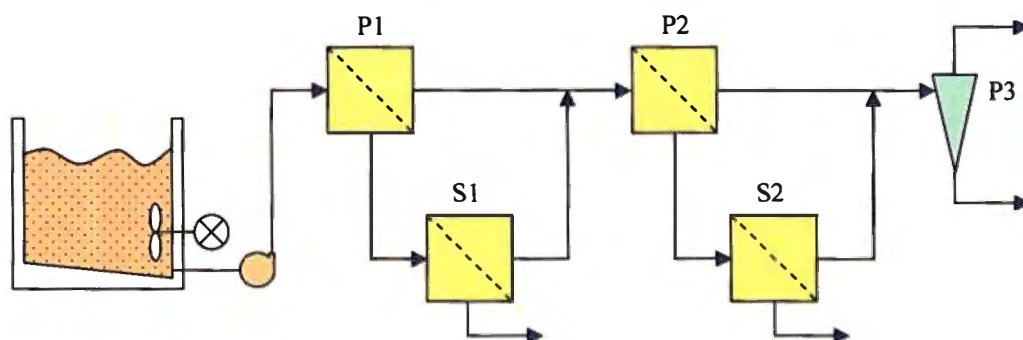


Figure 6.2 Schéma du procédé de fractionnement (b) : Tamis à trous (P1 et S1), tamis à fentes (P2 et S2) et hydrocyclone (P3)

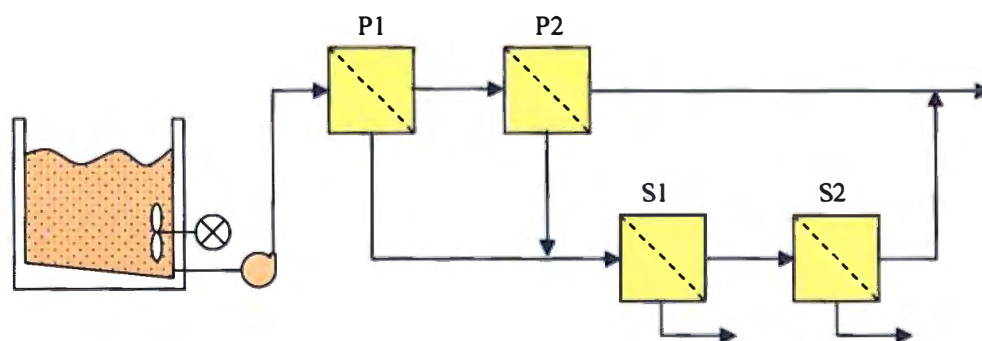


Figure 6.3 Schéma du procédé de fractionnement (c) : Tamis à trous (P1 et S1), tamis à fentes (P2 et S2)

Deux types de panier ont été utilisés afin d'en évaluer les capacités de fractionnement : deux paniers à trous lisses de 1,2 mm et de 0,25 mm de diamètre et deux paniers à fentes profilées de 0,10 mm et de 0,15 mm avec un profil de type CAE (Figure 6.4).

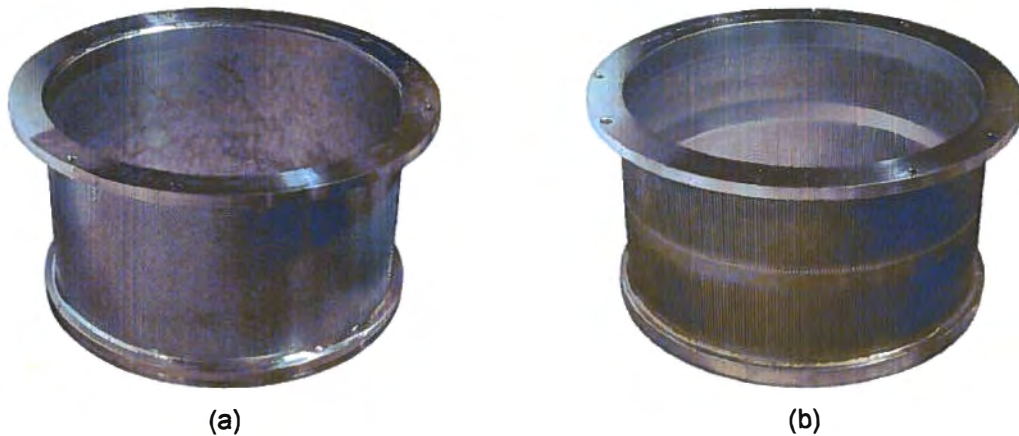


Figure 6.4 Photographies des paniers à trous lisses (a) et à fentes profilées (b) utilisés sur le tamis 8-P

La planification expérimentale des trois séries d'essais est indiquée dans le tableau 6.1 pour le procédé (a), dans le tableau 6.2 pour le procédé (b) et dans le tableau 6.3 pour le procédé (c).

Les résultats obtenus lors du procédé (a) avec le tamis équipé du panier à trous lisses de 1,2 mm de diamètre ont permis de définir les conditions d'opération des stades P1 et S1 du procédé (b). De la même manière, lors de la réalisation des essais du procédé (b), les résultats des essais correspondant au stade P2 ont été utilisés pour définir les conditions d'opération du stade S2 ; les conditions d'opération pour lesquelles les indices de fractionnement sont les plus élevés ont été retenues, en l'occurrence celles correspondant au tamis à fentes de 0,10 mm de largeur avec un taux de rejets de 50%. Par la suite et en raison de la faible performance du fractionnement de l'hydrocyclone sur la pâte primaire, ce dernier a été exclu de la suite de la recherche. De plus, un tamis à trous de 0,25 mm de diamètre a été testé au stade P2 du procédé (c). L'étude de ce tamis est présentée au chapitre suivant.

Tableau 6.1 Planification expérimentale des essais pour le procédé (a)

| Essai | Équipement | Stade | Ouvertures ⁽¹⁾ | Vp ⁽²⁾ | Cf ⁽³⁾ | Rv ⁽⁴⁾ |
|-------|------------|-------|---------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | | | m/s | % | % |
| 301 | Tamis 8-P | P1 | T 1,20 | 0,5 | 2,5 | 50 |
| 302 | Tamis 8-P | P1 | T 1,20 | 0,5 | 2,5 | 40 |
| 303 | Tamis 8-P | P1 | T 1,20 | 0,5 | 2,5 | 30 |
| 304 | Tamis 8-P | P1 | T 1,20 | 0,5 | 2,5 | 25 |
| 305 | Tamis 8-P | P1 | T 1,20 | 0,5 | 2,5 | 15 |
| 201 | Tamis 8-P | P1 | T 1,20 | 0,5 | 1,75 | 50 |
| 202 | Tamis 8-P | P1 | T 1,20 | 0,5 | 1,75 | 40 |
| 203 | Tamis 8-P | P1 | T 1,20 | 0,5 | 1,75 | 30 |
| 204 | Tamis 8-P | P1 | T 1,20 | 0,5 | 1,75 | 25 |
| 205 | Tamis 8-P | P1 | T 1,20 | 0,5 | 1,75 | 15 |
| 101 | Tamis 8-P | P1 | T 1,20 | 0,5 | 1,0 | 50 |
| 102 | Tamis 8-P | P1 | T 1,20 | 0,5 | 1,0 | 40 |
| 103 | Tamis 8-P | P1 | T 1,20 | 0,5 | 1,0 | 30 |
| 104 | Tamis 8-P | P1 | T 1,20 | 0,5 | 1,0 | 25 |
| 105 | Tamis 8-P | P1 | T 1,20 | 0,5 | 1,0 | 15 |
| 106 | Tamis 8-P | P2 | T 1,20 | 0,5 | 1,0 | 15 |
| 91 | HY-80X | S1 | 8,73 | — | 0,5 | 10 |
| 92 | HY-80X | S1 | 10,32 | — | 0,5 | 15 |
| 93 | HY-80X | S1 | 11,91 | — | 0,5 | 25 |
| 81 | HY-80X | P2 | 8,73 | — | 0,5 | 10 |
| 82 | HY-80X | P2 | 10,32 | — | 0,5 | 15 |
| 83 | HY-80X | P2 | 11,91 | — | 0,5 | 25 |

Notes : ⁽¹⁾ Type d'ouverture : T = Trous et diamètre (mm), F = Fentes et largeur (mm) dans le cas du tamis, diamètre du bec de rejets (mm) dans le cas de l'hydrocyclone, ⁽²⁾ Vitesse de passage au travers des ouvertures, ⁽³⁾ Consistance d'alimentation, ⁽⁴⁾ Taux de rejets volumique

Les essais des séries 100, 200 et 300 correspondent à l'étude du panier à trous de 1,20 mm de diamètre pour évaluer l'effet de la consistance et du taux de rejets volumique, à une vitesse de passage de 0,5 m/s et en position P1. L'essai 106 a été réalisé avec les acceptés de l'essai 105 avec les même conditions opératoires. Les séries 80 et 90 correspondent à l'étude du comportement de l'hydrocyclone avec les rejets et les acceptés du stade P1 respectivement à 3 niveaux de taux de rejets volumique.

Tableau 6.2 Planification expérimentale des essais pour le procédé (b)

| Essai | Équipement | Stade | Ouvertures ⁽¹⁾ | V _p ⁽²⁾ | C _f ⁽³⁾ | R _v ⁽⁴⁾ |
|-------|------------|-------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | | | m/s | % | % |
| 401 | Tamis 8-P | P1 | T 1,20 | 0,5 | 1,5 | 50,0 |
| 402 | Tamis 8-P | S1 | T 1,20 | 0,5 | 1,5 | 50,0 |
| 501 | Tamis 8-P | P2 | F 0,15 | 1,0 | 1,0 | 50,0 |
| 502 | Tamis 8-P | P2 | F 0,15 | 1,0 | 1,0 | 37,5 |
| 503 | Tamis 8-P | P2 | F 0,15 | 1,0 | 1,0 | 25,0 |
| 601 | Tamis 8-P | P2 | F 0,10 | 1,0 | 1,0 | 50,0 |
| 602 | Tamis 8-P | P2 | F 0,10 | 1,0 | 1,0 | 37,5 |
| 603 | Tamis 8-P | P2 | F 0,10 | 1,0 | 1,0 | 25,0 |
| 701 | Tamis 8-P | P2 | F 0,10 | 1,0 | 1,0 | 50,0 |
| 702 | Tamis 8-P | S2 | F 0,10 | 1,0 | 1,0 | 50,0 |
| 801 | HY-80X | P3 | 8,73 | — | 0,5 | 10,0 |
| 802 | HY-80X | P3 | 10,32 | — | 0,5 | 15,0 |
| 803 | HY-80X | P3 | 11,91 | — | 0,5 | 20,0 |

Notes : ⁽¹⁾ Type d'ouverture : T = Trous et diamètre (mm), F = Fentes et largeur (mm) dans le cas du tamis, diamètre du bec de rejets (mm) dans le cas de l'hydrocyclone

⁽²⁾ Vitesse de passage au travers des ouvertures

⁽³⁾ Consistance d'alimentation

⁽⁴⁾ Taux de rejets volumique

Les essais 401 et 402 permettent de produire la pâte afin d'étudier le comportement des paniers à fentes au stade P2, c'est-à-dire pour traiter les acceptés des stades P1 et S1 mélangés. Ces essais donnent lieu aux séries 500 et 600. Dans ces deux séries, l'effet du taux de rejets volumique est évalué. Finalement, le panier à fentes de 0,10 mm de largeur à un taux de rejets volumique de 50% a été retenu pour traiter l'ensemble de la pâte. Ces conditions donnent lieu aux essais 701 et 702 pour produire la pâte nécessaire à l'étude de l'hydrocyclone. Les acceptés mélangés des stades P2 et S2 sont fractionnés par l'hydrocyclone à 3 niveaux de taux de rejets volumique. Ces essais correspondent à la série 800.

Tableau 6.3 Planification expérimentale des essais pour le procédé (c)

| Essai | Équipement | Stade | Ouvertures ⁽¹⁾ | V _p ⁽²⁾ | C _r ⁽³⁾ | R _v ⁽⁴⁾ |
|-------|------------|-------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | | | m/s | % | % |
| 1101 | Tamis 8-P | P1 | T 1,20 | 0,5 | 1,5 | 40,0 |
| 1102 | Tamis 8-P | P1 | T 1,20 | 0,5 | 1,5 | 30,0 |
| 1103 | Tamis 8-P | P1 | T 1,20 | 0,5 | 1,5 | 40,0 |
| 1201 | Tamis 8-P | P2 | F 0,10 | 1,0 | 1,0 | 37,5 |
| 1202 | Tamis 8-P | P2 | F 0,10 | 1,0 | 1,0 | 30,0 |
| 1203 | Tamis 8-P | P2 | F 0,10 | 1,0 | 1,0 | 30,0 |
| 1301 | Tamis 8-P | S1 | T 1,20 | 0,5 | 1,5 | 40,0 |
| 1302 | Tamis 8-P | S1 | T 1,20 | 0,5 | 1,5 | 35,0 |
| 1303 | Tamis 8-P | S1 | T 1,20 | 0,5 | 1,5 | 40,0 |
| 1401 | Tamis 8-P | S2 | F 0,10 | 1,0 | 1,0 | 30,0 |
| 1402 | Tamis 8-P | S2 | F 0,10 | 1,0 | 1,0 | 20,0 |
| 1403 | Tamis 8-P | S2 | F 0,10 | 1,0 | 1,0 | 20,0 |
| 901 | Tamis 8-P | P1 | T 1,20 | 1,0 | 1,5 | 50,0 |
| 1004 | Tamis 8-P | P2 | T 0,25 | 0,16 | 1,0 | 20,0 |
| 1003 | Tamis 8-P | P2 | T 0,25 | 0,16 | 1,0 | 25,0 |
| 1007 | Tamis 8-P | P2 | T 0,25 | 0,22 | 1,0 | 35,0 |
| 1006 | Tamis 8-P | P2 | T 0,25 | 0,22 | 1,0 | 37,5 |
| 1005 | Tamis 8-P | P2 | T 0,25 | 0,22 | 1,0 | 50,0 |

Notes : ⁽¹⁾ Type d'ouverture : T = Trous et diamètre (mm), F = Fentes et largeur (mm)

⁽²⁾ Vitesse de passage au travers des ouvertures

⁽³⁾ Consistance d'alimentation

⁽⁴⁾ Taux de rejets volumique

Lors des essais correspondant au procédé (c), c'est-à-dire les séries 1100, 1200, 1300 et 1400, 2 essais consécutifs ont été réalisés avec 2 niveaux de taux de rejets volumique puis l'essai offrant la meilleure performance de fractionnement est répété pour traiter l'ensemble de la pâte. Le panier à trous de 0,25 mm de diamètre est testé dans la série 1000. Pour réaliser cette série, la pâte a été produite avec l'essai 901.

6.1.2 Performance de fractionnement

Les conditions d'opérations des essais ainsi que le taux de rejets massique et l'erreur de bilan de masse qui en résultent, sont indiquées dans les tableaux A.1 à A.3.

6.1.2.1 Taux de rejets, taux d'épaississement

6.1.2.1.1 Taux de rejets massique

Les taux de rejets massique et volumique peuvent être considérés comme des débits de rejets par unité de débit d'alimentation et constituent donc des paramètres adimensionnels importants pour caractériser le comportement général des équipements de fractionnement.

Les différents paniers ainsi que l'hydrocyclone présentent des comportements différents. Dans tous les cas, le taux de rejets massique augmente linéairement avec le taux de rejets volumique. Par contre, plus la taille des ouvertures du panier est petite et plus le taux de rejets massique est élevé, mettant en évidence l'effet barrière du tamis vis-à-vis du passage de la pâte au travers des ouvertures (Figure 6.5).

Dans le cas de l'hydrocyclone, le taux de rejets massique augmente plus rapidement que dans le tamis, en pratique, ceci oblige à maintenir le taux de rejets volumique à des niveaux plus faibles que dans le cas du tamis.

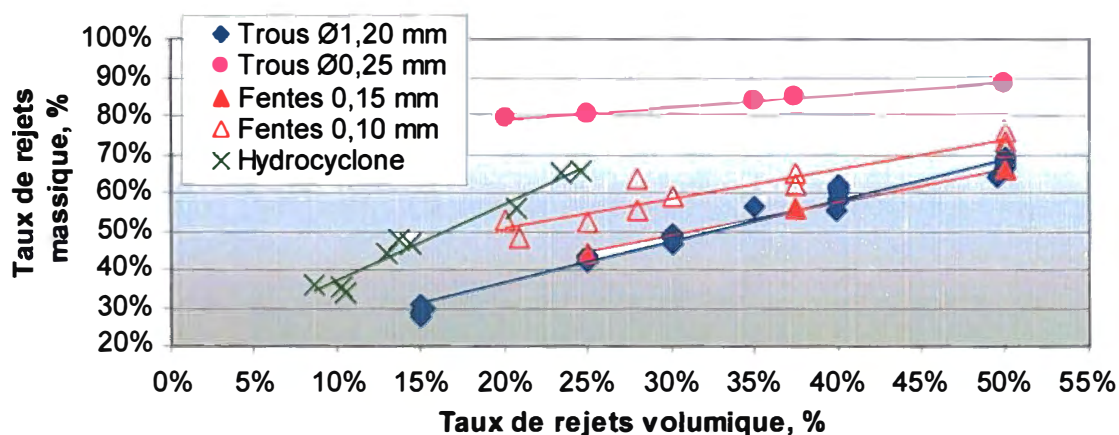


Figure 6.5 Évolution du taux de rejets massique en fonction du taux de rejets volumique pour les différents paniers et l'hydrocyclone

6.1.2.1.2 Taux d'épaississement

Le taux d'épaississement diminue avec le taux de rejets volumique, ce qui montre que la phase liquide possède une plus grande facilité de passage au travers du panier que les fibres ou dans le cas de l'hydrocyclone, de passer par le collecteur des acceptés (Figure 6.6).

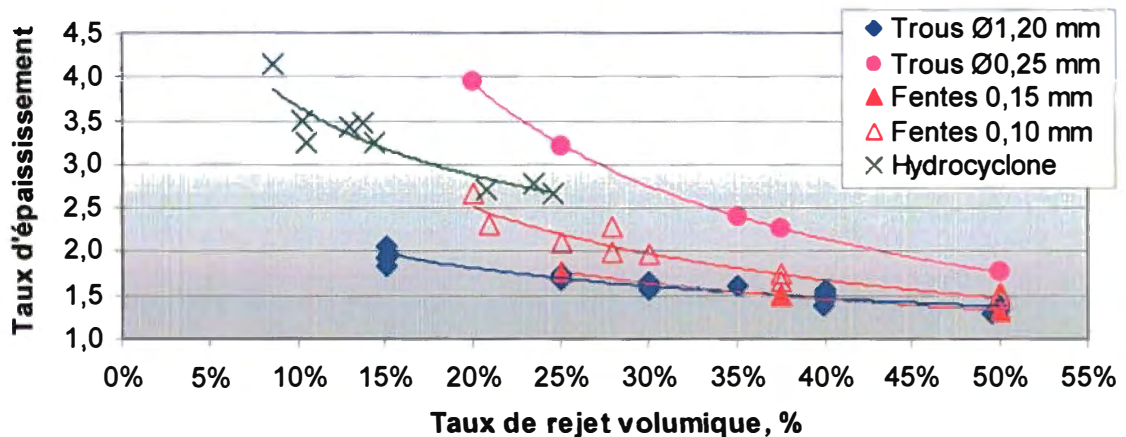


Figure 6.6 Évolution du taux d'épaississement en fonction du taux de rejets volumique pour les différents paniers et l'hydrocyclone

L'augmentation du taux d'épaississement à mesure que diminue le taux de rejets volumique traduit également l'accumulation de fibres dans les rejets et augmente corrélativement le risque de bouchage. Ainsi, deux limites apparaissent au travers de la figure 6.5 et de la figure 6.6 : à faible taux de rejets volumique, le taux d'épaississement élevé accroît le risque de bouchage, à taux de rejets volumique élevé, le taux de rejets massique élevé réduit la sélectivité du tamis et donc l'efficacité de fractionnement.

6.1.2.1.3 Régime d'écoulement

Comme il a été mentionné précédemment, le comportement de l'inverse du taux d'épaississement en fonction du taux de rejets volumique (Éq. 3.8) permet de caractériser le type d'écoulement dans le tamis. La linéarité entre ces paramètres (Figure 6.7) concorde avec un régime d'écoulement en mélange, ce qui est en accord avec les données de la littérature, le tamis étant équipé d'un rotor ouvert et à lames.

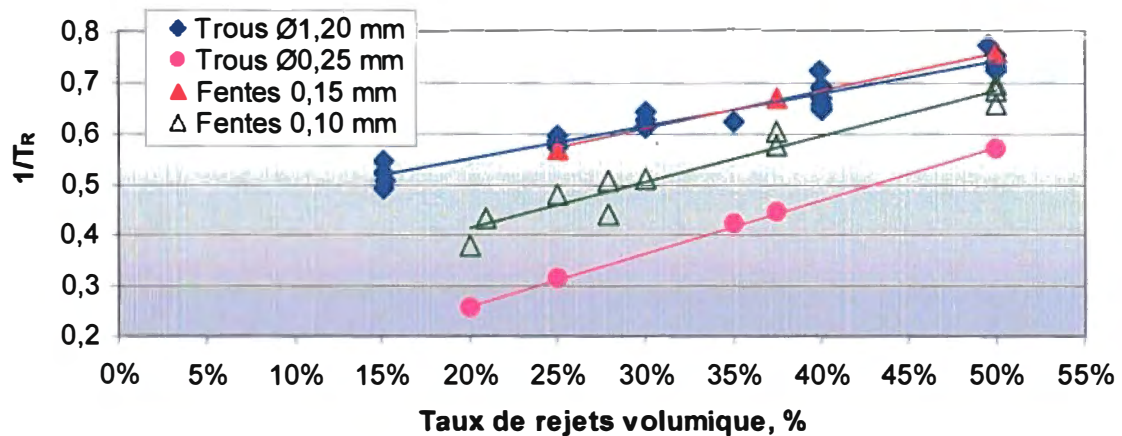


Figure 6.7 Inverse du taux d'épaississement en fonction du taux de rejets volumique pour les différents paniers

L'évaluation du taux de passage à partir de ces corrélations linéaires donne cependant des résultats peu précis. Les valeurs obtenues expérimentalement à partir de la pente de la droite, sensée être égale à $1-P$, et de l'ordonnée à l'origine, théoriquement égale à P , sont en fait très discordantes (Tableau 6.4).

Tableau 6.4 Valeurs du taux de passage obtenues par régression linéaire entre le taux de rejets volumique et l'inverse du taux d'épaississement

| Panier | 1 – Pente | Ordonnée à l'origine | Taux de passage | Écart relatif |
|-------------|-----------|----------------------|-----------------|---------------|
| Trous 1,20 | 0,36 | 0,42 | 0,39 | 17% |
| Fentes 0,15 | 0,22 | 0,38 | 0,31 | 44% |
| Fentes 0,10 | 0,09 | 0,23 | 0,16 | 90% |
| Trous 0,25 | -0,04 | 0,05 | 0,01 | 200% |

Ceci traduit l'existence d'un gradient de consistance entre l'alimentation et les rejets. Si on considère que la consistance moyenne en amont des ouvertures est une valeur comprise entre la consistance d'alimentation et la consistance des rejets, alors cette consistance peut être écrite sous la forme suivante en faisant intervenir un coefficient w dont la valeur est comprise entre 0 et 1 :

$$C_u = wC_f + (1 - w)C_r \quad \text{Éq. 6.1}$$

L'expression du taux de passage (Éq. 3.4) devient alors :

$$P = \frac{C_a}{wC_f + (1-w)C_r} \quad \text{Éq. 6.2}$$

En utilisant les bilans volumiques et massiques sur le tamis et les définitions du taux de rejets volumique et du taux d'épaississement, la consistance des acceptés peut être réécrite sous la forme :

$$C_a = C_f \frac{1 - R_v T_R}{1 - R_v} \quad \text{Éq. 6.3}$$

Par la suite, le taux de passage devient :

$$P = \frac{1 - R_v T_R}{1 - R_v} \frac{1}{w + (1-w)T_R} \quad \text{Éq. 6.4}$$

Cette dernière expression peut ensuite être arrangée en regroupant les termes en R_v et les termes en T_R de la manière suivante :

$$\frac{1}{w + (1-w)T_R} = P + (1-P) \frac{R_v}{1 - w(1 - R_v)} \quad \text{Éq. 6.5}$$

En considérant que le coefficient w représente en fait un indice de fractionnement de la pâte entière au travers du tamis, une définition peut en être donnée par la relation suivante, par analogie avec la probabilité de rétention de Wahren :

$$w = 1 - \frac{C_a}{C_r} \quad \text{Éq. 6.6}$$

En remplaçant les consistances par des expressions en fonction du taux d'épaississement et du taux de rejets massique, on obtient :

$$w = \frac{T_R - 1}{T_R - R_w} \quad \text{Éq. 6.7}$$

Cette définition correspond à la définition de la valeur W_C de la probabilité de rétention de Wahren (Éq. 3.23). On peut alors remarquer que le terme $\frac{R_v}{1 - w(1 - R_v)}$ est égal au taux de rejets massique. La relation précédente (Éq. 6.5) devient donc :

$$\frac{1}{W_c + (1 - W_c)T_R} = P + (1 - P)R_w \quad \text{Éq. 6.8}$$

Cette expression montre une relation de linéarité entre le terme de gauche de l'égalité précédente (Éq. 6.8) et le taux de rejets massique, avec une pente $1-P$ et une ordonnée à l'origine égale P . Cette relation est bien vérifiée expérimentalement (Figure 6.8) et fournit des valeurs de taux de passage cohérentes (Tableau 6.5).

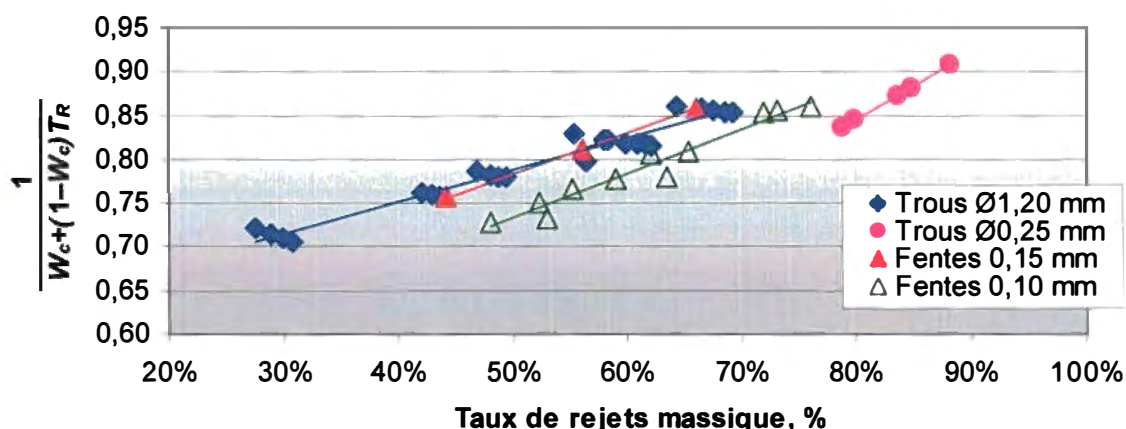


Figure 6.8 Régressions linéaires permettant de déterminer le taux de passage en régime d'écoulement en mélange

Tableau 6.5 Valeurs du taux de passage obtenues par régressions linéaires selon la relation entre W_C et R_w (Éq. 6.8)

| Panier | 1 – Pente | Ordonnée à l'origine | Taux de passage | Écart relatif |
|-------------|-----------|----------------------|-----------------|---------------|
| Trous 1,20 | 0,63 | 0,61 | 0,62 | 4,6% |
| Fentes 0,15 | 0,54 | 0,55 | 0,54 | 2,9% |
| Fentes 0,10 | 0,50 | 0,48 | 0,49 | 3,0% |
| Trous 0,25 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 1,3% |

Le taux de passage déterminé de cette manière définit un paramètre caractéristique d'un panier au même titre que la probabilité de rétention W_C de la pâte entière. Il est en effet

peu influencé par le taux de rejets (Figure 6.9), contrairement à la probabilité de rétention W_C .

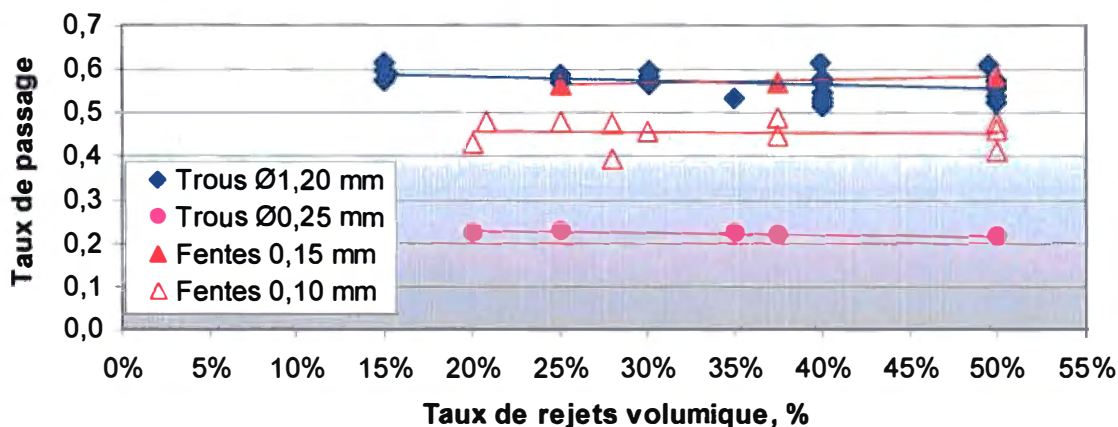


Figure 6.9 Influence du taux de rejets volumique sur le taux de passage

6.1.2.2 Indice de fractionnement

L'indice de fractionnement de Nelson permet de déterminer la manière dont les fractions Bauer McNett sont fractionnées et de comparer les paniers entre eux. Les mesures de fractions massiques obtenues avec le classeur Bauer McNett sont indiquées dans les tableaux A.4 à A.6.

La figure 6.10 présente les indices de fractionnement pour chacune des fractions Bauer McNett pour les essais réalisés à une consistance d'alimentation de 1%. À l'exception du panier à trous de 0,25 mm de diamètre, les paniers présentent un comportement au fractionnement relativement similaire avec un effet probabiliste relativement marqué : la fraction R14 est séparée vers les rejets par les 4 paniers. Plus les ouvertures sont petites et plus l'indice de fractionnement pour cette fraction est élevé. La situation est très similaire pour les fractions R28 et R48. Le tamis à trous de Ø 0,25 mm contraste fortement avec les autres paniers par un effet barrière très prononcé envers les fractions R14, R28 et R48, le fractionnement par probabilité se produisant seulement pour la fraction R100 et les fractions de fibres plus courtes.

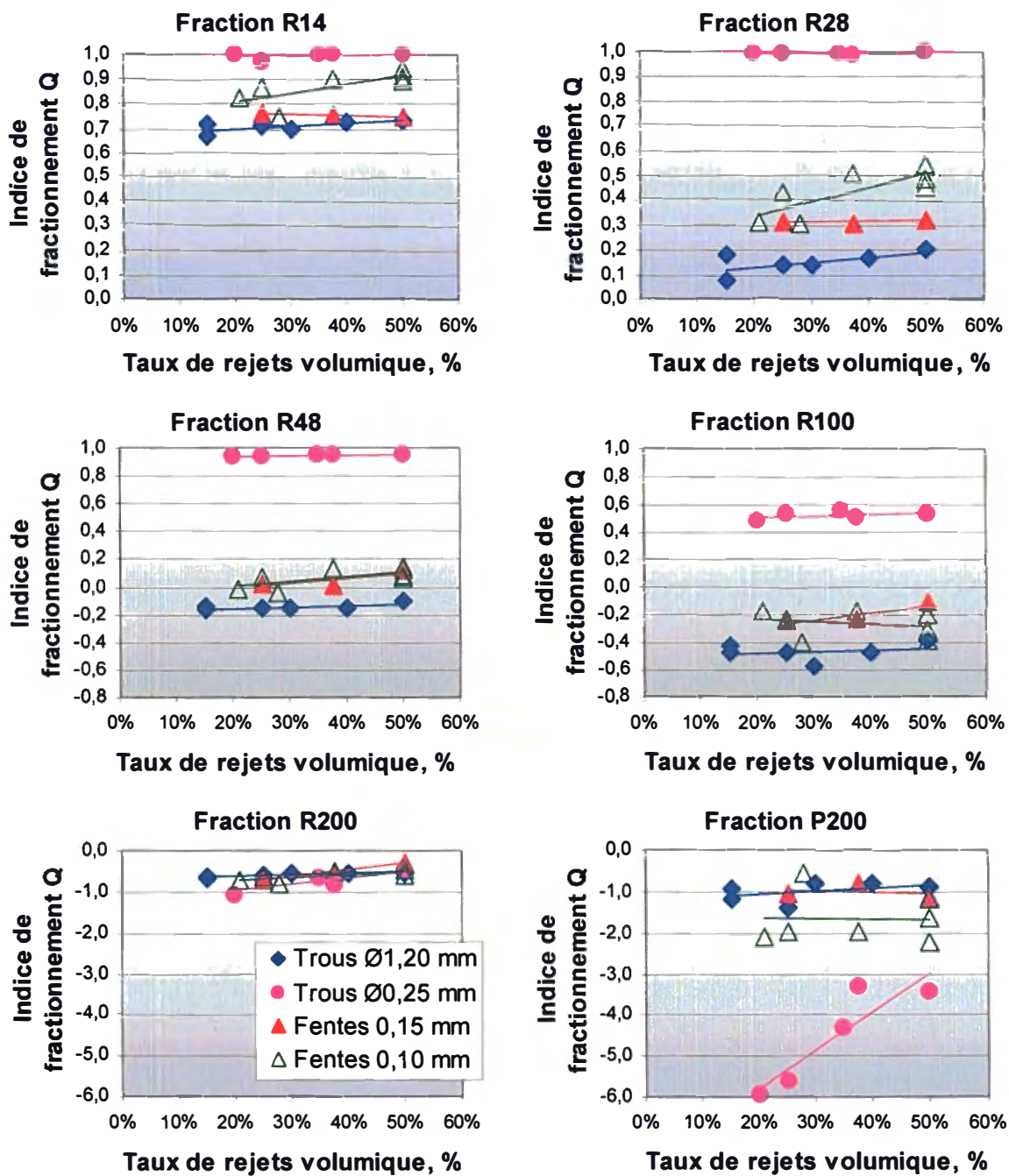


Figure 6.10 Indice de fractionnement Q des fractions Bauer McNett pour les différents paniers

Seul le tamis à trous de 0,25 mm de diamètre est capable de fractionner la fraction R100 vers les rejets. Finalement, les 4 tamis ont un comportement similaire vis-à-vis de la fraction R200, avec une séparation vers les acceptés. Pour les fibres courtes, notamment les fines de la fraction P200, on peut noter que l'indice de fractionnement est directement en relation avec l'indice de fractionnement des fibres longues.

Dans le cas de l'hydrocyclone (Figure 6.11), seule la fraction P200 est bien séparée du reste de la pâte. Les autres fractions, dont les indices sont légèrement positifs, sont préférentiellement rejetées. L'hydrocyclone produit donc des acceptés enrichis en fines mais peu différents des rejets du point de vue des autres fractions. Cet effet s'explique probablement par le comportement hydrodynamique des fines qui se comportent comme de petites particules colloïdales de masse volumique proche de celle de l'eau alors que les fibres se comportent comme des particules de masse volumique plus élevée et dont le coefficient de trainée est également plus élevé.

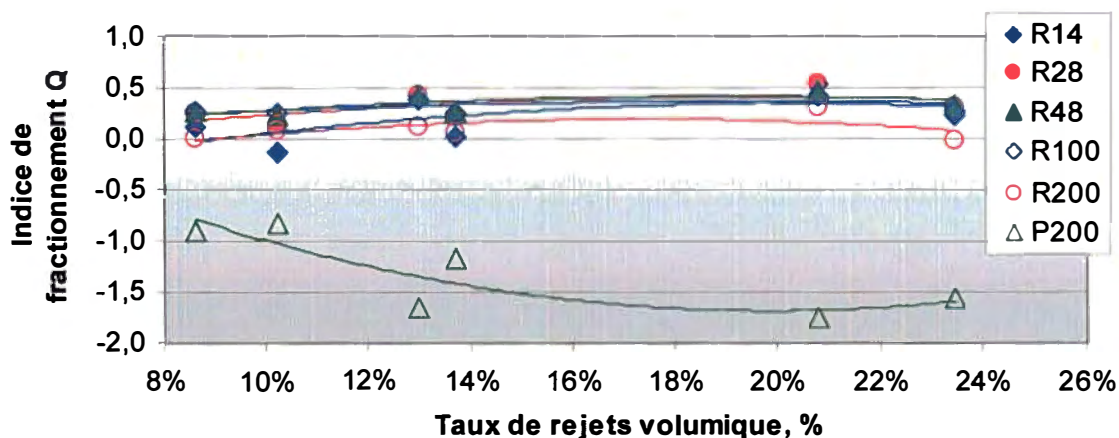


Figure 6.11 Indice de fractionnement Q des fractions Bauer McNett pour l'hydrocyclone

6.1.2.3 Efficacité de séparation des fibres

L'efficacité de séparation des fibres est évaluée ici sur la base de la longueur des fibres à partir des fractions Bauer McNett. L'efficacité de rejet fournit une indication quantitative sur la proportion avec laquelle une fraction sera séparée vers les rejets. Par comparaison avec le taux de rejets massique, il est possible de déterminer si cette fraction est préférentiellement rejetée ou acceptée : si l'efficacité de rejet est supérieure au taux de

rejets massique, alors la fraction est rejetée sinon elle est acceptée. Sur un graphique de l'efficacité de rejet en fonction du taux de rejets massique, la zone au-dessus de la première bissectrice correspond donc aux fractions préférentiellement rejetées alors que la zone en dessous correspond aux fractions préférentiellement acceptées. Dans le cas du panier à trous de 1,20 mm de diamètre (Figure 6.12), on constate que les fractions R14 et R28 sont plutôt rejetées alors que les autres fractions sont plutôt acceptées.

L'efficacité de rejet ne permet cependant pas de caractériser qualitativement la séparation réalisée par le tamis, c'est-à-dire de définir si les fibres préférentiellement rejetées sont plus ou moins bien séparées des fibres préférentiellement acceptées. Il est préférable d'utiliser l'efficacité de séparation.

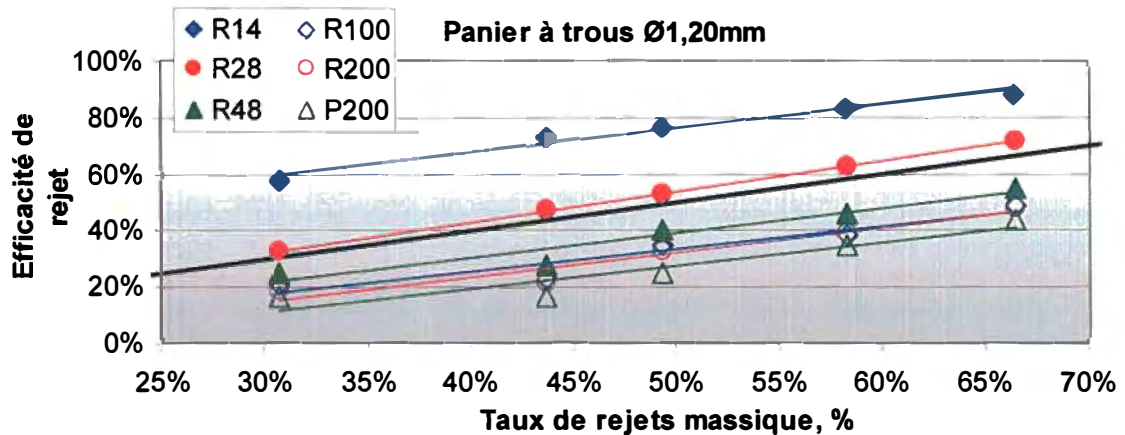


Figure 6.12 Efficacité de rejet en fonction du taux de rejets massique pour le panier à trous de 1,20 mm de diamètre à une consistance d'alimentation de 1%

L'efficacité de séparation peut être définie à partir de l'indice de fractionnement d'Olson (Éq. 3.26) comme étant la différence des efficacités de rejets de la fraction des fibres préférentiellement rejetées et de la fraction des fibres préférentiellement acceptées. On note alors qu'il existe un optimum de séparation pour un taux de rejets massique proche de 50% (Figure 6.13) pour le panier à trous de 1,20 mm de diamètre.

Ceci permet également de comparer les paniers entre eux (Figure 6.14). On constate que pour tous les paniers, un optimum apparaît pour un taux de rejets massique proche de 50%. Dans le cas du panier à trous de 0,25 mm de diamètre, cet optimum n'est pas at-

teint en raison du risque de bouchage croissant lié au fonctionnement avec des taux de rejets volumiques faibles, ceci est lié à l'effet barrière du panier qui génère un taux d'épaississement élevé.

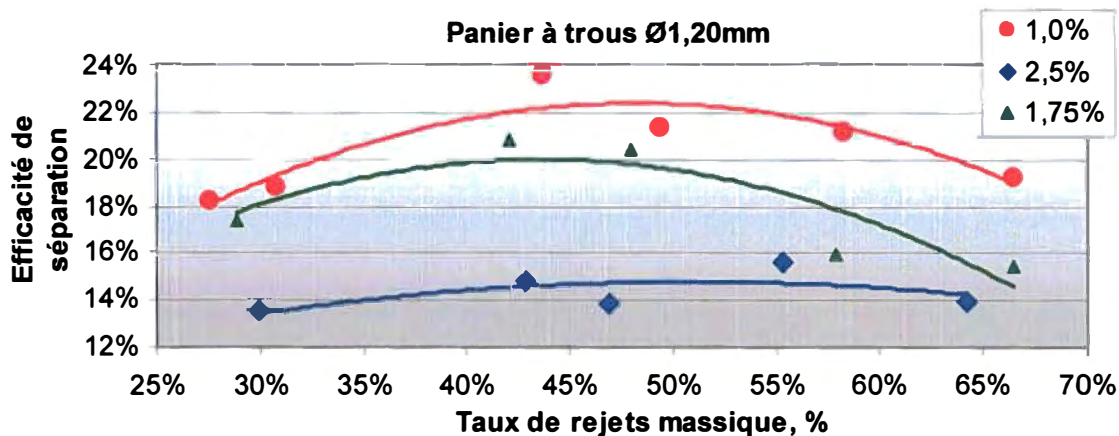


Figure 6.13 Efficacité de séparation le panier à trous de 1,20 mm de diamètre à différentes consistances d'alimentation

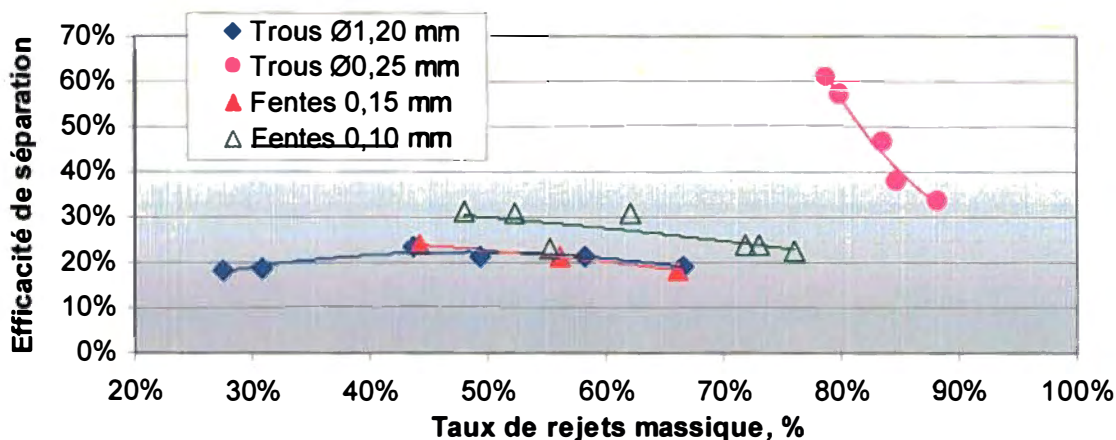


Figure 6.14 Efficacité de séparation pour les différents paniers à une consistance d'alimentation de 1%

6.1.3 Caractéristiques des pâtes fractionnées

Les propriétés des pâtes obtenues lors des essais de fractionnement sont indiquées dans les tableaux A.7 à A.9. Elles permettent d'évaluer l'effet de plusieurs paramètres dont le taux de rejets volumique. Pour chaque équipement, des paramètres différents ont été étudiés en fonction des objectifs principaux définis pour chaque séquence de fractionnement, cependant, le taux de rejets volumique a été conservé dans tous les cas car il

constitue un paramètre central dans l'opération de tout équipement de fractionnement. Les séries 100, 200 et 300 (Tableau A.7) permettent d'étudier l'effet de la consistance d'alimentation sur le panier à trous de 1,20 mm de diamètre. Les séries 80, 90 (Tableau A.7) et 800 (Tableau A.8) permettent d'étudier l'effet du stade de fractionnement sur l'hydrocyclone en termes de taux de fibres longues. Les séries 500 et 600 (Tableau A.8) permettent d'étudier l'effet de la largeur de fentes sur le fractionnement par panier à fentes.

6.1.3.1 Indice d'égouttage

La variation d'indice d'égouttage entre l'alimentation, les acceptés et les rejets fournit un indice important sur l'effet du fractionnement. L'indice d'égouttage est influencé par de nombreux facteurs dont la longueur, la surface spécifique et la conformabilité des fibres. Ces facteurs caractérisent en fait la capacité des fibres à former un matelas fibreux propre à s'opposer au passage de l'eau. L'indice d'égouttage des acceptés est inférieur à celui de l'alimentation tandis que l'indice d'égouttage de rejets est supérieur à celui de l'alimentation. Ce comportement reflète le fractionnement sur la base de la longueur : les rejets sont enrichis en fibre longues alors que les fibres plus courtes et les fines se concentrent dans les acceptés. Une différence plus élevée reflète donc un meilleur fractionnement. L'étude de l'effet des paramètres opérationnels est réalisée ici avec la différence entre les rejets et les acceptés des indices d'égouttage normalisés, c'est-à-dire le rapport entre l'indice d'égouttage des acceptés ou des rejets et l'indice d'égouttage de l'alimentation afin de prendre en compte les possibles variations entre les essais et surtout lors d'essais à des stades de fractionnement différents.

Dans le cas du tamis à trous de 1,20 mm de diamètre, la consistance d'alimentation et le taux de rejets volumiques ont tous deux des effets significatifs (Tableau 6.6) et montrent clairement que la différence d'indice d'égouttage entre les rejets et les acceptés est maximisée par une faible consistance et un taux de rejets volumique élevé. Dans le cas des tamis à fentes, l'usage de fentes de faible largeur augmente la différence d'indice d'égouttage (Tableau 6.7). L'effet du taux de rejets volumique est inversé par rapport au cas précédent et un faible taux de rejets volumique tend à augmenter la différence

d'indice d'égouttage. Ceci est en fait dû au fait que l'optimum de séparation n'est pas atteint dans l'intervalle d'étude et que celui-ci se situe en fait en deçà de la borne inférieure (Figure 6.14).

Tableau 6.6 Effet de la consistance d'alimentation et du taux de rejets volumiques sur l'indice d'égouttage pour le panier à trous de Ø 1, 20 mm

| Coef. Corrél. R ² | 0,96 | | | Représentation graphique |
|------------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------|--------------------------|
| Termes | Valeur ⁽¹⁾ | Écart-type ⁽¹⁾ | Seuil de rejet | |
| Moyenne | 0,546 | 0,00583 | < 0,0001 | |
| C _f | -0,0855 | 0,00732 | < 0,0001 | |
| R _v | 0,0485 | 0,00848 | < 0,0001 | |

Notes : ⁽¹⁾ Valeurs et écart-type pour les variables codées

Tableau 6.7 Effet de la largeur des fentes et du taux de rejets volumiques sur l'indice d'égouttage pour les paniers à fentes de 0, 15 et 0, 10 mm de largeur

| Coef. Corrél. R ² | 0,99 | | | Représentation graphique |
|--|-----------------------|---------------------------|----------------|--------------------------|
| Termes | Valeur ⁽²⁾ | Écart-type ⁽²⁾ | Seuil de rejet | |
| Moyenne | 1,03 | 0,005662 | < 0,0001 | |
| L _f ⁽¹⁾ [0, 10– 0, 15] | -0,118 | 0,005662 | 0,0002 | |
| R _v | -0,0533 | 0,00693 | 0,0046 | |

Notes : ⁽¹⁾ Largeur de fente (mm) – Valeurs ordinales

⁽²⁾ Valeurs et écart-type pour les variables codées

Tableau 6.8 Effet du taux de fibres longues et du taux de rejets volumiques sur l'indice d'égouttage pour l'hydrocyclone

| Coef. Corrél. R ² | 0,98 | | | Représentation graphique |
|-------------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------|--------------------------|
| Termes | Valeur ⁽²⁾ | Écart-type ⁽²⁾ | Seuil de rejet | |
| Moyenne | 1,32 | 0,0560 | < 0,0001 | |
| X _L ⁽¹⁾ | -1,08 | 0,0684 | < 0,0001 | |

Notes : ⁽¹⁾ Taux de fibres longues (R14+R28+R48), représentatif du stade de fractionnement (S1, P2 et P3)




⁽²⁾ Valeurs et écart-type pour les variables codées

Dans le cas de l'hydrocyclone (Tableau 6.8), le taux de rejets volumique n'est pas significatif, par contre le taux de fibres longues, ici utilisé pour représenter le stade de fractionnement, provoque une diminution de la différence d'indice d'égouttage lorsqu'il augmente, ce qui concorde avec le fait que l'hydrocyclone n'est sélectif que sur les fines. Une augmentation du taux de fibres longues signifie une diminution du taux de fibres courtes et des fines et donc réduit l'efficacité de l'hydrocyclone.

6.1.3.2 Longueur des fibres




De la même manière que pour l'indice d'égouttage, l'effet des paramètres opérationnels sur la longueur moyenne pondérée des fibres est étudié ici (Tableau 6.9). Les comportements observés sont relativement semblables. Notons que l'effet du taux de rejets volumique n'apparaît pas significatif en dépit du fractionnement sur la base de la longueur des fibres propre au tamis sous pression et de la séparation des fines que produit l'hydrocyclone. Ceci est probablement dû au fait que les variations de longueur sur l'intervalle d'étude sont relativement faibles et ne permettent pas de dégager clairement l'effet du taux de rejets volumique comme l'indique l'écart-type élevé.

Tableau 6.9 Effet de la consistance d'alimentation et du taux de rejets volumiques sur la longueur des fibres pour le panier à trous de Ø 1,20 mm

| Coef. Corrél. R^2 | 0,54 | | | Représentation graphique |
|---------------------|-----------------------|---------------------------|----------------|---|
| Termes | Valeur ⁽¹⁾ | Écart-type ⁽¹⁾ | Seuil de rejet | |
| Moyenne | 0,196 | 0,00933 | < 0,0001 |  |
| C_f | -0,0414 | 0,0117 | 0,0041 |  |
| R_v | 0,0161 | 0,0136 | 0,2585 |  |

Notes : ⁽¹⁾ Valeurs et écart-type pour les variables codées




Tableau 6.10 Effet de la largeur des fentes et du taux de rejets volumiques sur l'indice d'égouttage pour les paniers à fentes de 0,15 et 0,10 mm de largeur

| Coef. Corrél. R^2 | 0,92 | | | Représentation graphique |
|---------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------|---|
| Termes | Valeur ⁽²⁾ | Écart-type ⁽²⁾ | Seuil de rejet | |
| Moyenne | 0,310 | 0,00905 | < 0,0001 |  |
| $L_f^{(1)}$ [0,10 – 0,15] | -0,0491 | 0,00905 | 0,0123 |  |
| R_v | -0,0248 | 0,0111 | 0,1109 |  |

Notes : ⁽¹⁾ Largeur de fente (mm) – Valeurs ordinales

⁽²⁾ Valeurs et écart-type pour les variables codées

Tableau 6.11 Effet du taux de fibres longues et du taux de rejets volumiques sur l'indice d'égouttage pour l'hydrocyclone

| Coef. Corrél. R^2 | 0,65 | | | Représentation graphique |
|---------------------|-----------------------|---------------------------|----------------|---|
| Termes | Valeur ⁽²⁾ | Écart-type ⁽²⁾ | Seuil de rejet | |
| Moyenne | 0,0543 | 0,0173 | 0,0201 |  |
| $X_L^{(1)}$ | -0,0611 | 0,0215 | 0,0295 |  |
| R_v | 0,0572 | 0,0249 | 0,0616 |  |

Notes : ⁽¹⁾ Taux de fibres longues (R14+R28+R48), représentatif du stade de fractionnement (S1, P2 et P3)

⁽²⁾ Valeurs et écart-type pour les variables codées

6.1.3.3 Volume spécifique des fines

Les fines des fractions obtenues avec les différents paniers et avec l'hydrocyclone présentent de faibles valeurs de volume spécifique (Tableau 6.12). Notons que ces valeurs sont en accord avec les valeurs mesurées par Luukko [152] pour des fines floconneuses, ce qui fournit une indication importante sur la nature des fines de la pâte primaire de Papier Masson et explique la faible sélectivité de l'hydrocyclone, d'autant plus que la pâte de cette étude possède un indice d'égouttage nettement plus élevé que la pâte primaire utilisée par Luukko.

Tableau 6.12 Volume spécifique des fines dans les différents débits des équipements de fractionnement – Procédé (b)

| Essai | Panier | Ouvertures | Stade | Aliment. | Acceptés | Rejets |
|-------|--------------|---------------|-------|----------|----------|--------|
| | | | | mL | mL | mL |
| 401 | Tamis | Trous 1,20mm | P1 | 129 | – | 126 |
| 402 | Tamis | Trous 1,20mm | S1 | 129 | 146 | 152 |
| 701 | Tamis | Fentes 0,10mm | P2 | 124 | 124 | 128 |
| 702 | Tamis | Fentes 0,10mm | S2 | 128 | 130 | 136 |
| 803 | Hydrocyclone | Bec 11,91mm | P3 | 140 | 130 | 88 |

La nature des fines est confirmée par l'observation des fibres au microscope électronique à balayage (Figure 6.15) : la surface des fibres est lisse, la paroi ne présentant pas de fibrillation, par contre, on observe des décollements de la paroi primaire sous forme de plaques qui en se détachant, produisent des fines floconneuses.

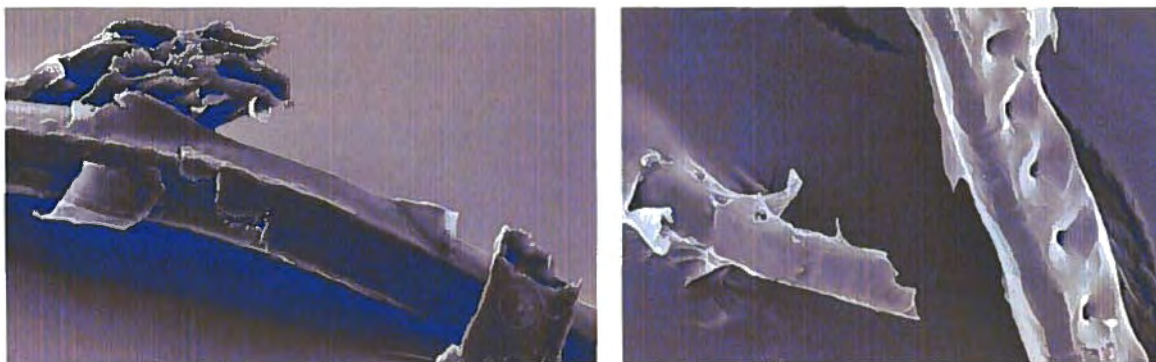


Figure 6.15 Fibres de pâte de premier stade observées au microscope électronique à balayage (×150)

6.2 Modélisation des tamis

La modélisation de tamis permet de prévoir la performance d'une séquence de fractionnement sans avoir à la réaliser et donc de réduire le nombre d'essai.

6.2.1 Taux de rejets massique

La probabilité de rétention pour chaque fraction du classeur Bauer McNett est calculée à l'aide des essais réalisés pour chaque type de panier (Figure 6.16). Le taux de rejets massique estimé à partir de ce modèle (Figure 6.17) offre une bonne corrélation avec le taux de rejets massique mesuré lors des essais.

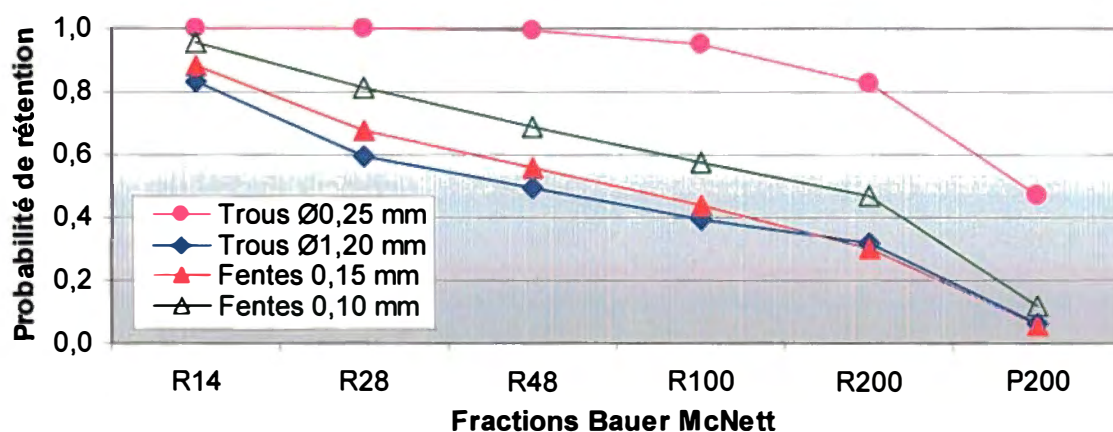


Figure 6.16 Probabilité de rétention des fractions Bauer McNett pour les différents paniers utilisés lors des essais en usine pilote

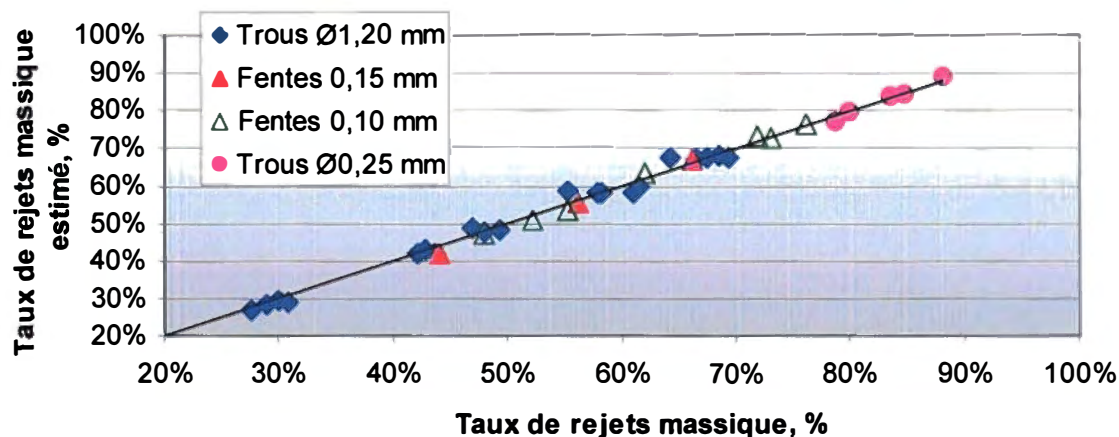


Figure 6.17 Comparaison du taux de rejets massique estimé par le modèle en fonction de taux de rejets massique mesuré

6.2.2 Probabilité de rétention

Les probabilités de rétention ne sont cependant pas nécessairement constantes et peuvent dépendre des paramètres opérationnels. Dans le cas du panier à trous, les essais réalisés permettent de mettre en évidence un effet significatif de la consistance d'alimentation et du taux de rejets volumique. La probabilité de rétention pour chaque fraction Bauer McNett peut donc s'exprimer sous la forme suivante (Éq. 6.9), à l'exception de la fraction P200 pour laquelle aucun effet des variables n'est significatif. Les coefficients sont indiqués dans le tableau ci-dessous (Tableau 6.13).

$$W_i = A_0 + B_1 C_f + B_2 R_v \quad \text{Éq. 6.9}$$

Tableau 6.13 Modèles de probabilité de rétention pour le panier à trous de Ø 1,20 mm (les seuils de rejet sont indiqués entre parenthèses)

| Classe <i>i</i> | A_0 | B_1 | B_2 | Coefficient de détermination R^2 |
|-----------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| R14 | 0,968 ($< 0,0001$) | -0,0700 ($< 0,0001$) | -0,0572 (0,0595) | 0,92 ($< 0,0001$) |
| R28 | 0,716 ($< 0,0001$) | -0,0398 (0,0002) | -0,187 (0,0001) | 0,83 ($< 0,0001$) |
| R48 | 0,559 ($< 0,0001$) | 0,0234 0,0030 | -0,319 ($< 0,0001$) | 0,92 ($< 0,0001$) |
| R100 | 0,375 ($< 0,0001$) | 0,0894 ($< 0,0001$) | -0,397 ($< 0,0001$) | 0,89 ($< 0,0001$) |
| R200 | 0,391 ($< 0,0001$) | 0,0702 ($< 0,0001$) | -0,551 ($< 0,0001$) | 0,88 ($< 0,0001$) |
| P200 | 0,0488 - | - - | - - | - - |

Dans le cas des paniers à fentes, l'effet du taux de rejets volumique n'est pas significatif probablement en raison du fait que les variations de la probabilité de rétention sont faibles sur l'intervalle d'étude et du même ordre que la variance expérimentale. Dans le cas du panier à trous de 0,25 mm de diamètre, l'effet du taux de rejets volumique est significatif seulement dans le cas des fractions R100 et R200. Les variations des probabilités de rétention des fractions R14, R28 et R48 sont très faibles en raison de l'effet barrière important du panier vis-à-vis des fibres longues et ne permettent pas de mettre en évidence l'effet du taux de rejets volumique.

Dans le cas de la fraction P200, l'effet des paramètres opérationnels est rarement significatif. Ceci est probablement dû à l'imprécision de la méthode de calcul de la fraction massique P200 qui est calculée par différence entre la masse totale introduite dans le classeur Bauer McNett et la masse des autres fractions. Par conséquent, cette fraction est influencée par les erreurs de mesure de chaque fraction mais aussi par celle de la masse totale de pâte introduite dans le classeur.

6.3 Raffinage

6.3.1 Fractions raffinées

Suite aux essais de fractionnement, les essais offrant les meilleures performances lors des procédés (b) et (c) sont répétés et les pâtes correspondantes sont épaissies avec un tamis statique incliné puis centrifugées à une siccité comprise entre 20% et 24% pour effectuer les essais de raffinage. Dans le cas du procédé (b), l'hydrocyclone n'a pas été employé. Trois fractions de la pâte de premier stade sont définies : la pâte « S1 » correspondant aux rejets du stade S1, la pâte « S2 » correspondant aux rejets du stade S2 et la pâte « A » correspondant aux acceptés mélangés des stades P2 et S2. Les pâtes S1, S2 sont raffinées à haute consistance en un et en deux stades ainsi qu'à basse consistance, la pâte A est raffinée à haute consistance en un seul stade en raison de son bas indice d'égouttage initial ainsi qu'à basse consistance.

Lors de chaque série de raffinage à haute consistance, l'énergie spécifique de raffinage est progressivement augmentée en contrôlant la distance d'entrefer. Des séries de 11 raffinages sont ainsi réalisées. Les pâtes raffinées sont ensuite désintégrées à chaud pour en retirer la latence puis quatre échantillons de chaque série sont sélectionnés. Ces échantillons sont choisis en fonction de leur indice d'égouttage de manière à couvrir le plus uniformément possible l'intervalle de 50 à 200 mL. Lors du procédé (c), le raffinage à haute consistance a été réalisé seulement en un stade et, d'autre part, trois pâtes raffinées à basse consistance ont été conservées au lieu de quatre afin de réduire le volume de l'expérimentation.

6.3.2 Propriétés de fractions raffinées

Les propriétés des pâtes raffinées ainsi que leurs caractéristiques mécaniques et optiques sont indiquées dans les tableaux A.10 à A.23.

L'indice d'égouttage des pâtes diminue au cours du raffinage (Figure 6.18). Lorsqu'elles sont raffinées à haute consistance, que ce soit en un ou deux stades, les fractions de fibres longues S1 et S2 conservent un indice d'égouttage plus élevé que celui de la pâte entière pour une même quantité d'énergie spécifique de raffinage. Lors du raffinage en un stade, la réduction de l'indice d'égouttage est cependant plus importante et traduit l'effet plus sévère subit par les fibres longues que lors du raffinage de la pâte entière. Inversement, dans le cas de la fraction de fibres courtes S1, la réduction d'indice d'égouttage est moins rapide. Il semble donc que l'absorption d'énergie de raffinage soit plus importante pour les fibres longues que pour les fibres courtes. Le raffinage à haute consistance en deux stades permet de compenser cette différence pour les fractions de fibres longues mais au prix d'une plus grande consommation d'énergie. À basse consistance, un comportement similaire peut également être constaté avec une consommation d'énergie notablement plus faible.

Du point de vue de la longueur des fibres, la cinétique de réduction de la longueur moyenne pondérée est similaire à celle de l'indice d'égouttement. Cependant, l'absence de différence entre le raffinage à haute consistance en un stade et en deux stades (Figure 6.19) suggère un traitement plus intensif des fibres, non seulement de coupe, mais aussi de délaminage de la surface des fibres. Dans le cas de la pâte entière, le traitement des fibres longues est partiellement réduit par la présence des fibres courtes et des fines qui absorbent une partie de l'énergie. Dans le cas du raffinage à haute consistance en deux stades, l'intensité de raffinage de chaque stade est probablement plus faible, ce qui préserve les fibres mais nécessite comparativement une plus grande quantité d'énergie pour générer un même niveau de développement des fibres. À basse consistance par contre, la coupe des fibres des fractions de fibres longues est plus rapide.

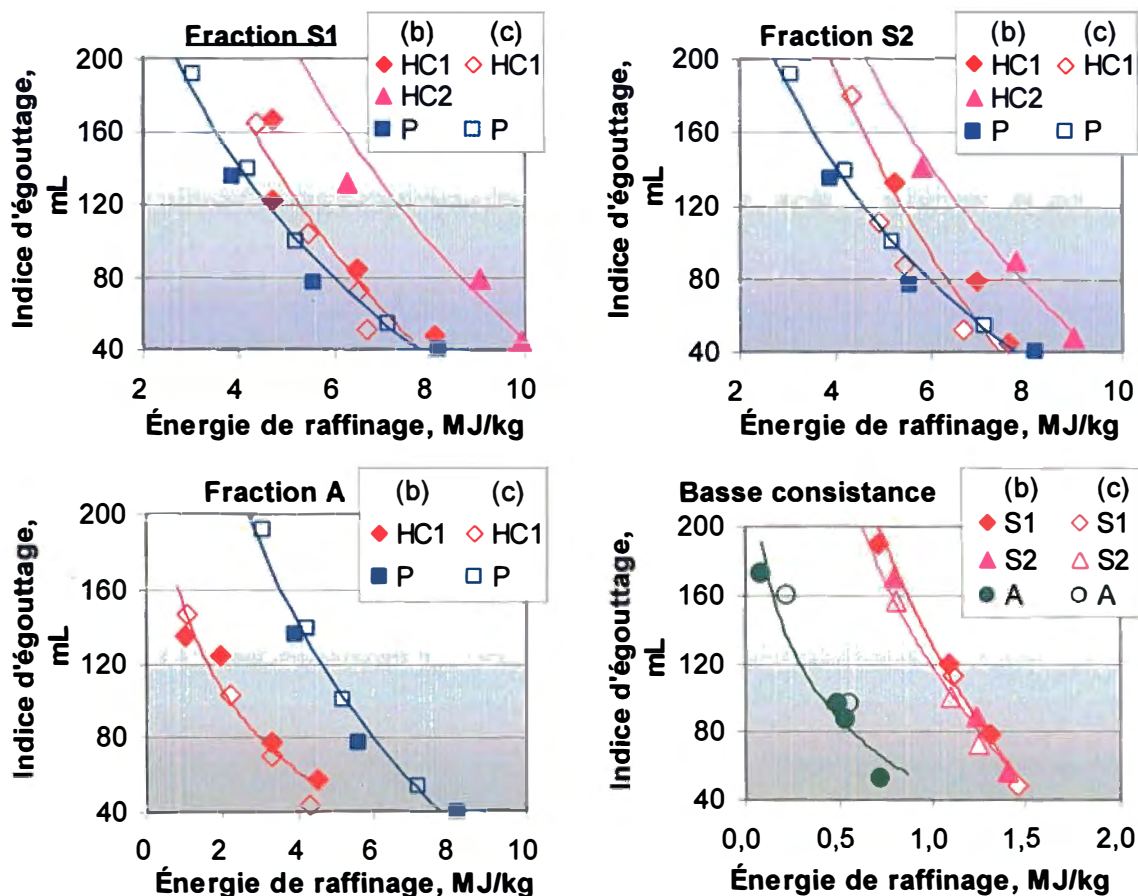


Figure 6.18 Évolution de l'indice d'égouttage au cours du raffinage pour les différentes fractions (HC1 = haute consistance en 1 stade, HC2 = haute consistance en 2 stades, P = pâte primaire)

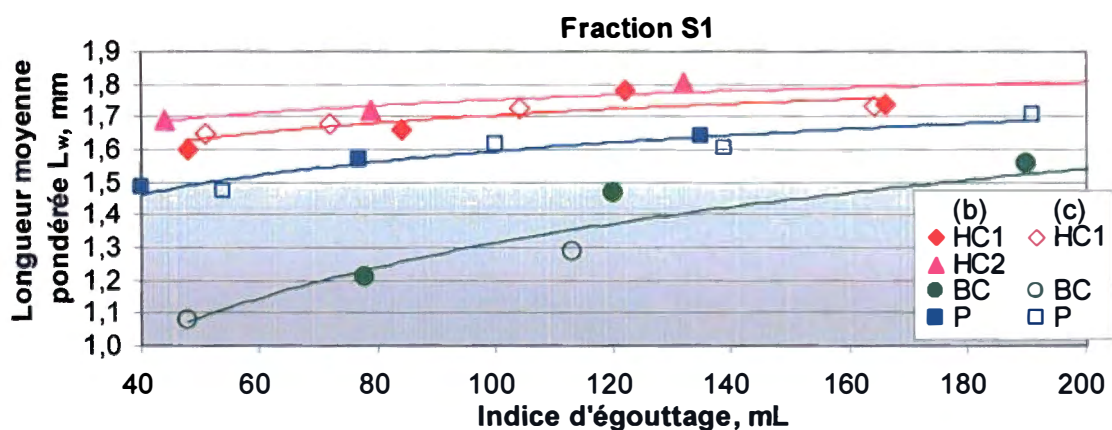


Figure 6.19 Évolution de la longueur moyenne pondérée des fibres au cours du raffinage pour la fraction S1 (HC1 = haute consistance en 1 stade, HC2 = haute consistance en 2 stades, BC = basse consistance, P = pâte primaire)

Dans le cas des fibres courtes, la réduction de longueur des fibres est moins rapide à haute consistance qu'à basse consistance et également moins rapide que pour la pâte entière raffinée à haute consistance en un stade (Figure 6.20). Ceci appuie les observations précédentes relatives à un mode d'action différent du raffinage sur les fibres en fonction de leur longueur. Le coefficient de diffusion des pâtes confirme également cet aspect (Figure 6.21). En effet, ce dernier est sensible à la présence de fibres courtes et de fines qui homogénéisent la feuille.

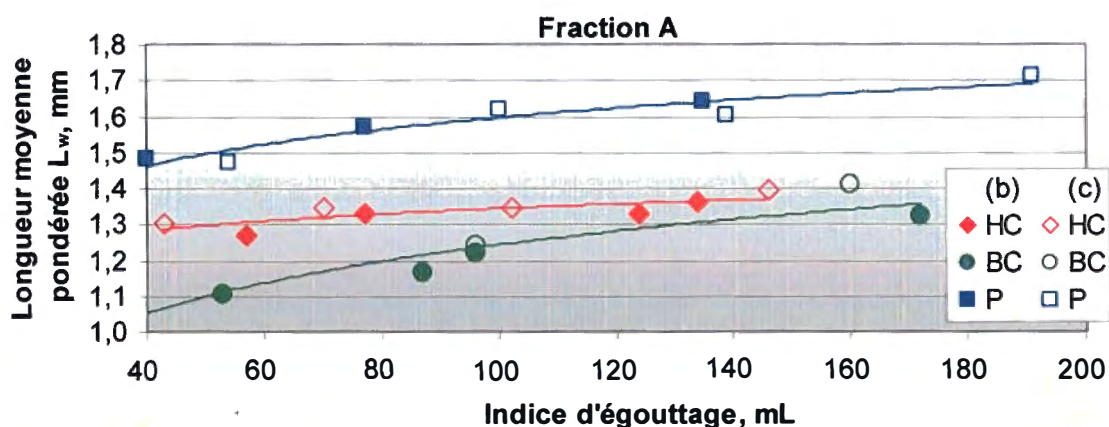


Figure 6.20 Évolution de la longueur moyenne pondérée des fibres au cours du raffinage pour la fraction A (HC = haute consistance, BC = basse consistance, P = pâte primaire)

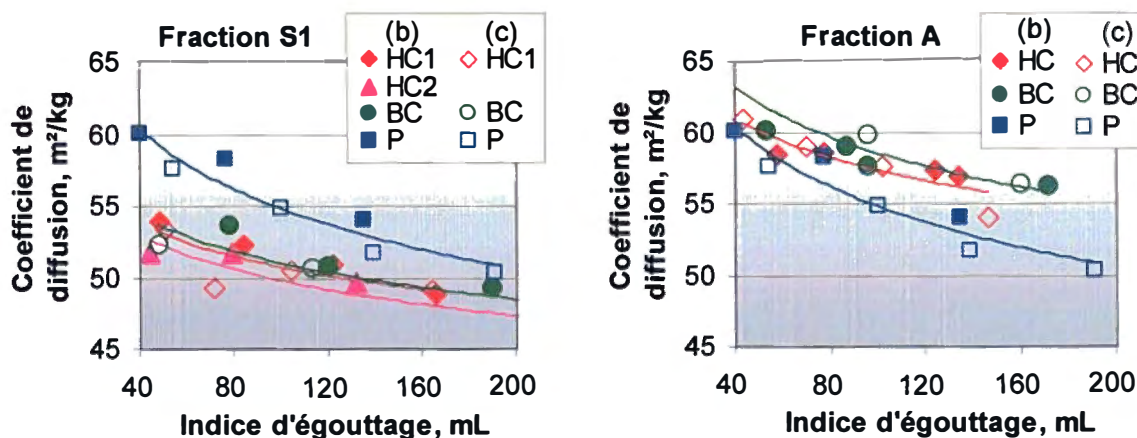


Figure 6.21 Évolution du coefficient de diffusion de la lumière au cours du raffinage pour les fractions S1 et A (HC = haute consistance, BC = basse consistance, P = pâte primaire)

Ce mode d'action produit un impact direct sur les propriétés de résistance mécanique des fibres. Ainsi la résistance à la déchirure qui dépend fortement de la longueur des fibres présente un comportement très similaire (Figure 6.22).

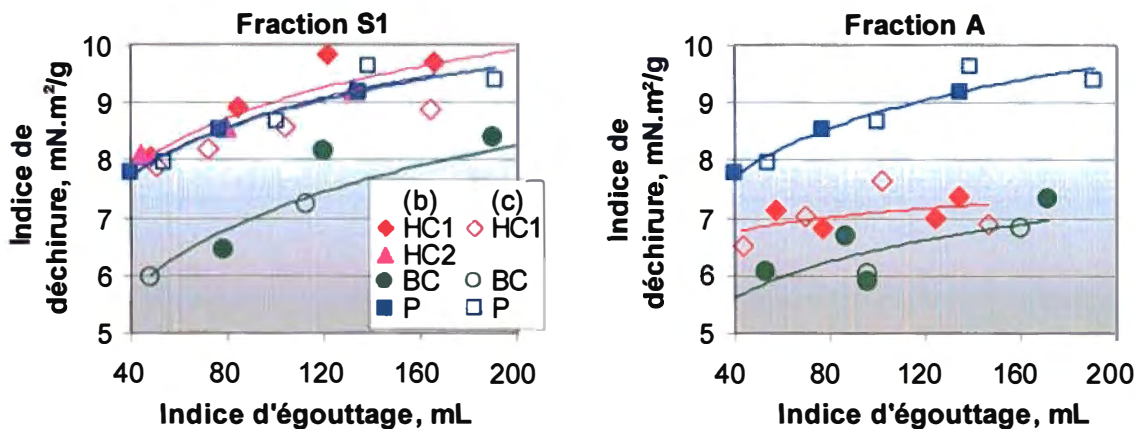


Figure 6.22 Évolution de l'indice de déchirure au cours du raffinage pour les fractions S1 et A (HC = haute consistance, BC = basse consistance, P = pâte primaire)

Notons que l'indice de déchirure présente souvent une valeur optimum au cours du raffinage. La décroissance monotone observée ici suggère que cet optimum a été dépassé. Ce n'est pas le cas, par contre, pour les autres propriétés physiques où on observe une augmentation au cours du raffinage et donc un comportement opposé à celui de l'indice de résistance à la déchirure.

On peut également remarquer que la fraction S2 présente un comportement similaire à la fraction S1 en tant que fractions de fibres longues. Par contre les propriétés physiques de cette pâte sont très proches de celle de la pâte primaire raffinée, autant lors du raffinage en un stade comme en deux stades. Le raffinage à basse consistance par contre produit une pâte dont les caractéristiques mécaniques sont significativement inférieures à celle de la pâte primaire raffinée.

6.4 Recombinaison de la pâte entière

6.4.1 Proportions de mélanges

Les proportions de mélanges sont déterminées par reconstitution de la séquence continue de fractionnement à partir des essais réalisés de manière discontinue. En raison des erreurs de bilan de masse, ces proportions doivent être corrigées à chaque stade de fractionnement. Différentes méthodes ont été présentées précédemment (§4.7.1). Les bilans de masse des procédés de fractionnement (b) et (c) sont présentés dans la figure A.1 et dans la figure A.2 respectivement. Les proportions obtenues pour chaque procédé sont indiquées dans le tableau 6.14. Dans le cas de la séquence (b), qui a été réalisée au début de cette étude, les proportions utilisées, sont celles du bilan de masse sans corrections, soit 38%, 31% et 30% pour les fractions S1, S2 et A respectivement, et sont donc sensiblement différentes de celles présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 6.14 Proportions massiques de mélanges des procédés de fractionnement (b) et (c)

| | S1 | S2 | A |
|-------------|-----------|-----------|----------|
| Procédé (b) | 46 | 30 | 24 |
| Procédé (c) | 51 | 15 | 34 |

6.4.2 Qualité de la pâte reconstituée

6.4.2.1 Sélection des mélanges

Les mélanges ont été sélectionnés selon des critères différents pour les procédés (b) et (c). Dans le cas du procédé (b), les propriétés de la pâte recombinaison ont été estimées et, parmi les mélanges offrant des propriétés de résistance mécanique optimales à un indice d'égouttage de 100 mL (± 10 mL), 18 ont été sélectionnés à 3 niveaux d'énergie spécifique de raffinage (800, 1200 et 1600 kWh/tmsa). Les mélanges sélectionnés sont indiqués dans le tableau 6.15.

Tableau 6.15 Mélanges sélectionnés pour la séquence de fractionnement (b)

| Mélange | S1 | S2 | A | Énergie spécifique ⁽¹⁾ | |
|---------|---------|---------|--------|-----------------------------------|-------|
| | | | | kWh/tmsa | MJ/kg |
| 1 | S1-5 | S2-B55 | A-3 | 800 | 2,9 |
| 2 | S1-24 | S2-B55 | A-B61 | 800 | 2,9 |
| 7 | S1-B143 | S2-10 | A-B30 | 800 | 2,9 |
| 8 | S1-B95 | S2-10 | A-B61 | 800 | 2,9 |
| 13 | S1-B95 | S2-10 | A-B120 | 800 | 2,9 |
| 14 | S1-B95 | S2-29 | A-B75 | 800 | 2,9 |
| 3 | S1-5 | S2-29 | A-B61 | 1200 | 4,3 |
| 6 | S1-11 | S2-23 | A-B75 | 1200 | 4,3 |
| 9 | S1-8 | S2-25 | A-B61 | 1200 | 4,3 |
| 12 | S1-24 | S2-6 | A-B30 | 1200 | 4,3 |
| 15 | S1-B193 | S2-31 | A-9 | 1200 | 4,3 |
| 18 | S1-30 | S2-B170 | A-1 | 1200 | 4,3 |
| 4 | S1-4 | S2-29 | A-9 | 1600 | 5,8 |
| 5 | S1-28 | S2-10 | A-B120 | 1600 | 5,8 |
| 10 | S1-8 | S2-29 | A-3 | 1600 | 5,8 |
| 11 | S1-30 | S2-5 | A-3 | 1600 | 5,8 |
| 16 | S1-24 | S2-29 | A-7 | 1600 | 5,8 |
| 17 | S1-30 | S2-25 | A-B120 | 1600 | 5,8 |

Note : ⁽¹⁾ Énergie spécifique de raffinage du stade primaire non-incluse

Dans le cas du procédé (c), un plan factoriel complet à 2 niveaux et à 4 facteurs a été choisi pour étudier l'effet du procédé de raffinage (basse consistance, haute consistance) et le niveau de raffinage de chaque fraction de fibres longues. La fraction de fibres courtes raffinée est ensuite choisie parmi deux niveaux de raffinage pour obtenir un indice d'égouttage final de 100 mL (± 10 mL). Le plan d'expérience et les mélanges sélectionnés sont indiqués dans le tableau 6.16.

Chacune de ces deux méthodes correspond à une approche spécifique pour la sélection des mélanges : dans le premier cas, les mélanges avec un meilleur potentiel sont sélectionnés par estimation des propriétés physiques des pâtes, dans le deuxième cas, une

étude systématique des variables du procédé de raffinage est menée afin de déterminer les conditions avec lesquelles les propriétés de la pâte reconstituée sont optimisées.

Tableau 6.16 Mélanges sélectionnés pour la séquence de fractionnement (c)

| Mélange | X ₁ ⁽¹⁾ | X ₂ ⁽¹⁾ | X ₃ ⁽²⁾ | X ₄ ⁽²⁾ | S1 | S2 | A |
|---------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|-------|-----|
| 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | RL1-8 | L2-8 | A1 |
| 2 | -1 | -1 | -1 | 1 | RL1-8 | L2-4 | A1 |
| 3 | -1 | -1 | 1 | -1 | RL1-5 | L2-8 | A10 |
| 4 | -1 | -1 | 1 | 1 | RL1-5 | L2-4 | A10 |
| 5 | -1 | 1 | -1 | -1 | RL1-8 | L2-B3 | A1 |
| 6 | -1 | 1 | -1 | 1 | RL1-8 | L2-B2 | A1 |
| 7 | -1 | 1 | 1 | -1 | RL1-5 | L2-B3 | A10 |
| 8 | -1 | 1 | 1 | 1 | RL1-5 | L2-B2 | A10 |
| 9 | 1 | -1 | -1 | -1 | L1-B3 | L2-8 | A1 |
| 10 | 1 | -1 | -1 | 1 | L1-B3 | L2-4 | A1 |
| 11 | 1 | -1 | 1 | -1 | L1-B0 | L2-8 | A10 |
| 12 | 1 | -1 | 1 | 1 | L1-B0 | L2-4 | A10 |
| 13 | 1 | 1 | -1 | -1 | L1-B3 | L2-B3 | A1 |
| 14 | 1 | 1 | -1 | 1 | L1-B3 | L2-B2 | A1 |
| 15 | 1 | 1 | 1 | -1 | L1-B0 | L2-B3 | A10 |
| 16 | 1 | 1 | 1 | 1 | L1-B0 | L2-B2 | A10 |

Notes : ⁽¹⁾ Procédé de raffinage des fractions S1 et S2 respectivement (Haute consistance = -1, Basse consistance = +1)

⁽²⁾ Niveau de raffinage des fractions S1 et S2 respectivement (Fortement raffinée = -1, Peu raffinée = +1)

6.4.2.2 Procédé de raffinage des fractions

Les propriétés des mélanges sont indiquées dans le tableau A.24 pour le procédé (b) et dans le tableau A.25 pour le procédé (c).

Les propriétés de la pâte reconstituée sont dépendantes de la manière avec laquelle les fractions ont été raffinées. Ceci est notable pour l'indice de rupture (Figure 6.23) mais aussi pour les autres propriétés mécaniques et optiques, notamment le coefficient de diffusion. Dans le cas de l'allongement à la rupture et l'absorption d'énergie de traction, il est plus difficile de mettre en évidence un effet significatif. Ceci est probablement dû au

fait que la mesure de l'allongement à la rupture sur formette de laboratoire présente une grande variabilité en raison de sa sensibilité à la présence de points faibles dans la feuille qui provoquent éventuellement une rupture prématurée de l'éprouvette.

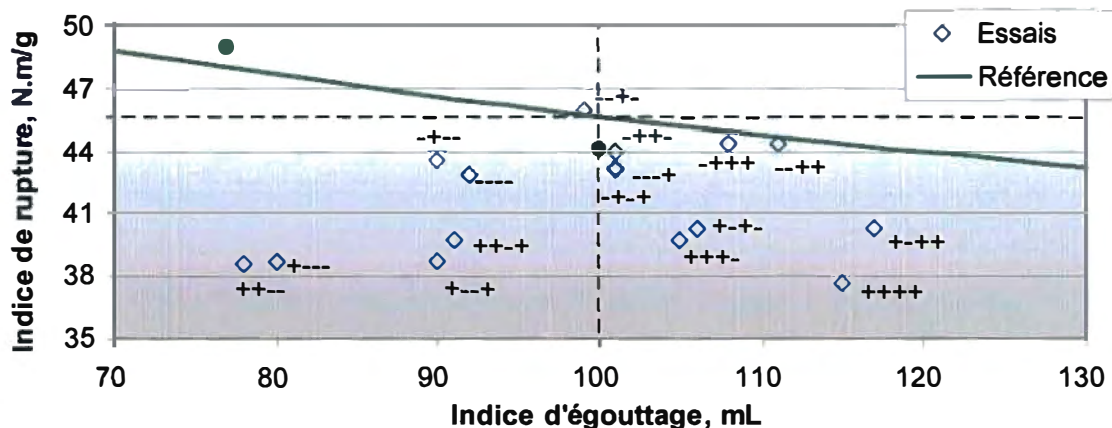


Figure 6.23 Effet du procédé de raffinage des fractions sur l'indice de rupture – Séquence (c) (les étiquettes indiquent le procédé de raffinage et le niveau de raffinage des fractions de fibres longues S1 et S2 respectivement, conformément au plan d'expérience indiqué dans le tableau 6.16)

Le raffinage des fractions de fibres longues à haute consistance permet d'obtenir de meilleures propriétés que le raffinage à basse consistance (Tableau 6.17). Un niveau de raffinage élevé des fibres longues favorise également de meilleures propriétés, surtout lorsque l'une ou les deux fractions de fibres longues sont raffinées à haute consistance. Lorsque les fractions de fibres longues sont raffinées à basse consistance, un niveau de raffinage élevé de ces fractions est alors également préjudiciable. Ce dernier point est probablement lié au fait que, dans cette étude menée sur les fractions obtenues avec la séquence (c), la fraction de fibres courtes a été raffinée à haute consistance seulement. Donc un faible développement des fractions de fibres longues à basse consistance est compensé par un plus fort développement de la fraction de fibres courtes à haute consistance, ce qui semble compenser la diminution des propriétés des pâtes. De plus, l'effet du niveau de raffinage de la fraction S2 est généralement non significatif en raison de la faible proportion de cette pâte dans le mélange (15%), comparativement à celle de la fraction S1 (51%) qui représente plus de la moitié de la pâte reconstituée.

Tableau 6.17 Effets du type de raffinage et du niveau de raffinage des fractions sur les propriétés de la pâte reconstituée – Séquence (c)

| Propriétés | Modèle (1) | Moyenne | Effets principaux | | | | Interactions | | |
|--------------------------|-------------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | | X ₁ ⁽²⁾ | X ₂ ⁽²⁾ | X ₃ ⁽³⁾ | X ₄ ⁽³⁾ | X ₁ .X ₂ | X ₁ .X ₃ | X ₂ .X ₃ |
| Indice de rupture | 0,947 < 0,0001 | 41,6 < 0,0001 | -2,36 < 0,0001 | -0,244 0,1930 | 0,519 0,0132 | – | – | – | -0,431 0,0320 |
| Allongement à la rupture | 0,797 0,0008 | 2,02 < 0,0001 | -0,143 0,0001 | -0,009 0,7242 | 0,025 0,3233 | – | – | – | -0,065 0,0211 |
| Absorption d'énergie | 0,890 < 0,0001 | 34,5 < 0,0001 | -4,92 < 0,0001 | -0,352 0,5425 | 0,967 0,1127 | – | – | – | -1,67 0,0127 |
| Indice d'éclatement | 0,881 < 0,0001 | 2,48 < 0,0001 | -0,208 < 0,0001 | -0,069 0,0187 | 0,012 0,6465 | – | – | -0,058 0,0415 | – |
| Indice de déchirure | 0,911 < 0,0001 | 8,12 < 0,0001 | -0,481 < 0,0001 | -0,194 0,0050 | 0,260 0,0007 | – | -0,103 0,0914 | – | – |
| Coefficient de diffusion | 0,769 0,0016 | 54,9 < 0,0001 | -0,338 0,0595 | – | -0,600 0,0033 | -0,613 0,0025 | – | -0,313 0,0778 | – |

Notes : Les nombres en petits caractères correspondent aux seuils de rejet. Lorsqu'une interaction est significative, les effets principaux correspondants sont conservés dans le modèle même s'ils ne sont pas significatifs.

(1) Coefficient de détermination du modèle, (2) Procédé de raffinage des fractions S1 et S2 respectivement, (3) Niveau de raffinage des fractions S1 et S2 respectivement

Cette approche de la sélection des mélanges met bien en évidence l'effet du raffinage des fractions mais ne montre pas le potentiel de développement de la pâte par rapport à la pâte entière raffinée à haute consistance. Ce dernier aspect est mieux observé par la sélection de mélanges présentant un meilleur potentiel. Dans le cas de l'indice de rupture (Figure 6.24), les mélanges dont les fractions de fibres longues sont raffinées à haute consistance présentent des valeurs supérieures à celles de la pâte de référence. Les mélanges qui optimisent l'indice de rupture sont différents de ceux qui optimisent l'indice de déchirure (Figure 6.25). Dans cette dernière propriété, le raffinage à haute consistance en deux stades est un facteur important pour l'obtention de valeur élevée. Ceci est probablement dû au fait que le raffinage en deux stades procure un raffinage moins intense et permet de préserver la longueur des fibres (Figure 6.19).

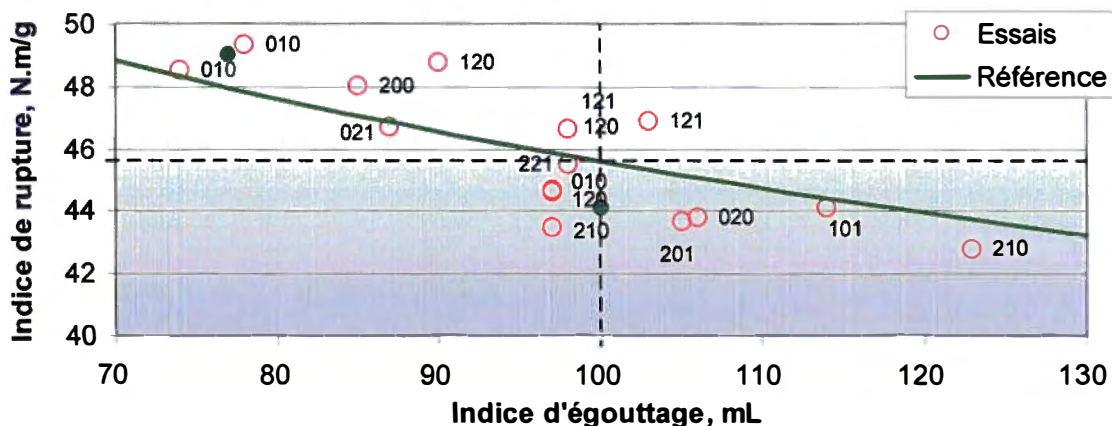


Figure 6.24 Effet du procédé de raffinage des fractions sur l'indice de rupture – Séquence (b) (les étiquettes indiquent le procédé de raffinage des fractions S1, S2 et A respectivement : 0 = basse consistance, 1 = haute consistance en un stade, 2 = haute consistance en deux stades)

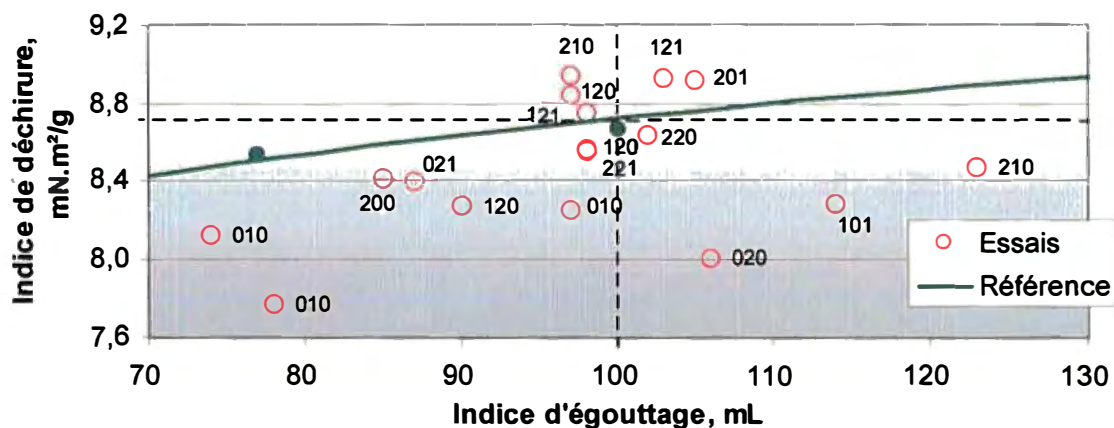


Figure 6.25 Effet du procédé de raffinage des fractions sur l'indice de déchirure – Séquence (b) (les étiquettes indiquent le procédé de raffinage des fractions S1, S2 et A respectivement : 0 = basse consistance, 1 = haute consistance en un stade, 2 = haute consistance en deux stades)

6.4.2.3 Prédiction des propriétés des mélanges

La simulation des mélanges qui n'ont pas été réalisés permet d'obtenir une vision plus complète des propriétés des mélanges. L'estimation des propriétés par des combinaisons linéaires ou semi-logarithmiques utilisant uniquement les proportions de mélange n'est pas satisfaisante. En effet, les mélanges sélectionnés avec les fractions de la séquence (b) ont été sélectionnés de cette manière en supposant que leur propriétés seraient supérieu-

res à celles de la pâte primaire raffinées, ce qui n'est pas le cas. Les propriétés des mélanges sont donc estimées en utilisant une corrélation du type

$$\ln(Y) = d + \sum_i p_i \left[a_i \ln(E_i) + b_i \ln(CSF_i) + c_i \ln(IR_i) \right] \quad \text{Éq. 6.10}$$

| | | | |
|----|---------|---|--|
| Où | Y | = | Propriété estimée |
| | i | = | Indice caractéristique des fractions S1, S2 et A |
| | p_i | = | Proportion de la fraction i dans le mélange |
| | E_i | = | Énergie spécifique de raffinage de la fraction i (MJ/kg) |
| | CSF_i | = | Indice d'égouttage de la fraction i (mL) |
| | IR_i | = | Indice de rupture de la fraction i (N.m/g) |

Ce modèle met en œuvre trois propriétés importantes : l'énergie spécifique de raffinage qui est caractéristique du procédé de raffinage, l'indice d'égouttage qui est spécifique des pâtes obtenues avec chaque fraction raffinée et, finalement, l'indice de rupture qui est caractéristique des feuilles de laboratoire. Ces trois propriétés sont choisies car elles offrent les meilleures corrélations avec les propriétés des mélanges réalisés. Les coefficients de chaque modèle sont déterminés par la méthode des moindres carrés. Ils sont indiqués dans le tableau 6.18. Pour chacune de propriétés modélisées, on obtient des modèles très satisfaisants, avec des seuils de significativité proches du seuil de rejet pour un intervalle de confiance de 95%. Pour les coefficients des modèles, on obtient également des seuils de significativité inférieurs au seuil de rejet, à l'exception de quelques cas très ponctuels.

Tableau 6.18 Modèles prédictifs des propriétés des mélanges

| | | CSF ⁽²⁾ | V _m ⁽³⁾ | IR ⁽⁴⁾ | All ⁽⁵⁾ | TEA ⁽⁶⁾ | IE ⁽⁷⁾ | ID ⁽⁸⁾ | S ⁽⁹⁾ |
|-----------------------|----------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|
| | Unités | mL | cm ³ /g | N.m/g | % | J/m ² | kPa.m ² /g | mN.m ² /g | m ² /kg |
| Modèle ⁽¹⁾ | | 84,3% | 93,3% | 87,1% | 55,9% | 72,5% | 85,5% | 80,8% | 70,8% |
| | | 0,0915 | 0,0290 | 0,0506 | 0,0189 | 0,0236 | 0,0673 | 0,0563 | 0,0157 |
| Fraction S1 | a ₁ | 0,137 < 0,0001 | 0,049 < 0,0001 | -0,011 0,1089 | 0,092 < 0,0001 | 0,155 < 0,0001 | 0,101 < 0,0001 | 0,095 < 0,0001 | 0,007 0,0129 |
| | b ₁ | 0,807 < 0,0001 | 0,129 < 0,0001 | 0,027 0,0031 | -0,033 0,0411 | -0,0050 0,4167 | -0,149 < 0,0001 | 0,198 < 0,0001 | -0,061 < 0,0001 |
| | c ₁ | -1,242 < 0,0001 | -0,541 < 0,0001 | 1,265 < 0,0001 | 0,628 < 0,0001 | 1,606 < 0,0001 | 0,910 < 0,0001 | 0,326 < 0,0001 | 0,042 < 0,0001 |
| Fraction S2 | a ₂ | 0,109 < 0,0001 | 0,047 < 0,0001 | -0,070 < 0,0001 | 0,025 0,0872 | 0,0048 0,4208 | 0,092 < 0,0001 | 0,068 < 0,0001 | -0,019 < 0,0001 |
| | b ₂ | 0,685 < 0,0001 | 0,015 0,0032 | -0,016 0,0415 | -0,025 0,0915 | -0,075 0,0021 | -0,287 < 0,0001 | 0,107 < 0,0001 | -0,069 < 0,0001 |
| | c ₂ | -1,570 < 0,0001 | -0,581 < 0,0001 | 1,315 < 0,0001 | 0,420 < 0,0001 | 1,678 < 0,0001 | 0,749 < 0,0001 | -0,100 < 0,0001 | 0,108 < 0,0001 |
| Fraction A | a ₃ | 0,071 0,0001 | 0,016 0,0015 | -0,056 < 0,0001 | -0,038 0,0242 | -0,040 0,0496 | 0,034 0,0044 | 0,049 < 0,0001 | -0,017 < 0,0001 |
| | b ₃ | 0,124 < 0,0001 | 0,068 < 0,0001 | 0,010 0,1330 | -0,095 < 0,0001 | 0,062 0,0071 | -0,436 < 0,0001 | -0,338 < 0,0001 | 0,017 < 0,0001 |
| | c ₃ | -3,150 < 0,0001 | -0,736 < 0,0001 | 1,554 < 0,0001 | 0,856 < 0,0001 | 2,636 < 0,0001 | 0,147 < 0,0001 | -1,363 < 0,0001 | 0,261 < 0,0001 |
| d | | 9,165 < 0,0001 | 2,892 < 0,0001 | -1,424 < 0,0001 | -1,602 < 0,0001 | -3,884 < 0,0001 | -0,279 < 0,0001 | 3,162 < 0,0001 | 3,702 < 0,0001 |

Notes : Les nombres en petits caractères correspondent aux seuils de rejet.

- ⁽¹⁾ Coefficient de détermination du modèle, ⁽²⁾ Indice d'égouttage, ⁽³⁾ Volume massique, ⁽⁴⁾ Indice de résistance à la rupture par traction, ⁽⁵⁾ Allongement à la rupture, ⁽⁶⁾ Absorption de l'énergie de traction, ⁽⁷⁾ Indice de résistance à l'éclatement, ⁽⁸⁾ Indice de résistance à la déchirure, ⁽⁹⁾ Coefficient de diffusion de la lumière

6.4.2.4 Énergie spécifique de raffinage

L'énergie spécifique appliquée à la pâte reconstituée dépend à la fois du procédé de raffinage utilisé pour raffiner les fractions postérieurement au fractionnement et au niveau de développement de chacune de ces fractions. Notamment, le raffinage à haute consistance en deux stades est plus énergivore que le raffinage en un stade et nettement plus que le raffinage à basse consistance.

Les propriétés physiques telles que l'indice de résistance à l'éclatement et l'indice de résistance à la déchirure dépendent fortement de l'énergie spécifique de raffinage (Figure 6.26). Cet aspect est très probablement lié à la dépendance qui a été mentionnée auparavant, d'une part, entre les procédés de raffinage et leur consommation d'énergie et, d'autre part, entre les procédés de raffinage et la réduction de longueur des fibres qu'ils occasionnent. Il montre également que pour optimiser ces propriétés, il est nécessaire de faire usage de raffinage à haute consistance, surtout en ce qui concerne les fractions de fibres longues, ce qui signifie une consommation accrue d'énergie spécifique de raffinage par rapport au procédé conventionnel.

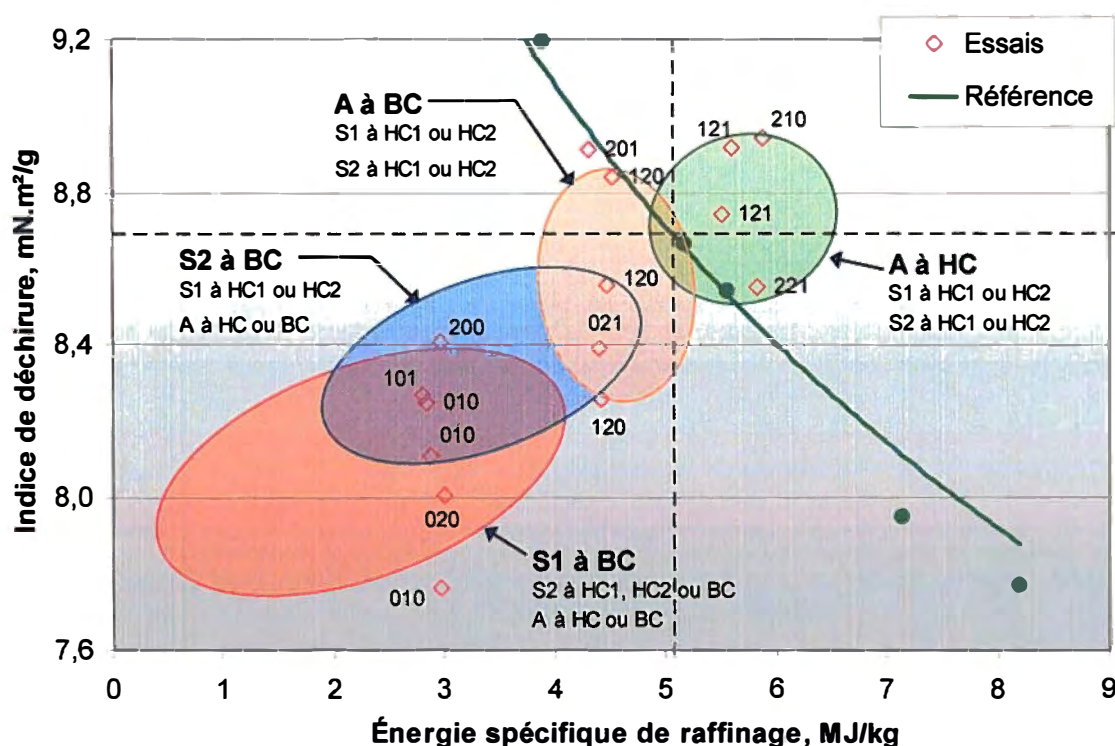


Figure 6.26 Relation entre l'énergie spécifique de raffinage et l'indice de résistance à la déchirure (les étiquettes indiquent le procédé de raffinage des fractions S1, S2 et A respectivement : 0 = BC, 1 = HC1, 2 = HC2, les ellipses correspondent au lieu des points fournis par le modèle dans les conditions de raffinage spécifiées)

Dans le cas de l'indice de résistance à la rupture, il n'y a pas de dépendance directe avec l'énergie spécifique de raffinage (Figure 6.27), ce qui offre une plus grande latitude pour l'optimisation de cette propriété par rapport à la consommation d'énergie. Cependant, de

même que pour les autres propriétés, le raffinage à haute consistance des fibres longues permet cependant d'obtenir de meilleures propriétés que le raffinage à basse consistance.

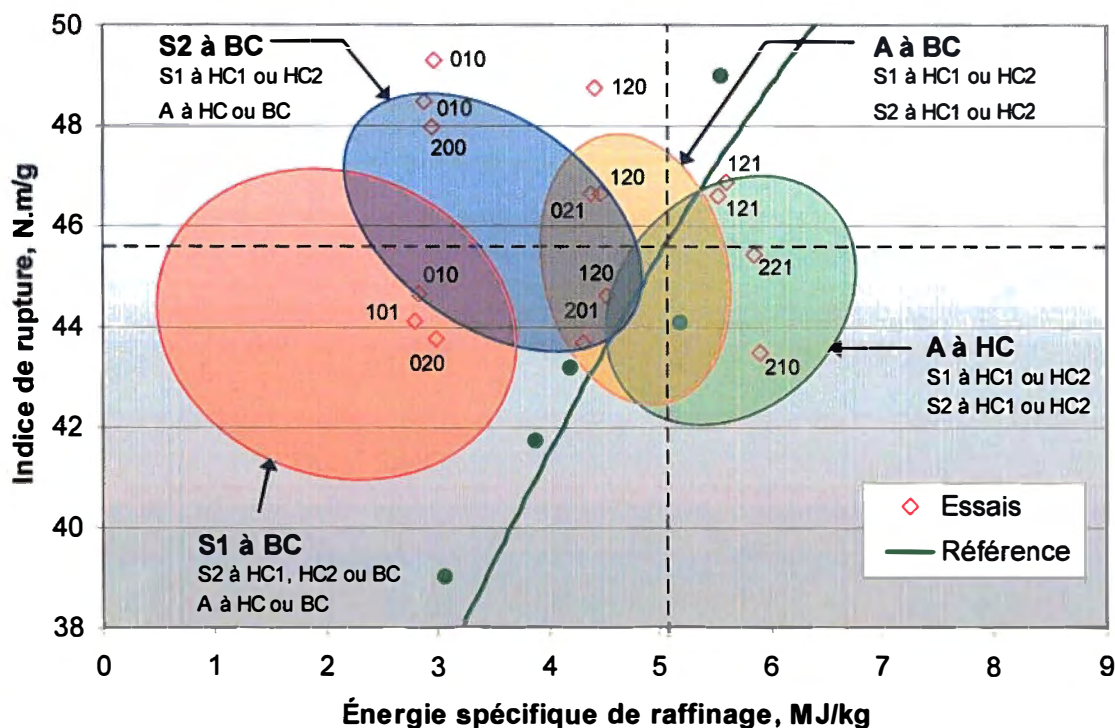


Figure 6.27 Relation entre l'énergie spécifique de raffinage des fractions et l'indice de résistance à la rupture (les étiquettes indiquent le procédé de raffinage des fractions S1, S2 et A respectivement : 0 = BC, 1 = HC1, 2 = HC2, les ellipses correspondent au lieu des points fournis par le modèle dans les conditions de raffinage spécifiées)

6.4.2.5 Potentiel de développement

Le potentiel de développement peut être estimé en traçant le lieu des points constituant la limite supérieure d'une propriété donnée pour l'ensemble des mélanges et en comparant la courbe obtenue avec la courbe de référence (Figure 6.28). Le potentiel de développement pour différentes propriétés est indiqué dans le tableau ci-dessous. Certaines propriétés ne sont pas mieux développées que la pâte entière raffinée, c'est le cas du coefficient de diffusion de la lumière. D'autres propriétés, par contre, sont inférieures à celles de la pâte entière raffinée. C'est le cas, par exemple, de l'allongement à la rupture et par suite, de l'absorption d'énergie de traction.

Tableau 6.19 Optimum de développement des propriétés physiques de la pâte reconstituée à un indice d'égouttage de 100 mL

| | Indice de rupture N.m/g | Indice d'éclatement kPa.m ² /g | Indice de déchirure mN.m ² /g |
|------------------|----------------------------|--|---|
| Référence | 45,6 | 2,80 | 8,72 |
| Optimum | 47,2 | 2,92 | 8,98 |
| Potentiel | 3,6% | 4,5% | 2,9% |

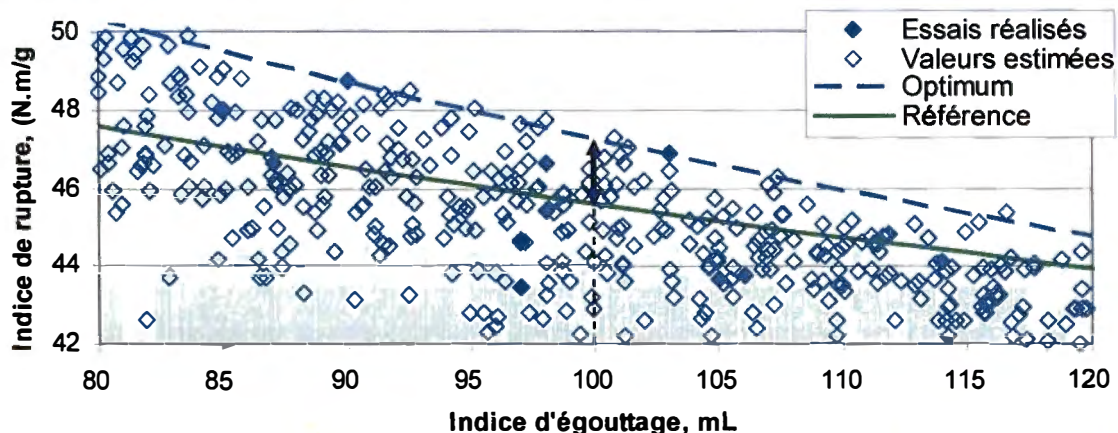


Figure 6.28 Potentiel de développement de l'indice de rupture

6.5 Conclusions

Les différents aspects abordés au cours de cette étude préliminaire permettent de dégager plusieurs points importants concernant le fractionnement, le raffinage et les propriétés des pâtes recombinaées obtenues.

6.5.1 Fractionnement

En ce qui concerne les séquences de fractionnement, l'hydrocyclone ne constitue pas un équipement adéquat en raison de l'usage de pâte primaire qui présente une faible surface spécifique. D'autre part, l'hydrocyclone, bien qu'efficace sur les fines, reste limité pour le fractionnement des fibres longues. Dans le cas du tamis, l'usage de panier avec de petites ouvertures permet de séparer les fibres sur la base de leur longueur essentiellement. Plus les ouvertures sont petites et plus le fractionnement est efficace en raison de l'effet barrière croissant qui supplée l'effet probabiliste. Il existe un optimum de fractionnement à taux de rejets massique de 50% environ. Cette valeur est difficile, voire

impossible à atteindre pour un tamis à ouvertures de petite dimension en raison du fort taux d'épaississement. Dans ce cas, le taux de rejets volumique doit être choisi le plus bas possible afin de réduire le risque de bouchage. Une consistance d'alimentation faible est également de nature à favoriser le fractionnement et à réduire le risque de bouchage, notamment avec les paniers à ouvertures de faible dimension. Cependant, la réduction de la consistance d'alimentation affecte la productivité du tamis et un compromis doit être établi entre productivité, efficacité de fractionnement et risque de bouchage.

Une nouvelle approche du taux de passage en régime d'écoulement en mélange a été proposée. Cette approche met en évidence que, plus le panier offre un effet barrière important c'est-à-dire une valeur de probabilité de rétention proche de 1, plus la consistance en amont des fentes est proche de la consistance d'alimentation. Ceci implique que l'augmentation de consistance est localisée dans le fond du tamis et non le long de la paroi du panier et montre donc que le bouchage se produirait en premier lieu par bouchage des rejets et non par colmatage des ouvertures du panier. Ceci rejoint les hypothèses communément rencontrées dans la littérature, où, pour un tamis de faible hauteur, il est souvent considérée que la consistance en amont des ouvertures est égale à celle des rejets alors que pour un tamis plus haut, cette consistance est alors considérée égale à la moyenne entre la consistance d'alimentation et la consistance des rejets.

6.5.2 Raffinage

Le raffinage des fractions produit un effet notable au niveau de la longueur de fibres. Cette effet est d'autant plus grand que la longueur initiale des fibres est grande, donc dans le cas des fractions de fibres longues, et plus prononcé dans le cas du raffinage à basse consistance, ce qui se répercute sur les propriétés physiques.

6.5.3 Propriétés de la pâte reconstituée

Les procédés de raffinage employés pour chaque fraction jouent un rôle essentiel dans la qualité finale de la pâte, autant du point de vue des propriétés que de la consommation d'énergie. Le raffinage à haute consistance permet d'optimiser les propriétés de la pâte, notamment le raffinage en deux stades, mais au prix d'une consommation d'énergie plus

importante. Le raffinage à basse consistance en contrepartie requiert moins d'énergie mais génère une coupe des fibres, notamment dans le cas des fractions de fibres longues, qui est de nature à porter préjudice à la qualité de la pâte, surtout dans le cas de l'indice de résistance à la déchirure et de l'indice de résistance à l'éclatement. Dans ce contexte, seulement certaines propriétés peuvent être améliorées au détriment des autres et l'amélioration de la pâte relève donc, soit du choix des propriétés qui requièrent une amélioration, soit d'un compromis entre plusieurs propriétés et la consommation d'énergie. Dans le cas des propriétés mécaniques, le potentiel d'amélioration des propriétés est compris entre 3 et 5% par rapport à celle de la pâte entière raffinée à haute consistance. Ce potentiel de développement est relativement modeste et probablement dû au fait que le raffinage séparé des fractions produit plus de coupe que le raffinage de la pâte entière. Ceci implique un raffinage des fractions de fibres longues à haute consistance en deux stade pour compenser cet effet de coupe et pour faire apparaître un développement additionnel des propriétés, surtout dans les cas de l'indice de résistance à la déchirure et de l'indice de résistance à l'éclatement.

Chapitre 7 - Résultats et discussion (3) – Fractionnement avec des ouvertures de petites dimensions

7.1 Introduction

Suite aux essais réalisés précédemment, il apparaît un besoin de générer des fractions de pâtes mieux différenciées du point de vue des caractéristiques morphologiques des fibres, autant du point de vue qualitatif que quantitatif. Dans ce but, l'usage d'un panier avec de petites ouvertures est proposé ici. Plusieurs essais ont donc été réalisés à l'aide d'un panier à trous lisses de 0,25 mm de diamètre disponible au CIPP. Ce panier a d'abord été testé individuellement puis introduit dans une séquence de fractionnement avec laquelle plusieurs fractions ont été générées puis raffinées.

7.2 Étude du panier à trous de 0,25 mm de diamètre

7.2.1 Plan d'étude

Afin de caractériser le comportement du tamis équipé du panier à trous lisses de 0,25 mm de diamètre, un plan basé sur une matrice factorielle complète (Tableau 7.1) est réalisé avec quatre variables à deux ou trois niveaux de valeurs : la consistance d'alimentation (deux niveaux), le taux de rejets volumique (trois niveaux), la vitesse de passage au travers des ouvertures du panier (trois niveaux) et le taux de fibres longues dans la pâte à l'alimentation (deux niveaux). Ce dernier facteur vise à étudier le comportement de la pâte dans le tamis lorsque le taux de fibres longues augmente, notamment lors de l'usage du tamis en cascade. Le taux de fibres longues est ici défini comme la somme des fractions massiques R14, R28 et R48 et est noté X_L . Le niveau bas du taux de fibres longues correspond à celui de la pâte primaire obtenue de l'usine de Papiers Masson Ltée. Le niveau haut est obtenu par les rejets finaux d'une séquence de fractionnement à deux tamis en cascade réalisée en discontinu avec une consistance d'alimentation de 0,5%, un taux de rejets volumique de 25% et une vitesse de passage de 0,13 m/s. La même pâte a été employée pour tous les essais à un même niveau de la variable X_L .

Tableau 7.1 Plan d'expérience du tamis à trous de 0,25 mm de diamètre

| Essais | | Variables codées | | | | Variables réelles | | | |
|--------|--------|------------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|
| Ident. | Point | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | C _f | R _v | V _p | X _L |
| 1501 | +++ - | 1 | 1 | 1 | -1 | 1,0 | 50,0 | 0,220 | 64,1 |
| 1502 | ++0 - | 1 | 1 | 0 | -1 | 1,0 | 50,0 | 0,175 | 64,1 |
| 1503 | +0+ - | 1 | 0 | 1 | -1 | 1,0 | 37,5 | 0,220 | 64,1 |
| 1504 | ++- - | 1 | 1 | -1 | -1 | 1,0 | 50,0 | 0,130 | 64,1 |
| 1505 | +00 - | 1 | 0 | 0 | -1 | 1,0 | 37,5 | 0,175 | 64,1 |
| 1506 | +0- - | 1 | 0 | -1 | -1 | 1,0 | 37,5 | 0,130 | 64,1 |
| 1507 | + -+ - | 1 | -1 | 1 | -1 | 1,0 | 25,0 | 0,220 | 64,1 |
| 1508 | + -0 - | 1 | -1 | 0 | -1 | 1,0 | 25,0 | 0,175 | 64,1 |
| 1509 | + --- | 1 | -1 | -1 | -1 | 1,0 | 25,0 | 0,130 | 64,1 |
| 1601 | -++ - | -1 | 1 | 1 | -1 | 0,5 | 50,0 | 0,220 | 64,1 |
| 1602 | -+0 - | -1 | 1 | 0 | -1 | 0,5 | 50,0 | 0,175 | 64,1 |
| 1603 | -0+ - | -1 | 0 | 1 | -1 | 0,5 | 37,5 | 0,220 | 64,1 |
| 1604 | -+- - | -1 | 1 | -1 | -1 | 0,5 | 50,0 | 0,130 | 64,1 |
| 1605 | -00 - | -1 | 0 | 0 | -1 | 0,5 | 37,5 | 0,175 | 64,1 |
| 1606 | -0- - | -1 | 0 | -1 | -1 | 0,5 | 37,5 | 0,130 | 64,1 |
| 1607 | --+ - | -1 | -1 | 1 | -1 | 0,5 | 25,0 | 0,220 | 64,1 |
| 1608 | --0 - | -1 | -1 | 0 | -1 | 0,5 | 25,0 | 0,175 | 64,1 |
| 1609 | ---- | -1 | -1 | -1 | -1 | 0,5 | 25,0 | 0,130 | 64,1 |
| 1701 | ++++ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,0 | 50,0 | 0,220 | 81,0 |
| 1702 | ++0 + | 1 | 1 | 0 | 1 | 1,0 | 50,0 | 0,175 | 81,0 |
| 1703 | +0++ | 1 | 0 | 1 | 1 | 1,0 | 37,5 | 0,220 | 81,0 |
| 1704 | ++- + | 1 | 1 | -1 | 1 | 1,0 | 50,0 | 0,130 | 81,0 |
| 1705 | +00 + | 1 | 0 | 0 | 1 | 1,0 | 37,5 | 0,175 | 81,0 |
| 1706 | +0- + | 1 | 0 | -1 | 1 | 1,0 | 37,5 | 0,130 | 81,0 |
| 1707 | + -++ | 1 | -1 | 1 | 1 | 1,0 | 25,0 | 0,220 | 81,0 |
| 1708 | + -0 + | 1 | -1 | 0 | 1 | 1,0 | 25,0 | 0,175 | 81,0 |
| 1709 | + --+ | 1 | -1 | -1 | 1 | 1,0 | 25,0 | 0,130 | 81,0 |
| 1801 | -+++ | -1 | 1 | 1 | 1 | 0,5 | 50,0 | 0,220 | 81,0 |
| 1802 | -+0 + | -1 | 1 | 0 | 1 | 0,5 | 50,0 | 0,175 | 81,0 |
| 1803 | -0++ | -1 | 0 | 1 | 1 | 0,5 | 37,5 | 0,220 | 81,0 |
| 1804 | -+- + | -1 | 1 | -1 | 1 | 0,5 | 50,0 | 0,130 | 81,0 |
| 1805 | -00 + | -1 | 0 | 0 | 1 | 0,5 | 37,5 | 0,175 | 81,0 |
| 1806 | -0- + | -1 | 0 | -1 | 1 | 0,5 | 37,5 | 0,130 | 81,0 |
| 1807 | --++ | -1 | -1 | 1 | 1 | 0,5 | 25,0 | 0,220 | 81,0 |
| 1808 | --0 + | -1 | -1 | 0 | 1 | 0,5 | 25,0 | 0,175 | 81,0 |
| 1809 | ---+ | -1 | -1 | -1 | 1 | 0,5 | 25,0 | 0,130 | 81,0 |

7.2.2 Résultats

Les résultats obtenus lors de la réalisation du plan d'expérience sont indiqués dans le tableau B.1 pour les conditions opératoires et dans les tableaux B.2 à B.5 pour les fractions Bauer McNett.

7.2.2.1 Analyse de variance et covariance du modèle

Les consistances d'alimentation réellement obtenues lors de la réalisation des essais sont légèrement différentes de celles qui ont été planifiées en raison de la difficulté de mesurer avec précision la quantité de pâte et les volumes d'eau introduits dans les cuiviers, notamment lors de la première série constituées des essais 1501 à 1509 (Tableau B.1). La variable X_1 a donc été recodée sur l'intervalle $[-1, 1]$ pour l'analyse des résultats. La nouvelle matrice est similaire à celle présentée dans le tableau 7.1 mais les valeurs dans la colonne X_1 sont remplacées par celles indiquées dans le tableau 7.2 ci-dessous.

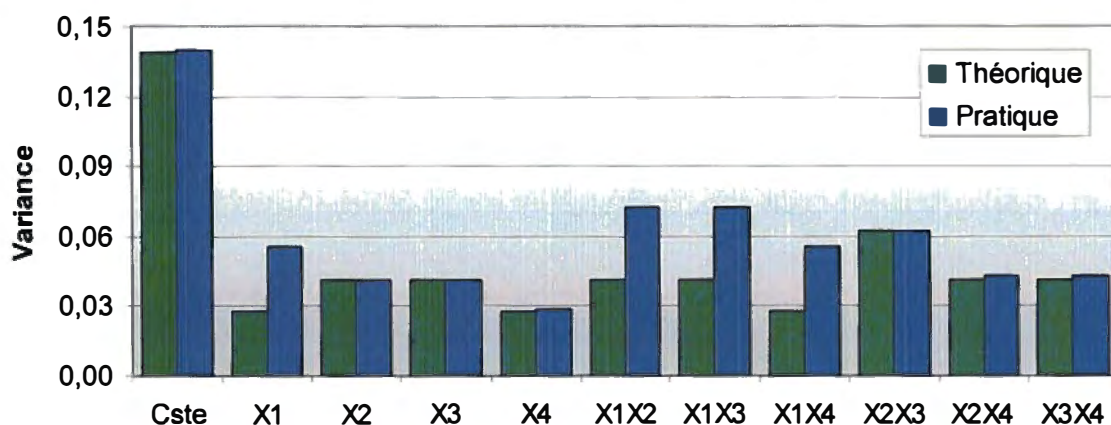
Tableau 7.2 Recodage de la consistance d'alimentation à partir des valeurs réelles obtenues lors de l'expérimentation

| Essais | Variable codée X_1 | Variable réelle C_f |
|-------------|-------------------------|--------------------------|
| 1501 à 1509 | 0,49 | 0,85 |
| 1601 à 1609 | -0,73 | 0,51 |
| 1701 à 1709 | 1,00 | 1,00 |
| 1801 à 1809 | -0,76 | 0,50 |
| Moyenne | 0,00 | 0,71 |

Cependant, alors que la matrice originale est orthogonale, cette nouvelle matrice possède une matrice de variance-covariance avec des termes non-diagonaux non-nuls (Tableau 7.3), ce qui indique que plusieurs coefficients du modèle sont partiellement confondus, notamment les coefficients des facteurs X_1 , X_4 , l'interaction $X_1.X_4$ et, dans une moindre mesure, la constante du modèle. On peut cependant constater que la variance des coefficients du modèle est peu affectée (Figure 7.1) à l'exception de X_1 et des interactions avec X_1 .

Tableau 7.3 Matrice de variance-covariance $(X^T.X)^{-1}$ du plan d'expérience

| | C^{ste} | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | $X_1.X_2$ | $X_1.X_3$ | $X_1.X_4$ | $X_2.X_3$ | $X_2.X_4$ | $X_3.X_4$ |
|-----------|-----------|--------|-------|-------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| C^{ste} | 0,140 | 0,002 | 0 | 0 | <0,001 | 0 | 0 | -0,007 | 0 | 0 | 0 |
| X_1 | 0,002 | 0,055 | 0 | 0 | -0,007 | 0 | 0 | -0,020 | 0 | 0 | 0 |
| X_2 | 0 | 0 | 0,042 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| X_3 | 0 | 0 | 0 | 0,042 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| X_4 | <0,001 | -0,007 | 0 | 0 | 0,029 | 0 | 0 | 0,002 | 0 | 0 | 0 |
| $X_1.X_2$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,073 | 0 | 0 | 0 | -0,009 | 0 |
| $X_1.X_3$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,073 | 0 | 0 | 0 | -0,009 |
| $X_1.X_4$ | -0,007 | -0,020 | 0 | 0 | 0,002 | 0 | 0 | 0,055 | 0 | 0 | 0 |
| $X_2.X_3$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,063 | 0 | 0 |
| $X_2.X_4$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0,009 | 0 | 0 | 0 | 0,043 | 0 |
| $X_3.X_4$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0,009 | 0 | 0 | 0 | 0,043 |

**Figure 7.1 Comparaison des termes diagonaux de la matrice de variance-covariance**

7.2.2.2 Pression différentielle

La pression différentielle correspond à la différence de pression entre l'alimentation et les acceptés et constitue la force motrice de l'écoulement au travers du panier. L'effet des variables du plan d'expérience est indiqué dans le tableau 7.4.

La consistance d'alimentation a un effet important sur la pression différentielle : plus celle-ci est élevée et plus la pression différentielle requise est grande pour un débit d'accepté donné. Ceci est lié à la formation d'un matelas fibreux à la surface du panier qui est d'autant plus épais que la consistance d'alimentation est grande mais aussi au comportement viscoélastique de la pâte en tant que fluide en écoulement en amont du

panier. La pâte se comporte comme un fluide d'autant plus visqueux que la consistance est élevée en raison des interactions entre fibres et entre les fibres et l'eau. De la même manière, une vitesse de passage plus élevée requiert une pression différentielle plus grande. Par contre, le taux de rejets volumique a un effet contraire : lorsque celui-ci augmente, la pression différentielle requise pour un même débit d'accepté diminue. Ceci est probablement dû au fait que, dans ce cas, le débit d'alimentation est plus élevé et provoque une augmentation de la turbulence à l'intérieur du tamis qui s'oppose à la formation d'un matelas fibreux à la surface du panier. Le taux de fibres longues a également un effet négatif sur la pression différentielle. Cet effet est probablement lié à une meilleure capacité d'égouttage d'un matelas de fibres longues comparativement à un matelas comportant une plus grande quantité de fibres courtes qui colmatent les espaces entre les fibres longues.

Le modèle obtenu, dont les coefficients sont indiqués dans le tableau 7.4, présente une bonne corrélation avec les valeurs mesurées (Figure 7.2a) mais on peut remarquer que les résidus des essais de la série 1700 présentent un écart-type plus élevé (Figure 7.2b), ce qui coïncide avec la tendance au bouchage observée lors de la réalisation des essais de cette série.

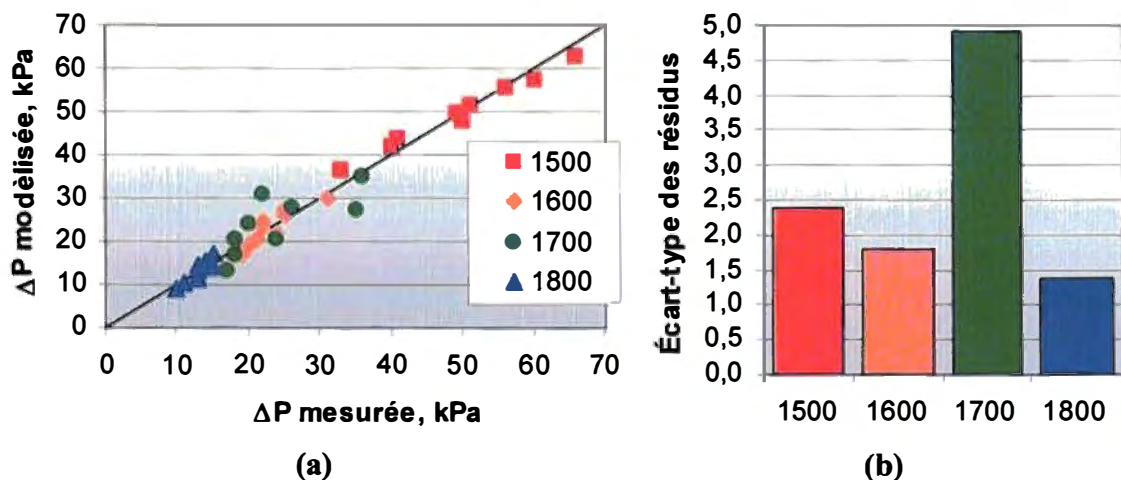


Figure 7.2 Comparaison entre mesures et valeurs prédites par le modèle de pression différentielle (a) et écart-type des résidus (b) pour chaque série d'essais

Tableau 7.4 Effets des variables du procédé de fractionnement sur divers paramètres de tamisage

| | $\Delta P^{(1)}$ | $\Delta CSF^{(2)}$ | R_w | T_R | $W_c^{(3)}$ |
|------------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| Modèle⁽⁴⁾ | 0,96 <0,0001 | 0,99 <0,0001 | 0,92 <0,0001 | 0,94 <0,0001 | 0,93 <0,0001 |
| Constante | 28,36 <0,0001 | -54,4 <0,0001 | 0,861 <0,0001 | 2,46 <0,0001 | 0,902 <0,0001 |
| X₁ | 12,28 <0,0001 | 4,51 <0,0001 | 0,0491 <0,0001 | 0,151 0,0009 | 0,0383 <0,0001 |
| X₂ | -3,417 <0,0001 | 7,38 <0,0001 | 0,0304 <0,0001 | -0,774 <0,0001 | -0,0240 <0,0001 |
| X₃ | 4,542 <0,0001 | — | 0,0186 0,0002 | — | 0,0169 <0,0001 |
| X₄ | -10,59 <0,0001 | 36,6 <0,0001 | -0,00279 0,4523 | -0,0115 0,7001 | -0,00384 0,1412 |
| X₁.X₂ | -2,592 0,0021 | — | -0,0218 0,0008 | -0,125 0,0115 | — |
| X₁.X₃ | 2,269 0,0056 | — | -0,0134 0,0296 | — | -0,0137 0,0022 |
| X₁.X₄ | -6,779 <0,0001 | — | 0,0371 <0,0001 | 0,123 0,0053 | 0,0255 <0,0001 |
| X₂.X₃ | — | — | — | — | — |
| X₂.X₄ | 2,682 0,0004 | -6,21 <0,0001 | — | — | 0,00674 0,0362 |
| X₃.X₄ | — | — | 0,0157 0,0016 | — | 0,0147 <0,0001 |

Note : Les nombres en petits caractères correspondent aux seuils de rejet. Les effets non indiqués ne sont pas significatifs. Les effets principaux non significatifs sont conservés si une interaction correspondante est significative.

(1) Pression différentielle entre l'alimentation et les acceptés

(2) Différence d'indice d'égouttage entre les rejets et l'alimentation

(3) Valeur de fractionnement nul pour la probabilité de rétention de Wahren

(4) Coefficient de détermination du modèle

7.2.2.3 Différence d'indice d'égouttage

La différence d'indice d'égouttage entre l'alimentation et les rejets est caractéristique du fractionnement réalisé par le tamis. Plus les fractions obtenues présentent des différences quant aux fibres qui les composent et plus la différence est importante. Les rejets ont typiquement un indice d'égouttage plus élevé que la pâte à l'alimentation, résultant en une différence d'indice d'égouttage négative.

Le taux de fibres longues présente un effet notablement plus élevé que les autres facteurs et confirme la tendance au bouchage observée lors de la série d'essais 1701 à 1709. Ceci est également appuyé par l'analyse des fractions Bauer McNett des acceptés (Figure 7.3) où on constate que lorsque la pâte a un taux de fibres longues bas, les fractions massiques des fibres longues dans les acceptés sont faibles et l'écart-type des mesures est inférieur à 1% alors que dans le cas de la pâte avec un taux de fibres longues élevé, les fractions massiques des fibres longues augmentent fortement, atteignant des valeurs similaires à celles des fractions R100 et R200, et ont un écart-type de l'ordre de 7 à 12 %. Ceci indique que lorsque le taux de fibres longues augmente dans la pâte, le tamis présente un comportement différent associé à la tendance au bouchage et qui provoque le passage des fibres longues au travers des ouvertures du panier.

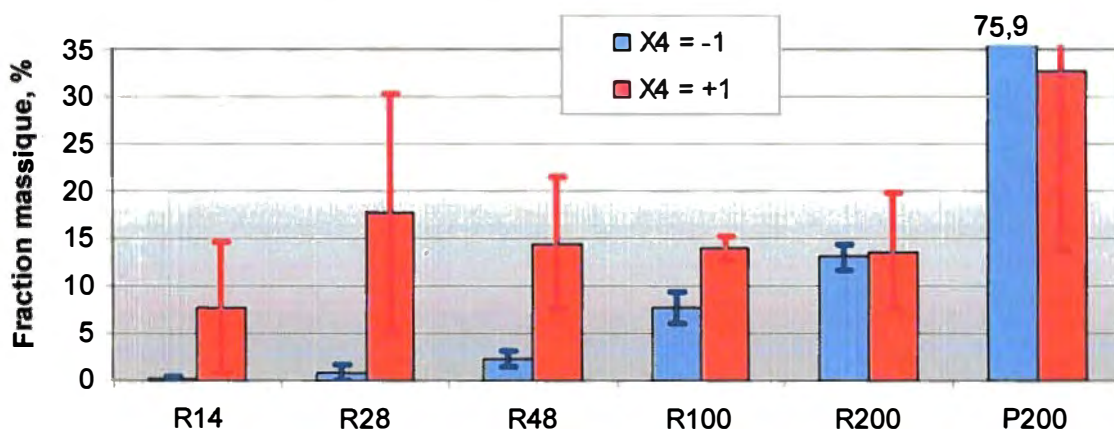


Figure 7.3 Fractions Bauer McNett moyennes et écart-type des acceptés du tamis pour différents taux de fibres longues

L'analyse séparée des blocs du plan d'expérience montre que lorsque le taux de fibres longues est bas ($X_4 = -1$), la consistance et le taux de rejets volumique ont un effet significatif sur la différence d'indice d'égouttage alors que lorsque le taux de fibres longues est haut ($X_4 = +1$), seule la consistance présente un effet significatif (Tableau 7.5) mais la corrélation entre le modèle et les valeurs mesurées est nettement moins satisfaisante. La bonne corrélation du modèle globale est en fait la conséquence d'un effet de levier entre les valeurs obtenues lors des deux blocs d'essais.

Tableau 7.5 Effets des variables du procédé de fractionnement sur la différence d'indice d'égouttage à différents taux de fibres longues

| X_4 | -1 | +1 |
|------------------------------|------------------|------------------|
| X_4 | 64,1 | 81,0 |
| Modèle ⁽¹⁾ | 0,93 <0,0001 | 0,30 0,0193 |
| Constante | -90,8 <0,0001 | -17,8 <0,0001 |
| X_1 | 6,57 0,0003 | 3,53 0,0193 |
| X_2 | 13,6 <0,0001 | — |

Note : Les nombres en petits caractères correspondent aux seuils de rejet. Les effets non indiqués ne sont pas significatifs.

⁽¹⁾ Coefficient de détermination du modèle

7.2.2.4 Taux de passage

Le taux de passage est obtenu ici à partir de la méthode introduite au paragraphe §6.1.2.1.3 (Figure 7.4a).

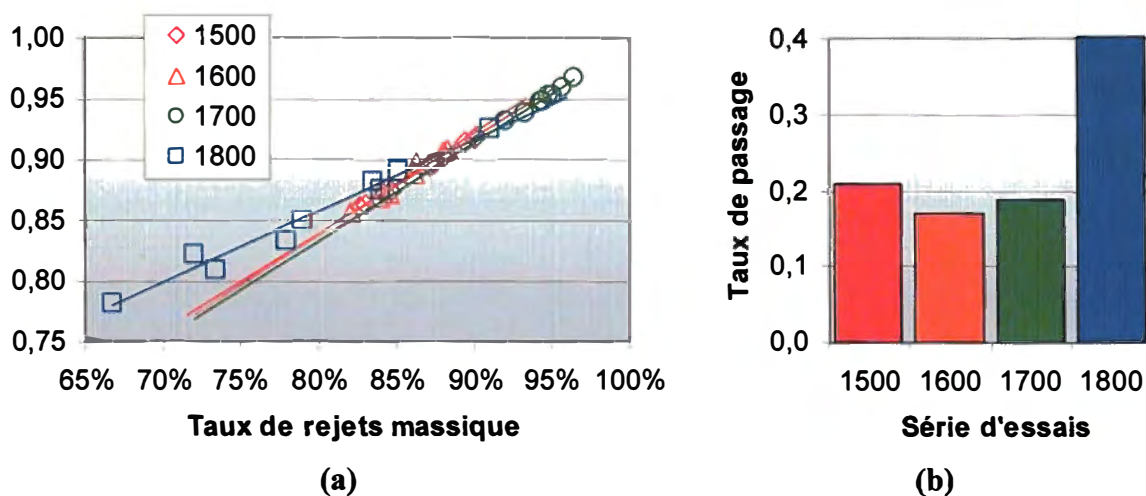


Figure 7.4 Droites de corrélation pour la détermination du taux de passage (a) et valeurs du taux de passage (b) pour chaque série d'essais

Les valeurs obtenues pour les séquences 1500, 1600 et 1700 sont concordantes avec les valeurs obtenues lors des essais préliminaires. Par contre, la valeur pour la série 1800 est nettement plus grande (Figure 7.4b), ce qui traduit un nouveau régime d'écoulement des

fibres au travers du panier. La série 1700 correspond donc à une condition critique de fonctionnement du tamis pour lesquelles les fibres longues en grande quantité tendent à boucher le tamis. La série 1800 illustre un mode de fonctionnement où les fibres longues sont capables de passer au travers du tamis grâce à la faible consistance d'alimentation.

7.2.2.5 Conclusion du plan d'expérience

Le plan d'expérience montre que la composition de la pâte, notamment le taux de fibres longues, joue un rôle très important dans la performance du panier à trous de 0,25 mm de diamètre et qu'un excès de fibres longues tend à produire un comportement d'instabilité opérationnelle qui se caractérise, soit par le passage de fibres longues au travers du panier lorsque la consistance est suffisamment faible, soit au bouchage du tamis. Ce panier ne devrait donc pas être employé avec des pâtes contenant un taux élevé de fibres longues, c'est-à-dire supérieur à 80%. Dans le cadre de cette étude, une telle pâte correspond aux rejets d'un tamis secondaire.

Dans la suite de l'étude, seuls les essais 1501 à 1509 et 1601 à 1609 sont employés. Ils correspondent à l'usage du panier dans un tamis primaire. La matrice factorielle complète de degré 2 du plan d'expérience correspondant est alors orthogonale. Les effets des variables sont indiqués dans le tableau 7.6. Les modèles pour les probabilités de rétention de Wahren montrent une influence significative de la consistance d'alimentation et du taux de rejets volumique pour les fractions R28, R48, R100 et R200 mais faible, ce qui justifie que les probabilités soient considérées comme constante pour la modélisation de tamis selon la méthode proposée au paragraphe §4.5.2.

Tableau 7.6 Effets des variables du procédé de fractionnement sur divers paramètres de tamisage et sur les probabilités de rétention de Wahren pour chaque fraction Bauer McNett

| | $\Delta P^{(1)}$ | $\Delta CSF^{(2)}$ | R_w | W_{R14} | W_{R28} | W_{R48} | W_{R100} | W_{R200} | W_{P200} |
|------------------------------------|------------------|--------------------|-------------------|-----------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------|
| Modèle ⁽³⁾ | 1,00 <0,0001 | 0,93 <0,0001 | 0,84 <0,0001 | — | 0,67 0,0011 | 0,77 0,0001 | 0,51 0,0051 | 0,95 <0,0001 | — |
| Constante | 36,4 <0,0001 | -91,6 <0,0001 | 0,862 <0,0001 | 0,999 | 0,997 <0,0001 | 0,990 <0,0001 | 0,936 <0,0001 | 0,725 <0,0001 | 0,116 |
| X₁ | 13,2 <0,0001 | 4,00 0,0003 | 0,0073 0,0118 | — | 0,0020 0,0024 | 0,0034 0,0005 | 0,0098 0,0196 | 0,055 <0,0001 | — |
| X₂ | -5,75 <0,0001 | 13,6 <0,0001 | 0,0262 <0,0001 | — | -0,0019 0,015 | -0,0042 0,0005 | -0,013 0,0106 | -0,082 <0,0001 | — |
| X₃ | 5,42 <0,0001 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| X₁.X₂ | -3,25 <0,0001 | — | — | — | 0,0018 0,0184 | 0,0024 0,0226 | — | 0,035 0,0001 | — |
| X₁.X₃ | 2,42 <0,0001 | — | — | — | — | — | — | — | — |

Note : Les nombres en petits caractères correspondent aux seuils de rejet. Les effets non indiqués ne sont pas significatifs.

⁽¹⁾ Pression différentielle entre l'alimentation et les acceptés

⁽²⁾ Différence d'indice d'égouttage entre les rejets et l'alimentation

⁽³⁾ Coefficient de détermination du modèle

7.2.2.6 Diamètre optimum des trous

Les résultats précédents mettent en évidence l'effet barrière prédominant de ce tamis envers les fibres longues, incluant une grande partie de la fraction R100. L'analyse de la distribution des fibres par caractéristique morphologique réalisée auparavant sur la pâte primaire montre également que la répartition de BP et de BE est liée à la longueur des fibres et dans ce contexte, il apparaît que la définition des fibres longues comme étant la somme des fibres des fractions R14, R28 et R48 est appropriée. Il est alors intéressant de déterminer la taille des ouvertures d'un panier à trous qui aurait la meilleure aptitude à séparer les fibres de cette manière.

L'analyse des distributions de longueur des classes du Bauer McNett par l'appareil FQA fournit à cette fin des indications intéressantes. La figure 7.5 présente les distributions normales correspondant à chaque classe et montre notamment que les intersections entre classes consécutives sont assez importantes et qu'il n'existe donc pas de longueur

de fibre qui permette de séparer précisément une classe d'une autre. D'autres critères nécessitent d'être pris en compte, tels que la flexibilité des fibres et donc, la nature des fibres en terme de BP et de BE, mais aussi la manière avec laquelle celles-ci ont été séparées et raffinées. Sur la base de l'approche à partir de la longueur des fibres, il apparaît cependant que 95% des fibres des classes R14, R28 et R48 correspondent à des fibres de longueur supérieure à 1,075 mm.

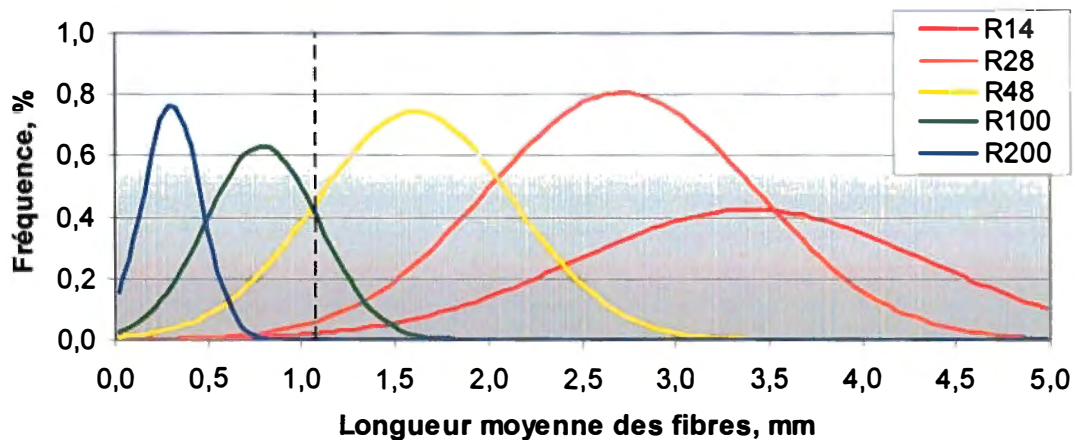


Figure 7.5 Distribution de longueur moyenne pondérée en longueur des fibres de chaque classe Bauer McNett de la pâte primaire

La représentation de l'indice Q en fonction de la longueur des fibres des classes du Bauer McNett permet de déterminer la longueur des fibres correspondant à un fractionnement nul. Cependant, l'indice Q (Éq. 3.20) fournit des valeurs comprises entre +1 et 0 pour les fibres qui sont rejetées alors qu'il fournit des valeurs entre 0 et $-\infty$ pour les fibres acceptées et ne donne donc pas un rôle symétrique pour les acceptés et les rejets. La définition proposée par la relation ci-dessous (Éq. 7.1) permet de remédier à cet inconvénient.

$$Q_{Ni} = \frac{X_r^i - X_a^i}{X_r^i + X_a^i} \quad \text{Éq. 7.1}$$

Où $X_{a,r}^i$ = Fractions massiques des fibres acceptées et rejetées pour la classe i

La représentation de l'indice de Nelson normalisé en fonction de la longueur des fibres des classes du Bauer McNett indique que la courbe du panier à trous de 0,25 mm cou-

pe l'axe des abscisses pour une longueur de 0,6 mm alors que celle du panier à trous de 1,20 mm coupe l'axe des abscisses pour une longueur de 2,4 mm (Figure 7.6a). Cette longueur correspond à une longueur critique de fibre pour laquelle le fractionnement est nul, les fibres plus longues sont de préférence rejetées et les fibres plus courtes acceptées. Par interpolation, il est possible d'estimer le diamètre des trous pour obtenir une longueur critique de 1,075 mm. Plusieurs interpolations sont possibles, par exemple, interpolation linéaire, semi-logarithmique ou encore exponentielle, et bien que l'une puisse paraître plus probable que les autres, l'expérimentation réalisée jusqu'à maintenant ne permet pas de déterminer laquelle doit être prise en compte. Cependant sur la base de ces trois types d'interpolations, il est possible de déterminer que le diamètre optimum des trous se situe entre 0,38 mm (semi-log) et 0,65 mm (exponentielle), l'interpolation linéaire fournissant une valeur intermédiaire de 0,5 mm (Figure 7.6b).

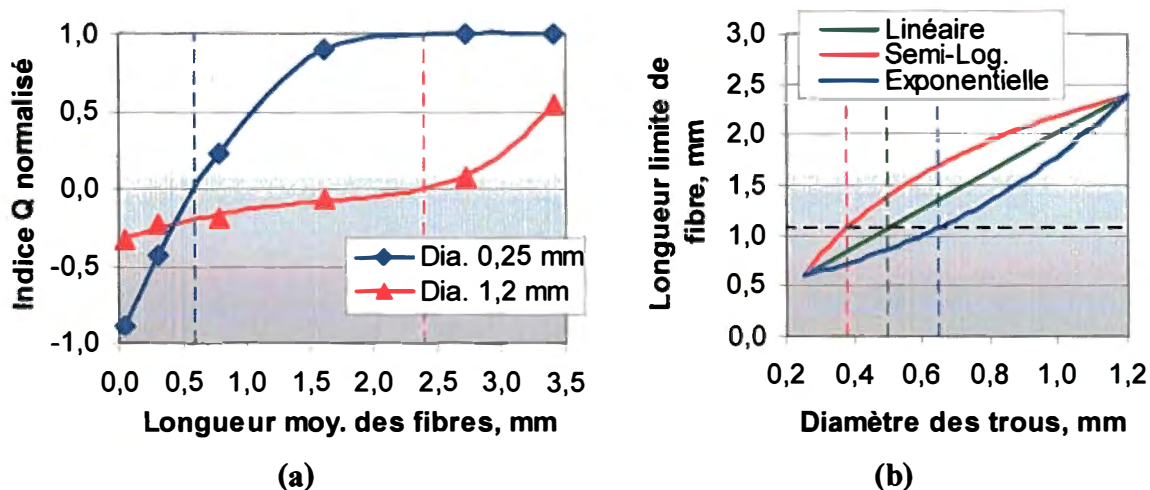


Figure 7.6 Courbes de l'indice Q normalisé pour les paniers à trous de 0,25 mm et de 1,20 mm en fonction de la longueur moyenne des fibres des classes du Bauer McNett (a) et interpolations du diamètre de trous requis pour une longueur critique de fibre de 1,075 mm (b)

7.3 Séquence de fractionnement

La séquence de fractionnement employée pour la production de fractions de pâte est constituée de 4 tamis en cascade sur les rejets (Figure 7.7). Pour les 2 premiers stades, P et S, le tamis est équipé du panier à trous de 0,25 mm de diamètre. Pour les 2 stades suivants, T et Q, le tamis est équipé du panier à fentes de 0,10 mm de largeur. L'objectif de

cette séquence est de réaliser une séparation des fibres longues et des fibres courtes suivi d'un fractionnement des fibres longues sur la base de la masse linéique des fibres afin d'évaluer l'impact de ces fractionnements sur les propriétés des pâtes recombinaées et la consommation d'énergie spécifique de raffinage. Dans ce but, 4 fractions de pâtes sont recueillies : les rejets du tamis secondaire (SR), les rejets du tamis quaternaire (QR), les acceptés mélangés des 2 premiers stades (A1) et les acceptés mélangés des 2 derniers stades (A2). Après raffinage, ces fractions peuvent être recombinaées pour reconstituer la pâte entière, on obtient ainsi 2 séries de pâtes recombinaées : les mélanges des fractions SR et A1 et les mélanges des fractions QR, A1 et A2. Les conditions opératoires de chaque stade de fractionnement sont indiquées dans le tableau B.10.

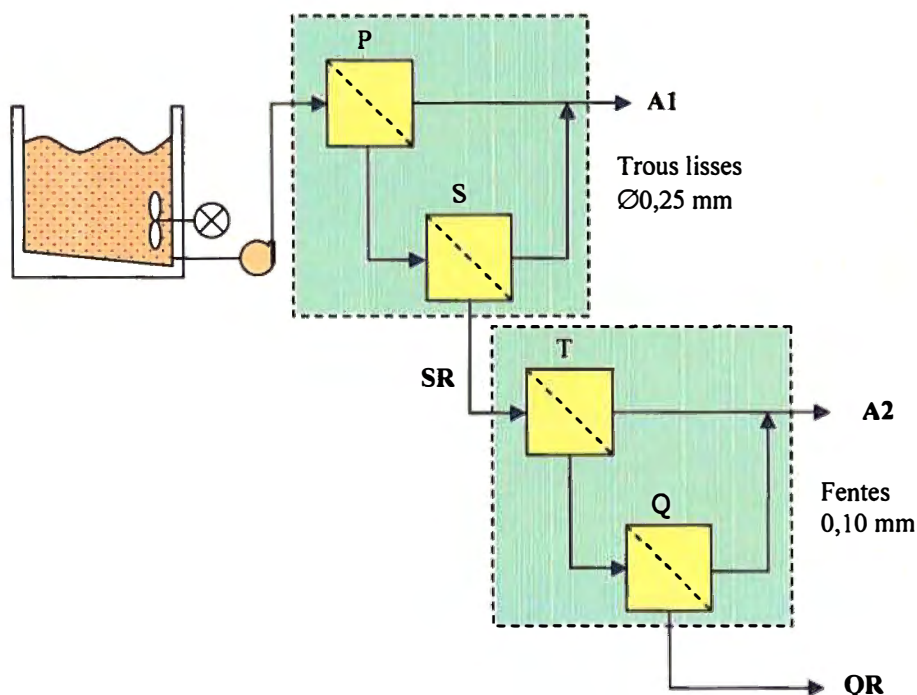


Figure 7.7 Schéma du procédé de fractionnement à 4 stades en cascade sur les rejets

7.3.1 Efficacité de fractionnement

Le procédé de fractionnement génère des fractions séparées en premier lieu sur la base de la longueur tel que le montre le classage de fibres au Bauer McNett des différentes fractions. Ainsi, après le deuxième tamis, on observe que les rejets SR contiennent les fibres longues alors que les acceptés A1 contiennent les fines et les fibres courtes

(Figure 7.8a). Dans le cas des rejets du tamis quaternaire, on observe par contre qu'il existe une distribution des fibres des classes R28, R48 et R100 entre les rejets et les acceptés A2 qui suggère un fractionnement sur la base de la longueur moins sévère (Figure 7.8b).

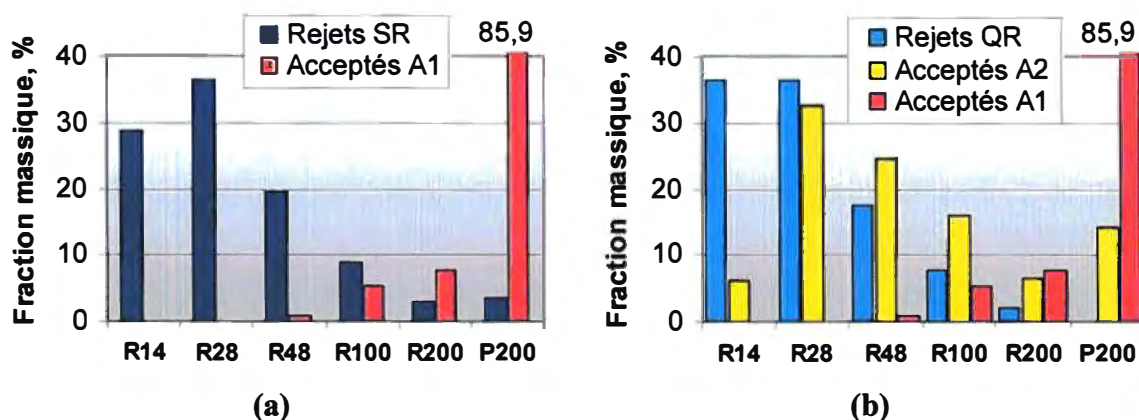


Figure 7.8 Classification Bauer McNett des fractions obtenues avec deux tamis (a) et avec quatre tamis (b)

Ces différences entre fractions sont également corrélées par les propriétés de la pâte telles que l'indice d'égouttage (Figure 7.9) qui souligne clairement les différences entre les pâtes. En effet, pendant la mesure de l'indice d'égouttage, les fibres longues sont mieux retenues sur la maille et forme rapidement un matelas fibreux mais en l'absence de fibres courtes, celui-ci reste poreux et permet un écoulement facile. Lorsqu'il y a présence de fibres courtes, celles-ci colmatent les interstices entre les fibres longues et réduisent l'écoulement au travers du matelas fibreux. Lorsque la pâte ne contient que des fibres très courtes et des fines, celles-ci sont capables de s'écouler au travers de la maille sans former de matelas puis, éventuellement, de former un matelas après écoulement d'une grande partie de l'eau et de générer alors un matelas pratiquement imperméable. De fait, la valeur indiquée pour la fraction A1 ne peut être mesurée directement. Elle est obtenue en réalisant les mesures sur un mélange avec une autre pâte dont l'indice d'égouttage est connu.

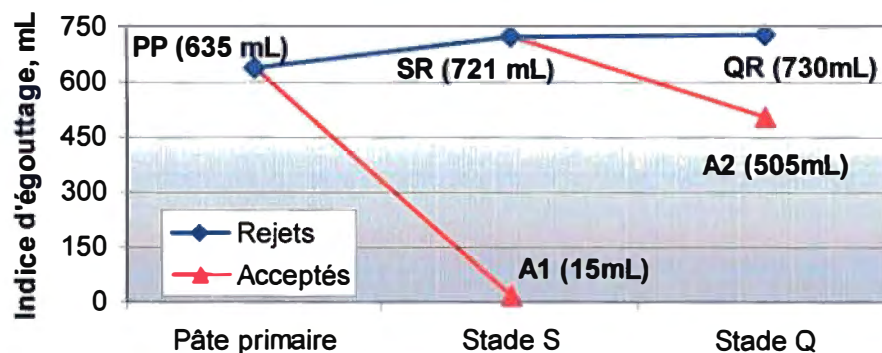


Figure 7.9 Indice d'égouttage des fractions de pâtes

L'analyse des efficacités de rejets des classes du Bauer McNett permet de déterminer le comportement du panier vis-à-vis de chaque classe (Figure 7.10a) par comparaison avec le taux de rejets massique. Ce dernier représente en fait l'efficacité de rejets de la pâte entière. Ainsi dans le cas du panier à trous de 0,25 mm de diamètre, les fractions R14, R28 et R48 sont rejetées alors que dans le cas du panier à fentes de 0,10 mm de largeur, seule la fraction R14 est rejetée.

L'indice Q normalisé proposé précédemment (Éq. 7.1) permet une comparaison plus aisée des effets de fractionnement (Figure 7.10b) et met clairement en évidence l'effet barrière généré par le tamis à trous vis-à-vis des fractions R14, R28 et R48 et par le tamis à fentes vis-à-vis de la fraction R14.

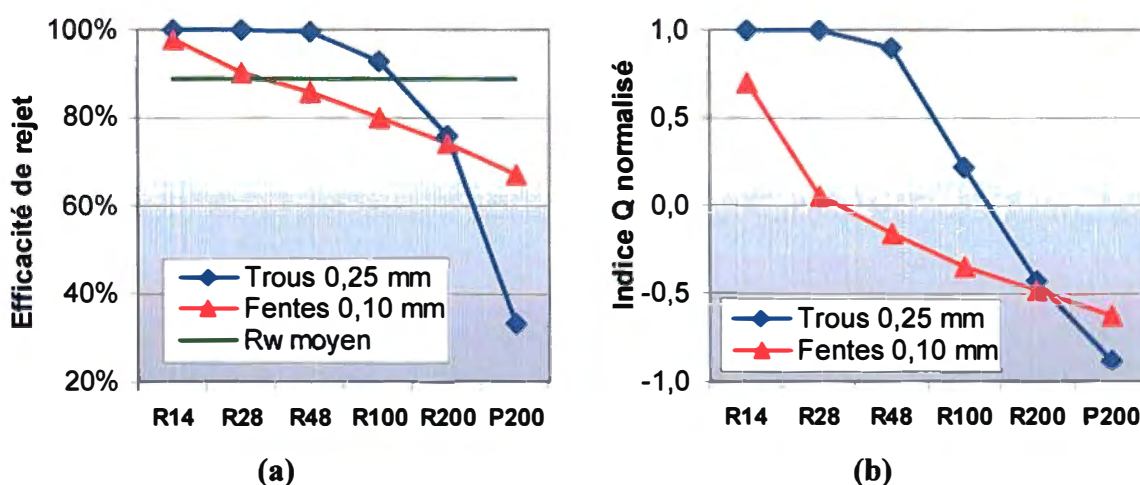


Figure 7.10 Efficacité de rejet (a) et indice de fractionnement Q normalisé (b) des paniers à trous et à fentes pour chaque classe Bauer McNett

7.3.2 Bilan de masse des fractions

Les bilans de masse du procédé de fractionnement sont indiqués dans la figure B.1 pour les essais préliminaires de cette séquence et dans la figure B.2 pour les essais finaux. Les fractions obtenues pendant les essais finaux ont été employées pour les essais de raffinement et de recombinaison de la pâte.

La distribution des différentes classes de fibres entre les fractions est la résultante des effets de fractionnement, barrière ou probabiliste, produit par le tamis pour chaque classe de fibres et des débits massiques de pâte entre les acceptés et les rejets. Ainsi, bien qu'une classe de fibres puisse avoir un indice de fractionnement nul, si le taux de rejets massique est de 90%, les rejets contiendront plus de fibres de cette classe que les acceptés. Le bilan de masse de chaque classe de fibre offre donc une vision plus complète de la séparation des fibres au cours du procédé de fractionnement. Afin de faire abstraction des fractions massiques de chaque classe dans la pâte primaire, la figure 7.11 présente le pourcentage en poids de chaque classe dans les fractions de pâte.

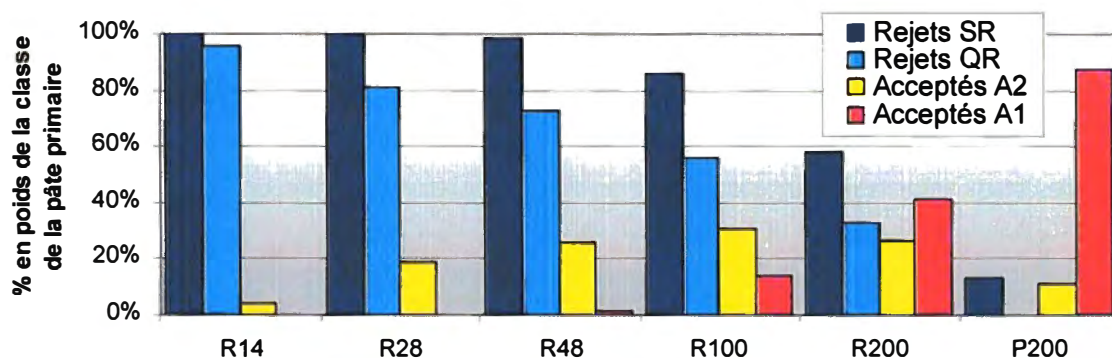


Figure 7.11 Fractionnement des classes Bauer McNett de la pâte primaire entre les différentes fractions obtenues

Bien que le tamis à trous ait un effet barrière envers les fractions de fibres longues et un effet probabiliste envers la fraction R100 et R200, une grande partie de ces dernières est conservée dans les rejets SR. Dans le cas du tamis à fentes, on observe une augmentation des fibres des classes R28, R48 et R100 dans les acceptés. Pour ces classes, un autre effet que le fractionnement sur la base de la longueur peut donc entrer en jeu, notam-

ment un fractionnement basé sur la flexibilité des fibres et par conséquent sur la nature des fibres en terme de BP et de BE.

7.3.3 Bilan de masse des fibres de BP et de BE

A partir de micrographies obtenues avec l'appareil MWT, les taux en nombre de fibres de BP et de BE, les épaisseurs de paroi et largeur de fibre ont été mesurés dans les fractions de pâtes (Tableau B.13) ainsi que la longueur des fibres et leur masse linéique (Tableau B.14, Tableau B.15). Ces résultats sont ensuite utilisés pour calculer les taux en poids de fibres de BP et de BE (Tableau 7.7).

Tableau 7.7 Distribution des fibres de BP et de BE au cours du procédé de raffinage, en pourcentage en poids de la pâte entière

| Fractions | | PP | SR | QR | A1 | A2 | MBE ⁽¹⁾ |
|-----------|----|----------------|----------------|---------------|--------------|--------------|--------------------|
| R28 | BP | 18,0 (100%) | 17,7 (98%) | 14,3 (79%) | 0,4 (2%) | 4,6 (25%) | -3,2% |
| | BE | 14,0 (100%) | 14,0 (100%) | 11,9 (85%) | 0,0 (0%) | 2,0 (14%) | 0,4% |
| R48 | BP | 11,3 (100%) | 10,9 (96%) | 7,8 (69%) | 0,4 (4%) | 3,7 (33%) | -2,6% |
| | BE | 5,8 (100%) | 5,6 (96%) | 4,3 (74%) | 0,2 (4%) | 1,1 (18%) | 2,2% |
| R100 | BP | 6,5 (100%) | 5,2 (80%) | 3,4 (53%) | 1,3 (20%) | 2,2 (34%) | -3,2% |
| | BE | 2,2 (100%) | 2,1 (92%) | 1,6 (71%) | 0,2 (7%) | 0,5 (24%) | -1,4% |

Notes : ⁽¹⁾ Erreur de bilan de masse pour le procédé de fractionnement complet

A cette fin les résultats d'analyse de la pâte primaire en termes de paramètre Z ont été employés pour caractériser la forme des sections transversales des fibres (Éq. 7.2).

$$\omega_E = \frac{1}{1 + \frac{p_P Z_E \left(\frac{W_{tP}}{W_{tE}} \right)^2}{p_E Z_P \left(\frac{W_{tP}}{W_{tE}} \right)}} \quad \text{Éq. 7.2}$$

Où $p_{P,E}$ = Taux en nombre de fibres de BP et de BE
 $Z_{P,E}$ = Paramètre Z des fibres de BP et de BE
 $W_{tP,E}$ = Épaisseur de paroi des fibres de BP et de BE

Le bilan des fibres de BP et de BE est ainsi obtenu pour les classes R28, R48 et R100 et fournit une indication sur l'influence du type de fibre sur le fractionnement. Le taux de fibres de BE est plus élevé dans les rejets finaux, ce qui indique que le tamis à fentes présente un effet de fractionnement basé sur la masse linéique des fibres, et donc sur l'épaisseur de paroi (Figure 7.12a), ce qui est également corrélé par les mesures de masse linéique (Figure 7.12b).

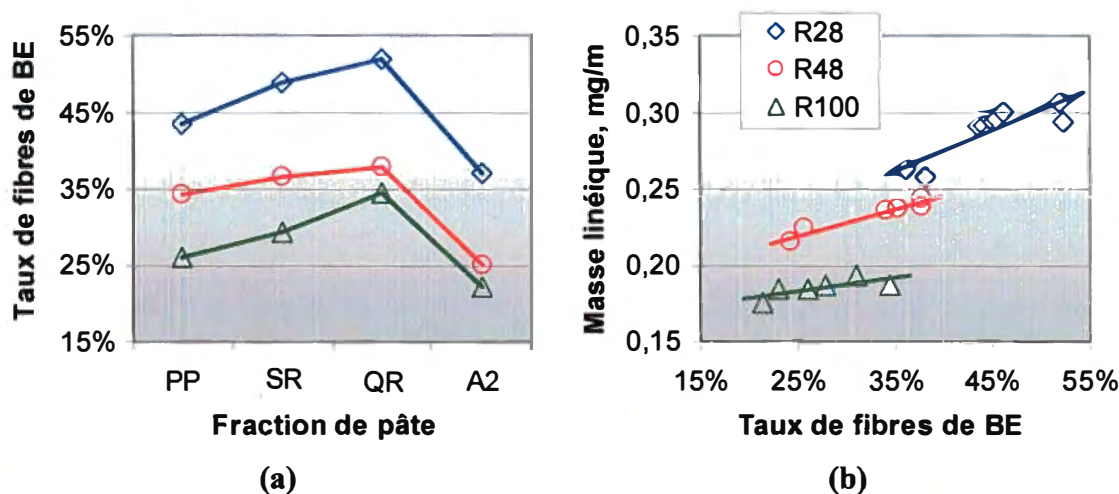


Figure 7.12 Taux en poids de fibre de BE dans chaque fraction de pâte (a) et masse linéique des fibres en fonction du taux de fibres de BE (b) pour les classes R28, R48 et R100

Dans le cas du panier à trous de 0,25 mm de diamètre, cet effet est cependant négligeable car l'effet barrière prédomine et empêche que les fibres longues passent au travers des ouvertures. Il en est probablement de même pour le panier à fentes dans le cas des fibres de la fraction R14. Cela revient à dire que le fractionnement sur la base de la longueur doit être de nature probabiliste pour qu'un autre effet de fractionnement puisse présenter un effet significatif. Il existe cependant une relation entre la longueur des fibres et la masse linéique dans le sens où les fibres de BE ont tendance à s'accumuler dans les fractions R14, R28 et R48. En effet, celles-ci sont moins fragiles et ont une plus grande capacité à supporter les contraintes de raffinage. Dans ce contexte, le fractionnement sur la base de la longueur a également une influence sur la masse linéique. Par contre, dans le cas d'une classe de longueur pour laquelle l'indice de fractionnement est proche du fractionnement nul, il est légitime de se demander quels sont les facteurs qui conditionnent le passage d'une fibre au travers des ouvertures du panier. La flexibilité

est certainement un paramètre important et est fréquemment mentionnée dans la littérature. Elle est d'ailleurs fortement liée à l'épaisseur de paroi des fibres et par conséquent à la masse linéique. Yu *et al.* [85] mentionnent notamment que la flexibilité intervient dans deux mécanismes impliqués dans le passage des fibres au travers des ouvertures : le cintrage des fibres dans le cas des paniers à fentes et la formation de flocs dans le cas des tamis à trous. Dans le premier cas, les fibres passent au travers des fentes avec une courbure prononcée. Celle-ci est due aux effets conjoints de l'écoulement tangentiel et du rotor qui courbent les fibres une fois que l'une de leurs extrémités a pénétré dans la fente. La vitesse périphérique du rotor est en effet bien supérieure à la vitesse de passage des fibres au travers des ouvertures. Lorsque les fibres sont peu flexibles, elles ont tendance à chevaucher les bords de la fente et à être finalement rejetées. Dans le cas des paniers à trous lisses, ce phénomène de cintrage est peu présent, par contre les fibres subissant le même type de courbure, elles ont tendance à s'accumuler sur le bord opposé au sens de l'écoulement et à former des flocs qui réduisent le diamètre de l'ouverture. Les fibres les plus flexibles glissent alors progressivement vers l'ouverture suivante alors que les fibres rigides ont plutôt tendance à être réintroduites dans l'écoulement en amont du panier sous l'effet des pulsations de pression produites par les lames du rotor. Dans les paniers à trous employés, la distance entre les trous est inférieure au millimètre ce qui permettrait éventuellement aux fibres les plus longues d'avoir leurs extrémités prises dans deux trous adjacents. Cette situation reste cependant peu probable en raison de la disposition des trous en quinconce.

7.4 Raffinage

Les fractions de rejets SR et QR ont été raffinées à haute consistance en un stade et en deux stades, et à basse consistance. La fraction des acceptés A2 a été raffinée à haute consistance en un stade et à basse consistance. Les propriétés de ces fractions raffinées sont indiquées dans les tableaux B.16 à B.23. L'étude du développement des fractions lors du raffinage n'est pas abordée ici car il fait l'objet d'une étude spécifique par Zha *et al.* [185].

La quantité d'énergie spécifique de raffinage requise pour obtenir un même niveau de raffinage, en termes d'indice d'égouttage, est d'autant plus élevée que les fibres sont longues. Ce comportement, déjà constaté lors des essais préliminaires, est ici d'autant plus prononcé que l'effet de fractionnement sur la base de la longueur est important et qui se traduit par des indices d'égouttage plus élevés pour les fractions de rejets SR et QR mais aussi pour la fraction d'acceptés A2 en comparaison des acceptés obtenues lors des séquences de fractionnement des essais préliminaires.

7.5 Recombinaison de la pâte

Le bilan de masse permettant de calculer les proportions de chaque fraction de pâte est indiqué dans la figure B.2. Deux séries de reconstitution de la pâte entière à partir des fractions raffinées ont été réalisées : les mélanges des fractions SR et A1 (1^{ère} série) correspondant à un procédé de fractionnement avec seulement deux tamis équipés de panier à trous de 0,25 mm, et les mélanges des fractions QR, A1 et A2 (2^{ème} série) correspondant au procédé de fractionnement à quatre tamis. Pour chaque série, des mélanges ont été sélectionnés avec pour objectif un indice d'égouttage de 100 mL.

7.5.1 Modèle prédictif des propriétés physiques

De la même manière que lors des essais préliminaires, un modèle est établi pour estimer les propriétés des mélanges (Tableau 7.8). Les propriétés de la fraction A1 ne peuvent pas être introduites dans ce modèle pour deux raisons : d'une part, cette fraction n'a pas été raffinée donc ses propriétés sont constantes et d'autre part, il n'est pas possible de mesurer ni l'indice d'égouttage, ni les propriétés de résistance mécanique.

Le modèle fournit des estimations satisfaisantes (Figure 7.13). Dans le cas de l'indice d'égouttage notamment, les valeurs mesurées sont mieux corrélées par ce modèle que par un modèle log-log (Éq. 4.11) en considérant un indice d'égouttage de 15 mL pour la fraction A1.

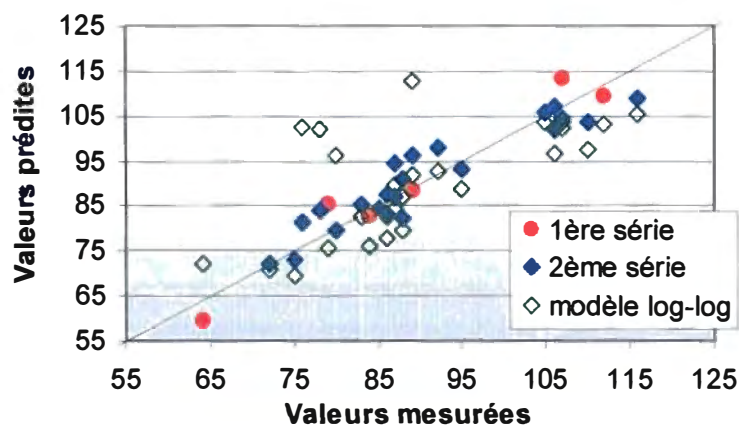


Figure 7.13 Comparaison des valeurs d'indice d'égouttage mesurées et prédites

Tableau 7.8 Modèles prédictifs des propriétés des mélanges

| | | CSF ⁽²⁾ | V _m ⁽³⁾ | IR ⁽⁴⁾ | All ⁽⁵⁾ | TEA ⁽⁶⁾ | IE ⁽⁷⁾ | ID ⁽⁸⁾ | S ⁽⁹⁾ |
|------------------------------|----------------------|--------------------|-------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|
| | | mL | cm ³ /g | N.m/g | % | J/m ² | kPa.m ² /g | mN.m ² /g | m ² /kg |
| Modèle ⁽¹⁾ | | 90,8% | 36,1% | 68,1% | 81,3% | 72,2% | 82,9% | 89,0% | 73,6% |
| | | 0,0202 | 0,0102 | 0,0135 | 0,0165 | 0,0323 | 0,0163 | 0,0112 | 0,0043 |
| Fraction SR ou QR | a₁ | 0,238 | 0,004 | -0,016 | 0,081 | 0,071 | 0,017 | 0,107 | -0,002 |
| | | <0,0001 | 0,3433 | 0,1265 | <0,0001 | 0,0194 | 0,1593 | <0,0001 | 0,3559 |
| | b₁ | 0,804 | 0,091 | -0,093 | 0,114 | 0,035 | -0,013 | 0,443 | -0,016 |
| | | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | 0,1461 | 0,2087 | <0,0001 | 0,0006 |
| | c₁ | -0,975 | 0,003 | 0,784 | 1,140 | 2,024 | 1,548 | 0,980 | 0,276 |
| | | <0,0001 | 0,3836 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 |
| Fraction A2 | a₂ | 0,119 | 0,085 | 0,002 | 0,081 | 0,066 | -0,025 | 0,057 | 0,008 |
| | | <0,0001 | <0,0001 | 0,4362 | <0,0001 | 0,0267 | 0,0685 | <0,0001 | 0,0362 |
| | b₂ | 0,768 | 0,152 | -0,065 | 0,107 | 0,053 | -0,089 | 0,455 | 0,002 |
| | | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | 0,0561 | <0,0001 | <0,0001 | 0,3303 |
| | c₂ | -0,954 | -0,071 | 0,717 | 1,228 | 2,085 | 1,641 | 1,029 | 0,296 |
| | | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 |
| d | | 4,073 | 0,646 | 1,771 | -3,259 | -2,763 | -3,734 | -2,742 | 3,262 |
| | | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 |

Notes : Les nombres en petits caractères correspondent aux seuils de rejet.

- ⁽¹⁾ Coefficient de détermination du modèle, ⁽²⁾ Indice d'égouttage, ⁽³⁾ Volume massique, ⁽⁴⁾ Indice de résistance à la rupture par traction, ⁽⁵⁾ Allongement à la rupture, ⁽⁶⁾ Absorption de l'énergie de traction, ⁽⁷⁾ Indice de résistance à l'éclatement, ⁽⁸⁾ Indice de résistance à la déchirure, ⁽⁹⁾ Coefficient de diffusion de la lumière

7.5.2 Énergie spécifique de raffinage

L'énergie spécifique correspond ici à l'énergie spécifique des stades postérieurs au premier stade. Le raffinage séparé des fractions permet d'obtenir des pâtes recombinaées pour lesquelles l'énergie spécifique de raffinage est différente pour un même niveau d'indice d'égouttage. Aussi bien dans le cas des pâtes recombinaées à partir des rejets secondaires (Figure 7.14) que dans le cas des pâtes reconstituées à partir des rejets quaternaires, l'énergie spécifique requise pour un même degré de raffinage est inférieure à celle requise pour la pâte entière raffinée à haute consistance en un stade (Figure 7.15).

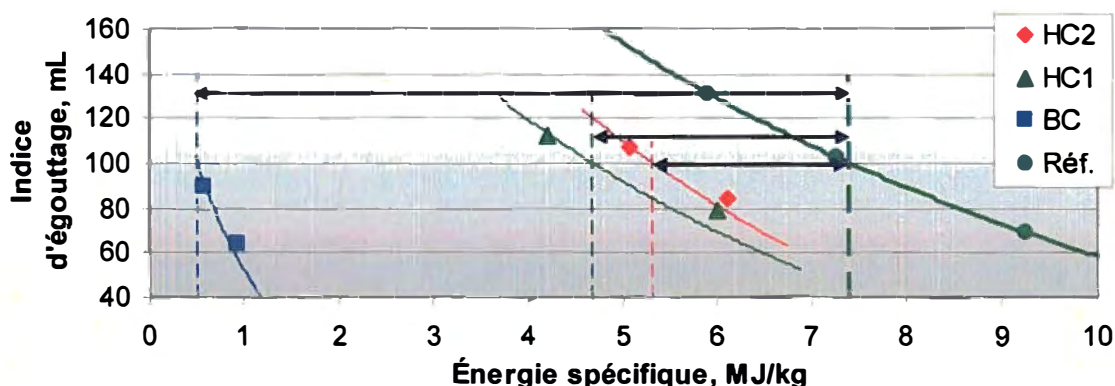


Figure 7.14 Indice d'égouttage des pâtes recombinaées et de la pâte entière en fonction de l'énergie spécifique – 1^{ère} série (en légende : procédé de raffinage de la fraction SR)

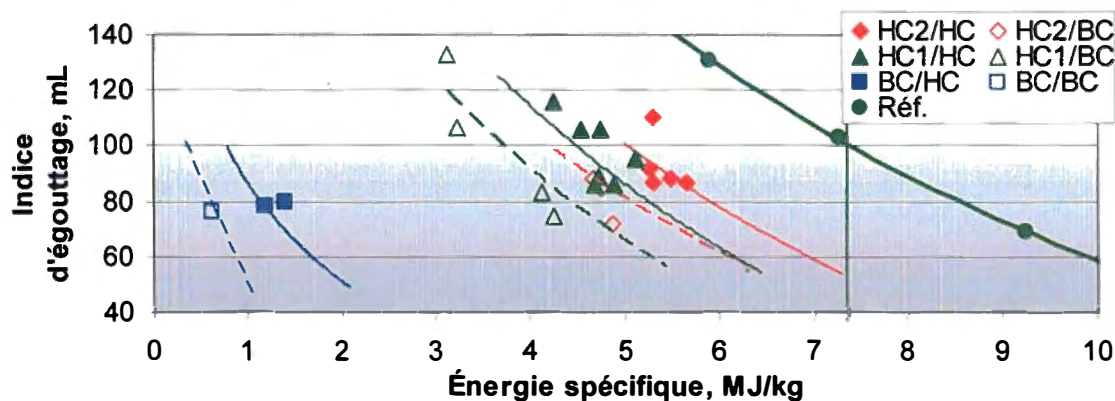


Figure 7.15 Indice d'égouttage des pâtes recombinaées et de la pâte entière en fonction de l'énergie spécifique – 2^{ème} série (en légende : procédé de raffinage des fractions QR et A2 respectivement)

Dans ce dernier cas, le procédé de raffinage employé et la distribution de l'énergie spécifique entre les fractions raffinées QR et A2 jouent également un rôle significatif (Figure 7.16).

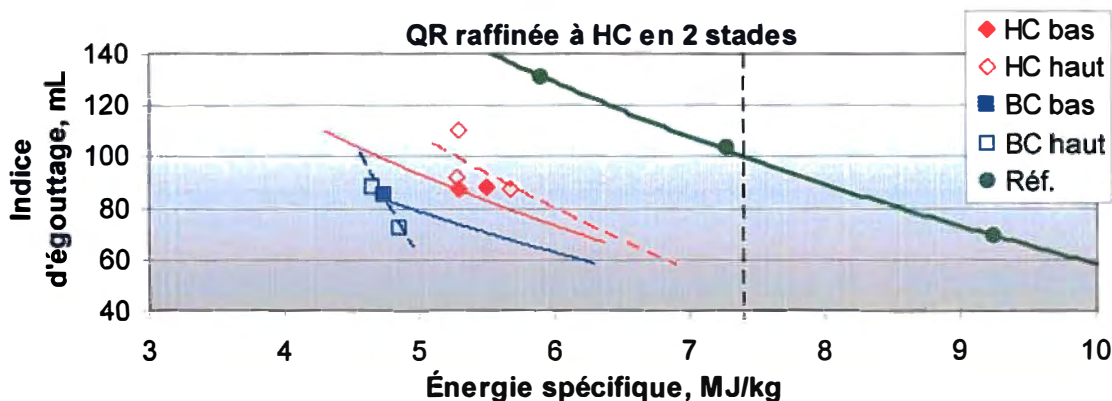


Figure 7.16 Indice d'égouttage des pâtes recombinaées et de la pâte entière en fonction de l'énergie spécifique – 2^{ème} série (en légende : procédé de raffinage de la fraction A2 et niveau d'énergie)

Ces résultats suggèrent que l'action de raffinage est dépendante de l'état des fibres : plus les fibres sont longues et plus l'action de raffinage est efficace sur ces fibres. Le fait de retirer les fibres les plus courtes et les fines permet de concentrer l'énergie spécifique sur la fraction de fibres la plus apte à se développer. Par contre, lorsque les fibres courtes et les fines sont présentes dans la pâte, celles-ci peuvent produire un effet protecteur des fibres longues en absorbant de l'énergie par un jeu de compression-décompression qui ne produit pas de développement de ces fibres courtes mais dissipe l'énergie sous forme de chaleur [186]. Cet aspect est également significatif des différences entre le raffinage à haute consistance et le raffinage à basse consistance, la différence essentielle entre les deux étant le milieu dans lequel s'écoulent les fibres entre les plaques du raffineur. Dans le cas du raffinage à basse consistance, le milieu est essentiellement incompressible et l'effet des barres de raffinage se transmet aux fibres non seulement par l'effet de friction mais également par la transmission des effets de compression et de cisaillement par le fluide. Dans le cas du raffinage à haute consistance, les fibres forment un matelas fibreux plus compressible avec la présence d'une phase gazeuse qui transmet les contraintes de pression mais pas les contraintes de cisaillement. Ces dernières sont transmises par friction entre les fibres elles-mêmes et entre les fibres et les barres. Un autre aspect à

prendre en compte est le temps de résidence des fibres dans l'entrefer qui influe fortement sur l'intensité de raffinage. Le raffinage à haute consistance est réalisé ici avec des distances d'entrefer comprises entre 0,4 mm et 1 mm alors que le raffinage à basse consistance est réalisé avec des distances d'entrefer de 0,25 mm à 0,4 mm. Dans ce dernier cas, la faible distance d'entrefer combiné à la basse consistance contribue à des temps de résidence faibles comparativement au raffinage à haute consistance et notamment au raffinage en deux stades. Il est connu que le raffinage à basse intensité agit sur les fibres au niveau de la paroi en favorisant la fibrillation et l'hydratation et développe les fibres en minimisant la coupe au contraire du raffinage à haute intensité qui provoque une réduction plus importante de la longueur des fibres. Outre la consommation d'énergie spécifique, il convient donc d'analyser plus en profondeur le développement des pâtes recombinaées en termes de propriétés physiques.

7.5.3 Propriétés physiques et optiques

Les pâtes recombinaées pour lesquelles les fractions de fibres longues ont été raffinées à basse consistance ont des propriétés mécaniques fortement réduites. Ceci est lié à l'effet de coupe des fibres qui est plus prononcé lors du raffinage à basse consistance que lors du raffinage à haute consistance. Zha *et al.* [185] a d'ailleurs mis en évidence la relation entre la réduction de la paroi des fibres et la réduction de longueur des fibres et montré que, lors du raffinage à basse consistance, la réduction de la paroi des fibres est plus faible que lors du raffinage à haute consistance alors que la réduction de la longueur des fibres est plus grande. Donc, non seulement les fibres subissent une coupe plus importante à basse consistance mais elles reçoivent un développement moindre de la paroi, ce qui certes, conserve la masse linéique et la résistance intrinsèque des fibres mais cela au détriment de la surface spécifique des fibres, de leur capacité à créer des liaisons inter-fibres et de la production de fines fibrillaires. Dans le cas des fibres courtes, le même phénomène se produit, cependant l'effet résultant sur la pâte recombinaée (2^{ème} série) est secondaire en raison de la faible proportion de cette fraction dans le mélange.

7.5.3.1 Procédés de raffinage

L'évolution des propriétés des pâtes au cours du raffinage est illustrée par les figures 7.17 à 7.23 et 7.24 à 7.30. La légende employée dans les figures 7.24 à 7.30 est indiquée dans le tableau 7.9. Le raffinage à haute consistance permet de préserver les propriétés de résistance mécaniques. Dans le cas de l'absorption de l'énergie de traction (Figure 7.17, Figure 7.24) et de l'indice de résistance à l'éclatement (Figure 7.20, Figure 7.27), il est possible d'obtenir des valeurs plus élevées que celle de la pâte entière avec un raffinage à haute consistance en deux stades des fractions de fibres longues et de fibres courtes. Cependant les valeurs pour la résistance à la rupture par traction (Figure 7.18, Figure 7.25) et à la déchirure (Figure 7.21, Figure 7.28) restent similaires ou inférieures. Cet aspect est lié au développement de l'allongement à la rupture qui est plus élevé que celui de la pâte entière lors du raffinage des fractions à haute consistance (Figure 7.19, Figure 7.26), probablement en raison d'une plus grande résistance intrinsèque des fibres ou encore, à une quantité moindre de points faibles dans les parois des fibres. Dans le cas de la résistance à la déchirure, la longueur des fibres joue un rôle prépondérant. Or, dans les pâtes recombinaées, la longueur des fibres est plus faible que celle de la pâte entière même lorsque les fibres longues sont raffinées à haute consistance (Figure 7.22, Figure 7.29), ce qui témoigne de l'effet protecteur des fibres courtes et des fines sur les fibres longues. En fait, pour obtenir un même niveau de développement de la pâte recombinaée sans raffiner les fibres courtes et les fines, il est nécessaire d'appliquer plus d'énergie sur les fibres longues, ce qui a pour conséquence une réduction plus importante de leur longueur. Les valeurs du coefficient de diffusion des pâtes recombinaées, bien que présentant le même type de hiérarchisation au regard des procédés de raffinage, sont dans tous les cas plus élevées que celles de la pâte entière (Figure 7.23, Figure 7.30). Ceci est significatif de la différence entre les fines présentes dans les pâtes recombinaées et celles présentent dans la pâte entière. En effet dans le premier cas, les fines n'ont pas subi de raffinage postérieurement au premier stade et ont conservé leur pouvoir de diffusion associé à la forme floconneuse alors que dans la pâte entière, les fines sont de nouveau divisées et perdent une partie de leur capacité de diffusion de la lumière en créant un milieu plus homogène dans la feuille.

Dans les cas de la deuxième série de mélanges, la différence entre la fraction de fibres longues et la fraction de fibres courtes A2 réside non seulement dans la longueur des fibres mais également dans le fait que la fraction de fibres longues QR contient une quantité plus élevée de fibres de BE que la fraction de fibres courtes A2. L'intérêt de cette série de mélange repose donc sur les différences de raffinage pour chaque type de fibre en termes d'intensité de raffinage et de distribution de l'énergie spécifique entre les deux fractions pour obtenir un même niveau de développement de la pâte recombinaée. Ces différences expliquent également la variabilité des mesures que l'on peut observer sur les mélanges à trois composants pour une combinaison donnée de procédé de raffinage (figures 7.24 à 7.30).

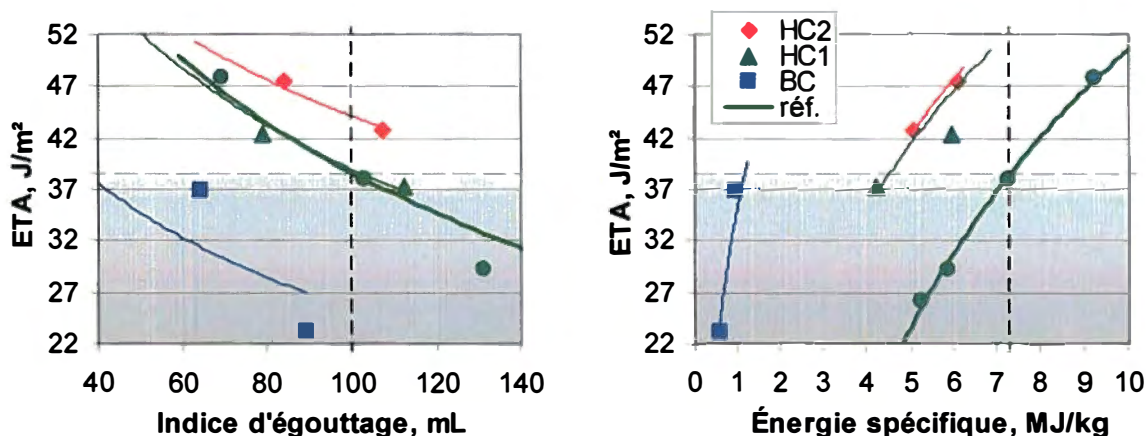


Figure 7.17 Absorption de l'énergie de traction en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 1^{ère} série

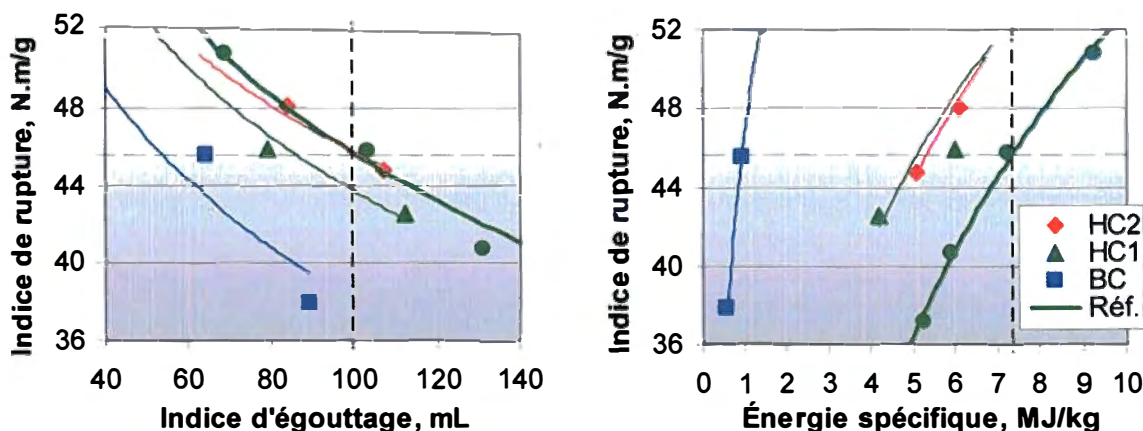


Figure 7.18 Indice de résistance à la rupture par traction en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 1^{ère} série

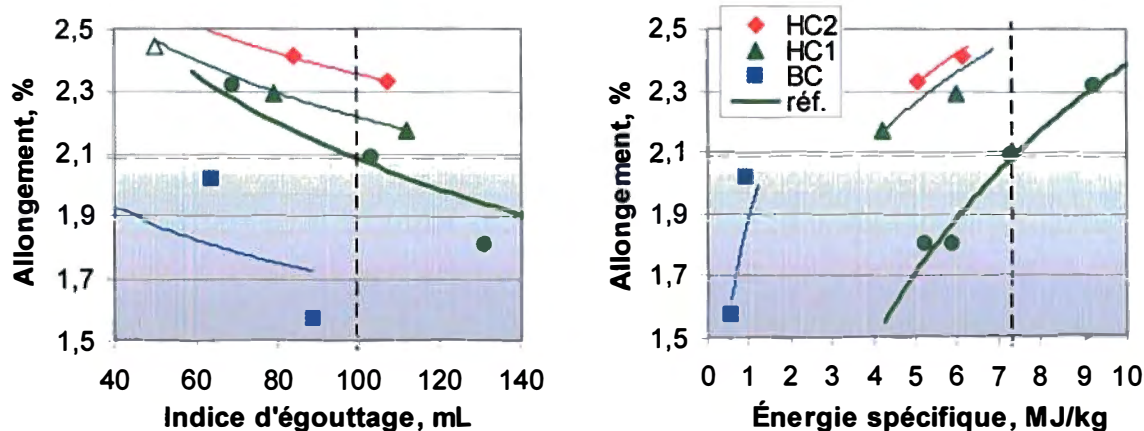


Figure 7.19 Allongement à la rupture en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 1^{ère} série

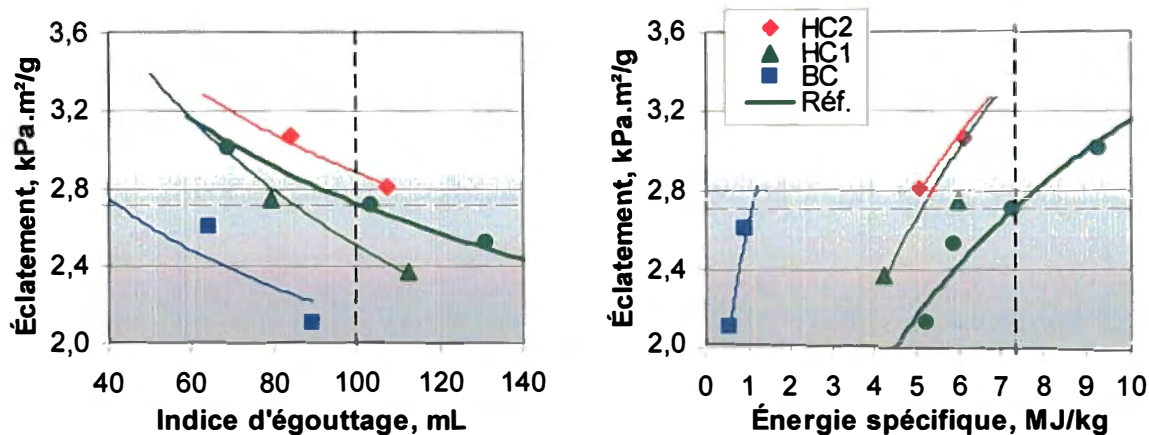


Figure 7.20 Indice de résistance à l'éclatement en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 1^{ère} série

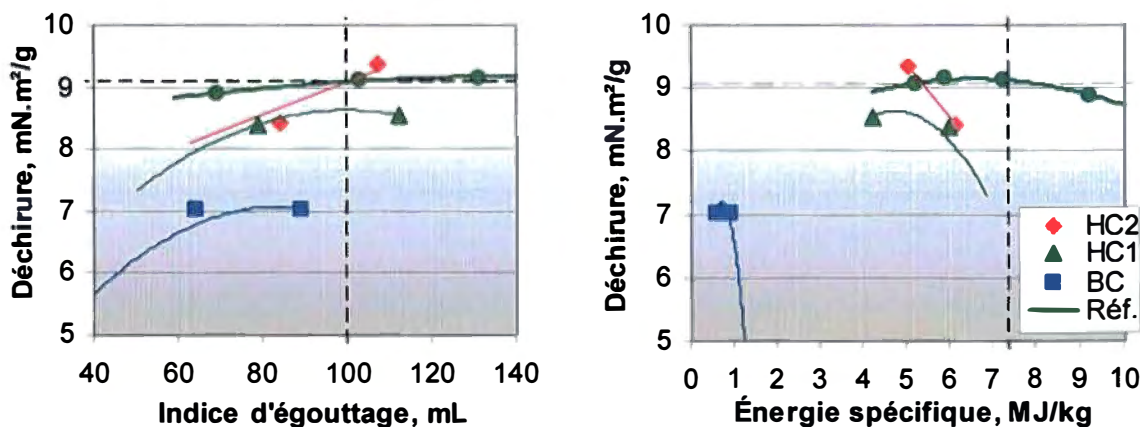


Figure 7.21 Indice de résistance à la déchirure en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 1^{ère} série

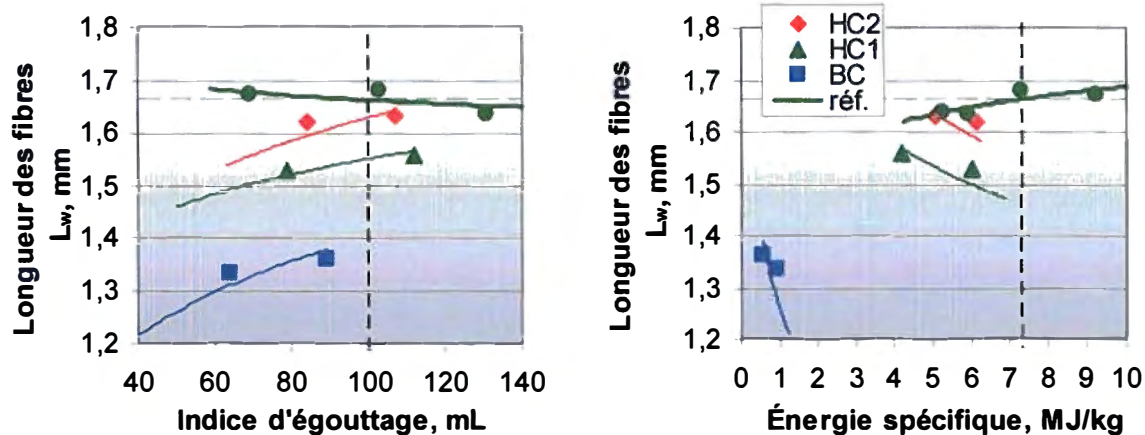


Figure 7.22 Longueur moyenne pondérée des fibres en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 1^{ère} série

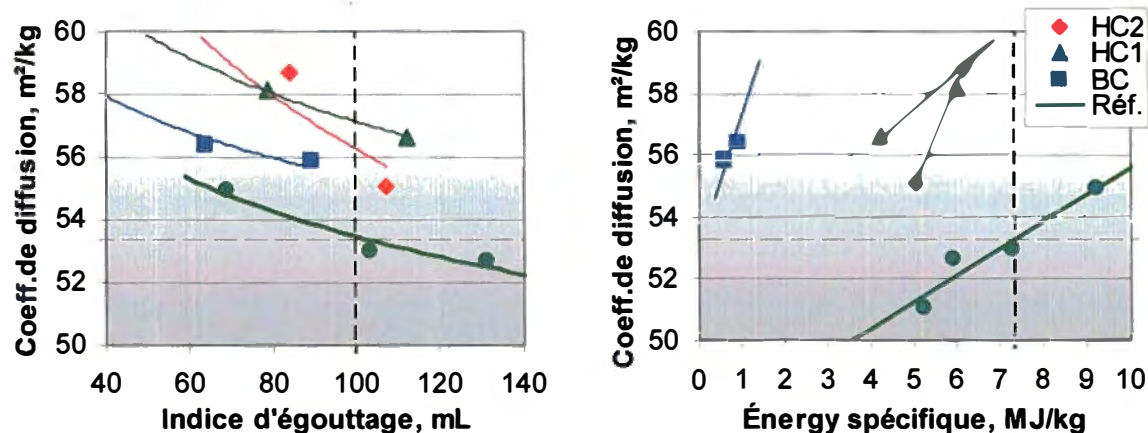


Figure 7.23 Coefficient de diffusion de la lumière en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 1^{ère} série

Tableau 7.9 Légende utilisée dans les figures 7.24 à 7.30

| Symboles | | Procédé de raffinage | |
|----------------------|---------------------|---|---------------------------|
| Points de validation | Courbes prédictives | QR | A2 |
| ● | — | Haute consistance 1 stade (pâte primaire entière) | |
| ◆ | — | Haute consistance 2 stades | Haute consistance 1 stade |
| ◇ | - - - | | Basse consistance |
| ▲ | — | Haute consistance 1 stade | Haute consistance 1 stade |
| △ | - - - | | Basse consistance |
| ■ | — | Basse consistance (multi-passe) | Haute consistance 1 stade |
| □ | - - - | | Basse consistance |

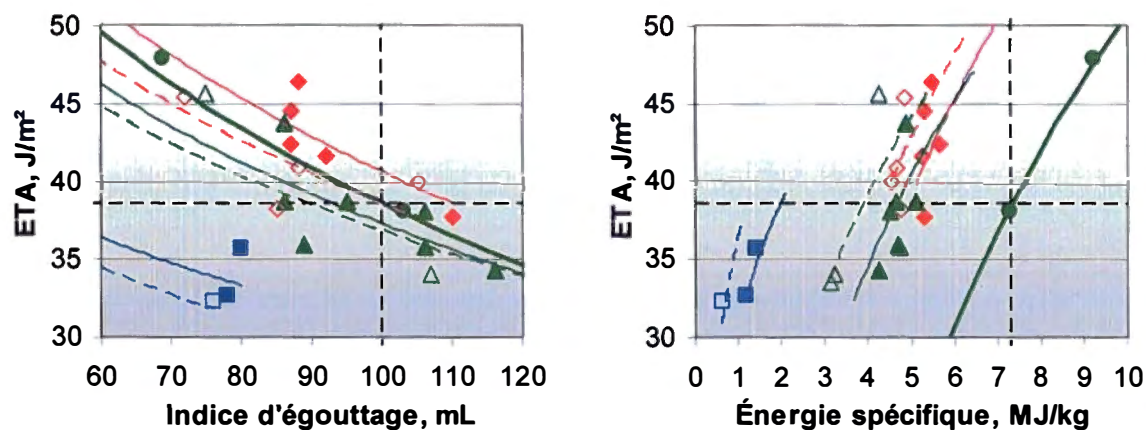


Figure 7.24 Absorption de l'énergie de traction en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 2^{ième} série

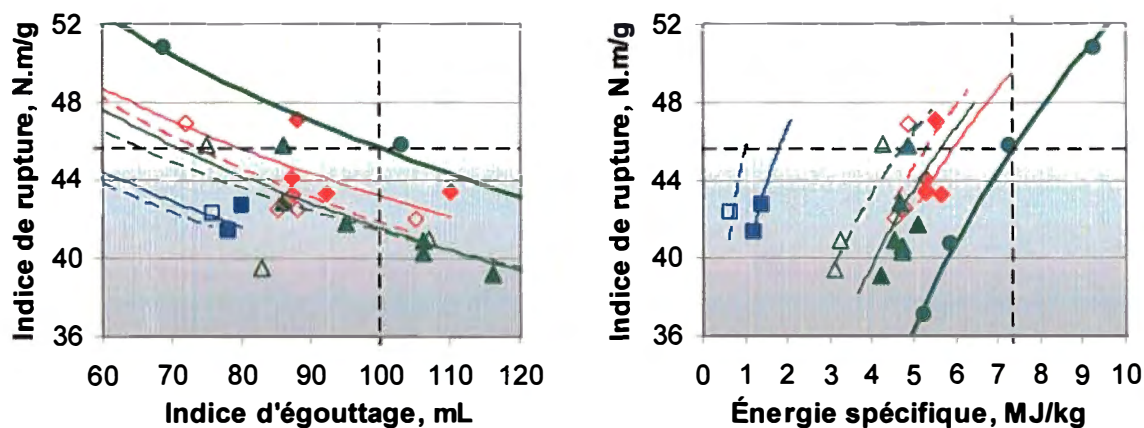


Figure 7.25 Indice de résistance à la rupture par traction en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 2^{ième} série

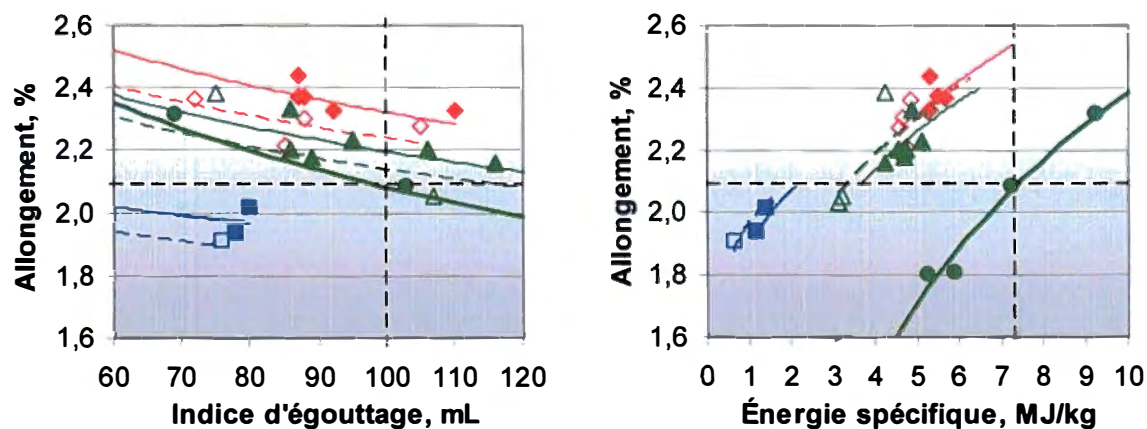


Figure 7.26 Allongement à la rupture en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 2^{ième} série

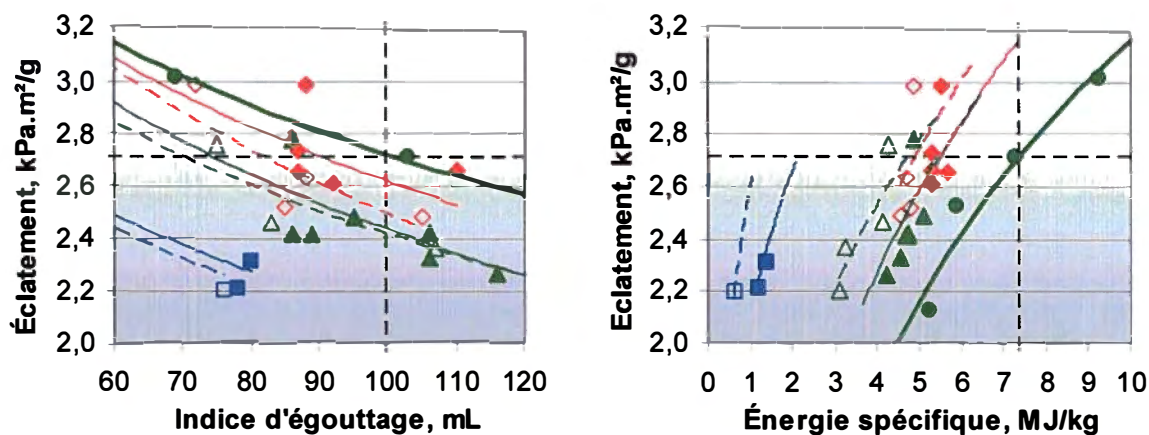


Figure 7.27 Indice de résistance à l'éclatement en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 2^{ième} série

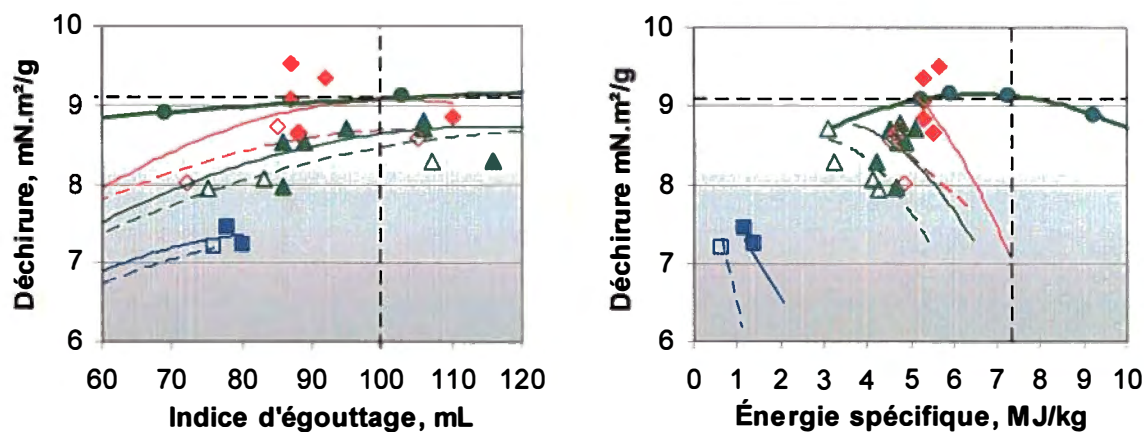


Figure 7.28 Indice de résistance à la déchirure en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 2^{ième} série

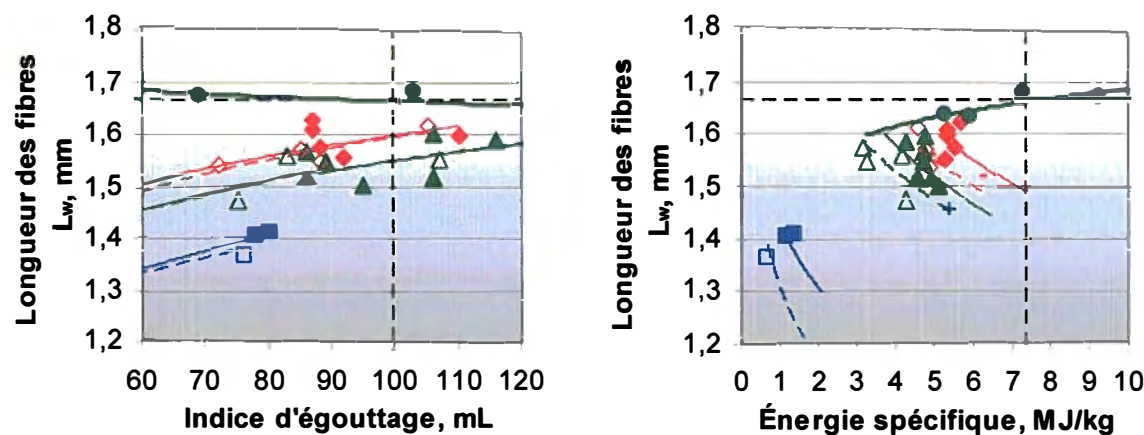


Figure 7.29 Longueur moyenne pondérée des fibres en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 2^{ième} série

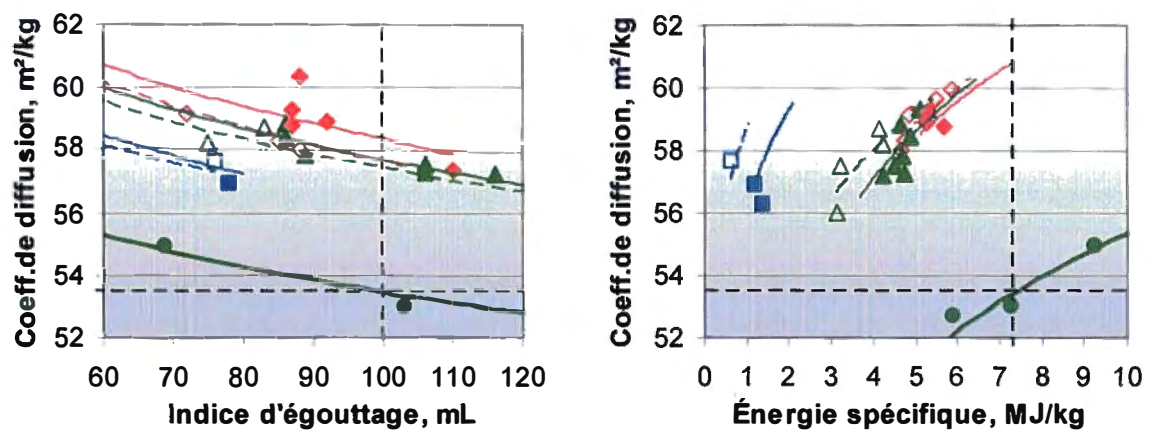


Figure 7.30 Coefficient de diffusion de la lumière en fonction de l'indice d'égouttage et de l'énergie spécifique – 2^{ème} série

7.5.3.2 Distribution de l'énergie spécifique

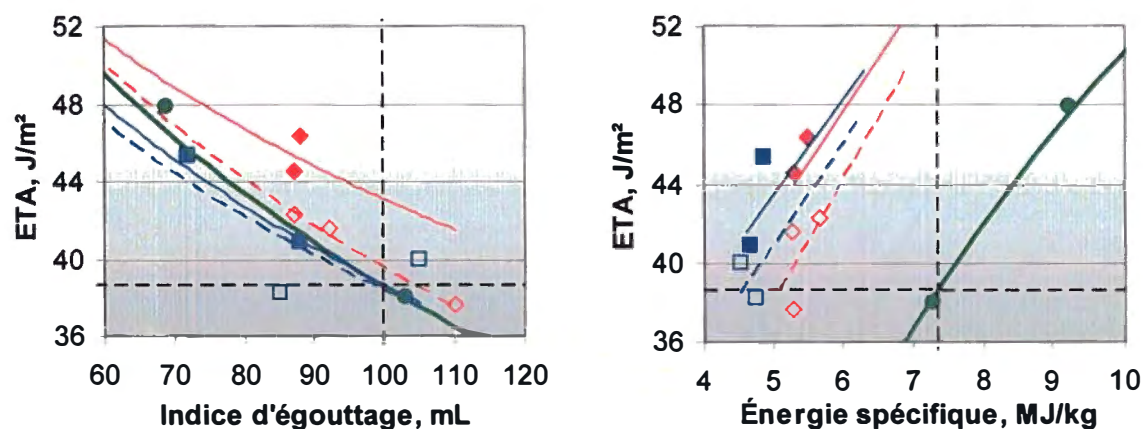
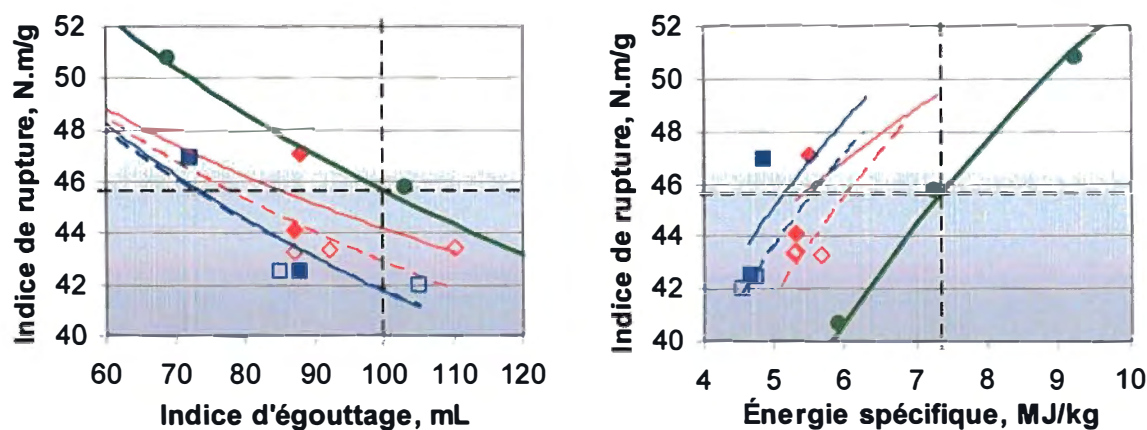
Dans le but de faciliter l'interprétation des graphiques, les figures présentées par la suite (figures 7.31 à 7.37) exposent le cas où la fraction QR a été raffinée à haute consistance en deux stades. La légende employée dans ces figures est indiquée dans le Tableau 7.10. Dans ce cas-ci, les pâtes recombinaées présentent de meilleures propriétés mais les conclusions restent valides lorsque la fraction QR est raffinée en un stade ou même à basse consistance.

Les pâtes recombinaées pour lesquelles une plus grande quantité d'énergie spécifique a été appliqué sur la fraction de fibres longues QR et, par conséquent, pour lesquelles moins d'énergie a été appliquée sur la fraction de fibres courtes A2, présente des propriétés de résistance mécaniques plus élevées. Les pâtes ont des propriétés similaires à celles obtenues en raffinant seulement les rejets SR à haute consistance en deux stades tandis que les pâtes où une plus grande quantité d'énergie a été appliquée sur la fraction de fibres courtes présentent des valeurs proches de celles où la fraction SR a été raffinée à haute consistance en un stade. Lorsque la fraction A2 est raffinée à basse consistance, le même type d'observation peut être fait, cependant les différences sont moins grandes.

Du point de vue de l'énergie spécifique de raffinage, la quantité d'énergie globale appliquée à la pâte recombinaée est moins grande si une plus grande quantité d'énergie a été appliquée sur la fraction de fibres longues.

Tableau 7.10 Légende employée dans les figures 7.31 à 7.37

| Symboles | | Procédé de raffinage | | Niveau d'énergie | |
|----------------------|---------------------|-----------------------------|----|------------------|------|
| Points de validation | Courbes prédictives | QR | A2 | QR | A2 |
| ● | — | HC1 (pâte primaire entière) | | — | — |
| ◆ | — | HC2 | HC | Haut | Bas |
| ◇ | - - - | HC2 | HC | Bas | Haut |
| ■ | — | HC2 | BC | Haut | Bas |
| □ | - - - | HC2 | BC | Bas | Haut |

Figure 7.31 Absorption de l'énergie de traction à différents niveaux d'énergie spécifique – 2^{ème} sérieFigure 7.32 Indice de rupture par traction à différents niveaux d'énergie spécifique – 2^{ème} série

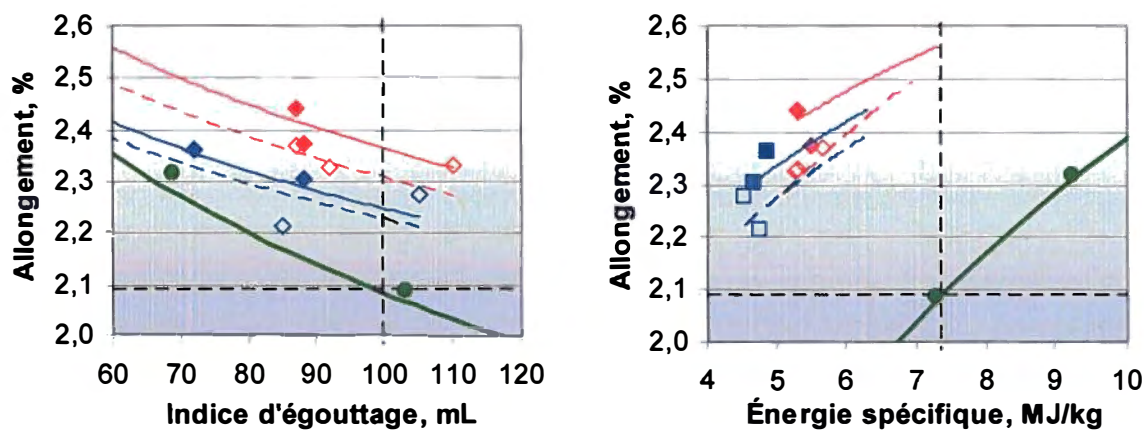


Figure 7.33 Allongement à la rupture à différents niveaux d'énergie spécifique – 2^{ième} série

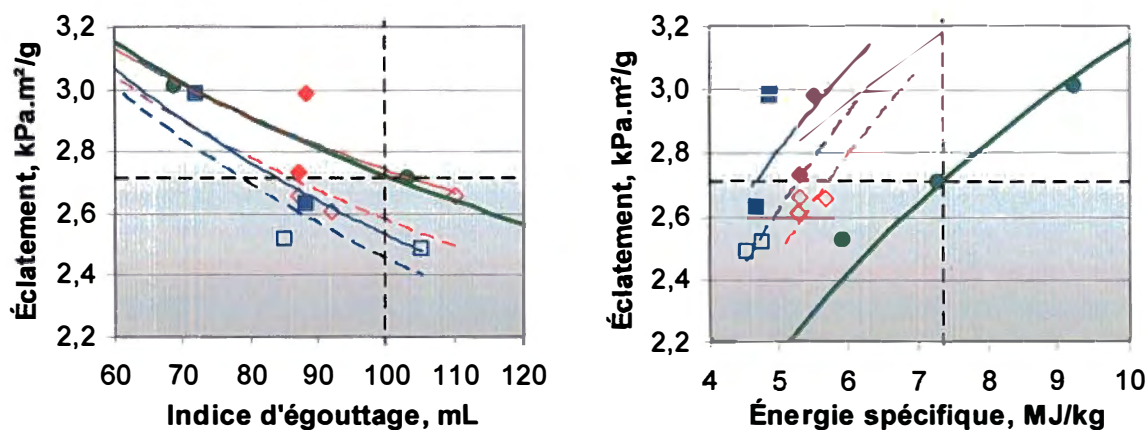


Figure 7.34 Indice de résistance à l'éclatement à différents niveaux d'énergie spécifique – 2^{ième} série

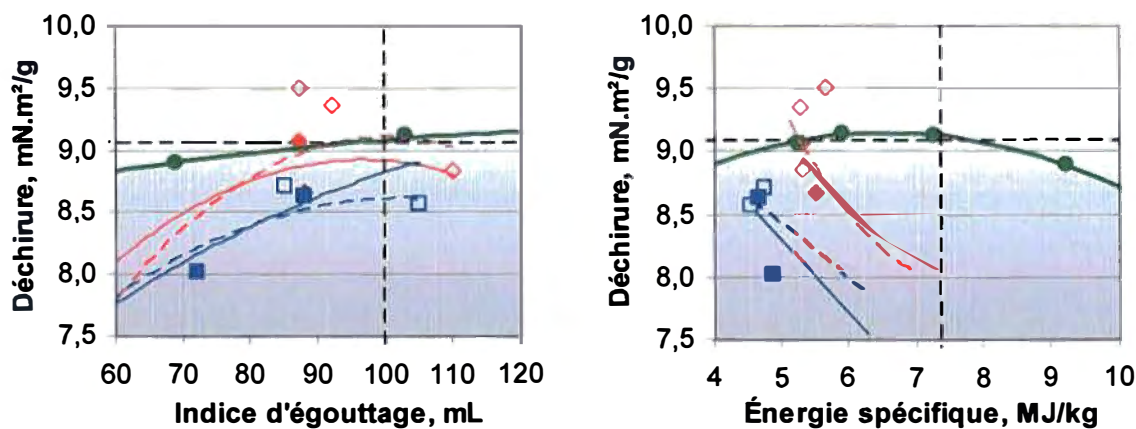


Figure 7.35 Indice de résistance à la déchirure à différents niveaux d'énergie spécifique – 2^{ième} série

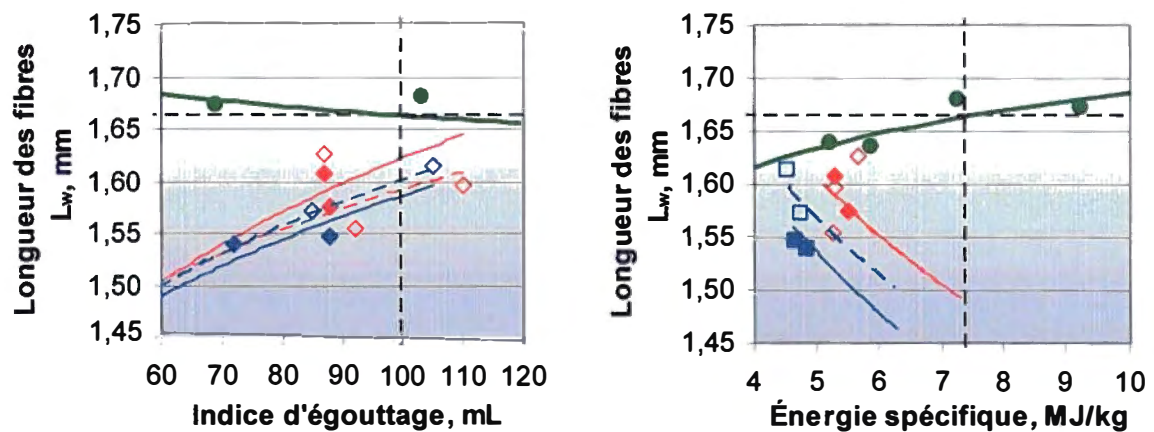


Figure 7.36 Longueur moyenne pondérée des fibres à différents niveaux d'énergie spécifique – 2^{ème} série

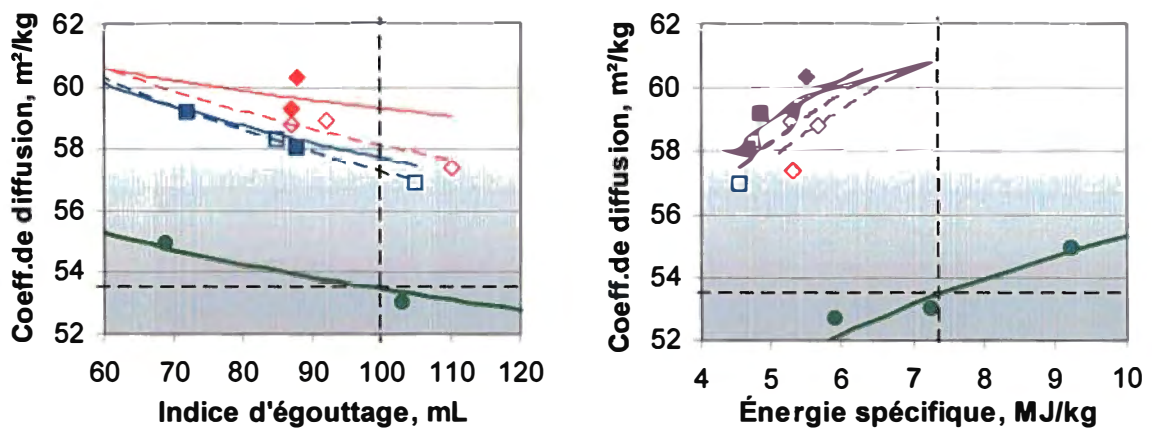


Figure 7.37 Coefficient de diffusion de la lumière à différents niveaux d'énergie spécifique – 2^{ème} série

7.6 Conclusions

Le raffinage séparé des fractions permet donc d'obtenir des pâtes dont les propriétés physiques sont différentes selon les procédés de raffinage employés sur chaque fraction et selon la distribution de l'énergie spécifique entre la fraction de fibres longues et la fraction de fibres courtes. Les fibres longues requièrent moins d'énergie spécifique que les fibres courtes pour obtenir un même niveau de développement de la pâte recombinaée. Ceci suggère soit que ces fibres se développent plus rapidement que les fibres courtes, ce qui est logique considérant qu'elles possèdent un potentiel de développement plus grand mais aussi que leur contribution en termes de propriétés physiques est également plus importante. Ce dernier point est probablement très dépendant des propriétés physi-

ques considérées. Par exemple, les propriétés de résistances à la traction sont très dépendantes à la fois de la longueur des fibres et de leur capacité de liaison alors que la résistance à la déchirure dépend plus spécifiquement de la longueur des fibres. Cependant cette dernière propriété est également sensible à la présence de points faibles dans la feuille qui facilitent la propagation de la déchirure et l'apport de fines avec une capacité de liaison élevée comme les fines fibrillaires par exemple, permet de consolider la feuille et d'améliorer cette propriété. Ce dernier point reste cependant secondaire. Zha *et al.* [185] ont d'ailleurs montré que les fines des pâtes recombinaées sont, à la fois, mieux développées en termes de volume spécifique de sédimentation et à la fois, plus nombreuses que dans la pâte entière raffinée. Le fait que les fines primaires ne soient pas de nouveau raffinées mais réintroduites dans la pâte sans traitement postérieur permet que celles-ci ne soient pas de nouveau divisées, ce qui explique les meilleures propriétés de diffusion de la lumière. D'autres propriétés de textures peuvent également être influencées par ces dernières remarques, telles que le peluchage et la rugosité de surface. La première est notamment sensible à la qualité des fines et des fibres courtes en termes de capacité de liaison pour éviter que celles-ci ne se détachent de la feuille alors que la seconde est plutôt sensible à la conformabilité des fibres longues, notamment des fibres de BE, qui peuvent gonfler ou se redresser dans la feuille sous l'effet de l'humidification de la feuille lors de l'impression soit par le mouillage offset, soit par les encres flexographiques à base d'eau.

7.6.1 Stratégies de raffinage

À partir des résultats discutés ci-dessus, plusieurs stratégies de fractionnement et de raffinage peuvent être élaborées dans le but de réduire la consommation d'énergie ou d'améliorer certaines propriétés. Le tableau 7.11 ci-dessous présente les différences entre plusieurs stratégies en termes de consommation d'énergie et de propriétés des pâtes comparativement avec la pâte entière raffinée à 100 mL et mettant en jeu, soit deux tamis à trous de 0,25 mm de diamètre, soit la séquence complète de fractionnement.

Dans le cas de la séquence de fractionnement complète, il est envisageable de considérer un niveau de raffinage plus élevé pour compenser les pertes de propriétés physiques. Il

est cependant peu probable que cela soit acceptable pour une sorte de papier donnée, par exemple le papier journal, en raison des implications au niveau de la machine à papier. Notamment dans la section humide mais surtout dans la sécherie, une plus grande quantité d'énergie pourrait être requise pour drainer et évaporer l'eau de la feuille, ce qui aurait pour conséquence d'absorber les économies générées lors de la mise en pâte.

Tableau 7.11 Tableau comparatif de plusieurs stratégies de raffinage en termes d'énergie spécifique de raffinage et de propriétés physiques

| Propriétés | Unités | Réf. | SR HC2 | QR HC2 A2 HC | | QR HC2 A2 BC | |
|-------------------------------------|-----------------------|------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Indice d'égouttage | mL | 100 | 100 | 100 | 80 | 100 | 80 |
| Énergie spécifique ⁽¹⁾ | MJ/kg | 7,40 | 5,32 (-28%) | 5,03 (-32%) | 5,91 (-20%) | 4,18 (-44%) | 5,04 (-32%) |
| Indice de résistance à la traction | N.m/g | 45,6 | 45,7 (0,1%) | 43,2 (-5,4%) | 45,6 (-0,1%) | 41,7 (-8,5%) | 44,5 (-2,4%) |
| Absorption d'énergie de traction | J/m ² | 38,6 | 44,0 (14%) | 40,5 (5,1%) | 45,7 (18,4%) | 38,7 (0,5%) | 42,9 (11%) |
| Indice de résistance à la déchirure | mN.m ² /g | 9,08 | 9,09 (0,0%) | 9,15 (0,7%) | 8,81 (-5,9%) | 8,84 (-2,7%) | 8,47 (-6,7%) |
| Indice de résistance à l'éclatement | kPa.m ² /g | 2,72 | 2,88 (5,7%) | 2,70 (-0,9%) | 2,88 (-3,0%) | 2,51 (-7,8%) | 2,74 (0,6%) |
| Coefficient de diffusion | m ² /kg | 53,5 | 56,2 (5,2%) | 58,4 (9,2%) | 59,4 (11,1%) | 57,6 (7,8%) | 58,7 (9,8%) |

Notes : Les valeurs entre parenthèses indiquent la différence avec la pâte de référence (pâte entière raffinée à 100 mL CSF). La fraction A1 non raffinées est introduite dans chacun des cas. ⁽¹⁾ Énergie spécifique du second stade de raffinage

7.6.2 Procédé TMP

En relation avec les stratégies proposées précédemment, la figure 7.38 ci-dessous présente le diagramme du procédé TMP faisant intervenir le fractionnement après le stade primaire. Le fractionnement comprend deux tamis équipés de paniers à trous lisses et éventuellement deux tamis avec un panier à fentes. Dans le premier cas, un stade de raffinage secondaire est employé pour raffiner la fraction de rejets. Dans le second cas, deux stades secondaires sont employés, un pour la fraction de fibres longues constituée

des rejets finaux et un pour la fraction de fibres courtes constituée des acceptés des tamis à fentes.

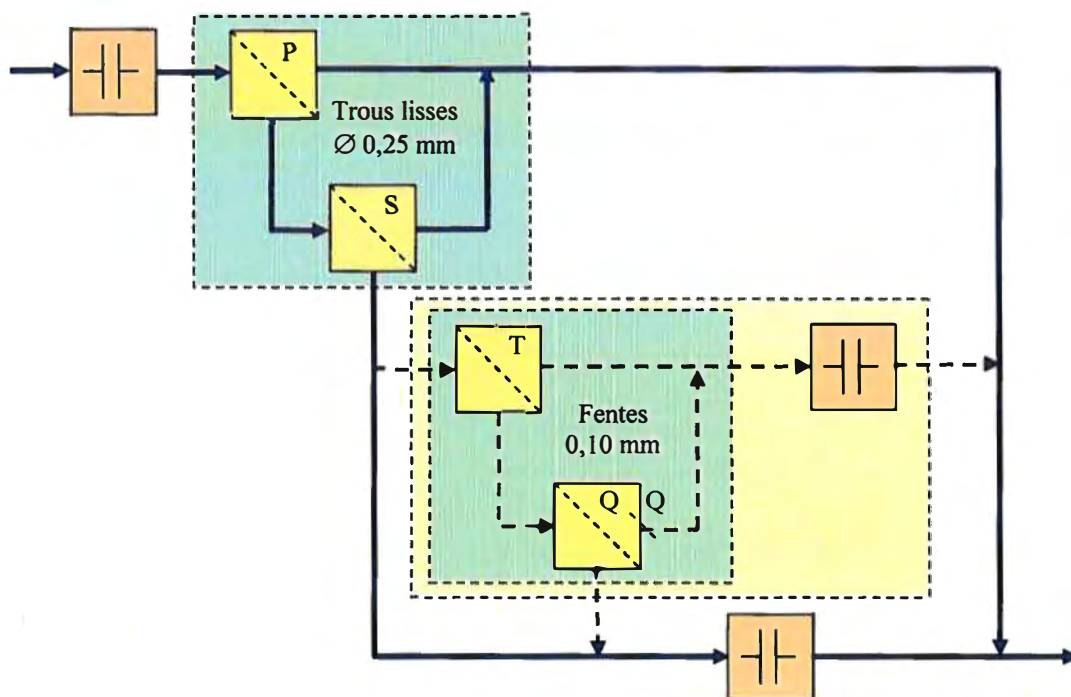


Figure 7.38 Schéma du procédé de mise en pâte thermomécanique incorporant le fractionnement avec tamis en cascade après le stade primaire

Dans le cas d'une usine existante, deux stades de raffinage des rejets peuvent être mis en place en utilisant le raffineur secondaire et le raffineur de rejets lorsque seulement deux tamis à trous sont employés. Dans le cas d'un fractionnement à quatre tamis, les rejets peuvent être raffinés par le raffineur secondaire et les acceptés par le raffineur de rejets, ce qui implique l'acquisition d'un nouveau raffineur afin de raffiner les rejets en deux stades. Dans les deux cas, il serait cependant plus judicieux de réaliser un raffinage des rejets en un seul stade en choisissant des conditions de raffinage pour obtenir une intensité de raffinage la plus basse possible. L'étude réalisée montre en effet que le raffinage en deux stades produit une pâte de meilleure qualité. Cependant, il est probable que le choix de plaques et de conditions de raffinage promouvant un raffinage à basse intensité, associé à une optimisation du bilan de masse des fractions et de la distribution d'énergie

spécifique entre fractions, permette d'optimiser la qualité de la pâte de manière à éviter l'installation d'un raffineur supplémentaire.

Dans le cas d'une installation neuve, ce procédé ne signifie pas d'investissement supplémentaire par rapport à un procédé TMP traditionnel dans la mesure où le stade de classage postérieur au stade de raffinage secondaire est remplacé par un stade de fractionnement de la pâte primaire et le raffineur secondaire et le raffineur de rejets par les raffineurs des fractions de pâte. Lorsque seuls les rejets sont raffinés, avec un procédé de fractionnement constitué de deux tamis à trous, il est possible d'envisager qu'une optimisation du raffinage permette de réaliser un seul stade à haute consistance, ce qui permettrait l'économie d'un raffineur et un investissement moindre.

Chapitre 8 - Conclusions

Deux aspects originaux ont été développés au cours de cette étude : le fractionnement de la pâte après le premier stade de raffinage et l'utilisation d'un tamis équipé d'un panier avec de petites ouvertures. La difficulté essentielle du fractionnement de la pâte de premier stade réside dans la présence de bûchettes et de fibres longues en grande quantité et le faible développement des fibres, notamment de leur surface spécifique, ce qui défavorise certains équipements comme les hydrocyclones. La pâte primaire de Papier Masson Ltée présente en ce sens l'avantage d'être composée de fibres bien individualisées et intactes. Leur forme de leur section transversale est similaire à celle qu'elles possédaient dans le bois et peu de fibres sont collapsées, même parmi la population de fibres de BP. Ces fibres ont donc conservé tout leur potentiel pour un développement ultérieur à travers un traitement de raffinage sélectif visant à favoriser le développement optimal de chaque type de fibre avec un moindre coût énergétique.

Le panier à trous de 0,25 mm est un bon équipement de fractionnement sur la base de la longueur mais l'effet barrière important qu'il produit, génère plusieurs limitations : d'une part, il ne permet pas de fractionner sur la base de critère tel que l'épaisseur de paroi et d'autre part, il produit un taux de rejets massique et un taux d'épaississement élevé. En raison du contenu de la pâte en fibres longues et de l'accroissement des fibres longues dans les rejets, ce tamis ne peut être employé que comme tamis primaire et secondaire. En position tertiaire ou postérieure, ce tamis a tendance à se boucher ou, si la consistance est suffisamment basse, à laisser passer les fibres longues au travers du panier. Par conséquent, et considérant deux tamis en cascade, il est nécessaire d'employer le taux de rejets volumique le plus bas possible pour obtenir un bilan de masse en accord avec la composition fibreuse de la pâte primaire. Par ailleurs, le taux de rejets volumique doit être suffisamment haut pour éviter le bouchage du tamis et fournir des conditions opérationnelles stables. Dans cette étude, ces conditions sont remplies pour un taux de rejets volumique de 25%. L'usage de trous lisses de plus grand diamètre, de l'ordre de 0,4 à 0,6 mm, permettrait probablement de minimiser ces limitations tout en fournissant un effet barrière adéquat pour la séparation des fibres longues et des fibres courtes.

L'usage de tamis équipé de panier à fentes de 0,10 mm postérieurement au tamis à trous permet de fractionner les rejets du tamis secondaire sur la base de l'épaisseur de paroi. Ce tamis produit également un effet barrière, notamment pour la classe R14, mais produit un fractionnement probabiliste pour les classes de fibres plus courtes. Ceci permet une augmentation significative des fibres de BE dans les rejets et une diminution de ces fibres dans les acceptés. La séparation des fibres de BE est le résultat du fractionnement sur la base de la longueur, dans la mesure où les fibres de BE ont tendance à se trouver en plus grand nombre dans les classes de fibres longues, et du fractionnement sur la base de l'épaisseur de paroi, dans la mesure où la flexibilité des fibres influence le passage des fibres au travers des ouvertures, les fibres rigides ayant une plus grande difficulté à passer dans les ouvertures. Dans la pâte primaire, la présence plus élevée de fibres de BE à paroi épaisse dans les classes de fibres longues que dans les classes de fibres courtes s'explique par le fait qu'elles résistent mieux aux contraintes de raffinage durant le stade primaire. Leur paroi épaisse offre une plus grande résistance mécanique. En contrepartie, la paroi plus fine des fibres de BP est fragile et la présence de ponctuations de grande taille crée des points faibles où la rupture se produit plus facilement.

8.1 Réduction de la consommation d'énergie

Le raffinage des fibres longues séparément des fibres courtes et des fines permet une réduction de la consommation globale d'énergie comparativement avec le raffinage de la pâte entière à haute consistance pour un même niveau de développement des fibres.

Les fibres courtes et les fines requièrent une quantité d'énergie plus importante que les fibres longues pour produire une même différence de développement, ce qui suggère que les fibres courtes et les fines ont une plus grande tendance à dissiper l'énergie de raffinage. Les dimensions de ces fibres réduisent leur probabilité de recevoir une action de raffinage par les barres des plaques du raffineur, ce qui les rend moins aptes à se développer. Cependant lorsqu'elles sont présentes dans la pâte avec les fibres longues, elles subissent les effets des contraintes de pression et produisent également des frictions entre fibres qui dissipent l'énergie sous forme de chaleur. Par ce mécanisme, elles jouent un rôle protecteur des fibres longues.

Le fractionnement des fibres de BE à l'aide d'un tamis à fentes, postérieurement au tamis à trous, permet d'augmenter le taux de fibres à paroi épaisse dans les rejets et d'obtenir une fraction d'acceptés avec une plus grande quantité de fibres de BP. Pour un même développement de la pâte recombinaée, le raffinage séparé de ces fractions, (rejets quaternaires et acceptés des deux derniers tamis) requiert moins d'énergie que le raffinage de la pâte entière mais aussi que le raffinage des rejets secondaires. Ainsi le raffinage de la seule fraction de rejets secondaires à haute consistance en deux stades pour obtenir une pâte recombinaée de 100 mL CSF, requiert 16% moins d'énergie que le raffinage de la pâte entière, alors que le raffinage des rejets quaternaires et des acceptés à haute consistance génère une économie d'énergie de 18%. Cette économie d'énergie peut également être accrue en remplaçant le raffinage à haute consistance par du raffinage à basse consistance, notamment sur la fraction des acceptés. Ces aspects de consommation énergétique ont cependant des impacts spécifiques sur les propriétés physiques de la pâte qu'il convient de considérer en fonction de ses propres besoins et objectifs.

8.2 Qualité des pâtes

Avec le raffinage séparé des fractions des rejets et des acceptés, les propriétés physiques de pâtes sont différentes de celles de la pâte entière raffinée.

Le raffinage des fibres longues, sans les fibres courtes, ni les fines, permet de développer sélectivement ces fibres tout en conservant les propriétés de diffusion des fines. Il en résulte des pâtes dont le coefficient de diffusion de la lumière est augmenté. Les propriétés physiques de la pâte recombinaée dépendent de la manière avec laquelle les fibres longues ont été raffinées. Le raffinage à haute consistance préserve la longueur des fibres et produit un délaminage de la paroi de fibres qui augmente leur capacité de liaison en exposant la paroi secondaire. Ces deux effets combinés provoquent une augmentation de l'allongement à la rupture en offrant à la feuille une plus grande capacité à supporter la déformation qu'elle subit sous l'effet de la traction. La feuille peut être considérée comme un maillage déformable où les fibres sont unies aux points de croisement des fibres. Plus ces points de croisement sont nombreux et solides et plus la feuille est à

même de supporter une déformation. En contrepartie, la réduction de l'épaisseur de paroi se traduit par une réduction de la résistance intrinsèque des fibres et par suite de la résistance à la traction de la feuille. Globalement, il en résulte une augmentation de l'absorption d'énergie de traction. Ces aspects favorisent également la résistance à l'éclatement. Cette propriété présente en effet des caractéristiques similaires à celle de la résistance à la traction dans la mesure où la feuille soumise à la pression de la membrane se déforme en produisant une courbe le long de laquelle la contrainte de pression normale à la surface de la feuille induit des forces de tensions tangentielles. La résistance à la déchirure est sensible à la résistance du réseau fibreux mais aussi à son homogénéité car la présence de points faibles au sein de la feuille facilite la propagation de la déchirure. Le raffinage séparé des rejets ne développent pas les fines primaires et l'apport de fines secondaires est réalisé par le délaminage ou la coupe des fibres longues. Ces fines secondaires sont plus développées lorsque le raffinage est effectué en deux stades. De cette manière la résistance à la déchirure de la pâte recombinaisonnée est similaire à celle de la pâte entière raffinée pour un indice d'égouttage de 100 mL. Mais un excès de raffinage des fibres longues conduit à une réduction de la longueur des fibres et produit une réduction de la résistance à la déchirure.

Le raffinage séparé des rejets enrichis en fibres de BE et des acceptés permet de compenser partiellement la coupe des fibres longues et de minimiser la réduction de la résistance à la déchirure et également de la résistance à la traction avec cependant une augmentation plus modeste de l'allongement à la rupture et de l'absorption d'énergie de traction. Cette aspect est dépendant de la distribution d'énergie entre les rejets et les acceptés. Dans le cas où une plus grande quantité d'énergie est appliquée sur les rejets, la qualité de la pâte est similaire au cas où seuls les rejets secondaires sont raffinés. Dans le cas opposé, il résulte une dégradation des propriétés physiques de la pâte et également une augmentation de la consommation d'énergie en dépit du raffinage à haute consistance en un stade des acceptés. Par conséquent, le raffinage séparé des rejets et des acceptés devient réellement avantageux dans le cas où une réduction plus importante de la consommation d'énergie est requise. Dans ce cas, le raffinage des acceptés à basse consistance constitue une solution intéressante. Dans tous les cas de figures présentés au

cours de cette étude, la résistance à la déchirure reste une propriété sensible pour laquelle aucune amélioration n'a été obtenue.

8.3 Contributions à l'avancement des connaissances

Dans le but de quantifier les fibres de BP et de BE dans les fractions de pâtes, une nouvelle approche a été proposée afin de permettre une analyse plus facile et d'éviter les étapes fastidieuses d'alignement des fibres, de fixation dans une résine époxy, de coupe des blocs au microtome et finalement de photographie au microscope électronique à balayage. Toutes ces étapes requièrent une grande minutie et sont exigeantes en temps pour obtenir une quantité de fibres suffisante pour une analyse quantitative. La méthode proposée fait usage de l'appareil MWT pour l'obtention de micrographies de fibres à partir d'échantillons de pâte diluée. L'analyse de ces micrographies permet de réaliser un comptage des fibres de BP et de BE sur la base de critères morphologiques. La conversion de ces comptages en proportions en poids est réalisée par l'usage d'un paramètre Z qui caractérise la forme des sections transversales des fibres de BP et de BE. Ce paramètre Z est similaire à celui couramment trouvé dans la littérature mais est calculé à l'aide du périmètre moyen de la paroi des fibres au lieu du périmètre extérieur. Il en résulte une meilleure discrimination des fibres de BP des fibres de BE, les fibres de BP ayant des valeurs inférieures à 55 et les fibres de BE des valeurs supérieures à 55 et éventuellement supérieures à 100 dans le cas de fibres à paroi épaisse mais de faible diamètre. L'obtention de valeurs caractéristiques de ce paramètre Z pour les fibres de BP et de BE requiert cependant une analyse des sections transversales des fibres, au moins sur la pâte primaire avant fractionnement.

La caractérisation des performances de fractionnement met en évidence le besoin d'indice qui permette de s'affranchir des conditions expérimentales. La plupart des indices proposés dans la littérature sont hérités de l'usage des tamis pour l'épuration des pâtes et non pour le fractionnement. Par conséquent, ces indices donnent une place de choix aux rejets au détriment des acceptés. Dans le cas du fractionnement, les deux fractions revêtent une importance égale. Une nouvelle définition de l'indice de Nelson a été proposée au cours de cette étude. Cet indice possède des caractéristiques semblables à la

définition originale mais de plus offre une symétrie entre les acceptés et les rejets en fournissant des valeurs comprises entre -1 et +1 et la performance de fractionnement d'une fraction rejetée peut être comparée facilement à la performance de fractionnement d'une fraction acceptée à un signe près. Une nouvelle définition du taux de passage en régime d'écoulement de mélange a également été proposée afin de résoudre des choix ambigus et parfois arbitraires rencontrés dans la littérature. Cette définition fait appel à la probabilité de rétention de la pâte comme critère de pondération permettant de calculer la consistance en amont des ouvertures du panier. Dans la littérature, les valeurs proposées sont généralement de 1 pour un tamis de faible hauteur ou 0,5 pour un tamis industriel. Ces valeurs conduisent en général à des contradictions. De fait, l'expérimentation présentée montre que ce paramètre dépend du type de panier, notamment de la taille des ouvertures du panier, des conditions opérationnelles et probablement de la configuration du rotor. Il serait intéressant de vérifier si cette définition peut être appliquée aussi dans le cas de tamis à régime d'écoulement bouchon.

La réalisation de séquence de fractionnement en mode discontinu requiert de boucler le bilan de masse de manière adéquate afin de s'assurer que les proportions de mélanges correspondent effectivement au fractionnement réalisé, en dépit des variations de débit et de consistance inhérentes au procédé et à la variabilité des mesures. Une méthode de correction des bilans de masse a été proposée. Cette méthode consiste à corriger les consistances d'alimentation, des rejets et des acceptés de manière à ce que le débit massique d'alimentation soit égal à la somme des débits massiques d'acceptés et de rejets, mais aussi qu'il soit égal à la moyenne des débits entrants et sortants mesurés. Cette approche ne privilégie donc pas un débit par rapport à l'autre et s'est montrée efficace pour l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux.

Finalement, cette étude a permis d'étendre la connaissance du fractionnement par des ouvertures de petites dimensions et pour la pâte primaire. Elle a également permis de mettre en évidence que des bénéfices peuvent en être obtenus, notamment en termes de réduction de consommation énergétique.

8.4 Recommandations et perspectives

L'étude réalisée jusqu'ici présente des résultats obtenus par une expérimentation en usine pilote. La mise en œuvre d'un essai en usine permettrait la comparaison et la validation de ces résultats et par suite, l'optimisation des conditions de fractionnement et de raffinage. L'optimisation du diamètre des ouvertures et des conditions opérationnelles, notamment en termes de consistance et de taux de rejets volumique, permettrait d'obtenir un meilleur compromis entre le fractionnement des fibres longues et des fibres courtes en fonction de la composition de la pâte primaire et du taux d'épaississement des rejets et de dilution des acceptés. Ces derniers paramètres influencent fortement le dimensionnement des équipements, notamment les équipements d'épaississage tels que les presses à vis, les presses à rouleaux ou les presses humides. L'optimisation du raffinage au travers de plaques de raffinage et de conditions opérationnelles promouvant un raffinage à basse intensité permettrait également d'optimiser la qualité de la pâte obtenue. Du point de vue des pâtes, d'autres propriétés devraient également être considérées telles que le peluchage et la rugosité. Dans ce contexte, le traitement séparé des acceptés et des rejets revêt une importance particulière. Le peluchage dépend en effet de la qualité des éléments fibreux courts et de leur capacité de cohésion alors que la rugosité dépend de la conformabilité des fibres rigides et de leur comportement aux cycles de séchage, calandrage et réhumidification.

D'autres traitements peuvent également être considérés en association avec le fractionnement de la pâte primaire, tel que l'application de traitement chimique séparé des fractions comme la sulfonation ou encore le blanchiment exclusif des fibres longues afin de réduire la consommation en agent de blanchiment [187]. Haugan *et al.* [188] constatent en effet que les fines génèrent une consommation additionnelle de réactif mais réalisent un apport moindre à la blancheur de la pâte et provoquent une baisse du coefficient de diffusion. Le traitement des rejets par le peroxyde d'hydrogène est également suggéré par Bian *et al.* [189] comme alternative à l'utilisation de pâte Kraft comme pâte de renforcement dans les papiers super-calandrés et les papiers couchés légers. Cependant dans leur étude, il constate également une baisse du coefficient de diffusion de la lumière. Le

procédé proposé dans cette étude produit une augmentation du coefficient de diffusion qui pourrait compenser la réduction produite par le traitement alcalin.

Dans le cadre de l'analyse quantitative de fibres de BP et de BE, le développement d'algorithme permettant d'analyser de manière automatique et sans intervention humaine les micrographies de fibres et de discriminer les fibres de BP des fibres de BE permettrait de réaliser des analyses avec une plus grande rapidité. Le paramètre Z modifié associé à des algorithmes à apprentissage automatique peut probablement apporter une réponse. Il est cependant probable que la largeur des fibres doive également être prise en compte dans la mesure où le paramètre Z ne peut être mesuré sur une micrographie longitudinale de fibre.

Bibliographie

- 1 Bussiere S., Vuorio P., Ullmar M., Hensley E., Aird J., Huhtanen J.-P., *Mill Scale Development towards High-Production, Low-Energy TMP Refining Line*, International Mechanical Pulping Conference, 12 pages, Minneapolis, 2007
- 2 Duchesne, I., Zhang, S., Y., *Variation in Tree Growth, Wood Density, and Pulp Fiber Properties of 35 White Spruce (Picea Glauca (Moench) Voss) Families Grown in Quebec*, Wood and Fiber Science, Vol.36, n°4, p.467-475, 2004
- 3 Lecourt, M., Deleuze-Brézins, C., Fauchon, T., Themelin, A., Lundqvist, S.,-O., Grah, T., Wilhelmsson, L., Arlinger, J., *Modeling TMP Fibre morphology and Pulp Properties from Wood and Forest Data : The Example of Norway Spruce Significant*, International Mechanical Pulping Conference, p.67-74, Québec, 2003
- 4 Bussière, S., *Présentation of Papiers Masson mill*, PAPTAC Mechanical Pulping Committee, Fall 2003 Meeting, Baie-Comeau, Québec, September 22-23, 2003
- 5 Granfeldt, T., *The Developement of Emerging Markets and Use of Hardwoods*, International Mechanical Pulping Conference, 5 pages, Oslo, 2005
- 6 Höglund, H., *Mechanical pulp fibres for new and improved paper grades*, 7th International Conference On New Available Technologies, p.158-163, Stockholm, 2002
- 7 Corson, S., R., *Aspect of mechanical pulp fibre separation and development in a disc refiner*, Paperi Ja Puu – Paper and Timber, n°7, p.801-814, 1989
- 8 Corson, S., R., *Development of TMP fibre and pulp quality*, APPITA Journal, vol.49, n°5, p.309-312, 324, 1996

- 9 Braaten, K., R., *Fibre and Fibril Properties Versus Light Scattering and Surface Smoothness for Mechanical Pulps*, Pulp and paper Canada, vol.101, n°5, p.122-126, 2000
- 10 Corson, S.,R. , Flowers, A., G., Morgan, D., G., Richardson, J., D., *Manipulation of paper structure and printability by control of the fibrous elements*, International Mechanical Pulping Conference, p.33-42, Québec, 2003
- 11 Aspler, J., S., Béland, M.-C., *A review of Fibre Rising and Surface Roughening Effects in Paper*, Journal of Pulp and Paper Science, vol. 20, n° 1, p.27-32, 1994
- 12 Shagaev, O., Bergström, B., *Advanced Process for Production of High Quality Mechanical Pulps for Value-Added Paper Grades*, International Mechanical Pulping Conference, 11 pages, Oslo, 2005
- 13 Reyier, S., Ferritsius, O., Shagaev, O., *Ways to Measure the Bonding Ability Distribution of Fibers in Mechanical Pulp*, International Mechanical Pulping Conference, 15 pages, Minneapolis, 2007
- 14 Dickson, A., R., Coson, S., R., Dooley, N., J., *Fibre Collapse and Decollapse Determined by Cross-Sectional Geometry*, Journal of Pulp and paper Science, vol.32, n°4, p.205-209, 2006
- 15 Tubek-Lindblom, A., Salmén, L., *Wood Containing Multi-ply Paper for Improved Properties*, 7th International Conference On New Available Technologies, p.169-172, Stockholm, 2002
- 16 Law, K., N., *An autopsy of refiner mechanical pulp*, Pulp and paper Canada, vol.106, n°1, p.37-40, 2005
- 17 Corson, S., R.; Lee, M. J., *Radiata Pine TMP requires effective long Fibre enhancement for good Printability*, APPITA Journal, Vol.43, n°4, p.277-282, 1990

- 18 Mao, C., Law, K., N., Kokta, B., V., *Effect of sulfonation on the compression behavior of early- and latewood*, Pulp and paper Canada, vol.105, n°12, p.67-71, 2004
- 19 Winberg, K., Lönnberg, B., Viljakainen, E., Koponen, R., *Sulphonation of TMP screen rejects for wood containing printing papers*, Paperi Ja Puu – Paper and Timber, vol.72, n°4, p.403-411, 1990
- 20 Corson, S., R., Wakelin, R., F., Lloyd, M., D., *TMP furnish development strategies for contrasting fibre types*, International Mechanical Pulping Conference, p.189-195, Ottawa, 1995
- 21 Corson, S., R., Wakelin, R., F., Lloyd, M., D., *TMP furnish development strategies, Part I: Fractionation and long fibre refining*, Pulp and Paper Canada, vol.97, n°12, p.129-132, 1996
- 22 Corson, S., R., Wakelin, R., F., Lloyd, M., D., *TMP furnish development strategies, Part II: Sheet properties*, Pulp and Paper Canada, vol.98, n°1, p.41-44, 1997
- 23 Musselmann, W., *Fractionation of Fibrous Stocks : Fundamentals, Process Development, Practical Application*, Secondary Fiber Recycling, Chapter 19, Atlanta: TAPPI Press Ed., p.207-227, 1993
- 24 Duffy, G., G., *Increasing profit through selective fibre treatment*, 53rd APPITA Annual General Conference, p.205-209, Rotorua, 1999
- 25 Yu, C., J., DeFoe, R., J., Crossley, B., R., *Fractionation technology and its applications*, TAPPI Pulping Conference, p. 451-466, San Diego, 1994
- 26 Bliss, T., *Secondary Fiber Fractionation Using Centrifugal Cleaners*, TAPPI Pulping Conference, vol.2, p. 217-225, San Francisco, 1984

- 27 Bliss, T., *Models can predict centrifugal cleaner fractionation trends*, Pulp and Paper Journal, vol.61, n°5, p.131-135, 1987
- 28 Scudlik, R., Gotsching, L., *Optimization of Waste Paper Fractionation to improve Secondary Fiber Quality for Packaging Papers*, Pulp, Paper and Board (Hendry & Hanssens Edition), p.108-115, 1987
- 29 Vinson, K., Byrd, M., Jameel, H., Chang, H.-, M., Venditti, R., Heitmann, J., Kirkman, A., *Fiber fractionation of mixed office waste for production of value-added products*, TAPPI Pulping Conference, p.1115-1128, Seattle, 2001
- 30 Eul, W., Suss, H., U., Helmling, O., *Fiber Fractionation and Post-Treatment of Deinked Pulp*, Pulp and Paper Canada, vol.90, n°10, p.95-101, 1989
- 31 Floccia, L., Voillot, C., *Fiber Separation and Bleaching*, Paper Technology Journal, vol.37, n°3 , p.45-48, 1996
- 32 Lapierre, L., Pitre, D., Bouchard, J., *Bleaching of deinked recycled pulp : benefits of fibre fractionation*, Pulp and paper Canada, vol.102, n°2, p.35-38, 2001
- 33 Mansito, O., Agüero, C., Denis, B., Gzregorzeńska, M., Sosa, M., *Characterization and Alternatives of Uses of Fiber Fractions of papermaking Pulps Made from OCC*, Pulpa y Papel, n°2, p.52-55, 1991
- 34 Abubakr, S., M., Scott, G. M., Klungness, J., H., *Fiber fractionation as a method of improving handsheet properties after repeated recycling*, TAPPI Journal, vol.78, n°5, p.123-126, 1995
- 35 Waterhouse, J., F., Liang, Y., X., *Improving the Fines Performance of Recycled Pulps*, TAPPI Recycling Symposium, p.103-116, New Orleans, 1995

- 36 Nazhad, M., M., Sodtivarakul, S., *OCC pulp fractionation - A comparative study of fractionated and unfractionated stock*, TAPPI Journal, vol.3, n° 1, p.34-50, 2004
- 37 Forbes, D., R., *Pulp Mill Screening is key to Pulp Quality, Maximum Fiber Utilization*, Pulp and Paper Journal, vol.61, n°11, p.107-112, 1987
- 38 Paavilainen, L., *Possibility of Fractionating Softwood Sulfate Pulp According to Cell-Wall Thickness*, APPITA Journal, vol.45, n°4, p.319-326, 1992
- 39 Sloane, C. , M., *Kraft pulp processing – pressure screen fractionation*, APPITA Journal, vol.53, n°3, p.220-226, 2000
- 40 Karnchanapoo, W., Palokangas, A., Nazhad, M., M., *Effect of formation on physical properties of paper*, 55th APPITA Annual General Conference, p.315-322, Hobart, 2001
- 41 Vomhoff, H., Grundström, K.-, J., *Fractionation of a Bleached Softwood Pulp and Separate Refining of the Earlywood– and Latewood–Enriched Fractions*, International PaperWorld, n°2, p.37-41, 2003
- 42 Pannula-Ontto, S., Fuhrmann, A., Robertsen, L., *Effect of cell-wall thickness and fines on bleaching*, TAPPI International Pulp Bleaching Conference, p.161-169, Portland, 2002
- 43 Laine, C., Wang, X., Tenkanen, M., Varhimo, A., *Changes in the fiber wall during refining of bleached pine Kraft pulp*, Holzforschung, vol.58, n°3, p.233-240, 2004
- 44 Vinson, K., D., *Method for Producing a Cellulose Pulp of Selected Fiber length and Coarseness by a Two-Stage Fractionation*, US Patent n°5,582,685, 13 pages, Issued December 10th, 1996

- 45 Oksum, J., *The Technical and Commercial Development of Wood-Containing Printing Papers*, International Mechanical Pulping Conference, 6 pages, Oslo, 2005
- 46 Smook, G., A., *Handbook for pulp and paper technologists*, 3rd Edition, p.4, 10-20, Vancouver: Angus Wilde Publication Inc., 425 pages, 2002
- 47 Food and Agriculture Organization of the United nations, *Forestry Products Statistical Databases*, <http://faostat.fao.org/>, last access August 2007
- 48 International Monetary Fund, *World Economic and Financial Surveys: World Economic Outlook Database*, <http://www.imf.org/>, April 2007 Edition, last access August 2007
- 49 Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, *World Population Prospects: The 2006 Revision and World Urbanization Prospects: The 2005 Revision*, <http://esa.un.org/unpp>, last access August 2007
- 50 Conseil de l'Industrie Forestière du Québec, *Statistiques 2003 secteur pâtes et papiers*, http://www.cifq.qc.ca/html/francais/pates_papiers/statistiques.php, dernier accès Novembre 2005
- 51 Sjöström, E., *Wood Chemistry: Fundamentals and Applications, Second Edition*, p.1-20, New York: Academic Press Inc., 293 pages, 1992
- 52 Scallan, A., M., Green, H., V., *The effect of pulping upon the dimensions of wood tracheids*, Wood and Fiber Science, vol.7, n°3, p.226-233, 1975

- 53 Kocurek, M., J., Stevens, C., F., B., *Pulp and Paper Manufacture, Volume 1, Properties of Fibrous Raw Materials and their Preparation for Pulping*, 3rd Edition, p.10-27, 80-89, Montreal: Joint Textbook Committee of the Paper Industry, 182 pages, 1983
- 54 Grissino-Mayer, H., D., University of Tennessee, Knoxville, Tennessee, USA
- 55 Wenzl, H., F., J., *The chemical technology of wood*, p.32-91, New York: Academic Press Inc. , 692 pages, 1970
- 56 Fengel, D., Wegener, G., *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*, p.6-25, New York: Walter de Gruyter, 613 pages, 1984
- 57 Rydholm, S., A., *Pulping Processes*, p.3-89, New York: Interscience Publishers, 1265 pages, 1965
- 58 Stenius, P., *Papermaking Science and Technology, Book 3: Forest Product Chemistry*, p.13-27, Finnish Paper Engineers' Association, 350 pages, 2000
- 59 Kellomäki, S., *Papermaking Science and Technology, Book 2: Forest Resources and Sustainable Management*, p.117-187, Finnish Paper Engineers' Association, 426 pages, 1998
- 60 Libby, E., C., *Pulp and Paper Science and technology, Volume :, Pulp*, p.20-53, Toronto: McGraw-Hill Book Company, 436 pages, 1962
- 61 Sirvio, J., Karenlampi, P., *Pits as Natural Irregularities in Softwood Fibers*, Wood and Fiber Science, vol.30, n°1, p.27-39, 1998
- 62 Scallan, A., M., Green, H., V., *A technique for determining the transverse dimensions of the fibres in wood*, Wood and Fiber Science, vol.5, n°4, p.323-333, 1974

- 63 Koran, Z., *Tangential Pitting in Black Spruce Tracheids*, Wood Science and Technology, Vol.11, n°2, p.115-123, 1977
- 64 Jang, H., Seth, R., *Characterization of the Collapse Behavior of Papermaking Fibers Using Confocal Microscopy*, 84th PAPTAC Annual Meeting, Preprints B, p.205-212, 1998
- 65 Tchepel, M., V., McDonald, J., D., Dixon, T., *The Effect of Peroxide Bleaching on the Mechanical Properties of Black Spruce Fibres*, Journal of Pulp and Paper Science, vol.32, n°2, p.100-104, 2006
- 66 Law, K., Lanouette, R., *A perspective on expanded use of secondary species in mechanical pulping*, 92nd PAPTAC Annual Meeting, Preprints B, p.119-125, 2006
- 67 Corriveau, A., Beaulieu, J., Mothe, F., Poliquin, J., Doucet, J., *Densité et largeur des cernes des populations d'Épinettes blanches de la région forestière des Grands Lacs et du Saint-Laurent*, Canadian Journal of Forest Research, Vol.20, n°2, p.121-129, 1990
- 68 Koubaa, A., Zhang, S., Y., Isabel, N., Beaulieu, J., Bousquet, J., *Phenotypic correlations between juvenile-mature wood density and growth in black spruce*, Journal of Wood and Fiber Science, vol.32, n°1, p.61-71, 2000
- 69 Koubaa, A., Isabel, N., Zhang, S., Y., Beaulieu, J., Bousquet, J., *Transition from juvenile to mature wood in black spruce (Picea mariana (Mill.) B.S.P.)*, Journal of Wood and Fiber Science, vol.37, n°3, p.445-455, 2005
- 70 Wehner, K., *Influence of seed provenance on specific gravity and radial growth increment of Picea glauca*, M. Sc. thesis, Michigan State University, USA, 110 pages, 2006

- 71 Koga, S., Zhang, S., Y., Bégin, J., *Effects of precommercial thinning on annual radial growth and wood density in balsam fir (Abies balsamea)*, Journal of Wood and Fiber Science, vol.34, n°4, p.625-640, 2002
- 72 Koga, S., Zhang, S., Y., *Relationships between wood density and annual growth rate components in balsam fir (Abies balsamea)*, Journal of Wood and Fiber Science, vol.34, n°1, p.146-157, 2002
- 73 Brew, M., A., Bennett, S., Schmidt, J. R., *Mechanical Pulp Fractionation with a Spray Disk Filter*, Canadian Patent n°2,108,321, 30 pages, Issued May 11th, 1994
- 74 Backman, J., Kempe, A., Rydqvist, J., *Particle removal by centrifugal cleaning and washing*, Developments in Wastepaper Technology, 22 pages, March 1993
- 75 Li, W., *Fractionation of Softwood TMP*, M. Sc. thesis, University of Alberta (Canada), 112 pages, 2002
- 76 Eckert, W., F., Afacan, A., Masliyah, J., H., *Fractionation of wood pulps by continuous flotation*, TAPPI Journal, vol. 83, n°8, p.93, 2000
- 77 Karnis, A., *Pulp Fractionation by Fibre Characteristics*, Paperi Ja Puu – Paper and Timber, vol.79, n°7, p.480-487, 1997
- 78 Al-Jabari, M.; Weber, M., E.; Van de Ven, T., G., M., *Particle Elutriation from a Spouted Bed of Recycled-Pulp Fibers*, Journal of Pulp and Paper Science, vol.22, n°7, p.231-236, 1996
- 79 Krogerus, B., Fagerholm, K., *Analytical fractionation of pulps by tube flow*, Paperi Ja Puu – paper and Timber, vol.85, n°4, p.209-213, 2003
- 80 Green, S., I., Wong, B., *Hydrodynamics of individual pulp fibers*, TAPPI Journal, vol.4, n°4, p.3-8, 2005

- 81 Wakelin, R., F., Corson, S., R., *TMP long fibre fractionation with pressure screens*, International Mechanical Pulping Conference, p.257-265, Ottawa, 1995
- 82 Meltzer, F., P., *Fractionation: Basics, Development, and Application*, Progress in Paper Recycling, Vol.7, n°3, p.60-66, 1998
- 83 Gooding, R.,W., Kerekes, R., J., *The Motion of Fibers Near a Screen Slot*, Journal of Pulp and Paper Science, vol.15, n°2, p.59-62, 1989
- 84 Yu, C., J. , DeFoe, R., J., *Fundamental Study of screening hydraulics, Part 1: Flow patterns at the feed-side surface of screen baskets; mechanism of fiber-mat formation and remixing*, TAPPI Journal, vol.77, n°8, p.219-226, 1994
- 85 Yu, C., J., DeFoe, R., J., *Fundamental Study of screening hydraulics, Part 2: Fiber orientation in the feed side of a screen basket*, TAPPI Journal, vol.77, n°9, p.119-124, 1994
- 86 Lawryshyn, Y., A., Kuhn, D., C., S., *Simulation of Flexible Fibre Motion Through Screen Apertures*, Journal of Pulp and Paper Science, vol.24, n°12, p.404-411, 1998
- 87 Yu, C., J., Crossley, B., R., Silveri, L., *Fundamental Study of screening hydraulics, Part 3: Model for calculating effective open area*, TAPPI Journal, vol.77, n°9, p.125-131, 1994
- 88 Dong, S., Salcudean, M., Gartshore, I., *The effect of slot shape on the performance of a pressure screen*, TAPPI Journal, vol.3, n°5, p.3-7, 2004
- 89 Gooding, R., W., *Flow Resistance of Screen Plates Apertures*, Ph.D. thesis, The University of British Columbia (Canada), 227 pages, 1996

- 90 Gooding, R., W., Kerekes, J., *Derivation of Performance Equations for Solid-Solid Screens*, The Canadian Journal of chemical Engineering, vol.67, n°10, p.801-805, 1989
- 91 Gooding, R., W., Kerekes, J., *Consistency changes caused by pulp screening*, TAPPI Journal, Vol.75, n°11, p.109-118, 1992
- 92 Allison, B., J., Olson, J. A., *Optimization of Multiple Screening Stages for Fibres Length Fractionation : Two-Stage Case*, Journal of Pulp and Paper Science, vol.26, n°3, p.113-119, 2000
- 93 Walmsley, M., Weeds, Z., *Plug Flow Versus Mixed Flow Modeling of a Pressure Screen*, APPITA Journal, vol.57, n°2, p.121-127, 2004
- 94 Julien Saint Amand, F., Perrin, B., *Screening: Experimental approach and modeling*, TAPPI Pulping Conference Proceedings, p.1019-1031, 1998
- 95 Olson, J., *The Effect of Fibre Length on Passage through narrow Apertures*, Ph.D. thesis, The University of British Columbia (Canada), 128 pages, 1996
- 96 Olson, J., Roberts, N., Allison, B., Gooding, R.W., *Fibre Length Fractionation Caused by Pulp Screening*, Journal of Pulp and Paper Science, vol.24, n°12, p.393-397, 1998
- 97 Bichard, W., Scudamore, P., *An Evaluation of the Comparative performance of the Kajaani FS-100 and FS-200 Fiber Length Analyzers*, TAPPI Journal, Vol.72, n°12, p.149-155, 1988
- 98 Robertson, G., Olson, J., Allen, P., Chan, B., Seth, R., *Measurement of Fibre Length, Coarseness, and Shape with the Fibre Quality Analyzer*, TAPPI Journal, vol.82, n°10, 11 pages, 1999

- 99 Eymin Petot Tourtollet, G., Cottin, F., Cochaux, A., Petit-Conil, M., *The use of MorFi analyser to characterise mechanical pulps*, International Mechanical Pulping Conference, p.225-232, Québec, 2003
- 100 Meyers, J., P., Nanko, H., *Effects of fines on the fiber length and coarseness values measured by the Fiber Quality Analyzer (FQA)*, Paper Asia, vol.9, n°10, p.26-29, 2004
- 101 Kumar, A., *Passage of Fibres through Screen Apertures*, Ph.D. thesis, The University of British Columbia (Canada), 185 pages, 1991
- 102 Olson, J., Wherrett G., *A Model of Fibre Fractionation by Slotted Screen Apertures*, Journal of Pulp and Paper Science, vol.24, n°12, p.398-403, 1998
- 103 Olson, J., Allison, B., Roberts, N., *Fibre Length Fractionation Caused by Pulp Screening. Smooth-Hole Screen Plates*, Journal of Pulp and Paper Science, vol.26, n°1, p.12-16, 2000
- 104 Olson, J., *Fibre Length Fractionation Caused by Pulp Screening. Slotted Screen Plates*, Journal of Pulp and Paper Science, vol.27, n°8, p.255-261, 2001
- 105 Julien Saint Amand, F., Perrin, B., *Characterization and Simulation of Fibre Separation in Screen and Cleaners*, International Mechanical Pulping Conference, p.245-257, Québec, 2003
- 106 Gooding, R., W., Olson, J., A., *Fractionation on a Bauer-McNett classifier*, 86th Annual meeting PAPTAC, Preprints C, p.291-300, 2000
- 107 Tiikkaja, E., Kauppinen, M., *Fiber Dimensions – Their Effect on Paper Properties and Required Measuring Accuracy*, 84th PAPTAC Annual Meeting, Preprints A, p.369-372, 1998

- 108 Ämmälä, A., *Fractionation of thermomechanical pulp in pressure screening*, Ph.D. thesis, University of Oulu (Finland), 107 pages, 2001
- 109 Ämmälä, A., Jussila, T., Niinimäki, J., *On the explanatory nature of reject rates for the fractionation of pulp with slotted pressure screens*, Paperi Ja Puu – Paper and Timber, vol.83, n°2, p.128-131, 2001
- 110 Kerekes, R., J., Tam Doo, P., A., *Wet Fibre Flexibility of Some Major Softwood Species Pulped by Various Processes*, Journal of Pulp and Paper Science, vol.11, n°2, p.60-61, 1985
- 111 Steadman, R., Luner, P., *The effect of wet fiber flexibility on sheet apparent density*, Papermaking Raw Materials (Punton Edition), vol.1, p.311-337, 1985
- 112 Kuhn, D., C., S., Lu, X., Olson, J., A., Robertson, A., G., *A Dynamic Wet Fibre Flexibility Measurement Device*, Journal of Pulp and Paper Science, vol.21, n°10, p.337-342, 1995
- 113 Petit-Conil, M., Cochaux, A., De Choudens, C., *Mechanical pulp characterization : a new and rapid method to evaluate fibre flexibility*, Paperi Ja Puu – Paper and Timber, vol.76, n°10, p.657-662, 1994
- 114 Nelson, G., L., *The screening quotient: a better index of screen performance*, TAPPI Journal, vol.64, n°5, p.133-134, 1981
- 115 Gooding, R., W., Olson, J., Roberts, N., *Parameters for assessing fibre fractionation and their application to screen rotor effects*, International Mechanical Pulping Conference, p.407-424, Helsinki, 2001
- 116 Wakelin, R., F., Paul, T., S., *Effects of some process variables on screen fractionator performance*, APPITA Journal, vol.54, n°4, p.357-363, 2001

- 117 Wahren, D., *Fundamentals of suspension screening*, Svensk Papperstidning, vol.82, n°18, p.539-546, 1979
- 118 Wakelin, R., F., *Prediction of fractionation efficiency for pressure screens*, APPITA Journal, vol.50, n°4, p.295-300, 1997
- 119 Niinimäki, J., Dahl, O., Hautala, J., Kuopanportti, H., *Effect of the pressure difference over the screen basket on the performance of a pressure screen*, TAPPI Journal, vol.82, n°4, p.176-180, 1999
- 120 Paul, S. T., Duffy, G., G., Chen, X., D., *Viscosity control as a new way to improve pressure screen performance*, TAPPI Journal, vol.83, n°9, p.61, 2000
- 121 Braaten, K., R., Wakelin, R., F., *Fiber length fractionation of TMP using pressure screens*, TAPPI Journal, vol.82, n°6, p.129-135, 1999
- 122 Weeds, Z., Walmsley, M., *Flow characteristics of eucalypt and Radiata pine suspensions in a pressure screen with smooth 1 mm holes and 150 micron contoured slot apertures*, TAPPI Pulping Conference Proceedings, p.1001-1017, 1998
- 123 Julien Saint Amand, F., Perrin, B., *Fundamentals of screening: effect of rotor design and fibre properties*, TAPPI Pulping Conference Proceedings, p.941-955, 1999
- 124 Wakelin, R. F., Corson, S., R., *Reject thickening behaviour of TMP screening, Equipment and operating variables affect results*, Pulp and Paper Canada, vol. 99, n°1, p.27-30, 1998
- 125 Atkins, M., Walmsley, M., Weeds, Z., *Internal fibre length concentration in a pressure screen*, 59th APPITA Annual Conference, p.23-30, Auckland, 2005
- 126 Ämmälä, A., J., *Dual effect of foil tip speed on reject thickening in pressure screening*, APPITA Journal, Vol.57, n°2, p.128-140, 2004

- 127 Repo, K., Sundholm, J., *The effect of rotor speed on the separation of coarse fibres in pressure screening with narrow slots*, Pulp and Paper Canada, vol. 97, n°7, p.67-71, 1996
- 128 Pinon, V., Gooding, R., W., Olson, J., A., *Measurements of pressure pulses from a solid core screen rotor*, TAPPI Journal, vol.2, n°10, p.9-12, 2003
- 129 Yu, C. J., *Pulsation Measurement in a Screen; Pulse Signature and Magnitude of S-Shape Rotor*, TAPPI Engineering Conference, p.767-782, San Francisco, 1994
- 130 Friesen, T., Bourdet, N., Tuomela, P., Allison, B., J., Olson, J., A., *Pressure screen system simulation for optimal fractionation*, Pulp and Paper Canada, vol.104, n°4, p.43-48, 2003
- 131 Gavelin, G., *Fractionation with hydrocyclones*, TAPPI Pulping Conference Proceedings, p.753-774, Orlando, 1991
- 132 Rehmat, T., Branion, R., M., R., *Fibre fractionation in hydrocyclones*, 81st PAPTAC Annual Meeting, Preprints B, p.105-125, 1995
- 133 Statie, E., Salcudean, M., Gartshore, I., Bibeau, E., *A Computational Study of Particule Separation in Hydrocyclones*, Journal of Pulp and Paper Science, vol.28, n°3, p.84-92, 2002
- 134 Sevilla, E., M., Branion, R., M., R., *Computational fluid dynamics calculations for flow in hydrocyclones*, 81st PAPTAC Annual Meeting, Preprints B, p.127-135, 1995
- 135 Hanna, J., M., Jouko, Niinimäki, J., Ämmälä, A., *Characteristics of LWC pulp fractions made by pressure screen and hydrocyclone*, International Mechanical Pulping Conference, p.213-217, Québec, 2003

- 136 Kure, K.,-A., Dahlgvist, G., Ekström, J., Helle, T., *Hydrocyclone separation, and reject refining, of thick-walled mechanical pulp fibres*, Nordic Pulp and Paper Research Journal, vol.14, n°2, p.100-110, 1999
- 137 Ouellet, D., Beaulieu, S., Roberts, N., Rompré, A., Gooding, R., *Comparison of Slotted Screen and Hydrocyclone Fractionation Systems for the Manufacture of newsprint TMP*, International Mechanical Pulping Conference, p.21-32, Quebec, 2003
- 138 Ho, S., -L., *Synthetic Fibre Fractionation in Hydrocyclones*, Ph.D. thesis, The University of British Columbia (Canada), 256 pages, 2001
- 139 Ho, S.,-L., Rehmat, T., Branion, R., *Fibre fractionation in hydrocyclones*, 86th PAPTAC Annual Meeting, Preprints C, p.193-215, 2003
- 140 Wang, Z., Dong, S., Gartshore, I., Salcudean, M., *Fiber separation in hydrocyclones*, TAPPI Fall Conference and Trade Fair, 7 pages, San Diego, 2002
- 141 Byrd, M., Pawlak, J., Jameel, H., Venditti, R., Chang, H.,-M., Park, S., *The Effect of Operating Variables on the Fractionation Characteristics of a Hydrocyclone*, TAPPI Fall Conference and Trade Fair, 9 pages, San Diego, 2002
- 142 Park, S., Venditti, R., A., Jameel, H., Pawlak, J., J., *The Effect of Fibre Properties on Fibre Fractionation using a Hydrocyclone*, Journal of Pulp and Paper Science, vol.31, n°3, p.132-137, 2005
- 143 Wakelin, R., F., Jackman, J. K., Bawden, A. D., *Changes in Mechanical Pulp Fibre Cross-Sectional Dimension Distributions caused by Screens*, Hydrocyclones and Reject Refining, 53rd APPITA Annual Conference, p.211-220, Rotorua, 1999
- 144 Kibblewhite, R., P., Bailey, D., G., *Measurement of Fibre Cross-Section Dimensions Using Image Processing*, APPITA Journal, vol.41, n°4, p.297-303, 1988

- 145 Jang, H., F., Robertson, A., G., Seth, R., S., *Optical sectioning of pulp fibers using confocal scanning laser microscopy*, TAPPI Journal, vol.74, n°10, p.217-219, 1991
- 146 Jang, H., F., *Measurement of Fibril Angle in Wood Fibres with Polarization Confocal Microscopy*, Journal of Pulp and Paper Science, vol.24, n°7, p.224-230, 1998
- 147 Jang, H., F., Seth, R., S., Wu, C., B., Chan, B., K., *Determining the transverse dimensions of fibers in wood using confocal microscopy*, Wood and Fiber Science, vol.37, n°4, p.615-628, 2005
- 148 Reme, P., A., Johnsen, P., O., Helle, T., *Assessment of Fibre Transverse Dimensions Using SEM and Image Analysis*, Journal of Pulp and Paper Science, vol.28, n°4, p.122-128, 1998
- 149 Wakelin, R., F., Dahlgvist, G. K., Isaksen, J. E., *Balancing the Roles of Refiners, Screens and Hydrocyclones in the Production of high Quality Mechanical Pulps*, 53rd Appita Annual Conference, p.509-517, Rotorua, 1999
- 150 Wood, J., R., Grondin, M., Karnis, A., *Characterization of Mechanical Pulp Fines with a Small Hydrocyclone. Part I: The Principle and nature Of the Separation*, Journal of Pulp and Paper Science, vol.17, n°1, p.1-5, 1991
- 151 Wood, J., R., Karnis, A., *The determination of the specific surface of mechanical pulp fines from turbidity measurements*, International Paper Physics Conference, TAPPI Proceedings, p.655-661, Kailua Kona, 1991
- 152 Luukko, K., *Fines Quantity and Quality in Controlling Pulp and Paper Quality*, International Mechanical Pulping Conference, p.67-75, Houston, 1999
- 153 Marton, R., Robie, J.D., *Characterization of Mechanical Pulps By a Settling Technique*, TAPPI Journal, vol.52, n°12, p.2400-2406, 1969

- 154 Sundström, L., Brodin, A., Hartler, N., *Fibrillation and its importance for the properties of mechanical pulp fiber sheets*, Nordic Pulp and Paper Research Journal, vol.8, n°4, p.379-383, 1993
- 155 Karnis, A., *The Mechanism of Fibre Development in Mechanical Pulping*, Journal of Pulp and Paper Science, vol.20, n°10, p.40-48, 1994
- 156 Stationwala, M., I. , Mathieu, J. , Karnis, A., *On the interaction of wood and mechanical pulping equipment part I: Fibre development and generation of fines*, International Mechanical Pulping Conference, p.157-163, Ottawa, 1995
- 157 Stationwala, M., I. , Mathieu, J. , Karnis, A., *On the interaction of wood and mechanical pulping equipment part II: Pulp quality*, International Mechanical Pulping Conference, p.165-170, Ottawa, 1995
- 158 Reme, P., A., Johnsen, P., O., Helle, T., *Changes induced in early- and latewood fibres by mechanical pulp refining*, Nordic Pulp and Paper Research Journal, vol.14, n°3, p.256-262, 1999
- 159 Law, K., N., *Refining earlywood and latewood – A difficult balance*, 91st PAP-TAC Annual Meeting, Preprints B, p.247-252, 2005
- 160 Tchepel, M., Ouellet, D., McDonald, D., Provan, J., Skognes, G., Steinke, D., *The Response of the Long Fibre Fraction to Different Refining Intensities*, International Mechanical Pulping Conference, p.425-436, Quebec, 2003
- 161 Kangas, H., Pöhler, T., Heikkurinen, A., Kleen, M., *Development of the Mechanical Pulp Fibre Surface as a Function of Refining Energy*, Journal of Pulp and Paper Science, vol.30, n°11, p.298-306, 2004

- 162 Stationwala, M., I., Miles, K. B., Karnis, A., *The Effect of First-Stage Refining Conditions on Pulp Properties and Energy Consumption*, Journal of Pulp and Paper Science, vol.19, n°1, p.12-18, 1993
- 163 Salmén, L., Dumail, J., F., Uhmeier, A., *Compression behaviour of wood in relation to mechanical pulping*, International Mechanical Pulping Conference, p.207-211, Helsinki, 2001
- 164 Liukkonen, S., Nurminen, I., *Improved fiber bonding ability of PGW and TMP and its effect on LWC print quality*, 7th International Conference On New Available Technologies, p.164-168, Stockholm, 2002
- 165 St. Laurent, J., M., Rudie, A., W., Shakhmet, A., R., *Mechanical pulping by fractionation after low energy refining*, Pulping Conference, TAPPI Proceedings, p.95-99, Atlanta, 1993
- 166 Hammar, L., -A., Ottestam, C., *Separate refining of TMP rejects from screens and hydrocyclones*, International Mechanical Pulping Conference, p.185-189, Helsinki, 2001
- 167 Roux, J., -C., Joris, G., Caucal, G., *Raffinage séparé ou en mélange, quels outils à mettre en œuvre pour optimiser la composition fibreuse, réduire la consommation énergétique pour la régularité de la qualité*, Revue ATIP, vol.56, n°3, p.9-16, 2002
- 168 Desrochers, C., Lupin, B., Bussière, S., Wilson, T., *Towards full automation of the largest single-line TMP*, International Mechanical Pulping Conference, p.473-476, Québec, 2003
- 169 Narasimhan, S., Jordache, C., *Data Reconciliation & Gross Error Detection: An Intelligent Use of Process Data*, p.85-117, Houston: Gulf Publishing Company, 406 pages, 2000

- 170 Partanen, K., Koivo, H., *On-Line Freeness Control at a Thermomechanical Pulp Plant*, ISA International Conference, Advance Instrumentation, Part 2, p. 877-884, Philadelphia, 1984
- 171 Qian, X., *Modeling and Dynamic Simulation of a CTMP Plant*, Ph. D. Thesis, The University of British Columbia (Canada), 162 pages, 1997
- 172 Seth, R., S., Chan, B., K., *Measurement of fiber coarseness with optical fiber length analyzers*, TAPPI Journal, vol.80, n°5, p.217-221, 1997
- 173 Hurst, M., Sutton, P., *The Fiber Quality Analyzer – A valuable tool*, 85th PAPTAC Annual Meeting, Preprints A, p.81-84, 1999
- 174 Bentley, R., G., Scudamore, P., Jack, J., S., *A comparison between fibre length measurement methods*, Pulp and Paper Canada, vol.95, n°4, p.41-45, 1994
- 175 Bermond, C., Lamboley, T., Eymin Petot Tourtolet, G., *Predicting physical properties and pulp comparison by using “statmorf”*, Revue ATIP, vol.58, n°4, p.14-18, 2004
- 176 Bermond, C., Soysouvanh, D., Lamboley, T., Bernet, R., Eymin Petot Tourtolet, G., *Fibre wall thickness and flexibility measurements : the last CTP's developments*, Revue ATIP, vol.59, n°2, p.6-15, 2005
- 177 Dykstra, M., J., *A Manual of Applied technical for Biological Electron Microscopy*, p.38-42, New York: Plenum Press, 257 pages, 1993
- 178 Law, K., N., Balatinecz, J., J., Garceau, J., J., *A technique for making oriented fiber sheet*, TAPPI Journal, vol.57, n°12, p.153-154, 1974
- 179 Ellis, A., E., *Corrected Formulation for Spurr Low Viscosity Embedding Medium Using the Replacement Epoxide ERL 4221*, Microscopy and Microanalysis, vol.12, supp.2, p.288-289, 2006

- 180 Williams, G., J., Drummond, J., G., *Preparation of large sections for the microscopical study of paper structure*, TAPPI Papermakers Conference, p.517-523, San Francisco, 1994
- 181 National Institutes of Health, *ImageJ, Image Processing and Analysis in Java*, <http://rsb.info.nih.gov/ij/>, last access October 2007
- 182 Fjerdingen, H., Foreseth, T.,F., Gregersen, Ø., Johnsen, P. O., Kure, K., -A., Reme, P., A., *Some Mechanical Pulp Fibre Characteristics, their Process Relationships and Papermaking Significance*, 11th Fundamental Research Symposium, The Fundamentals of Papermaking Materials, Mechanical Engineering Publications, Cambridge: Pira International, p. 547-605, 1997
- 183 Mork, O., *Die Qualität des Fichtenholzes unter besonderer Rücksichtnahme auf Schleif- und Papierholz*, Der Papierfabrikant, n°26, p. 741-747, 1928
- 184 Denne, M., P., *Definition of latewood according to Mork (1928)*, IAWA Bulletin vol.10, p. 59-62, 1988
- 185 Zha, Q., Lanouette, R., Bousquet, J.-, P., Bussi res, S., *Refining of Long Fibre Fractions after Fractionation*, 94th PAPTAC Annual Meeting, Preprints B, p.481-487, 2008
- 186 Valade, J., L., Law, K., N., Lanouette, R., *Upgrading Softwood CTMP by the Use of Hardwood*, Pulp and Paper Canada, Vol.94, n°4, p.28-36, 1993
- 187 Br nnvall, E, Torrmund, D., B ckstr m, M., Bergström, J., Tubek-Lindblom, A., *Separate Bleaching of Pulp Fractions Enriched in Earlywood and Latewood Fibers*, Journal of Wood Chemistry and Technology, vol.27, n 2, p.99-112, 2007
- 188 Haugan, M., Gregersen, Ø, *Fractionating – A Way to Save Bleaching Chemicals?*, Journal of Pulp and Paper Science, Vol.33, n 3, p.121-124, 2007

- 189 Bian, Y., Ni, Y., Yuan, C., Heitner, C., Beaulieu, S., *Improving TMP rejects refining through alkaline peroxide pre-treatment: an opportunity for SCA paper?*, Pulp and Paper Canada, vol.109, n°1, p.23-30, 2008

Annexe A - Résultats expérimentaux – Essais préliminaires

Tableau A.1 Conditions d'opération pour la séquence (a)

| Essai | $C_f^{(1)}$ | $C_a^{(1)}$ | $C_r^{(1)}$ | $Q_f^{(2)}$ | $Q_a^{(2)}$ | $Q_r^{(2)}$ | R_v | R_w | $MBE^{(3)}$ |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|-------|-------------|
| | % | % | % | L/min | L/min | L/min | % | % | % |
| 301 | 2,48 | 1,63 | 2,98 | 1615 | 815 | 800 | 49,5 | 59,5 | -7,31 |
| 302 | 2,48 | 1,74 | 3,24 | 1359 | 816 | 543 | 40,0 | 52,2 | -5,67 |
| 303 | 2,48 | 1,77 | 3,64 | 1165 | 815 | 350 | 30,0 | 44,1 | -5,98 |
| 304 | 2,48 | 1,82 | 4,09 | 1087 | 815 | 272 | 25,0 | 41,3 | -3,71 |
| 305 | 2,48 | 1,95 | 4,65 | 949 | 805 | 144 | 15,2 | 28,5 | -4,85 |
| 201 | 1,80 | 1,16 | 2,30 | 1630 | 815 | 815 | 50,0 | 63,9 | -3,89 |
| 202 | 1,80 | 1,20 | 2,47 | 1359 | 815 | 544 | 40,0 | 54,9 | -5,09 |
| 203 | 1,80 | 1,24 | 2,66 | 1165 | 815 | 350 | 30,0 | 44,4 | -7,41 |
| 204 | 1,80 | 1,25 | 2,72 | 1087 | 815 | 272 | 25,0 | 37,8 | -10,12 |
| 205 | 1,80 | 1,38 | 3,17 | 959 | 815 | 144 | 15,0 | 26,4 | -8,40 |
| 101 | 1,13 | 0,74 | 1,47 | 1630 | 815 | 815 | 50,0 | 65,0 | -2,21 |
| 102 | 1,13 | 0,75 | 1,57 | 1359 | 815 | 544 | 40,0 | 55,6 | -4,58 |
| 103 | 1,13 | 0,78 | 1,77 | 1165 | 815 | 350 | 30,0 | 47,1 | -4,65 |
| 104 | 1,13 | 0,81 | 1,88 | 1087 | 815 | 272 | 25,0 | 41,6 | -4,62 |
| 105 | 1,13 | 0,86 | 2,16 | 959 | 815 | 144 | 15,0 | 28,7 | -6,62 |
| 106 | 0,90 | 0,74 | 1,59 | 959 | 815 | 144 | 15,0 | 26,5 | -3,60 |
| 91 | 0,47 | 0,35 | 1,54 | 98 | 88 | 10 | 10,5 | 34,4 | 1,08 |
| 92 | 0,47 | 0,28 | 1,46 | 99 | 85 | 14 | 14,3 | 44,6 | -4,41 |
| 93 | 0,47 | 0,22 | 1,29 | 98 | 74 | 24 | 24,6 | 67,5 | 2,79 |
| 81 | 0,49 | 0,34 | 1,65 | 96 | 86 | 10 | 10,2 | 34,4 | -3,32 |
| 82 | 0,49 | 0,28 | 1,60 | 100 | 86 | 14 | 13,7 | 44,7 | -5,95 |
| 83 | 0,49 | 0,22 | 1,35 | 98 | 75 | 23 | 23,5 | 64,7 | -0,98 |

Notes : ⁽¹⁾ Consistances d'alimentation, des acceptés et des rejets

⁽²⁾ Débits volumiques d'alimentation, des acceptés et des rejets

⁽³⁾ Erreur de bilan de masse

Tableau A.2 Conditions d'opération pour la séquence (b)

| Essai | C_f⁽¹⁾ | C_a⁽¹⁾ | C_r⁽¹⁾ | Q_f⁽²⁾ | Q_a⁽²⁾ | Q_r⁽²⁾ | R_v | R_w | MBE⁽³⁾ |
|--------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|
| | % | % | % | L/min | L/min | L/min | % | % | % |
| 401 | 1,50 | 0,89 | 1,85 | 1630 | 815 | 815 | 50,0 | 0,617 | -8,63 |
| 402 | 1,59 | 0,91 | 1,98 | 1000 | 500 | 500 | 50,0 | 0,623 | -9,09 |
| 501 | 0,95 | 0,62 | 1,20 | 900 | 450 | 450 | 50,0 | 0,636 | -3,75 |
| 502 | 0,95 | 0,63 | 1,33 | 720 | 450 | 270 | 37,5 | 0,527 | -6,09 |
| 503 | 0,95 | 0,69 | 1,62 | 600 | 450 | 150 | 25,0 | 0,428 | -2,90 |
| 601 | 0,91 | 0,50 | 1,28 | 600 | 300 | 300 | 50,0 | 0,702 | -2,47 |
| 602 | 0,91 | 0,55 | 1,49 | 480 | 300 | 180 | 37,5 | 0,613 | -1,25 |
| 603 | 0,91 | 0,55 | 1,80 | 400 | 300 | 100 | 25,0 | 0,493 | -5,59 |
| 701 | 0,93 | 0,48 | 1,29 | 600 | 300 | 300 | 50,0 | 0,697 | -4,70 |
| 702 | 0,95 | 0,43 | 1,38 | 600 | 300 | 300 | 50,0 | 0,726 | -4,58 |
| 801 | 0,47 | 0,33 | 1,94 | 102 | 93,2 | 8,8 | 8,6 | 0,356 | -0,23 |
| 802 | 0,47 | 0,31 | 1,63 | 101 | 87,9 | 13,1 | 13,0 | 0,450 | 1,64 |
| 803 | 0,47 | 0,25 | 1,21 | 103 | 81,6 | 21,4 | 20,8 | 0,535 | -4,71 |

Notes : ⁽¹⁾ Consistances d'alimentation, des acceptés et des rejets

⁽²⁾ Débits volumiques d'alimentation, des acceptés et des rejets

⁽³⁾ Erreur de bilan de masse

Tableau A.3 Conditions d'opération pour la séquence (c)

| Essai | $C_f^{(1)}$ | $C_a^{(1)}$ | $C_r^{(1)}$ | $Q_f^{(2)}$ | $Q_a^{(2)}$ | $Q_r^{(2)}$ | R_v | R_w | $MBE^{(3)}$ |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|-------|-------------|
| | % | % | % | L/min | L/min | L/min | % | % | % |
| 1101 | 1,58 | 1,01 | 2,26 | 1500 | 900 | 600 | 0,40 | 0,57 | 2,27 |
| 1102 | 1,58 | 1,09 | 2,42 | 1500 | 1050 | 450 | 0,30 | 0,46 | 2,97 |
| 1103 | 1,50 | 0,99 | 2,30 | 1500 | 900 | 600 | 0,40 | 0,62 | -0,51 |
| 1201 | 0,99 | 0,57 | 1,80 | 480 | 300 | 180 | 0,38 | 0,69 | -2,38 |
| 1202 | 0,99 | 0,62 | 2,07 | 480 | 336 | 144 | 0,30 | 0,63 | -3,37 |
| 1203 | 0,99 | 0,68 | 2,16 | 480 | 346 | 134 | 0,28 | 0,61 | -5,14 |
| 1301 | 1,54 | 0,94 | 2,31 | 1500 | 900 | 600 | 0,40 | 0,60 | 1,66 |
| 1302 | 1,54 | 0,96 | 2,30 | 1500 | 975 | 525 | 0,35 | 0,52 | 3,81 |
| 1303 | 1,54 | 0,93 | 2,23 | 1500 | 900 | 600 | 0,40 | 0,58 | 3,01 |
| 1401 | 0,93 | 0,53 | 2,39 | 480 | 346 | 134 | 0,28 | 0,72 | -6,09 |
| 1402 | 0,93 | 0,60 | 2,70 | 480 | 384 | 96 | 0,20 | 0,58 | -4,54 |
| 1403 | 1,05 | 0,61 | 2,15 | 480 | 380 | 100 | 0,21 | 0,43 | 5,89 |
| 901 | 1,51 | 0,96 | 2,16 | 1630 | 815 | 815 | 0,50 | 0,69 | -1,61 |
| 1004 | 0,96 | 0,27 | 3,93 | 500 | 400 | 100 | 0,20 | 0,79 | -1,99 |
| 1003 | 0,96 | 0,28 | 3,37 | 500 | 375 | 125 | 0,25 | 0,80 | -4,75 |
| 1007 | 0,96 | 0,27 | 2,53 | 800 | 520 | 280 | 0,35 | 0,84 | -5,02 |
| 1006 | 0,96 | 0,27 | 2,48 | 800 | 500 | 300 | 0,38 | 0,85 | -6,73 |
| 1005 | 0,96 | 0,26 | 1,92 | 1000 | 500 | 500 | 0,50 | 0,88 | -6,30 |

Notes : ⁽¹⁾ Consistances d'alimentation, des acceptés et des rejets

⁽²⁾ Débits volumiques d'alimentation, des acceptés et des rejets

⁽³⁾ Erreur de bilan de masse

Tableau A.4 Fractions Bauer McNett des pâtes – Séquence (a)

| Essai | Point | R14 | R28 | R48 | R100 | R200 | P200 |
|-------|--------------|------|------|------|------|------|------|
| 301 | Alimentation | 16,8 | 30,9 | 19,9 | 9,8 | 5,7 | 16,9 |
| | Acceptés | 8,2 | 27,3 | 20,2 | 10,5 | 6,7 | 27,1 |
| | Rejets | 19,2 | 31,3 | 20,4 | 9,4 | 5,1 | 14,6 |
| 302 | Alimentation | 16,8 | 30,9 | 19,9 | 9,8 | 5,7 | 16,9 |
| | Acceptés | 9,4 | 27,8 | 19,7 | 10,4 | 6,1 | 26,6 |
| | Rejets | 21,5 | 31,4 | 20,0 | 9,4 | 4,8 | 12,9 |
| 303 | Alimentation | 16,8 | 30,9 | 19,9 | 9,8 | 5,7 | 16,9 |
| | Acceptés | 10,3 | 28,6 | 20,2 | 10,4 | 6,0 | 24,5 |
| | Rejets | 21,2 | 31,5 | 19,7 | 9,0 | 5,1 | 13,5 |
| 304 | Alimentation | 16,8 | 30,9 | 19,9 | 9,8 | 5,7 | 16,9 |
| | Acceptés | 11,0 | 29,0 | 19,8 | 10,2 | 6,0 | 24,0 |
| | Rejets | 23,2 | 31,8 | 19,9 | 9,0 | 4,8 | 11,3 |
| 305 | Alimentation | 16,8 | 30,9 | 19,9 | 9,8 | 5,7 | 16,9 |
| | Acceptés | 11,3 | 28,7 | 19,7 | 10,0 | 5,7 | 24,6 |
| | Rejets | 24,5 | 31,4 | 19,6 | 9,0 | 4,5 | 11,0 |
| 201 | Alimentation | 15,0 | 30,2 | 19,3 | 8,7 | 5,8 | 21,0 |
| | Acceptés | 6,8 | 27,3 | 21,1 | 11,2 | 7,3 | 26,3 |
| | Rejets | 19,8 | 31,5 | 19,3 | 8,9 | 4,6 | 15,9 |
| 202 | Alimentation | 15,0 | 30,2 | 19,3 | 8,7 | 5,8 | 21,0 |
| | Acceptés | 8,2 | 28,8 | 21,1 | 11,0 | 6,8 | 24,1 |
| | Rejets | 22,0 | 31,3 | 19,0 | 8,5 | 4,4 | 14,8 |
| 203 | Alimentation | 15,0 | 30,2 | 19,3 | 8,7 | 5,8 | 21,0 |
| | Acceptés | 8,5 | 28,2 | 19,8 | 10,5 | 5,7 | 27,3 |
| | Rejets | 24,7 | 32,3 | 19,1 | 8,7 | 4,4 | 10,8 |
| 204 | Alimentation | 15,0 | 30,2 | 19,3 | 8,7 | 5,8 | 21,0 |
| | Acceptés | 7,9 | 28,0 | 20,1 | 10,0 | 6,0 | 28,0 |
| | Rejets | 25,6 | 31,4 | 18,8 | 8,5 | 4,4 | 11,3 |
| 205 | Alimentation | 15,0 | 30,2 | 19,3 | 8,7 | 5,8 | 21,0 |
| | Acceptés | 11,3 | 29,1 | 20,0 | 9,5 | 6,5 | 23,6 |
| | Rejets | 28,9 | 32,5 | 19,3 | 8,2 | 4,9 | 6,2 |
| 101 | Alimentation | 15,7 | 30,3 | 19,8 | 8,4 | 6,7 | 19,1 |
| | Acceptés | 5,5 | 25,5 | 21,1 | 11,0 | 8,2 | 28,7 |
| | Rejets | 20,6 | 31,8 | 19,0 | 7,9 | 5,3 | 15,4 |
| 102 | Alimentation | 15,7 | 30,3 | 19,8 | 8,4 | 6,7 | 19,1 |
| | Acceptés | 6,1 | 26,2 | 21,4 | 11,1 | 7,8 | 27,4 |
| | Rejets | 22,3 | 31,5 | 18,5 | 7,5 | 5,1 | 15,1 |
| 103 | Alimentation | 15,7 | 30,3 | 19,8 | 8,4 | 6,7 | 19,1 |
| | Acceptés | 7,2 | 27,3 | 20,9 | 10,7 | 7,5 | 26,4 |
| | Rejets | 23,9 | 31,7 | 18,1 | 6,8 | 4,9 | 14,6 |
| 104 | Alimentation | 15,7 | 30,3 | 19,8 | 8,4 | 6,7 | 19,1 |
| | Acceptés | 7,8 | 27,8 | 20,8 | 10,2 | 7,6 | 25,8 |
| | Rejets | 27,1 | 32,3 | 18,0 | 6,9 | 4,8 | 10,9 |

Tableau A.4 Fractions Bauer McNett des pâtes – Séquence (a) – suite

| Essai | Point | R14 | R28 | R48 | R100 | R200 | P200 |
|--------------|--------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 105 | Alimentation | 15,7 | 30,3 | 19,8 | 8,4 | 6,7 | 19,1 |
| | Acceptés | 9,6 | 29,1 | 20,4 | 9,6 | 7,4 | 23,9 |
| | Rejets | 29,2 | 31,4 | 17,4 | 6,5 | 4,5 | 11,0 |
| 106 | Alimentation | 10,1 | 29,8 | 20,5 | 9,6 | 7,3 | 22,7 |
| | Acceptés | 6,3 | 27,2 | 21,2 | 10,4 | 8,2 | 26,7 |
| | Rejets | 22,2 | 33,1 | 18,6 | 7,3 | 4,9 | 13,9 |
| 91 | Alimentation | 25,1 | 30,0 | 17,6 | 7,4 | 5,1 | 14,8 |
| | Acceptés | 27,2 | 29,1 | 16,6 | 7,0 | 5,2 | 14,9 |
| | Rejets | 21,2 | 33,7 | 20,3 | 8,7 | 5,8 | 10,3 |
| 92 | Alimentation | 25,1 | 30,0 | 17,6 | 7,4 | 5,1 | 14,8 |
| | Acceptés | 26,1 | 28,5 | 16,0 | 6,9 | 4,9 | 17,6 |
| | Rejets | 24,2 | 34,5 | 20,5 | 8,9 | 5,4 | 6,5 |
| 93 | Alimentation | 25,1 | 30,0 | 17,6 | 7,4 | 5,1 | 14,8 |
| | Acceptés | 26,5 | 24,9 | 13,9 | 6,2 | 5,5 | 23,0 |
| | Rejets | 22,8 | 33,6 | 19,8 | 8,5 | 5,3 | 10,0 |
| 81 | Alimentation | 11,3 | 29,1 | 20,2 | 9,6 | 6,8 | 23,0 |
| | Acceptés | 11,5 | 27,5 | 18,3 | 8,6 | 6,7 | 27,4 |
| | Rejets | 10,2 | 32,1 | 23,9 | 11,5 | 7,3 | 15,0 |
| 82 | Alimentation | 11,3 | 29,1 | 20,2 | 9,6 | 6,8 | 23,0 |
| | Acceptés | 10,5 | 25,9 | 17,2 | 8,3 | 6,9 | 31,2 |
| | Rejets | 10,7 | 32,9 | 23,8 | 11,0 | 7,3 | 14,3 |
| 83 | Alimentation | 11,3 | 29,1 | 20,2 | 9,6 | 6,8 | 23,0 |
| | Acceptés | 9,3 | 22,5 | 15,1 | 7,6 | 7,0 | 38,5 |
| | Rejets | 12,2 | 32,6 | 22,7 | 10,5 | 6,9 | 15,1 |

Tableau A.5 Fractions Bauer McNett des pâtes – Séquence (b)

| Essai | Point | R14 | R28 | R48 | R100 | R200 | P200 |
|--------------|--------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 401 | Alimentation | 16,5 | 28,7 | 20,9 | 10,6 | 5,4 | 17,9 |
| | Acceptés | 6,1 | 24,5 | 22,5 | 12,6 | 7,1 | 27,2 |
| | Rejets | 20,4 | 30,0 | 20,4 | 10,1 | 4,6 | 14,5 |
| 402 | Alimentation | 18,6 | 30,0 | 19,8 | 9,3 | 4,5 | 17,8 |
| | Acceptés | 9,3 | 27,8 | 22,4 | 12,1 | 6,0 | 22,4 |
| | Rejets | 24,6 | 31,0 | 19,2 | 8,1 | 3,7 | 13,4 |
| 501 | Alimentation | 8,4 | 26,2 | 21,5 | 12,1 | 6,3 | 25,5 |
| | Acceptés | 3,2 | 20,4 | 20,8 | 13,5 | 7,2 | 34,9 |
| | Rejets | 12,5 | 30,0 | 23,6 | 12,1 | 5,5 | 16,3 |
| 502 | Alimentation | 8,4 | 26,2 | 21,5 | 12,1 | 6,3 | 25,5 |
| | Acceptés | 3,3 | 20,8 | 22,1 | 13,7 | 7,7 | 32,4 |
| | Rejets | 13,5 | 30,1 | 22,3 | 11,1 | 5,1 | 17,9 |
| 503 | Alimentation | 8,4 | 26,2 | 21,5 | 12,1 | 6,3 | 25,5 |
| | Acceptés | 3,9 | 21,2 | 21,7 | 13,3 | 7,3 | 32,6 |
| | Rejets | 16,3 | 30,8 | 22,2 | 10,6 | 4,3 | 15,8 |
| 601 | Alimentation | 8,6 | 26,7 | 22,5 | 12,5 | 6,5 | 23,2 |
| | Acceptés | 1,3 | 14,5 | 20,4 | 14,4 | 8,0 | 41,4 |
| | Rejets | 14,3 | 28,4 | 22,2 | 10,4 | 5,5 | 19,2 |
| 602 | Alimentation | 8,6 | 26,7 | 22,5 | 12,5 | 6,5 | 23,2 |
| | Acceptés | 1,6 | 15,3 | 19,8 | 13,1 | 7,6 | 42,6 |
| | Rejets | 15,8 | 30,9 | 22,7 | 11,1 | 5,1 | 14,4 |
| 603 | Alimentation | 8,6 | 26,7 | 22,5 | 12,5 | 6,5 | 23,2 |
| | Acceptés | 2,3 | 18,3 | 21,5 | 13,8 | 7,6 | 36,5 |
| | Rejets | 17,0 | 32,0 | 23,0 | 11,1 | 4,7 | 12,2 |
| 701 | Alimentation | 8,6 | 26,1 | 21,5 | 11,2 | 6,3 | 26,3 |
| | Acceptés | 1,3 | 14,0 | 20,0 | 14,1 | 7,7 | 42,9 |
| | Rejets | 12,7 | 30,6 | 23,3 | 11,8 | 5,3 | 16,3 |
| 702 | Alimentation | 12,9 | 30,5 | 23,1 | 12,0 | 5,6 | 15,9 |
| | Acceptés | 0,9 | 18,2 | 21,8 | 14,3 | 7,5 | 37,3 |
| | Rejets | 15,6 | 33,8 | 23,5 | 10,9 | 4,7 | 11,5 |
| 801 | Alimentation | 3,8 | 20,0 | 21,2 | 13,4 | 8,1 | 33,5 |
| | Acceptés | 3,7 | 18,0 | 19,5 | 11,9 | 7,7 | 39,2 |
| | Rejets | 4,2 | 24,2 | 26,9 | 16,4 | 7,7 | 20,6 |
| 802 | Alimentation | 3,8 | 20,0 | 21,2 | 13,4 | 8,1 | 33,5 |
| | Acceptés | 3,1 | 14,7 | 15,5 | 10,0 | 6,9 | 49,8 |
| | Rejets | 5,0 | 25,3 | 26,8 | 16,3 | 7,8 | 18,8 |
| 803 | Alimentation | 3,8 | 20,0 | 21,2 | 13,4 | 8,1 | 33,5 |
| | Acceptés | 2,3 | 11,6 | 13,0 | 9,1 | 5,0 | 59,0 |
| | Rejets | 5,0 | 24,9 | 25,5 | 15,8 | 7,3 | 21,5 |

Tableau A.6 Fractions Bauer McNett des pâtes – Séquence (c)

| Essai | Point | R14 | R28 | R48 | R100 | R200 | P200 |
|--------------|--------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 1103 | Alimentation | 18,5 | 28,8 | 19,0 | 9,5 | 5,8 | 18,4 |
| | Acceptés | 8,2 | 25,9 | 20,4 | 11,9 | 7,1 | 26,5 |
| | Rejets | 21,4 | 28,8 | 17,3 | 7,8 | 4,3 | 20,4 |
| 1203 | Alimentation | 8,2 | 25,9 | 20,4 | 11,9 | 7,1 | 26,5 |
| | Acceptés | 4,2 | 21,0 | 19,7 | 12,2 | 8,3 | 34,6 |
| | Rejets | 16,8 | 30,3 | 19,0 | 8,7 | 4,6 | 20,6 |
| 1303 | Alimentation | 21,7 | 29,6 | 18,6 | 8,9 | 5,2 | 16,0 |
| | Acceptés | 10,6 | 27,9 | 21,0 | 10,5 | 7,0 | 23,0 |
| | Rejets | 25,8 | 30,0 | 17,6 | 8,0 | 4,3 | 14,3 |
| 1403 | Alimentation | 10,6 | 27,9 | 21,0 | 10,5 | 7,0 | 23,0 |
| | Acceptés | 4,3 | 22,7 | 20,1 | 11,7 | 7,2 | 34,0 |
| | Rejets | 24,6 | 33,1 | 19,8 | 10,0 | 4,2 | 8,3 |
| 901 | Alimentation | 18,3 | 28,7 | 19,1 | 9,3 | 5,6 | 19,0 |
| | Acceptés | 7,5 | 25,7 | 20,7 | 12,2 | 7,6 | 26,3 |
| | Rejets | 23,5 | 30,3 | 18,3 | 8,7 | 4,7 | 14,5 |
| 1004 | Alimentation | 7,5 | 25,7 | 20,7 | 12,2 | 7,6 | 26,3 |
| | Acceptés | 0,0 | 0,2 | 1,7 | 6,7 | 11,9 | 79,6 |
| | Rejets | 16,2 | 32,3 | 24,7 | 12,6 | 5,7 | 8,5 |
| 1003 | Alimentation | 7,5 | 25,7 | 20,7 | 12,2 | 7,6 | 26,3 |
| | Acceptés | 0,4 | 0,2 | 1,5 | 6,0 | 10,7 | 81,2 |
| | Rejets | 15,7 | 32,0 | 23,7 | 12,7 | 6,1 | 9,8 |
| 1007 | Alimentation | 7,5 | 25,7 | 20,7 | 12,2 | 7,6 | 26,3 |
| | Acceptés | 0,0 | 0,3 | 1,0 | 5,4 | 10,2 | 83,1 |
| | Rejets | 14,2 | 31,3 | 22,6 | 11,9 | 6,1 | 13,9 |
| 1006 | Alimentation | 7,5 | 25,7 | 20,7 | 12,2 | 7,6 | 26,3 |
| | Acceptés | 0,0 | 0,3 | 1,1 | 5,7 | 10,3 | 82,6 |
| | Rejets | 12,5 | 29,0 | 21,4 | 11,5 | 5,6 | 20,0 |
| 1005 | Alimentation | 7,5 | 25,7 | 20,7 | 12,2 | 7,6 | 26,3 |
| | Acceptés | 0,0 | 0,1 | 1,2 | 5,6 | 9,6 | 83,5 |
| | Rejets | 13,4 | 29,3 | 22,0 | 11,9 | 6,4 | 17,0 |

Tableau A.7 Propriétés des pâtes – Séquence (a)

| Essai | Indice d'égouttage | | | Longueur des fibres L_w (FQA) | | |
|--------------|---------------------------|-----------------|---------------|---|-----------------|---------------|
| | Aliment. | Acceptés | Rejets | Aliment. | Acceptés | Rejets |
| | mL | mL | mL | mm | mm | mm |
| 301 | 548 | 352 | 623 | 1,59 | 1,39 | 1,74 |
| 302 | 548 | 394 | 645 | 1,59 | 1,50 | 1,73 |
| 303 | 548 | 395 | 650 | 1,59 | 1,46 | 1,73 |
| 304 | 548 | 409 | 651 | 1,59 | 1,50 | 1,74 |
| 305 | 548 | 429 | 658 | 1,59 | 1,60 | 1,82 |
| 201 | 530 | 302 | 624 | 1,65 | 1,49 | 1,69 |
| 202 | 530 | 327 | 651 | 1,65 | 1,43 | 1,79 |
| 203 | 530 | 360 | 660 | 1,65 | 1,50 | 1,80 |
| 204 | 530 | 381 | 663 | 1,65 | 1,46 | 1,83 |
| 205 | 530 | 420 | 678 | 1,65 | 1,55 | 1,77 |
| 101 | 529 | 271 | 617 | 1,59 | 1,37 | 1,82 |
| 102 | 529 | 296 | 633 | 1,59 | 1,41 | 1,80 |
| 103 | 529 | 311 | 657 | 1,59 | 1,49 | 1,85 |
| 104 | 529 | 346 | 666 | 1,59 | 1,46 | 1,84 |
| 105 | 529 | 388 | 685 | 1,59 | 1,53 | 1,91 |
| 106 | 398 | 301 | 636 | 1,55 | 1,44 | 1,85 |
| 91 | 627 | 579 | 722 | 1,80 | 1,77 | 1,73 |
| 92 | 627 | 517 | 719 | 1,80 | 1,80 | 1,79 |
| 93 | 627 | 388 | 712 | 1,80 | 1,69 | 1,76 |
| 81 | 408 | 283 | 652 | 1,56 | 1,57 | 1,49 |
| 82 | 408 | 213 | 661 | 1,56 | 1,46 | 1,54 |
| 83 | 408 | 125 | 646 | 1,56 | 1,38 | 1,61 |

Tableau A.8 Propriétés des pâtes – Séquence (b)

| Essai | Indice d'égouttage | | | Longueur des fibres L_w (FQA) | | |
|-------|--------------------|----------|--------|---------------------------------|----------|--------|
| | Aliment. | Acceptés | Rejets | Aliment. | Acceptés | Rejets |
| | mL | mL | mL | mm | mm | Mm |
| 401 | 586 | 329 | 656 | 1,55 | 1,35 | 1,60 |
| 402 | 647 | 450 | 693 | 1,65 | 1,41 | 1,76 |
| 501 | 413 | 180 | 531 | 1,45 | 1,17 | 1,53 |
| 502 | 413 | 207 | 589 | 1,45 | 1,25 | 1,62 |
| 503 | 413 | 242 | 633 | 1,45 | 1,25 | 1,66 |
| 601 | 404 | 111 | 549 | 1,43 | 1,05 | 1,54 |
| 602 | 404 | 142 | 605 | 1,43 | 1,13 | 1,61 |
| 603 | 404 | 157 | 642 | 1,43 | 1,13 | 1,71 |
| 701 | 395 | 114 | 544 | 1,38 | 1,04 | 1,56 |
| 702 | 536 | 166 | 622 | 1,56 | 0,99 | 1,67 |
| 801 | 188 | 106 | 586 | 1,21 | 1,21 | 1,28 |
| 802 | 188 | 82 | 551 | 1,21 | 1,04 | 1,25 |
| 803 | 188 | 56 | 520 | 1,21 | 1,08 | 1,19 |

Tableau A.9 Propriétés des pâtes – Séquence (c)

| Essai | Indice d'égouttage | | | Longueur des fibres L_w (FQA) | | |
|-------|--------------------|------------------|--------|---------------------------------|----------|--------|
| | Aliment. | Acceptés | Rejets | Aliment. | Acceptés | Rejets |
| | mL | mL | mL | mm | mm | Mm |
| 1103 | 557 | 338 | 650 | 1,67 | 1,42 | 1,75 |
| 1203 | 338 | 180 | 608 | 1,42 | 1,27 | 1,71 |
| 1303 | 638 | 434 | 680 | 1,66 | 1,47 | 1,86 |
| 1403 | 434 | 225 | 676 | 1,43 | 1,31 | 1,76 |
| 901 | 587 | 331 | 642 | 1,66 | 1,36 | 1,76 |
| 1004 | 331 | — ⁽¹⁾ | 663 | 1,36 | 0,36 | 1,55 |
| 1003 | 331 | — ⁽¹⁾ | 646 | 1,36 | 0,37 | 1,58 |
| 1007 | 331 | — ⁽¹⁾ | 625 | 1,36 | 0,34 | 1,54 |
| 1006 | 331 | — ⁽¹⁾ | 629 | 1,36 | 0,34 | 1,55 |
| 1005 | 331 | — ⁽¹⁾ | 564 | 1,36 | 0,34 | 1,53 |

Notes : ⁽¹⁾ valeurs trop basses pour être mesurées

**Tableau A.10 Propriétés de la fraction S1 raffinée à haute consistance en 1
stade – Séquence (b)**

| Propriétés | | Unités | S1-4 | S1-5 | S1-8 | S1-11 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|------|------|------|-------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 4,1 | 4,7 | 6,5 | 8,1 |
| Indice d'égouttage | | mL | 166 | 122 | 84 | 48 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 1,79 | 1,30 | 1,06 | 0,50 |
| Bauer McNett | R14 | % | 18,4 | 10,6 | 8,2 | 6,1 |
| | R28 | % | 24,6 | 26,7 | 25,8 | 25,1 |
| | R48 | % | 24,5 | 25,6 | 26,1 | 26,7 |
| | R100 | % | 10,8 | 11,1 | 11,9 | 12,6 |
| | R200 | % | 5,7 | 5,7 | 6,6 | 7,9 |
| | P200 | % | 16,0 | 20,3 | 21,4 | 21,6 |
| FQA | L _a | mm | 0,84 | 0,87 | 0,82 | 0,77 |
| | L _w | mm | 1,74 | 1,78 | 1,66 | 1,60 |
| | L _{ww} | mm | 2,35 | 2,38 | 2,21 | 2,18 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 2,76 | 2,68 | 2,55 | 2,27 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 45,5 | 48,2 | 53,5 | 59,1 |
| | Allongement à la rupture | % | 2,37 | 2,62 | 2,59 | 2,88 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 44,3 | 51,9 | 55,6 | 69,4 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 3,09 | 3,47 | 3,74 | 4,18 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 9,68 | 9,82 | 8,91 | 8,04 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 52,6 | 52,8 | 52,9 | 53,3 |
| | Opacité | % | 94,9 | 95,5 | 95,5 | 95,9 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 48,9 | 50,9 | 52,3 | 53,9 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 3,99 | 4,11 | 4,20 | 4,15 |
| | CIELAB | L | % | 85,5 | 85,6 | 85,6 |
| | | a [*] | % | 0,12 | 0,16 | 0,14 |
| | | b [*] | % | 14,2 | 14,1 | 14,0 |

Tableau A.11 Propriétés de la fraction S1 raffinée à haute consistance en 2 stades – Séquence (b)

| Propriétés | | Unités | S1-23 | S1-24 | S1-28 | S1-30 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 5,5 | 6,3 | 9,1 | 9,9 |
| Indice d'égouttage | | mL | 209 | 132 | 79 | 44 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 2,08 | 1,56 | 1,05 | 0,74 |
| Bauer McNett | R14 | % | 13,8 | 11,0 | 9,8 | 6,4 |
| | R28 | % | 27,8 | 26,9 | 25,9 | 24,8 |
| | R48 | % | 24,9 | 24,8 | 25,5 | 25,0 |
| | R100 | % | 10,4 | 11,0 | 11,3 | 12,2 |
| | R200 | % | 5,0 | 5,5 | 6,1 | 7,2 |
| | P200 | % | 18,1 | 20,8 | 21,4 | 24,4 |
| FQA | L _a | mm | 0,88 | 0,88 | 0,82 | 0,81 |
| | L _w | mm | 1,80 | 1,80 | 1,72 | 1,69 |
| | L _{ww} | mm | 2,41 | 2,42 | 2,31 | 2,27 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 2,85 | 2,58 | 2,47 | 2,24 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 39,9 | 48,9 | 55,8 | 59,3 |
| | Allongement à la rupture | % | 2,07 | 2,41 | 2,44 | 2,50 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 33,5 | 48,7 | 57,2 | 61,7 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 2,80 | 3,28 | 4,08 | 4,29 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 10,14 | 9,21 | 8,56 | 8,07 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 52,2 | 52,5 | 52,6 | 52,9 |
| | Opacité | % | 94,3 | 95,2 | 95,9 | 95,8 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 46,1 | 49,7 | 51,7 | 51,7 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 3,82 | 4,14 | 4,20 | 4,23 |
| | CIELAB | L | % | 85,3 | 85,4 | 85,5 |
| | | a [*] | % | 0,18 | 0,18 | 0,14 |
| | | b [*] | % | 14,4 | 14,2 | 14,0 |

**Tableau A.12 Propriétés de la fraction S1 raffinée à basse consistance –
Séquence (b)**

| Propriétés | | Unités | S1-B193 | S1-B143 | S1-B95 | S1-B50 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|---------|---------|--------|--------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 0,58 | 0,72 | 1,1 | 1,3 |
| Indice d'égouttage | | mL | 262 | 190 | 120 | 78 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 1,91 | 1,61 | 1,46 | 1,11 |
| Bauer McNett | R14 | % | 6,4 | 6,1 | 3,9 | 0,5 |
| | R28 | % | 27,0 | 26,1 | 24,4 | 15,4 |
| | R48 | % | 30,6 | 31,4 | 31,2 | 36,2 |
| | R100 | % | 12,9 | 13,6 | 14,2 | 18,1 |
| | R200 | % | 6,3 | 6,8 | 7,6 | 9,2 |
| | P200 | % | 16,8 | 16,0 | 18,7 | 20,6 |
| FQA | L _a | mm | 0,82 | 0,76 | 0,71 | 0,60 |
| | L _w | mm | 1,65 | 1,56 | 1,47 | 1,21 |
| | L _{ww} | mm | 2,22 | 2,12 | 2,01 | 1,69 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 3,00 | 2,66 | 2,53 | 2,42 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 40,0 | 43,9 | 51,0 | 47,4 |
| | Allongement à la rupture | % | 1,97 | 2,06 | 2,38 | 2,20 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 32,9 | 38,0 | 51,4 | 44,0 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 2,48 | 2,80 | 3,24 | 2,91 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 8,63 | 8,39 | 8,15 | 6,44 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 51,7 | 52,2 | 52,3 | 51,9 |
| | Opacité | % | 94,9 | 95,6 | 95,9 | 96,7 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 46,7 | 49,3 | 50,7 | 53,6 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 4,10 | 4,24 | 4,40 | 4,90 |
| | CIELAB | L | % | 84,9 | 85,0 | 85,1 |
| | | a [*] | % | 0,10 | 0,09 | 0,11 |
| | | b [*] | % | 14,1 | 13,8 | 13,3 |

Tableau A.13 Propriétés de la fraction S2 raffinée à haute consistance en 1 stade – Séquence (b)

| Propriétés | | Unités | S2-5 | S2-6 | S2-9 | S2-10 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|------|------|------|-------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 4,3 | 5,2 | 5,5 | 7,0 |
| Indice d'égouttage | | mL | 209 | 132 | 79 | 44 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 1,34 | 1,24 | 0,92 | 0,63 |
| Bauer McNett | R14 | % | 8,3 | 6,6 | 5,8 | 3,7 |
| | R28 | % | 26,0 | 26,2 | 25,6 | 23,1 |
| | R48 | % | 28,3 | 28,8 | 28,8 | 28,3 |
| | R100 | % | 12,9 | 13,2 | 13,8 | 14,3 |
| | R200 | % | 5,8 | 6,1 | 6,7 | 7,4 |
| | P200 | % | 18,7 | 19,1 | 19,3 | 23,2 |
| FQA | L _a | mm | 0,81 | 0,79 | 0,77 | 0,75 |
| | L _w | mm | 1,66 | 1,62 | 1,58 | 1,54 |
| | L _{ww} | mm | 2,26 | 2,22 | 2,16 | 2,12 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 2,92 | 2,80 | 2,69 | 2,41 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 41,0 | 43,7 | 49,3 | 54,7 |
| | Allongement à la rupture | % | 1,98 | 2,05 | 2,18 | 2,70 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 32,5 | 36,6 | 44,1 | 60,3 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 2,54 | 2,96 | 3,37 | 4,00 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 10,0 | 9,25 | 8,93 | 8,38 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 50,2 | 50,8 | 51,0 | 51,4 |
| | Opacité | % | 96,0 | 96,5 | 96,6 | 96,9 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 48,4 | 50,2 | 51,8 | 54,1 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 5,03 | 5,05 | 5,08 | 5,29 |
| | CIELAB | L | % | 83,7 | 84,0 | 84,1 |
| | | a [*] | % | 0,14 | 0,11 | 0,09 |
| | | b [*] | % | 13,5 | 13,4 | 13,3 |

Tableau A.14 Propriétés de la fraction S2 raffinée à haute consistance en 2 stades – Séquence (b)

| Propriétés | | Unités | S2-23 | S2-25 | S2-29 | S2-31 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 4,1 | 5,8 | 7,8 | 9,0 |
| Indice d'égouttage | | mL | 233 | 141 | 89 | 48 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 1,84 | 1,15 | 0,89 | 0,60 |
| Bauer McNett | R14 | % | 9,4 | 7,7 | 6,7 | 4,2 |
| | R28 | % | 28,3 | 26,3 | 25,2 | 23,2 |
| | R48 | % | 27,4 | 27,4 | 27,0 | 26,4 |
| | R100 | % | 12,9 | 13,6 | 13,6 | 13,9 |
| | R200 | % | 5,6 | 6,2 | 7,0 | 7,8 |
| | P200 | % | 16,4 | 18,8 | 20,5 | 24,5 |
| FQA | L _a | mm | 0,81 | 0,79 | 0,77 | 0,73 |
| | L _w | mm | 1,65 | 1,63 | 1,61 | 1,50 |
| | L _{ww} | mm | 2,24 | 2,23 | 2,22 | 2,06 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 3,16 | 2,71 | 2,55 | 2,39 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 38,2 | 46,6 | 54,2 | 60,8 |
| | Allongement à la rupture | % | 2,09 | 2,50 | 2,75 | 3,18 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 33,7 | 48,4 | 62,3 | 82,3 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 2,22 | 3,25 | 3,68 | 4,11 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 9,91 | 9,01 | 8,80 | 8,12 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 50,5 | 50,6 | 51,1 | 51,4 |
| | Opacité | % | 95,4 | 96,1 | 96,5 | 96,7 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 46,5 | 50,0 | 52,2 | 53,1 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 4,63 | 5,05 | 5,17 | 5,11 |
| | CIELAB | L | % | 84,1 | 84,0 | 84,2 |
| | | a [*] | % | 0,08 | 0,12 | 0,07 |
| | | b [*] | % | 14,0 | 13,8 | 13,6 |

**Tableau A.15 Propriétés de la fraction S2 raffinée à basse consistance –
Séquence (b)**

| Propriétés | | Unités | S2-B170 | S2-B100 | S2-B72 | S2-B55 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|---------|---------|--------|--------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 0,55 | 0,80 | 1,1 | 1,3 |
| Indice d'égouttage | | mL | 212 | 156 | 100 | 72 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 1,53 | 1,26 | 1,21 | 1,07 |
| Bauer McNett | R14 | % | 5,7 | 3,1 | 1,8 | 1,6 |
| | R28 | % | 26,7 | 31,3 | 22,0 | 20,0 |
| | R48 | % | 32,4 | 24,1 | 33,9 | 33,7 |
| | R100 | % | 15,2 | 14,8 | 16,9 | 17,5 |
| | R200 | % | 6,6 | 8,2 | 8,5 | 9,2 |
| | P200 | % | 13,4 | 18,5 | 16,9 | 18,0 |
| FQA | L _a | mm | 0,75 | 0,69 | 0,67 | 0,64 |
| | L _w | mm | 1,51 | 1,39 | 1,35 | 1,32 |
| | L _{ww} | mm | 2,05 | 1,93 | 1,85 | 1,83 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 2,79 | 2,56 | 2,55 | 2,45 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 40,9 | 43,8 | 49,4 | 53,2 |
| | Allongement à la rupture | % | 2,08 | 2,10 | 2,56 | 2,72 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 36,2 | 37,8 | 54,2 | 62,2 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 2,36 | 2,97 | 2,97 | 3,28 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 8,29 | 7,49 | 7,34 | 7,12 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 50,4 | 50,4 | 50,7 | 51,0 |
| | Opacité | % | 96,1 | 96,2 | 96,9 | 97,1 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 47,3 | 49,1 | 51,9 | 53,3 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 5,01 | 5,14 | 5,39 | 5,52 |
| | CIELAB | L | % | 83,7 | 83,7 | 83,8 |
| | | a* | % | 0,03 | 0,03 | 0,05 |
| | | b* | % | 13,4 | 13,3 | 13,2 |

Tableau A.16 Propriétés de la fraction A raffinée à haute consistance en 1 stade – Séquence (b)

| Propriétés | | Unités | A-1 | A-3 | A-7 | A-9 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|------|------|------|------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 1,1 | 2,0 | 3,3 | 4,5 |
| Indice d'égouttage | | mL | 134 | 124 | 77 | 57 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 1,04 | 0,99 | 1,61 | 1,80 |
| Bauer McNett | R14 | % | 2,7 | 2,8 | 4,5 | 4,8 |
| | R28 | % | 17,1 | 16,9 | 14,5 | 18,1 |
| | R48 | % | 23,5 | 24,1 | 22,3 | 17,3 |
| | R100 | % | 14,9 | 14,8 | 14,2 | 10,5 |
| | R200 | % | 7,8 | 7,8 | 7,7 | 11,6 |
| | P200 | % | 34,0 | 33,6 | 36,8 | 37,7 |
| FQA | L _a | mm | 0,58 | 0,57 | 0,57 | 0,55 |
| | L _w | mm | 1,36 | 1,33 | 1,33 | 1,27 |
| | L _{ww} | mm | 2,08 | 2,01 | 2,03 | 1,95 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 2,85 | 2,67 | 2,42 | 2,26 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 32,9 | 34,7 | 41,1 | 44,7 |
| | Allongement à la rupture | % | 2,02 | 2,04 | 2,45 | 2,64 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 28,4 | 30,1 | 43,5 | 51,4 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 1,81 | 2,15 | 2,63 | 2,72 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 7,36 | 6,98 | 6,81 | 7,12 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 49,9 | 49,7 | 49,5 | 49,5 |
| | Opacité | % | 97,9 | 98,0 | 98,2 | 98,2 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 57,0 | 57,4 | 58,6 | 58,5 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 6,38 | 6,50 | 6,75 | 6,84 |
| | CIELAB | L | % | 83,2 | 83,1 | 82,9 |
| | | a [*] | % | 0,04 | 0,10 | 0,12 |
| | | b [*] | % | 12,9 | 13,1 | 13,0 |

**Tableau A.17 Propriétés de la fraction A raffinée à basse consistance –
Séquence (b)**

| Propriétés | | Unités | A-B120 | A-B75 | A-B61 | A-B30 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|--------|-------|-------|-------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 0,09 | 0,49 | 0,54 | 0,72 |
| Indice d'égouttage | | mL | 172 | 96 | 87 | 53 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 0,91 | 1,65 | 2,09 | 2,28 |
| Bauer McNett | R14 | % | 2,1 | 2,9 | 2,1 | 1,9 |
| | R28 | % | 18,4 | 14,7 | 13,0 | 12,9 |
| | R48 | % | 24,4 | 22,9 | 22,7 | 24,6 |
| | R100 | % | 15,7 | 15,2 | 15,6 | 16,9 |
| | R200 | % | 7,8 | 7,8 | 8,6 | 8,6 |
| | P200 | % | 31,6 | 36,5 | 38,0 | 35,1 |
| FQA | L _a | mm | 0,56 | 0,53 | 0,54 | 0,51 |
| | L _w | mm | 1,32 | 1,17 | 1,22 | 1,11 |
| | L _{ww} | mm | 2,02 | 1,76 | 1,87 | 1,66 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 2,76 | 2,44 | 2,41 | 2,31 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 29,4 | 36,6 | 41,3 | 43,3 |
| | Allongement à la rupture | % | 1,71 | 1,93 | 2,39 | 2,33 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 20,3 | 28,9 | 42,5 | 42,6 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 1,65 | 2,11 | 2,50 | 2,64 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 7,34 | 5,90 | 6,67 | 6,07 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 49,3 | 49,3 | 48,9 | 48,9 |
| | Opacité | % | 97,8 | 98,2 | 98,3 | 98,5 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 56,2 | 59,0 | 57,5 | 60,1 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 6,69 | 7,02 | 7,21 | 7,47 |
| | CIELAB | L | % | 82,8 | 82,9 | 82,4 |
| | | a [*] | % | 0,06 | 0,13 | 0,07 |
| | | b [*] | % | 12,9 | 13,1 | 12,7 |

**Tableau A.18 Propriétés de la fraction S1 raffinée à haute consistance en 1
stade – Séquence (c)**

| Propriétés | | Unités | RL1-5 | RL1-7 | RL1-8 | RL1-9 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 4,4 | 5,5 | 6,5 | 6,7 |
| Indice d'égouttage | | mL | 164 | 104 | 72 | 51 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 2,54 | 2,13 | 1,74 | 1,43 |
| Bauer McNett | R14 | % | 20,0 | 17,8 | 16,2 | 14,2 |
| | R28 | % | 27,6 | 27,3 | 26,7 | 27,1 |
| | R48 | % | 16,8 | 16,7 | 16,5 | 17,1 |
| | R100 | % | 8,2 | 9,2 | 9,8 | 10,3 |
| | R200 | % | 6,6 | 6,8 | 7,1 | 7,5 |
| | P200 | % | 20,8 | 22,2 | 23,7 | 23,8 |
| FQA | L _a | mm | 0,78 | 0,79 | 0,77 | 0,73 |
| | L _w | mm | 1,73 | 1,73 | 1,68 | 1,65 |
| | L _{ww} | mm | 2,36 | 2,36 | 2,31 | 2,47 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 2,99 | 2,92 | 2,68 | 2,77 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 44,5 | 51,7 | 55,1 | 56,7 |
| | Allongement à la rupture | % | 1,73 | 2,05 | 2,01 | 2,04 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 29,9 | 42,8 | 43,8 | 46,4 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 2,82 | 3,20 | 3,48 | 3,65 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 8,89 | 8,57 | 8,18 | 7,86 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 49,7 | 49,6 | 49,5 | 49,9 |
| | Opacité | % | 96,6 | 97,0 | 96,7 | 97,5 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 49,1 | 50,4 | 49,2 | 53,3 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 5,66 | 5,97 | 5,86 | 6,26 |
| | CIELAB | L | % | 82,9 | 82,8 | 82,7 |
| | | a [*] | % | 0,14 | 0,13 | 0,15 |
| | | b [*] | % | 12,7 | 12,6 | 12,5 |

**Tableau A.19 Propriétés de la fraction S1 raffinée à basse consistance –
Séquence (c)**

| Propriétés | | Unités | L1-B0 | L1-B1 | L1-B3 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 0,64 | 1,1 | 1,5 |
| Indice d'égouttage | | mL | 203 | 113 | 48 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 2,58 | 1,99 | 1,49 |
| Bauer McNett | R14 | % | 11,4 | 4,4 | 0,5 |
| | R28 | % | 32,4 | 29,9 | 20,8 |
| | R48 | % | 22,2 | 25,0 | 28,7 |
| | R100 | % | 11,7 | 14,5 | 18,6 |
| | R200 | % | 5,9 | 7,4 | 9,3 |
| | P200 | % | 16,4 | 18,8 | 22,1 |
| FQA | L _a | mm | 0,68 | 0,62 | 0,55 |
| | L _w | mm | 1,49 | 1,29 | 1,08 |
| | L _{ww} | mm | 2,10 | 1,80 | 1,51 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 3,10 | 2,93 | 2,71 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 36,6 | 38,5 | 46,4 |
| | Allongement à la rupture | % | 1,53 | 1,42 | 1,64 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 22,2 | 20,8 | 29,9 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 1,94 | 2,47 | 2,45 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 7,85 | 7,24 | 5,96 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 49,0 | 49,7 | 47,9 |
| | Opacité | % | 96,8 | 97,1 | 98,0 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 48,0 | 50,6 | 52,3 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 6,10 | 5,99 | 7,68 |
| | CIELAB | L | % | 82,3 | 82,7 |
| | | a [*] | % | 0,12 | 0,17 |
| | | b [*] | % | 12,4 | 11,4 |

Tableau A.20 Propriétés de la fraction S2 raffinée à haute consistance en 1 stade – Séquence (c)

| Propriétés | | Unités | L2-4 | L2-5 | L2-8 | L2-11 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|------|------|------|-------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 4,4 | 4,9 | 5,4 | 6,7 |
| Indice d'égouttage | | mL | 180 | 111 | 87 | 52 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 3,14 | 2,38 | 2,11 | 1,35 |
| Bauer McNett | R14 | % | 20,0 | 16,9 | 15,2 | 11,5 |
| | R28 | % | 28,8 | 28,9 | 28,1 | 27,6 |
| | R48 | % | 18,0 | 18,4 | 18,7 | 18,7 |
| | R100 | % | 10,0 | 10,4 | 10,8 | 11,5 |
| | R200 | % | 5,3 | 6,2 | 6,4 | 7,4 |
| | P200 | % | 17,9 | 19,2 | 20,8 | 23,3 |
| FQA | L _a | mm | 0,82 | 0,78 | 0,74 | 0,71 |
| | L _w | mm | 1,75 | 1,70 | 1,60 | 1,58 |
| | L _{ww} | mm | 2,36 | 2,34 | 2,22 | 2,21 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 3,19 | 3,17 | 2,92 | 3,05 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 43,8 | 49,9 | 51,6 | 55,4 |
| | Allongement à la rupture | % | 2,01 | 2,04 | 2,05 | 2,08 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 34,9 | 40,8 | 42,0 | 45,1 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 2,49 | 3,11 | 3,12 | 3,35 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 9,47 | 8,60 | 8,66 | 7,29 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 49,5 | 49,6 | 49,4 | 49,2 |
| | Opacité | % | 96,4 | 96,9 | 97,3 | 97,0 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 48,3 | 49,7 | 52,1 | 50,2 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 5,76 | 6,01 | 6,37 | 6,27 |
| | CIELAB | L | % | 82,7 | 82,6 | 82,5 |
| | | a [*] | % | 0,13 | 0,11 | 0,12 |
| | | b [*] | % | 12,6 | 12,4 | 12,4 |

**Tableau A.21 Propriétés de la fraction S2 raffinée à basse consistance –
Séquence (c)**

| Propriétés | | Unités | L2-B2 | L2-B3 | L2-B4 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 0,80 | 1,2 | 1,4 |
| Indice d'égouttage | | mL | 170 | 88 | 56 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 2,84 | 2,18 | 1,75 |
| Bauer McNett | R14 | % | 6,2 | 1,5 | 0,3 |
| | R28 | % | 31,9 | 26,5 | 19,5 |
| | R48 | % | 24,6 | 27,7 | 29,7 |
| | R100 | % | 13,7 | 16,7 | 19,3 |
| | R200 | % | 6,6 | 8,1 | 9,3 |
| | P200 | % | 17,0 | 19,5 | 21,9 |
| FQA | L _a | mm | 0,65 | 0,57 | 0,51 |
| | L _w | mm | 1,37 | 1,18 | 1,01 |
| | L _{ww} | mm | 1,93 | 1,70 | 1,48 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 3,46 | 3,16 | 3,04 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 38,4 | 43,1 | 44,6 |
| | Allongement à la rupture | % | 1,60 | 1,65 | 1,66 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 24,6 | 27,7 | 29,2 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 2,08 | 2,44 | 2,52 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 7,39 | 6,97 | 5,97 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 48,3 | 49,1 | 48,5 |
| | Opacité | % | 97,0 | 97,3 | 97,8 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 47,4 | 51,0 | 51,6 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 6,42 | 6,39 | 7,11 |
| | CIELAB | L | % | 81,8 | 82,2 |
| | | a [*] | % | 0,15 | 0,15 |
| | | b [*] | % | 12,3 | 12,2 |

Tableau A.22 Propriétés de la fraction A raffinée à haute consistance en 1 stade – Séquence (c)

| Propriétés | | Unités | A-1 | A-5 | A-8 | A-10 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|------|------|------|------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 1,1 | 2,2 | 3,3 | 4,3 |
| Indice d'égouttage | | mL | 146 | 102 | 70 | 43 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 1,02 | 0,79 | 0,88 | 0,89 |
| Bauer McNett | R14 | % | 4,6 | 4,9 | 4,8 | 3,8 |
| | R28 | % | 24,3 | 22,4 | 21,6 | 29,7 |
| | R48 | % | 29,4 | 18,5 | 17,7 | 17,2 |
| | R100 | % | 12,3 | 12,1 | 12,3 | 12,8 |
| | R200 | % | 7,2 | 7,1 | 7,6 | 8,0 |
| | P200 | % | 22,2 | 35,0 | 36,0 | 28,5 |
| FQA | L _a | mm | 0,55 | 0,54 | 0,53 | 0,53 |
| | L _w | mm | 1,40 | 1,34 | 1,34 | 1,30 |
| | L _{ww} | mm | 2,13 | 2,08 | 2,06 | 2,01 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 3,02 | 2,80 | 2,63 | 2,49 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 30,8 | 36,0 | 40,2 | 42,9 |
| | Allongement à la rupture | % | 1,57 | 1,78 | 1,91 | 1,77 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 19,1 | 25,9 | 31,4 | 30,0 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 1,61 | 2,01 | 2,35 | 2,56 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 6,88 | 7,64 | 7,03 | 6,51 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 48,2 | 48,0 | 47,8 | 47,8 |
| | Opacité | % | 98,0 | 98,5 | 98,8 | 98,9 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 54,1 | 57,6 | 59,0 | 60,9 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 7,22 | 8,16 | 8,43 | 9,01 |
| | CIELAB | L | % | 81,7 | 81,4 | 81,2 |
| | | a* | % | 0,08 | 0,12 | 0,20 |
| | | b* | % | 12,2 | 11,9 | 11,3 |

**Tableau A.23 Propriétés de la fraction A raffinée à basse consistance –
Séquence (c)**

| Propriétés | | Unités | A-B1 | A-B2 | A-B3 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|------|-------|------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 0,21 | 0,56 | 0,87 |
| Indice d'égouttage | | mL | 160 | 96 | 37 |
| Rejets Pulmac (0,004'') | | % | 1,10 | 1,07 | 0,72 |
| Bauer McNett | R14 | % | 4,7 | 2,1 | 0,5 |
| | R28 | % | 24,0 | 21,2 | 16,1 |
| | R48 | % | 19,5 | 20,6 | 21,6 |
| | R100 | % | 12,2 | 13,8 | 15,9 |
| | R200 | % | 7,0 | 7,5 | 9,3 |
| | P200 | % | 32,6 | 34,8 | 36,6 |
| FQA | L _a | mm | 0,57 | 0,53 | 0,47 |
| | L _w | mm | 1,41 | 1,24 | 1,06 |
| | L _{ww} | mm | 2,12 | 1,88 | 1,63 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 2,93 | 2,68 | 2,55 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 28,3 | 33,7 | 39,8 |
| | Allongement à la rupture | % | 1,52 | 1,55 | 1,70 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 16,6 | 20,5 | 26,2 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 1,50 | 1,80 | 2,11 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 6,80 | 6,01 | 5,56 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 46,8 | 47,3 | 47,9 |
| | Opacité | % | 98,6 | 98,8 | 99,1 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 56,4 | 59,8 | 64,9 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 9,03 | 8,93 | 9,59 |
| | CIELAB | L | % | 80,3 | 80,8 |
| | | a* | % | -0,03 | 0,04 |
| | | b* | % | 11,3 | 11,6 |

Figure A.1

Bilan de masse de la séquence (b)

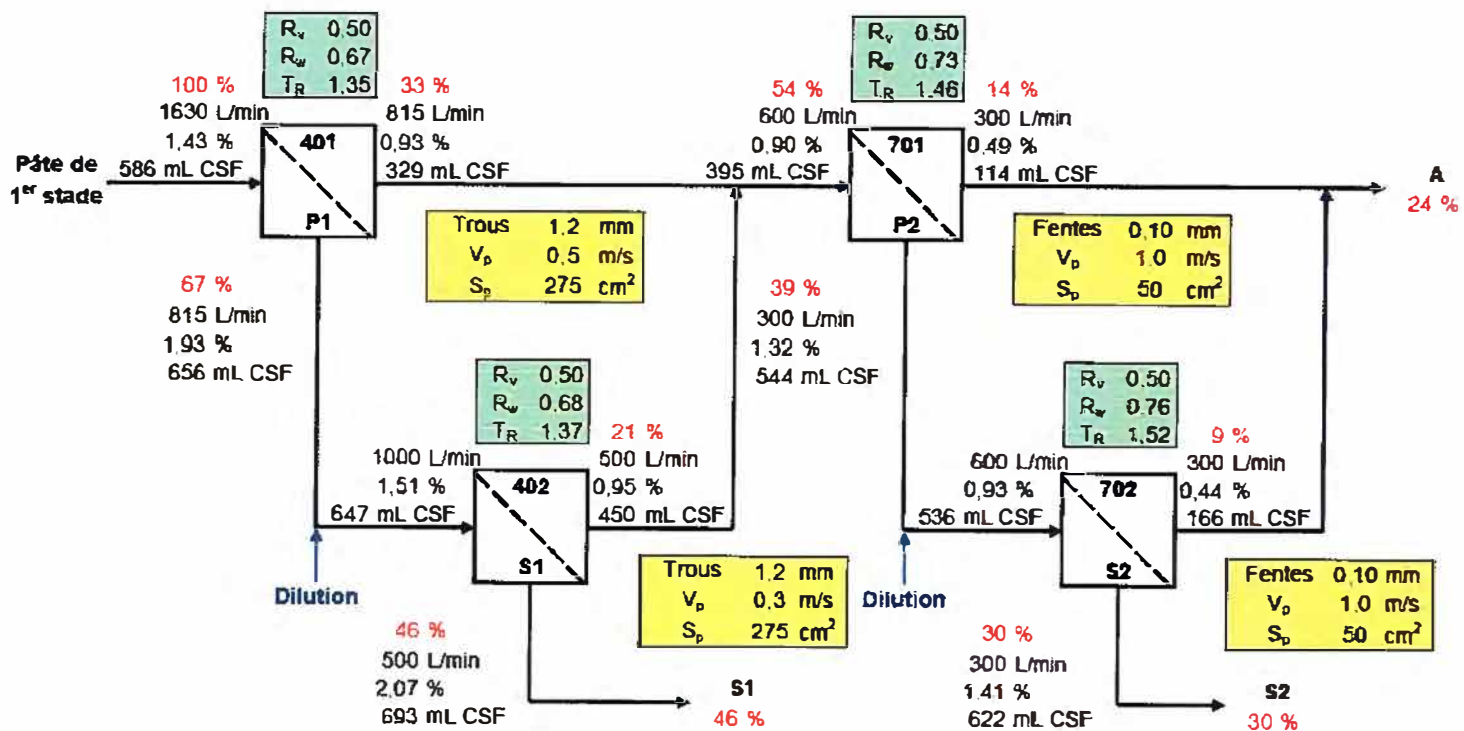
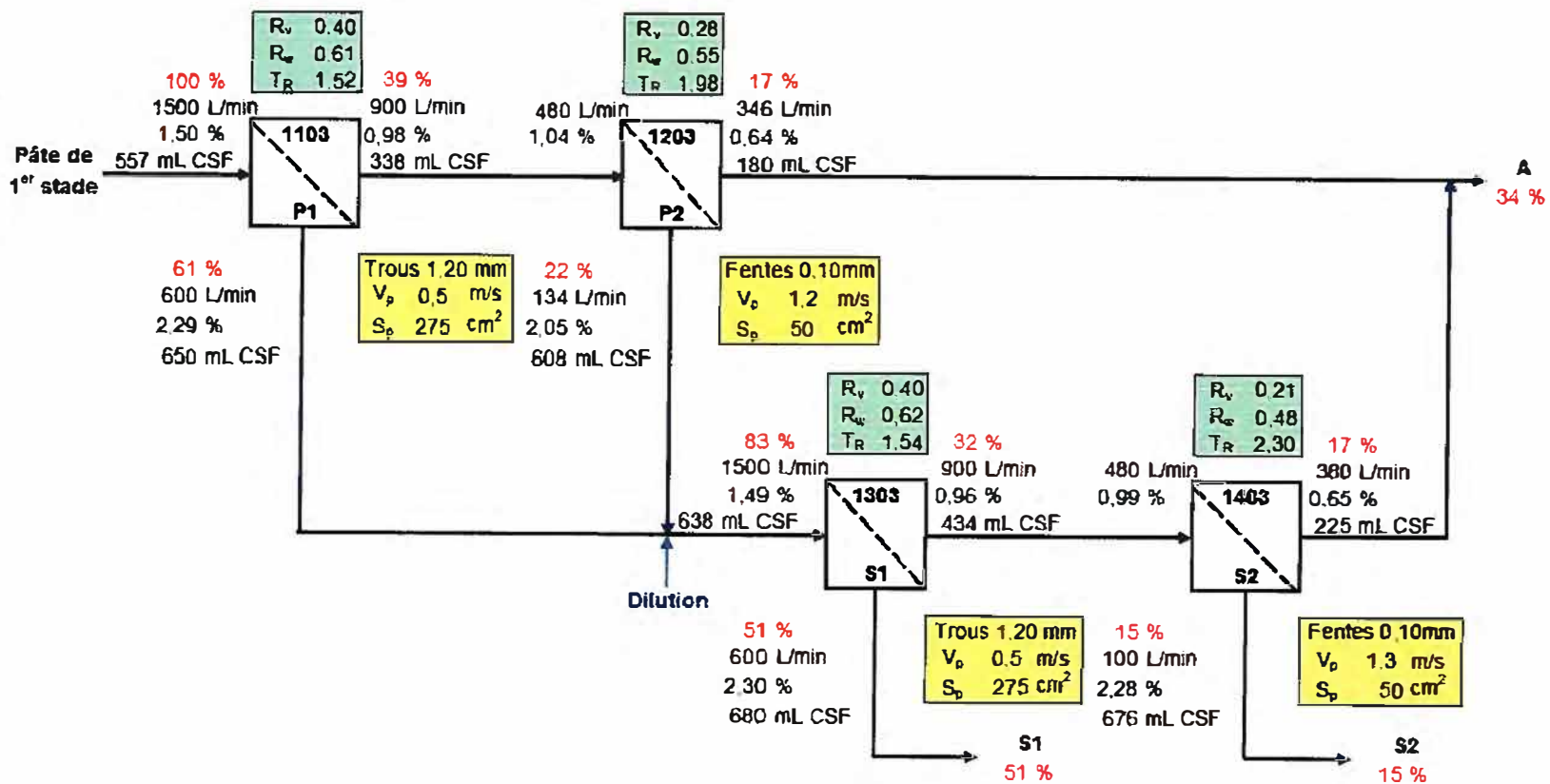


Figure A.2 Bilan de masse de la séquence (c)



| Propriétés | | Unités | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|-----------------------|-----------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Énergie spécifique | | MJ/kg | 2,8 | 3,0 | 4,4 | 5,6 | 5,7 | 4,5 | 2,8 | 2,8 | 4,5 | 5,5 | 5,8 | 4,3 | 2,7 | 3,1 | 4,4 | 5,8 | 5,7 | 4,3 |
| CSF | | mL | 113 | 87 | 93 | 104 | 97 | 98 | 75 | 78 | 99 | 99 | 145 | 121 | 97 | 103 | 87 | 96 | 105 | 104 |
| FOA | L _a | mm | 0,65 | 0,66 | 0,69 | 0,68 | 0,68 | 0,68 | 0,66 | 0,64 | 0,68 | 0,71 | 0,69 | 0,67 | 0,66 | 0,63 | 0,67 | 0,74 | 0,70 | 0,697 |
| | L _w | mm | 1,44 | 1,45 | 1,52 | 1,53 | 1,52 | 1,47 | 1,43 | 1,40 | 1,50 | 1,56 | 1,53 | 1,50 | 1,43 | 1,36 | 1,44 | 1,61 | 1,56 | 1,52 |
| | L _{ww} | mm | 2,07 | 2,08 | 2,15 | 2,18 | 2,18 | 2,10 | 2,02 | 2,00 | 2,13 | 2,20 | 2,17 | 2,13 | 2,01 | 1,95 | 2,04 | 2,26 | 2,20 | 2,13 |
| Volume massique | | cm ³ /g | 2,62 | 2,52 | 2,53 | 2,59 | 2,71 | 2,63 | 2,42 | 2,43 | 2,51 | 2,55 | 2,55 | 2,63 | 2,63 | 2,59 | 2,59 | 2,60 | 2,58 | 2,58 |
| Indice de rupture | | N.m/g | 44,1 | 48,0 | 48,7 | 46,9 | 43,5 | 44,6 | 48,5 | 49,3 | 46,6 | 46,6 | 39,5 | 42,7 | 44,6 | 43,8 | 46,7 | 45,4 | 32,2 | 43,7 |
| Allongement à la rup. | | % | 1,90 | 1,93 | 2,02 | 2,04 | 1,97 | 1,91 | 1,86 | 2,02 | 2,05 | 1,97 | 2,08 | 1,80 | 1,74 | 1,79 | 1,78 | 1,68 | 1,98 | 1,80 |
| Absorption d'énergie | | J/m ² | 34,7 | 37,3 | 40,6 | 38,9 | 34,4 | 34,0 | 35,7 | 40,7 | 38,9 | 36,9 | 34,1 | 31,0 | 30,6 | 30,9 | 32,6 | 29,3 | 34,8 | 31,6 |
| Indice d'éclatement | | kPa.m ² /g | 2,48 | 2,70 | 2,87 | 2,77 | 2,84 | 2,62 | 2,92 | 2,81 | 2,70 | 2,84 | 2,22 | 2,59 | 2,60 | 2,41 | 2,81 | 2,97 | 2,65 | 2,56 |
| Indice de déchirure | | mN.m ² /g | 8,27 | 8,41 | 8,26 | 8,91 | 8,94 | 8,84 | 8,11 | 7,76 | 8,55 | 8,74 | 9,08 | 8,46 | 8,25 | 8,01 | 8,39 | 8,55 | 8,63 | 8,91 |
| Blancheur | | % | 50,7 | 50,8 | 51,0 | 51,5 | 51,6 | 51,7 | 51,1 | 51,3 | 51,4 | 51,6 | 52,0 | 51,7 | 51,8 | 51,6 | 51,4 | 51,5 | 52,1 | 51,6 |
| Opacité | | % | 97,5 | 97,4 | 97,3 | 96,8 | 97,1 | 96,8 | 97,3 | 97,3 | 97,1 | 96,7 | 96,8 | 96,7 | 96,8 | 96,6 | 96,9 | 96,6 | 96,9 | 97,1 |
| Coeff. de diffusion | | m ² /kg | 55,2 | 55,5 | 54,9 | 53,8 | 55,2 | 54,3 | 55,2 | 55,1 | 55,1 | 54,1 | 54,6 | 53,9 | 54,6 | 53,8 | 54,6 | 53,5 | 55,7 | 54,5 |
| Coeff. d'absorption | | m ² /kg | 5,60 | 5,72 | 5,52 | 5,12 | 5,29 | 5,13 | 5,64 | 5,58 | 5,29 | 5,17 | 5,14 | 5,16 | 5,16 | 5,04 | 5,34 | 5,23 | 5,17 | 5,43 |
| CIELAB | L | — | 83,9 | 83,9 | 84,0 | 84,3 | 84,3 | 84,6 | 83,3 | 84,0 | 84,3 | 84,5 | 84,6 | 84,4 | 84,4 | 84,4 | 84,3 | 84,3 | 84,6 | 84,1 |
| | a* | — | 0,19 | 0,12 | 0,13 | 0,06 | 0,07 | 0,09 | 0,09 | 0,1 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,05 | 0,04 | 0,08 | 0,06 | 0,04 | 0,03 | 0,03 |
| | b* | — | 13,5 | 13,2 | 13,2 | 13,3 | 13,1 | 13,5 | 12,8 | 13,0 | 13,3 | 13,4 | 13,2 | 13,2 | 13,1 | 13,4 | 13,3 | 13,2 | 13,1 | 12,8 |

Tableau A.24 Propriétés des mélanges – Séquence (b)

Tableau A.25 Propriétés des mélanges – Séquence (c)

| Propriétés | Unités | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|--------------------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Énergie spécifique | MJ/kg | 1,9 | 2,0 | 1,2 | 1,3 | 2,5 | 2,64 | 1,8 | 1,9 | 3,8 | 3,9 | 3,8 | 3,8 | 4,4 | 4,5 | 4,3 | 4,5 |
| CSF | mL | 115 | 105 | 91 | 78 | 117 | 106 | 90 | 80 | 108 | 101 | 101 | 90 | 111 | 99 | 101 | 92 |
| Volume massique | cm ³ /g | 2,94 | 2,89 | 2,80 | 2,79 | 2,87 | 2,91 | 2,89 | 2,82 | 2,81 | 2,84 | 2,83 | 2,93 | 2,90 | 2,85 | 2,89 | 2,78 |
| Indice de rupture | N.m/g | 37,6 | 39,7 | 39,7 | 38,6 | 40,3 | 40,3 | 38,7 | 38,7 | 44,3 | 44,0 | 43,1 | 43,5 | 44,4 | 46,0 | 43,2 | 42,8 |
| Allongement à la rupture | % | 1,64 | 1,85 | 1,96 | 1,92 | 1,96 | 2,05 | 1,91 | 1,74 | 2,24 | 2,16 | 2,13 | 2,20 | 2,29 | 2,18 | 2,13 | 1,98 |
| Absorption d'énergie | J/m ² | 23,4 | 29,9 | 31,6 | 30,1 | 32,5 | 33,0 | 29,6 | 26,7 | 41,2 | 39,4 | 38,3 | 39,6 | 42,9 | 41,6 | 37,9 | 34,7 |
| Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 2,07 | 2,11 | 2,25 | 2,23 | 2,31 | 2,42 | 2,38 | 2,42 | 2,78 | 2,79 | 2,46 | 2,61 | 2,60 | 2,87 | 2,72 | 2,69 |
| Indice de déchirure | mN.m ² /g | 7,72 | 7,59 | 7,29 | 6,78 | 8,48 | 8,08 | 7,46 | 7,73 | 8,84 | 8,87 | 8,29 | 8,05 | 8,77 | 8,71 | 8,60 | 8,70 |
| Blancheur | % | 47,2 | 48,1 | 47,8 | 47,8 | 48,2 | 48,2 | 47,4 | 47,2 | 48,3 | 48,6 | 48,4 | 48,6 | 48,4 | 47,9 | 48,2 | 48,2 |
| Opacité | % | 97,9 | 98,1 | 98,3 | 98,5 | 98,0 | 97,8 | 98,3 | 98,6 | 98,0 | 98,3 | 98,1 | 98,1 | 98,0 | 98,2 | 98,3 | 98,3 |
| Coeff. de diffusion | m ² /kg | 53,3 | 54,2 | 54,4 | 56,5 | 53,5 | 53,7 | 54,9 | 56,2 | 54,6 | 56,9 | 54,8 | 55,7 | 53,5 | 54,9 | 55,5 | 56,2 |
| Coeff. d'absorption | m ² /kg | 7,52 | 7,48 | 7,99 | 8,24 | 7,25 | 7,36 | 8,10 | 8,50 | 7,32 | 7,43 | 7,24 | 7,32 | 7,05 | 7,40 | 7,44 | 7,58 |
| CIELAB | L | – | 81,3 | 81,6 | 81,1 | 81,1 | 81,7 | 81,7 | 80,9 | 80,9 | 81,8 | 82,0 | 81,9 | 82,0 | 81,9 | 81,7 | 81,8 |
| | a [*] | – | 0,33 | 0,24 | 0,21 | 0,20 | 0,23 | 0,25 | 0,25 | 0,24 | 0,22 | 0,20 | 0,19 | 0,18 | 0,20 | 0,31 | 0,29 |
| | b [*] | – | 12,6 | 12,2 | 11,6 | 11,6 | 12,2 | 12,2 | 11,7 | 11,9 | 12,3 | 12,3 | 12,2 | 12,2 | 12,4 | 12,6 | 12,3 |

Annexe B - Résultats expérimentaux – Fractionnement avec de petites ouvertures

Tableau B.1 Conditions d'opération des essais de fractionnement avec le tamis à trous de 0,25 mm de diamètre

| Essai | C _f % | C _a % | C _r % | Q _f L/min | Q _a L/min | Q _r L/min | P _f ⁽¹⁾ kPa | P _a ⁽¹⁾ kPa | R _v % | R _w % | MBE % |
|-------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|---------------------|----------|
| 1501 | 0,85 | 0,18 | 1,66 | 1008 | 504 | 504 | 169 | 119 | 50,0 | 90,2 | -3,84 |
| 1502 | 0,85 | 0,18 | 1,59 | 802 | 401 | 401 | 127 | 87 | 50,0 | 90,0 | -1,82 |
| 1503 | 0,85 | 0,18 | 1,52 | 596 | 298 | 298 | 159 | 126 | 50,0 | 89,4 | 0,12 |
| 1504 | 0,85 | 0,17 | 2,11 | 807 | 504 | 303 | 233 | 177 | 37,5 | 88,0 | -2,75 |
| 1505 | 0,85 | 0,17 | 2,01 | 642 | 401 | 241 | 174 | 125 | 37,5 | 87,4 | -0,65 |
| 1506 | 0,85 | 0,18 | 2,05 | 477 | 298 | 179 | 140 | 99 | 37,5 | 87,2 | -1,75 |
| 1507 | 0,85 | 0,17 | 2,79 | 672 | 504 | 168 | 184 | 118 | 25,0 | 84,6 | 1,66 |
| 1508 | 0,85 | 0,18 | 2,67 | 535 | 401 | 134 | 184 | 124 | 25,0 | 83,1 | 2,83 |
| 1509 | 0,85 | 0,18 | 2,58 | 397 | 298 | 99 | 177 | 126 | 24,9 | 82,6 | 4,46 |
| 1601 | 0,51 | 0,12 | 0,90 | 1008 | 504 | 504 | 148 | 124 | 50,0 | 88,3 | -0,20 |
| 1602 | 0,51 | 0,13 | 0,80 | 802 | 401 | 401 | 140 | 120 | 50,0 | 86,3 | 4,78 |
| 1603 | 0,51 | 0,12 | 0,88 | 596 | 298 | 298 | 150 | 131 | 50,0 | 88,0 | 0,74 |
| 1604 | 0,51 | 0,12 | 1,22 | 807 | 504 | 303 | 146 | 121 | 37,5 | 86,1 | -2,02 |
| 1605 | 0,51 | 0,11 | 1,18 | 642 | 401 | 241 | 147 | 124 | 37,5 | 86,2 | -0,24 |
| 1606 | 0,51 | 0,12 | 1,07 | 477 | 298 | 179 | 148 | 128 | 37,5 | 84,0 | 3,08 |
| 1607 | 0,51 | 0,11 | 1,69 | 672 | 504 | 168 | 153 | 122 | 25,0 | 83,9 | 0,64 |
| 1608 | 0,51 | 0,13 | 1,72 | 535 | 401 | 134 | 153 | 128 | 25,0 | 82,0 | -1,47 |
| 1609 | 0,51 | 0,12 | 1,93 | 397 | 298 | 99 | 154 | 131 | 24,9 | 84,5 | -5,54 |
| 1701 | 1,00 | 0,07 | 1,93 | 1008 | 504 | 504 | 151 | 116 | 50,0 | 96,5 | -0,23 |
| 1702 | 1,00 | 0,10 | 1,82 | 802 | 401 | 401 | 143 | 125 | 50,0 | 94,9 | 1,84 |
| 1703 | 1,00 | 0,15 | 1,80 | 596 | 298 | 298 | 142 | 125 | 50,0 | 92,1 | 0,91 |
| 1704 | 1,00 | 0,08 | 2,63 | 807 | 504 | 303 | 143 | 121 | 37,5 | 95,1 | -2,15 |
| 1705 | 1,00 | 0,08 | 2,29 | 642 | 401 | 241 | 145 | 125 | 37,5 | 94,3 | 4,38 |
| 1706 | 1,00 | 0,10 | 2,19 | 477 | 298 | 179 | 142 | 124 | 37,5 | 93,3 | 6,07 |
| 1707 | 1,00 | 0,06 | 3,83 | 672 | 504 | 168 | 144 | 108 | 25,0 | 95,7 | -0,30 |
| 1708 | 1,00 | 0,07 | 3,44 | 535 | 401 | 134 | 152 | 125 | 25,0 | 94,5 | 4,36 |
| 1709 | 1,00 | 0,08 | 3,14 | 397 | 298 | 99 | 149 | 125 | 24,9 | 93,3 | 8,49 |
| 1801 | 0,50 | 0,09 | 0,94 | 1008 | 504 | 504 | 138 | 122 | 50,0 | 91,0 | -1,48 |
| 1802 | 0,50 | 0,14 | 0,82 | 802 | 401 | 401 | 158 | 145 | 50,0 | 85,1 | 1,63 |
| 1803 | 0,50 | 0,16 | 0,81 | 596 | 298 | 298 | 147 | 134 | 50,0 | 83,5 | 1,47 |
| 1804 | 0,50 | 0,13 | 1,16 | 807 | 504 | 303 | 144 | 129 | 37,5 | 84,0 | -1,97 |
| 1805 | 0,50 | 0,17 | 1,06 | 642 | 401 | 241 | 139 | 125 | 37,5 | 79,1 | -0,42 |
| 1806 | 0,50 | 0,24 | 1,02 | 477 | 298 | 179 | 142 | 131 | 37,5 | 72,0 | -2,85 |
| 1807 | 0,50 | 0,14 | 1,46 | 672 | 504 | 168 | 140 | 126 | 25,0 | 78,0 | 3,33 |
| 1808 | 0,50 | 0,19 | 1,54 | 535 | 401 | 134 | 137 | 124 | 25,0 | 73,5 | -2,45 |
| 1809 | 0,50 | 0,23 | 1,37 | 397 | 298 | 99 | 140 | 130 | 24,9 | 66,7 | -1,19 |

Notes : ⁽¹⁾ Pression d'alimentation et des acceptés

Tableau B.2 Fractions Bauer McNett – Essais 1501 à 1509

| Essai | Point | R14 | R28 | R48 | R100 | R200 | P200 |
|--------------|--------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 1501 | Alimentation | 14,4 | 29,4 | 20,0 | 10,7 | 5,9 | 19,6 |
| | Acceptés | 0,0 | 0,0 | 1,0 | 5,9 | 11,0 | 82,1 |
| | Rejets | 16,0 | 29,9 | 20,4 | 10,9 | 5,2 | 17,6 |
| 1502 | Alimentation | 14,4 | 29,4 | 20,0 | 10,7 | 5,9 | 19,6 |
| | Acceptés | 0,3 | 0,2 | 1,3 | 6,5 | 12,3 | 79,4 |
| | Rejets | 17,5 | 32,0 | 22,0 | 11,6 | 5,1 | 11,8 |
| 1503 | Alimentation | 14,4 | 29,4 | 20,0 | 10,7 | 5,9 | 19,6 |
| | Acceptés | 0,2 | 0,4 | 2,3 | 7,2 | 12,2 | 77,7 |
| | Rejets | 18,8 | 33,0 | 21,9 | 11,6 | 5,0 | 9,7 |
| 1504 | Alimentation | 14,4 | 29,4 | 20,0 | 10,7 | 5,9 | 19,6 |
| | Acceptés | 0,0 | 0,0 | 2,1 | 7,3 | 11,5 | 79,1 |
| | Rejets | 17,7 | 31,3 | 21,1 | 11,1 | 4,5 | 14,3 |
| 1505 | Alimentation | 14,4 | 29,4 | 20,0 | 10,7 | 5,9 | 19,6 |
| | Acceptés | 0,5 | 0,7 | 2,1 | 7,5 | 12,4 | 76,8 |
| | Rejets | 18,9 | 31,6 | 21,9 | 11,2 | 4,4 | 12,0 |
| 1506 | Alimentation | 14,4 | 29,4 | 20,0 | 10,7 | 5,9 | 19,6 |
| | Acceptés | 0,5 | 0,8 | 2,0 | 7,4 | 12,3 | 77,0 |
| | Rejets | 19,5 | 32,3 | 21,5 | 11,5 | 4,7 | 10,5 |
| 1507 | Alimentation | 14,4 | 29,4 | 20,0 | 10,7 | 5,9 | 19,6 |
| | Acceptés | 0,2 | 0,5 | 1,6 | 7,7 | 12,2 | 77,8 |
| | Rejets | 19,0 | 32,9 | 22,1 | 11,4 | 4,7 | 9,9 |
| 1508 | Alimentation | 14,4 | 29,4 | 20,0 | 10,7 | 5,9 | 19,6 |
| | Acceptés | 0,0 | 0,4 | 1,4 | 7,3 | 11,6 | 79,3 |
| | Rejets | 21,3 | 34,5 | 22,9 | 11,7 | 4,5 | 5,1 |
| 1509 | Alimentation | 14,4 | 29,4 | 20,0 | 10,7 | 5,9 | 19,6 |
| | Acceptés | 0,0 | 0,0 | 1,6 | 7,3 | 11,5 | 79,6 |
| | Rejets | 20,5 | 33,6 | 22,5 | 12,0 | 4,6 | 6,8 |

Tableau B.3 Fractions Bauer McNett – Essais 1601 à 1609

| Essai | Point | R14 | R28 | R48 | R100 | R200 | P200 |
|--------------|--------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 1601 | Alimentation | 15,1 | 29,4 | 19,9 | 10,9 | 5,8 | 18,9 |
| | Acceptés | 0,0 | 1,7 | 3,2 | 8,4 | 14,3 | 72,4 |
| | Rejets | 18,5 | 32,6 | 21,7 | 10,9 | 4,0 | 12,3 |
| 1602 | Alimentation | 15,1 | 29,4 | 19,9 | 10,9 | 5,8 | 18,9 |
| | Acceptés | 0,8 | 2,8 | 3,0 | 2,8 | 14,2 | 76,4 |
| | Rejets | 18,3 | 32,5 | 21,9 | 11,1 | 4,8 | 11,4 |
| 1603 | Alimentation | 15,1 | 29,4 | 19,9 | 10,9 | 5,8 | 18,9 |
| | Acceptés | 0,4 | 0,8 | 2,4 | 9,2 | 14,4 | 72,8 |
| | Rejets | 19,8 | 33,5 | 21,9 | 11,1 | 4,8 | 8,9 |
| 1604 | Alimentation | 15,1 | 29,4 | 19,9 | 10,9 | 5,8 | 18,9 |
| | Acceptés | 0,0 | 1,8 | 3,4 | 9,0 | 14,6 | 71,2 |
| | Rejets | 19,3 | 32,7 | 22,3 | 10,7 | 4,6 | 10,4 |
| 1605 | Alimentation | 15,1 | 29,4 | 19,9 | 10,9 | 5,8 | 18,9 |
| | Acceptés | 0,0 | 1,8 | 3,4 | 9,0 | 14,6 | 71,2 |
| | Rejets | 20,2 | 32,9 | 22,1 | 11,1 | 4,4 | 9,3 |
| 1606 | Alimentation | 15,1 | 29,4 | 19,9 | 10,9 | 5,8 | 18,9 |
| | Acceptés | 0,4 | 2,4 | 4,2 | 8,6 | 13,0 | 71,4 |
| | Rejets | 19,7 | 32,6 | 21,7 | 11,1 | 4,5 | 10,4 |
| 1607 | Alimentation | 15,1 | 29,4 | 19,9 | 10,9 | 5,8 | 18,9 |
| | Acceptés | 0,2 | 0,4 | 1,8 | 10,4 | 14,2 | 73,0 |
| | Rejets | 22,3 | 34,4 | 23,1 | 12,1 | 4,2 | 3,9 |
| 1608 | Alimentation | 15,1 | 29,4 | 19,9 | 10,9 | 5,8 | 18,9 |
| | Acceptés | 0,0 | 0,0 | 1,6 | 9,2 | 14,8 | 74,4 |
| | Rejets | 21,1 | 34,2 | 22,5 | 11,0 | 4,4 | 6,8 |
| 1609 | Alimentation | 15,1 | 29,4 | 19,9 | 10,9 | 5,8 | 18,9 |
| | Acceptés | 0,0 | 0,6 | 2,4 | 8,6 | 13,6 | 74,8 |
| | Rejets | 23,8 | 35,3 | 23,4 | 11,3 | 4,4 | 1,8 |

Tableau B.4 Fractions Bauer McNett – Essais 1701 à 1709

| Essai | Point | R14 | R28 | R48 | R100 | R200 | P200 |
|--------------|--------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 1701 | Alimentation | 22,0 | 37,7 | 23,8 | 11,9 | 4,5 | 0,1 |
| | Acceptés | 0,6 | 3,6 | 6,4 | 15,2 | 21,4 | 52,8 |
| | Rejets | 21,4 | 36,1 | 23,4 | 10,8 | 4,3 | 4,0 |
| 1702 | Alimentation | 22,0 | 37,7 | 23,8 | 11,9 | 4,5 | 0,1 |
| | Acceptés | 2,4 | 12,6 | 13,4 | 14,2 | 16,8 | 40,6 |
| | Rejets | 23,4 | 35,9 | 23,7 | 11,4 | 4,2 | 1,4 |
| 1703 | Alimentation | 22,0 | 37,7 | 23,8 | 11,9 | 4,5 | 0,1 |
| | Acceptés | – | – | – | – | – | – |
| | Rejets | 23,3 | 34,8 | 23,8 | 11,3 | 4,3 | 2,5 |
| 1704 | Alimentation | 22,0 | 37,7 | 23,8 | 11,9 | 4,5 | 0,1 |
| | Acceptés | 0,8 | 6,6 | 8,6 | 14,4 | 20,8 | 48,8 |
| | Rejets | 23,6 | 37,2 | 23,0 | 11,7 | 4,0 | 0,5 |
| 1705 | Alimentation | 22,0 | 37,7 | 23,8 | 11,9 | 4,5 | 0,1 |
| | Acceptés | 1,0 | 8,2 | 10,2 | 14,2 | 17,4 | 49,0 |
| | Rejets | 22,6 | 37,3 | 24,3 | 11,2 | 4,4 | 0,2 |
| 1706 | Alimentation | 22,0 | 37,7 | 23,8 | 11,9 | 4,5 | 0,1 |
| | Acceptés | 0,6 | 11,0 | 12,8 | 14,4 | 16,2 | 45,0 |
| | Rejets | 22,9 | 36,9 | 24,2 | 11,6 | 4,0 | 0,4 |
| 1707 | Alimentation | 22,0 | 37,7 | 23,8 | 11,9 | 4,5 | 0,1 |
| | Acceptés | 0,2 | 0,6 | 3,4 | 14,6 | 20,4 | 60,8 |
| | Rejets | 21,3 | 35,3 | 23,5 | 11,7 | 4,1 | 4,1 |
| 1708 | Alimentation | 22,0 | 37,7 | 23,8 | 11,9 | 4,5 | 0,1 |
| | Acceptés | 0,8 | 0,6 | 4,0 | 15,4 | 21,6 | 57,6 |
| | Rejets | 22,8 | 36,0 | 23,5 | 11,2 | 4,0 | 2,5 |
| 1709 | Alimentation | 22,0 | 37,7 | 23,8 | 11,9 | 4,5 | 0,1 |
| | Acceptés | 0,2 | 0,8 | 4,2 | 16,4 | 21,4 | 57,0 |
| | Rejets | 23,3 | 35,8 | 23,3 | 11,2 | 3,9 | 2,5 |

Tableau B.5 Fractions Bauer McNett – Essais 1801 à 1809

| Essai | Point | R14 | R28 | R48 | R100 | R200 | P200 |
|--------------|--------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 1801 | Alimentation | 20,5 | 34,5 | 23,5 | 11,8 | 4,6 | 5,1 |
| | Acceptés | 8,7 | 23,0 | 18,2 | 15,2 | 13,0 | 21,9 |
| | Rejets | 20,4 | 35,3 | 23,3 | 11,0 | 3,8 | 6,2 |
| 1802 | Alimentation | 20,5 | 34,5 | 23,5 | 11,8 | 4,6 | 5,1 |
| | Acceptés | 14,2 | 28,9 | 20,7 | 13,3 | 8,4 | 14,5 |
| | Rejets | 23,4 | 36,0 | 23,9 | 11,4 | 3,8 | 1,5 |
| 1803 | Alimentation | 20,5 | 34,5 | 23,5 | 11,8 | 4,6 | 5,1 |
| | Acceptés | 14,5 | 30,4 | 20,8 | 13,5 | 7,5 | 13,3 |
| | Rejets | 22,4 | 36,2 | 23,4 | 11,3 | 3,8 | 2,9 |
| 1804 | Alimentation | 20,5 | 34,5 | 23,5 | 11,8 | 4,6 | 5,1 |
| | Acceptés | 12,6 | 26,7 | 19,9 | 13,4 | 8,5 | 18,9 |
| | Rejets | 21,8 | 35,0 | 23,4 | 10,9 | 3,7 | 5,2 |
| 1805 | Alimentation | 20,5 | 34,5 | 23,5 | 11,8 | 4,6 | 5,1 |
| | Acceptés | 13,6 | 28,5 | 20,2 | 12,6 | 7,6 | 17,5 |
| | Rejets | 22,9 | 36,2 | 24,1 | 11,4 | 4,0 | 1,4 |
| 1806 | Alimentation | 20,5 | 34,5 | 23,5 | 11,8 | 4,6 | 5,1 |
| | Acceptés | 16,4 | 30,8 | 21,2 | 11,8 | 6,3 | 13,5 |
| | Rejets | 22,1 | 36,1 | 23,8 | 11,5 | 3,9 | 2,6 |
| 1807 | Alimentation | 20,5 | 34,5 | 23,5 | 11,8 | 4,6 | 5,1 |
| | Acceptés | 11,4 | 27,5 | 19,4 | 13,1 | 9,0 | 19,6 |
| | Rejets | 24,8 | 36,6 | 24,1 | 11,0 | 3,5 | 0,0 |
| 1808 | Alimentation | 20,5 | 34,5 | 23,5 | 11,8 | 4,6 | 5,1 |
| | Acceptés | 13,7 | 29,2 | 20,5 | 12,4 | 7,6 | 16,6 |
| | Rejets | 22,8 | 35,6 | 23,4 | 11,0 | 3,4 | 3,8 |
| 1809 | Alimentation | 20,5 | 34,5 | 23,5 | 11,8 | 4,6 | 5,1 |
| | Acceptés | 17,9 | 31,9 | 21,8 | 12,2 | 6,7 | 9,5 |
| | Rejets | 23,8 | 36,8 | 24,0 | 10,8 | 3,4 | 1,2 |

Tableau B.6 Longueur moyenne des fibres, masse linéique et taux de fines mesurés avec l'appareil FQA sur la fraction R28 des rejets

| Essai | Longueur moyenne pondérée | | | Masse linéique | Taux de fines pondéré | |
|---------------------|---------------------------|-------------|----------|----------------|-----------------------|----------|
| | en nombre | en longueur | en poids | | en nombre | en poids |
| | mm | mm | mm | | % | % |
| 1500 ⁽¹⁾ | 1,81 | 2,33 | 2,57 | 0,297 | 12,6 | 0,860 |
| 1501 | 2,02 | 2,32 | 2,53 | 0,291 | 3,61 | 0,220 |
| 1502 | 1,82 | 2,27 | 2,50 | 0,291 | 9,49 | 0,650 |
| 1503 | 1,79 | 2,25 | 2,49 | 0,287 | 9,34 | 0,647 |
| 1504 | 1,81 | 2,25 | 2,47 | 0,289 | 8,55 | 0,587 |
| 1505 | 1,84 | 2,25 | 2,47 | 0,287 | 7,47 | 0,530 |
| 1506 | 1,88 | 2,26 | 2,47 | 0,287 | 6,96 | 0,463 |
| 1507 | 1,80 | 2,23 | 2,45 | 0,288 | 8,51 | 0,600 |
| 1508 | 1,85 | 2,25 | 2,47 | 0,283 | 8,32 | 0,537 |
| 1509 | 1,76 | 2,21 | 2,43 | 0,292 | 10,3 | 0,717 |
| 1601 | 1,78 | 2,22 | 2,45 | 0,283 | 9,40 | 0,653 |
| 1602 | 1,79 | 2,24 | 2,47 | 0,282 | 9,00 | 0,627 |
| 1603 | 1,77 | 2,23 | 2,46 | 0,279 | 10,79 | 0,750 |
| 1604 | 1,91 | 2,26 | 2,46 | 0,293 | 6,22 | 0,397 |
| 1605 | 1,77 | 2,22 | 2,44 | 0,294 | 9,65 | 0,713 |
| 1606 | 1,72 | 2,24 | 2,48 | 0,284 | 12,2 | 0,890 |
| 1607 | 1,81 | 2,24 | 2,46 | 0,285 | 8,90 | 0,630 |
| 1608 | 1,85 | 2,27 | 2,50 | 0,300 | 7,47 | 0,513 |
| 1609 | 1,74 | 2,24 | 2,49 | 0,302 | 11,0 | 0,797 |

Notes : ⁽¹⁾ Pâte primaire

Tableau B.7 Longueur moyenne des fibres, masse linéique et taux de fines mesurés avec l'appareil FQA sur la fraction R48 des rejets

| Essai | Longueur moyenne pondérée | | | Masse linéique | Taux de fines pondéré | |
|---------------------|---------------------------|-------------|----------|----------------|-----------------------|----------|
| | en nombre | en longueur | en poids | | en nombre | en poids |
| | mm | mm | mm | | % | % |
| 1500 ⁽¹⁾ | 1,22 | 1,45 | 1,61 | 0,240 | 6,35 | 0,65 |
| 1501 | 1,13 | 1,35 | 1,52 | 0,238 | 6,42 | 0,71 |
| 1502 | 1,14 | 1,36 | 1,55 | 0,230 | 6,23 | 0,71 |
| 1503 | 1,15 | 1,35 | 1,52 | 0,238 | 5,15 | 0,59 |
| 1504 | 1,13 | 1,35 | 1,52 | 0,231 | 5,77 | 0,67 |
| 1505 | 1,10 | 1,32 | 1,49 | 0,228 | 6,84 | 0,79 |
| 1506 | 1,12 | 1,35 | 1,53 | 0,229 | 7,02 | 0,80 |
| 1507 | 1,13 | 1,35 | 1,53 | 0,229 | 5,27 | 0,58 |
| 1508 | 1,13 | 1,35 | 1,53 | 0,219 | 6,26 | 0,72 |
| 1509 | 1,10 | 1,34 | 1,51 | 0,224 | 7,42 | 0,85 |
| 1601 | 1,12 | 1,33 | 1,49 | 0,231 | 6,39 | 0,70 |
| 1602 | 1,07 | 1,32 | 1,49 | 0,234 | 9,71 | 1,14 |
| 1603 | 1,04 | 1,32 | 1,50 | 0,220 | 11,9 | 1,39 |
| 1604 | 1,08 | 1,33 | 1,50 | 0,224 | 10,2 | 1,19 |
| 1605 | 1,08 | 1,33 | 1,50 | 0,222 | 9,43 | 1,08 |
| 1606 | 1,12 | 1,34 | 1,51 | 0,225 | 6,70 | 0,76 |
| 1607 | 1,10 | 1,34 | 1,52 | 0,225 | 8,11 | 0,91 |
| 1608 | 1,09 | 1,34 | 1,52 | 0,230 | 8,34 | 0,96 |
| 1609 | 1,00 | 1,29 | 1,47 | 0,223 | 13,9 | 1,71 |

Notes : ⁽¹⁾ Pâte primaire

Tableau B.8 Longueur moyenne des fibres, masse linéique et taux de fines mesurés avec l'appareil FQA sur la fraction R100 des rejets

| Essai | Longueur moyenne pondérée | | | Masse linéique | Taux de fines pondéré | |
|---------------------|---------------------------|-------------|----------|----------------|-----------------------|----------|
| | en nombre | en longueur | en poids | | en nombre | en poids |
| | mm | mm | mm | | % | % |
| 1500 ⁽¹⁾ | 0,65 | 0,78 | 0,89 | 0,188 | 6,67 | 1,40 |
| 1501 | 0,59 | 0,72 | 0,87 | 0,178 | 8,25 | 1,94 |
| 1502 | 0,60 | 0,73 | 0,88 | 0,175 | 7,97 | 1,87 |
| 1503 | 0,59 | 0,73 | 0,90 | 0,174 | 9,16 | 2,14 |
| 1504 | 0,58 | 0,73 | 0,90 | 0,175 | 10,00 | 2,32 |
| 1505 | 0,60 | 0,73 | 0,87 | 0,175 | 8,30 | 1,89 |
| 1506 | 0,61 | 0,73 | 0,87 | 0,177 | 8,14 | 1,82 |
| 1507 | 0,60 | 0,73 | 0,87 | 0,176 | 8,33 | 1,89 |
| 1508 | 0,60 | 0,74 | 0,88 | 0,172 | 8,47 | 1,89 |
| 1509 | 0,61 | 0,75 | 0,93 | 0,190 | 7,64 | 1,74 |
| 1601 | 0,60 | 0,73 | 0,89 | 0,178 | 8,38 | 1,92 |
| 1602 | 0,60 | 0,74 | 0,92 | 0,181 | 8,04 | 1,84 |
| 1603 | 0,60 | 0,74 | 0,92 | 0,180 | 7,34 | 1,69 |
| 1604 | 0,61 | 0,74 | 0,86 | 0,179 | 7,83 | 1,75 |
| 1605 | 0,60 | 0,73 | 0,88 | 0,182 | 7,86 | 1,81 |
| 1606 | 0,61 | 0,74 | 0,91 | 0,183 | 6,72 | 1,56 |
| 1607 | 0,61 | 0,74 | 0,88 | 0,184 | 8,34 | 1,86 |
| 1608 | 0,61 | 0,74 | 0,91 | 0,184 | 7,56 | 1,69 |
| 1609 | 0,61 | 0,74 | 0,89 | 0,188 | 7,39 | 1,66 |

Notes : ⁽¹⁾ Pâte primaire

Tableau B.9 Longueur moyenne des fibres, masse linéique et taux de fines mesurés avec l'appareil FQA sur la fraction R200 des rejets

| Essai | Longueur moyenne pondérée | | | Masse linéique | Taux de fines pondéré | |
|---------------------|---------------------------|-------------|----------|----------------|-----------------------|----------|
| | en nombre | en longueur | en poids | | en nombre | en poids |
| | mm | mm | mm | | % | % |
| 1500 ⁽¹⁾ | 0,25 | 0,36 | 0,61 | 0,166 | 48,1 | 26,0 |
| 1501 | 0,24 | 0,33 | 0,54 | 0,167 | 49,4 | 27,9 |
| 1502 | 0,24 | 0,34 | 0,58 | 0,177 | 50,9 | 28,9 |
| 1503 | 0,24 | 0,34 | 0,60 | 0,157 | 49,2 | 27,6 |
| 1504 | 0,24 | 0,34 | 0,57 | 0,164 | 49,8 | 28,1 |
| 1505 | 0,25 | 0,33 | 0,49 | 0,168 | 49,0 | 27,5 |
| 1506 | 0,25 | 0,36 | 0,67 | 0,167 | 47,0 | 25,6 |
| 1507 | 0,25 | 0,35 | 0,59 | 0,162 | 47,5 | 26,1 |
| 1508 | 0,25 | 0,36 | 0,67 | 0,174 | 48,1 | 26,4 |
| 1509 | 0,25 | 0,35 | 0,59 | 0,175 | 47,1 | 25,7 |
| 1601 | 0,25 | 0,34 | 0,54 | 0,168 | 48,4 | 26,9 |
| 1602 | 0,25 | 0,35 | 0,62 | 0,176 | 48,6 | 26,9 |
| 1603 | 0,25 | 0,35 | 0,72 | 0,180 | 48,5 | 26,7 |
| 1604 | 0,25 | 0,34 | 0,53 | 0,172 | 46,9 | 25,6 |
| 1605 | 0,25 | 0,35 | 0,63 | 0,174 | 47,2 | 25,8 |
| 1606 | 0,25 | 0,36 | 0,69 | 0,171 | 47,2 | 25,7 |
| 1607 | 0,26 | 0,37 | 0,66 | 0,181 | 46,3 | 24,7 |
| 1608 | 0,26 | 0,38 | 0,79 | 0,177 | 45,0 | 23,6 |
| 1609 | 0,26 | 0,37 | 0,66 | 0,160 | 46,1 | 24,5 |

Notes : ⁽¹⁾ Pâte primaire

Tableau B.10 Conditions d'opération pour la séquence de fractionnement à 4 stades en cascade sur les rejets

| Essai | $C_f^{(1)}$ | $C_a^{(1)}$ | $C_r^{(1)}$ | $Q_r^{(2)}$ | $Q_a^{(2)}$ | $Q_r^{(2)}$ | R_v | R_w | $MBE^{(3)}$ |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|-------|-------------|
| | % | % | % | L/min | L/min | L/min | % | % | % |
| 1901 | 1,01 | 0,18 | 3,84 | 600 | 450 | 150 | 25,0 | 95,0 | -4,04 |
| 1902 | 1,07 | 0,09 | 4,36 | 600 | 450 | 150 | 25,0 | 101,9 | -3,93 |
| 1903 | 0,99 | 0,35 | 2,19 | 480 | 336 | 144 | 30,0 | 66,4 | 4,65 |
| 1904 | 1,05 | 0,32 | 2,33 | 480 | 336 | 144 | 30,0 | 66,6 | 6,44 |
| 2001 | 1,03 | 0,18 | 2,97 | 664 | 485 | 179 | 27,0 | 77,7 | 4,99 |
| 2002 | 1,03 | 0,10 | 3,15 | 667 | 495 | 172 | 25,8 | 78,9 | 7,49 |
| 2201 | 1,03 | 0,22 | 1,87 | 598 | 296 | 302 | 50,5 | 91,7 | -1,12 |
| 2203 | 1,10 | 0,23 | 1,91 | 614 | 317 | 297 | 48,4 | 84,0 | 2,68 |

Notes : ⁽¹⁾ Consistances d'alimentation, des acceptés et des rejets

⁽²⁾ Débits volumiques d'alimentation, des acceptés et des rejets

⁽³⁾ Erreur de bilan de masse

Tableau B.11 Propriétés des pâtes

| Essai | Indice d'égouttage | | | Longueur des fibres L_w (FQA) | | |
|-------|--------------------|----------|--------|---------------------------------|---------------------|--------|
| | Aliment. | Acceptés | Rejets | Aliment. | Acceptés | Rejets |
| | mL | mL | mL | mm | mm | mm |
| 1901 | 647 | 75 | — | 1,64 | 0,46 ⁽¹⁾ | — |
| 1902 | — | 75 | 723 | — | 0,46 ⁽¹⁾ | 1,74 |
| 1903 | 723 ⁽³⁾ | 650 | — | 1,74 ⁽³⁾ | 1,48 ⁽²⁾ | — |
| 1904 | — | 650 | 732 | — | 1,48 ⁽²⁾ | 2,06 |
| 2001 | 635 | — | 710 | — | — | — |
| 2002 | 710 ⁽³⁾ | — | 721 | — | — | — |
| 2201 | 724 | 438 | 732 | — | — | — |
| 2203 | 732 ⁽³⁾ | 538 | 730 | — | — | — |

Notes : ⁽¹⁾ Mélange des acceptés des essais 1901 et 1902

⁽²⁾ Mélange des acceptés des essais 1903 et 1904

⁽³⁾ Identique aux rejets de l'essai précédent

Tableau B.12 Fractions Bauer McNett des pâtes fractionnées

| Essai | Point | R14 | R28 | R48 | R100 | R200 | P200 |
|-------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 1901 | Alimentation | 16,6 | 31,4 | 21,0 | 11,3 | 5,4 | 14,3 |
| | Acceptés ⁽¹⁾ | 3,0 | 1,6 | 3,4 | 9,0 | 14,1 | 68,9 |
| | Rejets | — | — | — | — | — | — |
| 1902 | Alimentation | — | — | — | — | — | — |
| | Acceptés ⁽¹⁾ | 3,0 | 1,6 | 3,4 | 9,0 | 14,1 | 68,9 |
| | Rejets | 23,1 | 35,1 | 24,1 | 11,4 | 4,1 | 2,2 |
| 1903 | Alimentation ⁽³⁾ | — | — | — | — | — | — |
| | Acceptés ⁽²⁾ | 9,8 | 34,0 | 28,0 | 16,3 | 6,1 | 5,8 |
| | Rejets | — | — | — | — | — | — |
| 1904 | Alimentation | — | — | — | — | — | — |
| | Acceptés ⁽²⁾ | 9,8 | 34,0 | 28,0 | 16,3 | 6,1 | 5,8 |
| | Rejets | 30,3 | 35,1 | 19,4 | 7,6 | 2,2 | 5,4 |
| 2001 | Alimentation | 20,0 | 32,0 | 17,1 | 8,6 | 4,2 | 18,1 |
| | Acceptés | 0,0 | 0,1 | 0,9 | 4,7 | 6,4 | 87,9 |
| | Rejets | 26,3 | 35,1 | 18,7 | 9,0 | 3,5 | 7,4 |
| 2002 | Alimentation ⁽³⁾ | — | — | — | — | — | — |
| | Acceptés | 0,0 | 0,0 | 1,1 | 6,7 | 10,3 | 81,9 |
| | Rejets | 28,6 | 36,4 | 19,6 | 8,9 | 2,9 | 3,6 |
| 2201 | Alimentation | 24,9 | 37,0 | 19,4 | 9,1 | 3,2 | 6,4 |
| | Acceptés | 4,4 | 30,3 | 24,2 | 16,5 | 7,2 | 17,4 |
| | Rejets | 30,5 | 36,6 | 18,3 | 8,0 | 2,5 | 4,1 |
| 2203 | Alimentation ⁽³⁾ | — | — | — | — | — | — |
| | Acceptés | 7,9 | 34,8 | 24,7 | 15,5 | 6,0 | 11,1 |
| | Rejets | 36,4 | 36,4 | 17,5 | 7,6 | 2,1 | 0,0 |

Notes : ⁽¹⁾ Mélange des acceptés des essais 1901 et 1902

⁽²⁾ Mélange des acceptés des essais 1903 et 1904

⁽³⁾ Identique aux rejets de l'essai précédent

Tableau B.13 Comptage et caractéristiques morphologique des fibres de BP et des fibres de BE

| Fraction | Essai | | Nombre de fibre | Proportion en nombre | | Épaisseur de paroi | | Largeur des fibres | | Proportion en poids | |
|----------|-------|---|-----------------|----------------------|----|--------------------|------|--------------------|------|---------------------|----|
| | | | | BP | BE | BP | BE | BP | BE | BP | BE |
| | | | | % | % | µm | µm | µm | µm | % | % |
| R28 | 2001 | F | 235 | 56 | 44 | 3,45 | 5,08 | 40,3 | 28,9 | 56 | 44 |
| | | A | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | R | 359 | 60 | 40 | 3,49 | 5,64 | 41,9 | 29,2 | 56 | 44 |
| | 2002 | F | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | A | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | R | 240 | 55 | 45 | 3,35 | 5,86 | 38,1 | 28,4 | 48 | 52 |
| | 2201 | F | 369 | 57 | 43 | 3,73 | 5,88 | 40,0 | 28,7 | 55 | 45 |
| | | A | 232 | 66 | 34 | 3,51 | 5,44 | 38,5 | 25,2 | 64 | 36 |
| | | R | 343 | 57 | 43 | 3,53 | 5,57 | 40,5 | 26,8 | 54 | 46 |
| | 2203 | F | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | A | 211 | 67 | 33 | 3,34 | 5,55 | 40,9 | 27,7 | 62 | 38 |
| | | R | 386 | 55 | 45 | 3,52 | 6,03 | 39,8 | 29,2 | 48 | 52 |
| R48 | 2001 | F | 280 | 69 | 31 | 3,08 | 4,94 | 36,0 | 27,5 | 66 | 34 |
| | | A | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | R | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 2002 | F | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | A | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | R | 341 | 67 | 33 | 3,38 | 5,61 | 39,2 | 25,2 | 62 | 38 |
| | 2201 | F | 253 | 66 | 34 | 3,48 | 5,41 | 38,2 | 25,2 | 65 | 35 |
| | | A | 245 | 75 | 25 | 3,36 | 4,92 | 36,4 | 23,8 | 76 | 24 |
| | | R | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 2203 | F | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | A | 273 | 76 | 24 | 3,59 | 5,63 | 38,5 | 24,3 | 74 | 26 |
| | | R | 261 | 64 | 36 | 3,54 | 5,54 | 40,1 | 23,6 | 62 | 38 |
| R100 | 2001 | F | 322 | 75 | 25 | 3,25 | 4,96 | 32,7 | 24,1 | 74 | 26 |
| | | A | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | R | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 2002 | F | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | A | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | R | 352 | 72 | 28 | 3,72 | 5,52 | 36,1 | 24,1 | 72 | 28 |
| | 2201 | F | 323 | 72 | 28 | 3,53 | 5,66 | 35,1 | 23,9 | 69 | 31 |
| | | A | 289 | 79 | 21 | 3,56 | 5,42 | 37,0 | 23,3 | 79 | 21 |
| | | R | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 2203 | F | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | A | 379 | 78 | 22 | 3,68 | 5,65 | 34,4 | 24,4 | 77 | 23 |
| | | R | 321 | 72 | 28 | 3,32 | 5,76 | 32,9 | 24,5 | 66 | 34 |

Tableau B.14 Longueur moyenne des fibres, masse linéique et taux de fines mesurés avec l'appareil FQA sur la fraction R28 et R48

| Classe | Essai | | Longueur moyenne pondérée | | | Masse linéique mg/m | Taux de fines pondéré | |
|--------|-------|------------------|---------------------------|-------------|----------|------------------------|-----------------------|----------|
| | | | en nombre | en longueur | en poids | | en nombre | en poids |
| | | | mm | mm | mm | | % | % |
| R28 | 2001 | F ⁽¹⁾ | 1,70 | 2,30 | 2,56 | 0,291 | 13,74 | 1,04 |
| | | A | — | — | — | — | — | — |
| | | R | 1,90 | 2,33 | 2,54 | 0,291 | 9,08 | 0,59 |
| | 2002 | F | — | — | — | — | — | — |
| | | A | — | — | — | — | — | — |
| | | R | 1,77 | 2,28 | 2,51 | 0,294 | 12,28 | 0,88 |
| | 2201 | F | 1,90 | 2,33 | 2,54 | 0,293 | 7,85 | 0,53 |
| | | A | 1,66 | 2,20 | 2,44 | 0,262 | 12,97 | 0,98 |
| | | R | 1,52 | 2,28 | 2,56 | 0,300 | 22,72 | 1,87 |
| | 2203 | F | — | — | — | — | — | — |
| | | A | 1,66 | 2,18 | 2,42 | 0,257 | 11,74 | 0,89 |
| | | R | 1,67 | 2,32 | 2,57 | 0,307 | 18,86 | 1,40 |
| R48 | 2001 | F ⁽¹⁾ | 1,13 | 1,42 | 1,61 | 0,236 | 9,34 | 1,07 |
| | | A | — | — | — | — | — | — |
| | | R | 1,20 | 1,45 | 1,65 | 0,228 | 7,22 | 0,73 |
| | 2002 | F | — | — | — | — | — | — |
| | | A | — | — | — | — | — | — |
| | | R | 1,21 | 1,43 | 1,61 | 0,243 | 5,01 | 0,54 |
| | 2201 | F | 1,20 | 1,43 | 1,60 | 0,237 | 5,53 | 0,59 |
| | | A | 1,07 | 1,34 | 1,54 | 0,215 | 9,85 | 1,20 |
| | | R | 1,15 | 1,44 | 1,63 | 0,247 | 10,23 | 1,09 |
| | 2203 | F | — | — | — | — | — | — |
| | | A | 1,12 | 1,33 | 1,51 | 0,224 | 4,92 | 0,58 |
| | | R | 1,18 | 1,48 | 1,68 | 0,239 | 9,51 | 1,01 |

Notes : ⁽¹⁾ Pâte primaire

Tableau B.15 Longueur moyenne des fibres, masse linéique et taux de fines mesurés avec l'appareil FQA sur la fraction R100 et R200

| Classe | Essai | | Longueur moyenne pondérée | | | Masse linéique mg/m | Taux de fines pondéré | |
|--------|-------|------------------|---------------------------|-------------|----------|------------------------|-----------------------|----------|
| | | | en nombre | en longueur | en poids | | en nombre | en poids |
| | | | mm | mm | mm | | % | % |
| R100 | 2001 | F ⁽¹⁾ | 0,60 | 0,76 | 0,92 | 0,185 | 9,73 | 1,51 |
| | | A | — | — | — | — | — | — |
| | | R | 0,60 | 0,76 | 0,95 | 0,191 | 10,71 | 2,45 |
| | 2002 | F | — | — | — | — | — | — |
| | | A | — | — | — | — | — | — |
| | | R | 0,61 | 0,77 | 0,97 | 0,187 | 9,52 | 2,12 |
| | 2201 | F | 0,61 | 0,77 | 0,92 | 0,194 | 10,68 | 2,40 |
| | | A | 0,59 | 0,74 | 0,94 | 0,176 | 8,82 | 2,08 |
| | | R | 0,61 | 0,78 | 0,97 | 0,187 | 12,66 | 2,76 |
| | 2203 | F | — | — | — | — | — | — |
| | | A | 0,63 | 0,81 | 1,0 | 0,184 | 11,75 | 2,51 |
| | | R | 0,57 | 0,72 | 0,88 | 0,187 | 10,89 | 2,66 |
| R200 | 2001 | F ⁽¹⁾ | — | — | — | — | — | — |
| | | A | — | — | — | — | — | — |
| | | R | — | — | — | — | — | — |
| | 2002 | F | — | — | — | — | — | — |
| | | A | — | — | — | — | — | — |
| | | R | 0,25 | 0,35 | 0,63 | 0,184 | 48,53 | 26,88 |
| | 2201 | F | 0,25 | 0,35 | 0,65 | 0,195 | 48,89 | 26,89 |
| | | A | 0,23 | 0,32 | 0,51 | 0,198 | 52,18 | 30,54 |
| | | R | — | — | — | — | — | — |
| | 2203 | F | — | — | — | — | — | — |
| | | A | — | — | — | — | — | — |
| | | R | 0,25 | 0,36 | 0,65 | 0,185 | 47,43 | 25,52 |

Notes : ⁽¹⁾ Pâte primaire

Tableau B.16 Propriétés de la fraction SR raffinée à haute consistance en 1 stade

| Propriétés | | Unités | SR-5 | SR-6 | SR-8 | SR-9 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|------|------|------|------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 5,4 | 7,6 | 7,7 | 8,7 |
| Indice d'égouttage | | mL | 174 | 117 | 80 | 57 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 1,39 | 1,11 | 0,78 | 0,74 |
| Bauer McNett | R14 | % | 14,4 | 13,0 | 9,2 | 4,8 |
| | R28 | % | 33,3 | 33,5 | 32,9 | 31,1 |
| | R48 | % | 19,2 | 19,5 | 20,5 | 21,3 |
| | R100 | % | 11,9 | 11,9 | 13,4 | 14,4 |
| | R200 | % | 4,8 | 6,3 | 7,1 | 7,6 |
| | P200 | % | 16,4 | 15,8 | 16,9 | 20,8 |
| FQA | L _a | mm | 0,88 | 0,84 | 0,79 | 0,75 |
| | L _w | mm | 1,74 | 1,67 | 1,58 | 1,52 |
| | L _{ww} | mm | 2,31 | 2,21 | 2,13 | 2,10 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 3,13 | 2,87 | 2,92 | 2,92 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 47,1 | 51,2 | 56,4 | 58,5 |
| | Allongement à la rupture | % | 2,12 | 2,42 | 2,41 | 2,41 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 40,3 | 50,6 | 55,4 | 56,4 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 2,85 | 3,24 | 3,42 | 3,42 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 9,50 | 9,58 | 8,84 | 7,85 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 51,1 | 51,2 | 50,9 | 51,0 |
| | Opacité | % | 95,2 | 95,5 | 95,3 | 95,6 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 47,3 | 48,4 | 46,7 | 48,9 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 4,50 | 4,47 | 4,47 | 4,72 |
| | CIELAB | L | % | 84,5 | 84,5 | 84,3 |
| | | a* | % | 0,32 | 0,30 | 0,30 |
| | | b* | % | 14,1 | 13,9 | 13,7 |

Tableau B.17 Propriétés de la fraction SR raffinée à haute consistance en 2 stades

| Propriétés | | Unités | SR2-4 | SR2-5 | SR2-7 | SR2-9 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 6,4 | 7,8 | 7,9 | 11 |
| Indice d'égouttage | | mL | 175 | 118 | 94 | 75 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 1,46 | 1,20 | 1,04 | 0,88 |
| Bauer McNett | R14 | % | 16,2 | 15,8 | 14,8 | 12,0 |
| | R28 | % | 32,1 | 31,6 | 31,9 | 31,3 |
| | R48 | % | 17,1 | 17,4 | 18,2 | 18,9 |
| | R100 | % | 10,1 | 10,7 | 11,3 | 11,9 |
| | R200 | % | 4,8 | 5,6 | 6,0 | 6,7 |
| | P200 | % | 19,7 | 18,9 | 17,8 | 19,2 |
| FQA | L _a | mm | 0,93 | 0,87 | 0,81 | 0,79 |
| | L _w | mm | 1,81 | 1,76 | 1,68 | 1,65 |
| | L _{ww} | mm | 2,37 | 2,32 | 2,25 | 2,22 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 2,97 | 2,94 | 2,92 | 2,91 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 47,3 | 53,9 | 56,5 | 57,4 |
| | Allongement à la rupture | % | 1,98 | 2,24 | 2,51 | 2,34 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 37,7 | 48,6 | 58,7 | 53,5 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 2,96 | 3,21 | 3,34 | 3,51 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 9,54 | 9,11 | 9,25 | 8,59 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 50,0 | 50,7 | 50,6 | 50,5 |
| | Opacité | % | 95,5 | 95,6 | 95,9 | 95,8 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 46,2 | 47,8 | 48,0 | 48,4 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 4,82 | 4,88 | 4,98 | 5,05 |
| | CIELAB | L | % | 83,6 | 83,9 | 83,8 |
| | | a [*] | % | 0,28 | 0,19 | 0,27 |
| | | b [*] | % | 13,7 | 13,4 | 13,5 |

Tableau B.18 Propriétés de la fraction SR raffinée à basse consistance

| Propriétés | | Unités | SBC-1A | SBC-2 | SBC-3 | SBC-4 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|--------|-------|-------|-------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 0,73 | 1,2 | 1,3 | 1,6 |
| Indice d'égouttage | | mL | 195 | 110 | 88 | 39 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 1,60 | - | 1,27 | 1,01 |
| Bauer McNett | R14 | % | 4,6 | 3,6 | 1,3 | 0,4 |
| | R28 | % | 34,5 | 32,5 | 28,0 | 19,8 |
| | R48 | % | 24,6 | 25,4 | 26,5 | 28,0 |
| | R100 | % | 15,7 | 15,6 | 18,7 | 22,3 |
| | R200 | % | 6,8 | 7,7 | 8,5 | 10,8 |
| | P200 | % | 13,8 | 15,2 | 17,0 | 18,7 |
| FQA | L _a | mm | 0,72 | 0,67 | 0,64 | 0,56 |
| | L _w | mm | 1,43 | 1,42 | 1,24 | 1,06 |
| | L _{ww} | mm | 1,94 | 1,97 | 1,72 | 1,49 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 3,08 | 2,66 | 2,98 | 2,99 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 42,0 | 49,6 | 47,7 | 52,3 |
| | Allongement à la rupture | % | 1,82 | 2,17 | 1,87 | 1,86 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 30,6 | 43,9 | 34,6 | 38,0 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 2,19 | 2,74 | 2,43 | 2,74 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 8,29 | 6,67 | 7,07 | 6,46 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 50,7 | 51,6 | 50,9 | 50,5 |
| | Opacité | % | 94,7 | 94,9 | 95,6 | 96,1 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 44,9 | 46,8 | 48,5 | 48,9 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 4,31 | 4,13 | 4,93 | 5,21 |
| | CIELAB | L | % | 84,4 | 84,9 | 84,0 |
| | | a [*] | % | 0,35 | 0,30 | 0,21 |
| | | b [*] | % | 14,2 | 14,2 | 13,3 |

Tableau B.19 Propriétés de la fraction QR raffinée à haute consistance en 1 stade

| Propriétés | | Unités | QR-4 | QR-6 | QR-8 | QR-10 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|-------|-------|------|-------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 4,9 | 6,3 | 6,5 | 8,4 |
| Indice d'égouttage | | mL | 220 | 167 | 118 | 67 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 1,80 | 1,20 | 1,00 | 0,69 |
| Bauer McNett | R14 | % | 18,4 | 17,9 | 15,4 | 7,8 |
| | R28 | % | 34,2 | 33,0 | 33,1 | 32,5 |
| | R48 | % | 18,5 | 18,6 | 19,2 | 21,0 |
| | R100 | % | 9,9 | 10,5 | 11,1 | 13,1 |
| | R200 | % | 4,6 | 5,1 | 5,7 | 6,2 |
| | P200 | % | 14,4 | 14,9 | 15,5 | 19,4 |
| FQA | L _a | mm | 0,92 | 0,87 | 0,83 | 0,77 |
| | L _w | mm | 1,80 | 1,73 | 1,72 | 1,53 |
| | L _{ww} | mm | 2,34 | 2,29 | 2,30 | 2,05 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 3,14 | 2,87 | 2,96 | 2,81 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 44,1 | 48,4 | 51,1 | 55,1 |
| | Allongement à la rupture | % | 1,85 | 2,09 | 1,98 | 2,13 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 32,1 | 40,7 | 39,6 | 46,1 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 2,82 | 3,10 | 3,36 | 3,47 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 10,27 | 10,16 | 9,19 | 8,61 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 50,2 | 50,7 | 50,9 | 50,7 |
| | Opacité | % | 94,6 | 95,1 | 95,3 | 95,3 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 44,7 | 46,5 | 48,1 | 47,8 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 4,39 | 4,51 | 4,59 | 4,79 |
| | CIELAB | L | % | 84,1 | 84,3 | 84,4 |
| | | a [*] | % | 0,37 | 0,38 | 0,42 |
| | | b [*] | % | 14,3 | 14,1 | 14,0 |

Tableau B.20 Propriétés de la fraction QR raffinée à haute consistance en 2 stades

| Propriétés | | Unités | QR2-4 | QR2-6 | QR2-7 | QR2-8 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 7,2 | 7,5 | 8,4 | 9,8 |
| Indice d'égouttage | | mL | 169 | 122 | 97 | 73 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 1,60 | 1,35 | 1,28 | 1,10 |
| Bauer McNett | R14 | % | 19,1 | 18,3 | 15,8 | 14,7 |
| | R28 | % | 33,2 | 32,6 | 32,6 | 31,9 |
| | R48 | % | 17,7 | 17,7 | 18,2 | 18,2 |
| | R100 | % | 10,1 | 10,2 | 10,6 | 11,0 |
| | R200 | % | 4,4 | 5,1 | 5,8 | 6,0 |
| | P200 | % | 15,5 | 16,1 | 17,0 | 18,2 |
| FQA | L _a | mm | 0,95 | 0,90 | 0,87 | 0,84 |
| | L _w | mm | 1,83 | 1,80 | 1,72 | 1,70 |
| | L _{ww} | mm | 2,36 | 2,33 | 2,25 | 2,23 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 2,95 | 2,90 | 2,72 | 2,76 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 49,2 | 55,2 | 54,5 | 59,0 |
| | Allongement à la rupture | % | 2,15 | 2,40 | 2,34 | 2,50 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 42,3 | 53,4 | 51,1 | 59,1 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 3,45 | 3,36 | 3,73 | 3,86 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 9,83 | 9,33 | 9,26 | 8,91 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 50,2 | 50,6 | 50,8 | 50,2 |
| | Opacité | % | 95,2 | 95,2 | 95,7 | 95,4 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 46,6 | 47,0 | 48,8 | 47,0 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 4,72 | 4,72 | 4,86 | 4,88 |
| | CIELAB | L | % | 84,0 | 84,2 | 83,9 |
| | | a* | % | 0,31 | 0,25 | 0,28 |
| | | b* | % | 14,1 | 14,0 | 13,9 |

Tableau B.21 Propriétés de la fraction QR raffinée à basse consistance

| Propriétés | | Unités | QBC-2B | QBC-3 | QBC-4 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|--------|-------|-------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 0,89 | 1,2 | 1,4 |
| Indice d'égouttage | | mL | 166 | 115 | 70 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 1,82 | 1,78 | 1,38 |
| Bauer McNett | R14 | % | 6,5 | 4,7 | 1,9 |
| | R28 | % | 35,1 | 32,8 | 22,8 |
| | R48 | % | 24,1 | 24,8 | 25,3 |
| | R100 | % | 14,7 | 16,1 | 17,4 |
| | R200 | % | 6,6 | 7,5 | 8,6 |
| | P200 | % | 13,0 | 14,1 | 24,0 |
| FQA | L _a | mm | 0,75 | 0,70 | 0,65 |
| | L _w | mm | 1,46 | 1,38 | 1,29 |
| | L _{ww} | mm | 1,96 | 1,88 | 1,79 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 2,91 | 2,89 | 2,79 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 45,0 | 48,3 | 50,9 |
| | Allongement à la rupture | % | 1,99 | 2,06 | 2,17 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 36,7 | 40,2 | 44,6 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 2,66 | 2,84 | 3,02 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 7,84 | 7,69 | 7,29 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 50,3 | 50,6 | 50,7 |
| | Opacité | % | 95,4 | 95,3 | 95,6 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 46,3 | 46,5 | 47,5 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 4,79 | 4,65 | 4,81 |
| | CIELAB | L | 83,9 | 84,2 | 84,1 |
| | | a [*] | 0,30 | 0,40 | 0,31 |
| | | b [*] | 13,8 | 14,0 | 13,7 |

Tableau B.22 Propriétés de la fraction A2 raffinée à haute consistance en 1 stade

| Propriétés | | Unités | A2-3 | A2-4 | A2-5 | A2-8 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|------|------|------|------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 3,8 | 5,1 | 4,9 | 7,4 |
| Indice d'égouttage | | mL | 194 | 135 | 99 | 80 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 0,48 | 0,45 | 0,43 | 0,32 |
| Bauer McNett | R14 | % | 5,4 | 4,9 | 4,4 | 3,5 |
| | R28 | % | 29,9 | 29,0 | 27,7 | 26,5 |
| | R48 | % | 22,8 | 22,5 | 22,3 | 21,3 |
| | R100 | % | 15,9 | 16,0 | 16,2 | 16,0 |
| | R200 | % | 7,7 | 7,9 | 8,1 | 8,7 |
| | P200 | % | 18,3 | 19,7 | 21,3 | 24,0 |
| FQA | L _a | mm | 0,66 | 0,65 | 0,64 | 0,62 |
| | L _w | mm | 1,41 | 1,40 | 1,39 | 1,35 |
| | L _{ww} | mm | 2,01 | 2,01 | 1,98 | 1,93 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 2,95 | 2,80 | 2,71 | 2,60 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 37,0 | 40,2 | 44,8 | 49,3 |
| | Allongement à la rupture | % | 1,69 | 1,84 | 1,96 | 2,14 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 25,4 | 29,1 | 34,7 | 42,9 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 2,20 | 2,33 | 2,64 | 2,65 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 8,35 | 8,45 | 8,12 | 8,02 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 48,7 | 49,6 | 49,3 | 49,2 |
| | Opacité | % | 96,8 | 96,8 | 97,0 | 97,2 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 48,7 | 51,2 | 52,0 | 52,1 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 5,71 | 5,73 | 5,93 | 6,01 |
| | CIELAB | L | % | 82,9 | 83,0 | 82,9 |
| | | a [*] | % | 0,32 | 0,22 | 0,28 |
| | | b [*] | % | 13,8 | 13,4 | 13,2 |

Tableau B.23 Propriétés de la fraction A2 raffinée à basse consistance

| Propriétés | | Unités | ABC-1 | ABC-2 | ABC-3 |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|
| Énergie spécifique de raffinage | | MJ/kg | 0,46 | 0,97 | 1,2 |
| Indice d'égouttage | | mL | 199 | 104 | 67 |
| Rejets Pulmac (0,004") | | % | 0,33 | 0,51 | 0,63 |
| Bauer McNett | R14 | % | 1,9 | 1,6 | 0,6 |
| | R28 | % | 27,2 | 24,2 | 21,2 |
| | R48 | % | 25,5 | 25,7 | 25,3 |
| | R100 | % | 18,8 | 20,1 | 20,7 |
| | R200 | % | 9,2 | 10,0 | 10,8 |
| | P200 | % | 17,4 | 18,4 | 21,4 |
| FQA | L _a | mm | 0,62 | 0,59 | 0,56 |
| | L _w | mm | 1,28 | 1,19 | 1,14 |
| | L _{ww} | mm | 1,82 | 1,68 | 1,63 |
| Propriétés physiques | Volume spécifique | cm ³ /g | 2,90 | 2,63 | 2,52 |
| | Indice de rupture | N.m/g | 34,8 | 41,9 | 44,4 |
| | Allongement à la rupture | % | 1,65 | 1,95 | 1,80 |
| | Absorption d'énergie | J/m ² | 23,0 | 33,4 | 31,7 |
| | Indice d'éclatement | kPa.m ² /g | 1,94 | 2,30 | 2,40 |
| | Indice de déchirure | mN.m ² /g | 6,74 | 6,79 | 6,50 |
| Propriétés optiques | Blancheur | % | 49,7 | 49,5 | 50,1 |
| | Opacité | % | 96,8 | 97,0 | 97,1 |
| | Coeff. de diffusion S | m ² /kg | 51,0 | 51,2 | 53,3 |
| | Coeff. d'absorption K | m ² /kg | 5,67 | 5,99 | 5,66 |
| | CIELAB | L | % | 83,3 | 83,0 |
| | | a [*] | % | 0,22 | 0,23 |
| | | b [*] | % | 13,4 | 13,0 |

Figure B.1 Bilan de masse de la séquence de fractionnement préliminaire à 4 stades

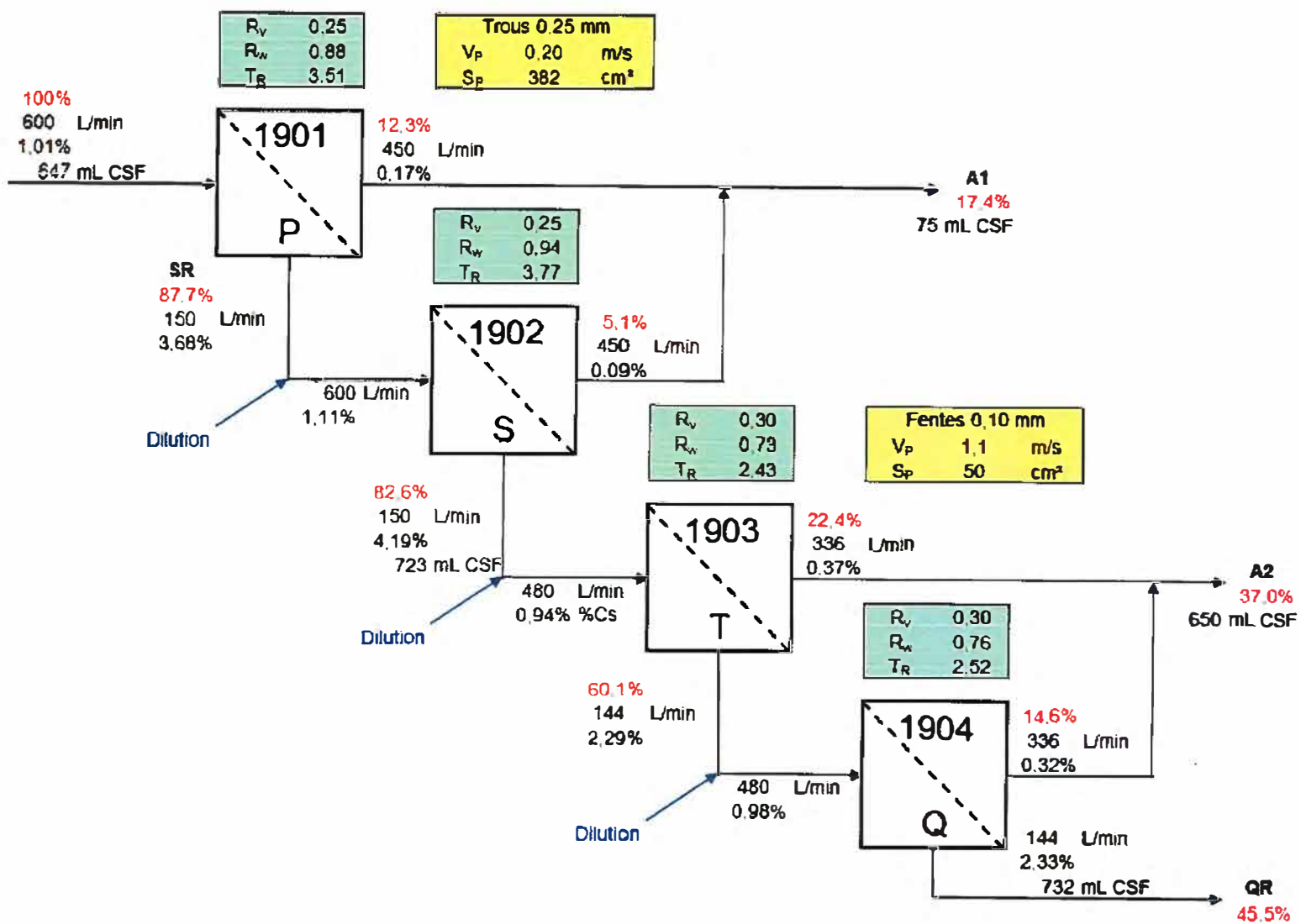


Tableau B.24 Propriétés des mélanges obtenus par recombinaison des fractions SR et A1

| Propriétés | | Unités | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 |
|--------------------------|-----------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Énergie spécifique | | MJ/kg | 4,2 | 6,0 | 5,1 | 6,1 | 0,57 | 0,93 |
| CSF | | mL | 112 | 79 | 107 | 84 | 89 | 64 |
| FQA | L _a | mm | 0,66 | 0,63 | 0,67 | 0,68 | 0,60 | 0,58 |
| | L _w | mm | 1,56 | 1,53 | 1,63 | 1,62 | 1,36 | 1,34 |
| | L _{ww} | mm | 2,18 | 2,17 | 2,26 | 2,24 | 1,95 | 1,92 |
| Volume massique | | cm ³ /g | 2,80 | 2,76 | 2,78 | 2,73 | 2,70 | 2,82 |
| Indice de rupture | | N.m/g | 42,6 | 45,9 | 44,7 | 48,0 | 37,9 | 45,5 |
| Allongement à la rupture | | % | 2,17 | 2,29 | 2,33 | 2,41 | 1,57 | 2,02 |
| Absorption d'énergie | | J/m ² | 37,1 | 42,2 | 42,7 | 47,4 | 23,1 | 36,7 |
| Indice d'éclatement | | kPa.m ² /g | 2,37 | 2,74 | 2,80 | 3,06 | 2,11 | 2,61 |
| Indice de déchirure | | mN.m ² /g | 8,55 | 8,39 | 9,36 | 8,43 | 7,01 | 7,02 |
| Blancheur | | % | 50,2 | 50,4 | 49,4 | 49,6 | 49,8 | 49,7 |
| Opacité | | % | 97,7 | 97,9 | 97,9 | 98,2 | 97,8 | 97,9 |
| Coeff. de diffusion | | m ² /kg | 56,6 | 58,1 | 55,1 | 58,7 | 55,9 | 56,4 |
| Coeff. d'absorption | | m ² /kg | 6,40 | 6,54 | 6,80 | 7,21 | 6,54 | 6,71 |
| CIELAB | L | — | 83,1 | 83,1 | 82,5 | 82,5 | 82,8 | 82,7 |
| | a* | — | -0,07 | -0,07 | -0,03 | -0,02 | -0,01 | 0,00 |
| | b* | — | 12,4 | 12,3 | 12,3 | 12,1 | 12,4 | 12,3 |

Tableau B.25 Propriétés des mélanges obtenus par recombinaison des fractions QR, A2 et A1 – 1^{ère} partie

| Propriétés | | Unités | T21 | T8 | T3 | T4 | T2 | T1 | T7 | T23 | T9 | T19 | T13 |
|-----------------------|-----------------|-----------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------|
| Énergie spécifique | | MJ/kg | 4,9 | 4,7 | 4,7 | 5,1 | 4,7 | 4,5 | 4,2 | 4,2 | 4,1 | 3,2 | 3,1 |
| CSF | | mL | 86 | 86 | 89 | 95 | 106 | 106 | 116 | 75 | 83 | 107 | 133 |
| FQA | L _a | mm | 0,63 | 0,65 | 0,65 | 0,61 | 0,67 | 0,64 | 0,67 | 0,62 | 0,64 | 0,65 | 0,67 |
| | L _w | mm | 1,52 | 1,57 | 1,55 | 1,50 | 1,60 | 1,52 | 1,59 | 1,47 | 1,56 | 1,55 | 1,58 |
| | L _{ww} | mm | 2,15 | 2,25 | 2,17 | 2,16 | 2,25 | 2,14 | 2,22 | 2,11 | 2,23 | 2,20 | 2,21 |
| Volume massique | | cm ³ /g | 2,77 | 2,89 | 2,81 | 2,80 | 2,73 | 2,83 | 3,09 | 2,61 | 2,76 | 2,85 | 2,82 |
| Indice de rupture | | N.m/g | 45,8 | 42,9 | 40,7 | 41,8 | 40,3 | 40,9 | 39,2 | 45,8 | 39,5 | 41,0 | 39,4 |
| Allongement à la rup. | | % | 2,33 | 2,20 | 2,18 | 2,23 | 2,20 | 2,20 | 2,16 | 2,39 | 1,92 | 2,05 | 2,03 |
| Absorption d'énergie | | J/m ² | 43,7 | 38,7 | 35,9 | 38,7 | 35,8 | 38,0 | 34,2 | 45,6 | 30,3 | 34,0 | 33,6 |
| Indice d'éclatement | | kPa.m ² /g | 2,78 | 2,41 | 2,41 | 2,48 | 2,42 | 2,33 | 2,27 | 2,76 | 2,46 | 2,36 | 2,20 |
| Indice de déchirure | | mN.m ² /g | 8,52 | 7,97 | 8,53 | 8,70 | 8,79 | 8,70 | 8,29 | 7,93 | 8,07 | 8,29 | 8,72 |
| Blancheur | | % | 49,1 | 49,9 | 49,9 | 49,6 | 49,8 | 49,3 | 49,6 | 48,8 | 49,2 | 49,1 | 49,4 |
| Opacité | | % | 98,2 | 98,2 | 98,1 | 98,4 | 97,9 | 98,4 | 97,9 | 98,4 | 98,4 | 98,2 | 98,1 |
| Coeff. de diffusion | | m ² /kg | 58,4 | 58,8 | 57,8 | 59,3 | 57,3 | 57,5 | 57,2 | 58,2 | 58,7 | 57,5 | 56,0 |
| Coeff. d'absorption | | m ² /kg | 7,22 | 7,02 | 6,98 | 7,41 | 6,95 | 7,31 | 6,96 | 7,42 | 7,48 | 7,21 | 6,85 |
| CIELAB | L | – | 82,5 | 82,7 | 82,7 | 82,4 | 82,6 | 82,3 | 82,6 | 82,2 | 82,2 | 82,3 | 49,4 |
| | a* | – | 0,27 | -0,13 | -0,15 | -0,17 | -0,13 | -0,10 | 0,06 | 0,33 | -0,06 | 0,05 | 0,07 |
| | b* | – | 12,6 | 12,1 | 12,1 | 11,9 | 12,1 | 12,0 | 12,3 | 12,5 | 12,0 | 12,3 | 12,3 |

Tableau B.26 Propriétés des mélanges obtenus par recombinaison des fractions QR, A2 et A1 – 2^{ème} partie

| Propriétés | | Unités | T15 | T12 | T26 | T11 | T10 | T28 | T16 | T14 | T25 | T20 | T18 | T17 |
|-----------------------|-----------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Énergie spécifique | | MJ/kg | 5,3 | 5,7 | 5,5 | 5,3 | 5,3 | 4,9 | 4,8 | 4,7 | 4,6 | 0,63 | 1,4 | 1,2 |
| CSF | | mL | 87 | 87 | 88 | 92 | 110 | 72 | 85 | 88 | 105 | 76 | 80 | 78 |
| FOA | L _a | mm | 0,68 | 0,66 | 0,65 | 0,64 | 0,64 | 0,63 | 0,66 | 0,64 | 0,67 | 0,59 | 0,62 | 0,61 |
| | L _w | mm | 1,61 | 1,63 | 1,57 | 1,55 | 1,60 | 1,54 | 1,57 | 1,55 | 1,614 | 1,37 | 1,41 | 1,41 |
| | L _{ww} | mm | 2,91 | 2,78 | 2,73 | 2,89 | 2,90 | 2,68 | 2,72 | 2,75 | 2,86 | 2,81 | 2,89 | 2,80 |
| Volume massique | | cm ³ /g | 2,22 | 2,27 | 2,21 | 2,20 | 2,26 | 2,17 | 2,19 | 2,21 | 2,27 | 1,95 | 1,99 | 1,99 |
| Indice de rupture | | N.m/g | 44,1 | 43,2 | 47,1 | 43,3 | 43,4 | 46,9 | 42,5 | 42,5 | 42,0 | 42,3 | 42,7 | 41,4 |
| Allongement à la rup. | | % | 2,44 | 2,37 | 2,37 | 2,32 | 2,33 | 2,36 | 2,21 | 2,30 | 2,27 | 1,91 | 2,02 | 1,94 |
| Absorption d'énergie | | J/m ² | 44,5 | 42,3 | 46,3 | 41,5 | 37,6 | 45,3 | 38,2 | 40,8 | 39,9 | 32,3 | 35,7 | 32,6 |
| Indice d'éclatement | | kPa.m ² /g | 2,73 | 2,65 | 2,98 | 2,61 | 2,66 | 2,98 | 2,52 | 2,63 | 2,48 | 2,20 | 2,31 | 2,21 |
| Indice de déchirure | | mN.m ² /g | 9,07 | 9,50 | 8,66 | 9,35 | 8,84 | 8,02 | 8,71 | 8,64 | 8,57 | 7,20 | 7,23 | 7,45 |
| Blancheur | | % | 49,0 | 49,7 | 49,7 | 49,6 | 49,4 | 49,3 | 49,4 | 49,2 | 49,6 | 49,5 | 49,3 | 49,5 |
| Opacité | | % | 98,5 | 98,3 | 98,4 | 98,3 | 98,2 | 98,3 | 98,3 | 98,2 | 98,1 | 98,1 | 98,1 | 98,1 |
| Coeff. de diffusion | | m ² /kg | 59,3 | 58,7 | 60,3 | 58,9 | 57,4 | 59,1 | 58,3 | 58,0 | 56,9 | 57,6 | 56,3 | 56,9 |
| Coeff. d'absorption | | m ² /kg | 7,66 | 7,18 | 7,39 | 7,38 | 7,13 | 7,37 | 7,52 | 7,09 | 6,95 | 7,05 | 7,06 | 6,95 |
| CIELAB | L | — | 82,1 | 82,5 | 82,5 | 82,3 | 82,3 | 82,4 | 82,2 | 82,6 | 82,6 | 82,4 | 82,4 | 82,5 |
| | a* | — | -0,08 | -0,13 | -0,06 | -0,17 | -0,16 | 0,19 | -0,11 | -0,05 | -0,13 | -0,07 | -0,08 | -0,10 |
| | b* | — | 11,9 | 12,0 | 11,9 | 11,8 | 12,0 | 12,3 | 11,8 | 12,6 | 12,3 | 12,0 | 12,3 | 12,1 |

Annexe C - Macro ImageJ

Cette macro-commande calcule l'épaisseur moyenne de la paroi des sections transversales des fibres ainsi que la largeur, le paramètre Z modifié et le facteur de forme FC. La documentation nécessaire pour la mise en place de cette macro dans le logiciel ImageJ et son utilisation est disponible sur le site Internet du logiciel [181].

```
macro "Cross-sections Wall-Thickness Analysis" {
    requires("1.38x");
    run("Clear Results");
    run("Select None");
    run("Duplicate...", "title="+getTitle()+"-wt_output.tif");
    run("Set Measurements...", "area center perimeter redirect=None
decimal=4");
    run("Analyze Particles...", "size=0-Infinity circularity=0.00-1.00
show=Nothing display clear record");

    setColor(255, 255, 255);
    setJustification("center");

    // obtient le nombre de mesure
    pn = nResults;

    // obtient les facteurs d'echelle
    getVoxelSize(w, h, d, u);
    scale_x = 1;
    scale_y = 1;
    if (w!=0) scale_x = 1/w;
    if (h!=0) scale_y = 1/h;

    // mesure le diameter, l'aire du lumen, le perimetre et
    // realise les calculs et les tracages
    for (i = 0; i < pn; i++) {

        // selectionne l'aire totale et calcule le diameter (la distance la
        // plus grande entre deux points du perimetre exterieur)
        x = getResult("XStart", i);
        y = getResult("YStart", i);
        doWand(x, y);
        getSelectionCoordinates(xCoord, yCoord);
        n = xCoord.length;
        diameter = 0.0;
        for (p = 0; p < n; p++) {
            for (q = p; q < n; q++) {
                dx = (xCoord[p] - xCoord[q]) / scale_x;
                dy = (yCoord[p] - yCoord[q]) / scale_y;
                d = sqrt(dx * dx + dy * dy);
                if (d > diameter) {
                    diameter = d;
                    pl = p;
                }
            }
        }
    }
}
```

```

        p2 = q;
    }
}

area = getResult("Area", i);
perim_ext = getResult("Perim.", i);

// Selectionne le lumen, mesure and trace les nombres
x = getResult("XM", i) * scale_x;
y = getResult("YM", i) * scale_y;
doWand(x, y);
run("Measure");
lumen_area = getResult("Area", nResults - 1);
lumen_perim = getResult("Perim.", nResults - 1);

// Trace le lumen
setForegroundColor(96,96,96);
run("Fill");

// Trace le diametre
setForegroundColor(255,127,255);
setLineWidth(2);
drawLine(xCoord[p1], yCoord[p1], xCoord[p2], yCoord[p2]);

// Trace le numero
setColor(160, 160, 160);
drawString(i + 1, x, y);

perim = (perim_ext + lumen_perim) / 2;
wt = 0;
z_param = 0;
fc = 0;
if (perim != 0) {
    wt = area / perim;
    z_param = 1256.637 * area / (perim * perim);
}
if (perim_ext != 0) {
    fc = 12.56637 * (area + lumen_area) / (perim_ext * perim_ext);
}
setResult("Lumen_area", i, lumen_area);
setResult("Lumen_Perim.", i, lumen_perim);
setResult("Average_Perim.", i, perim);
setResult("Wall_Thickness", i, wt);
setResult("Z_parameter", i, z_param);
setResult("Form_Circle", i, fc);
setResult("Diameter", i, diameter);
}
updateResults;
run("Select None");
}

```

Annexe D - Publications

“Optimum Refining of TMP Pulp by Fractionation after the First Refining Stage”

Article présenté au congrès IMPC (International Mechanical Pulping Conference), Minneapolis, Mai 2007

“Optimization of TMP Process and Pulp Quality by Means of Primary Pulp Fractionation”

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

Optimum Refining of TMP Pulp by Fractionation after the First Refining Stage

Ferluc, Alexandre¹; Lanouette, Robert^{1,2}; Bousquet, Jean-Pierre³; Bussières, Sylvain⁴

Abstract

The pulp used in this work was sampled after the first TMP refining stage of a Canadian newsprint mill. This pulp was fractionated with a pressure screen in two or more fractions of long fibres and fine fibres. We refined the fractions at high consistency in one or two stages or at low consistency. We recombined the refined fractions together to recreate the initial pulp. The initial pulp, itself refined at high consistency as in a typical TMP process, has been compared with the recombined pulps. It appears that refining consistency has strong effect on the quality of the recombined pulp and that it is possible to optimize the quality by this kind of treatment. This optimization is closely related with the fractionation efficiency. The best fractionation process is a pressure screen cascade using baskets with very small apertures. This process is very efficient in separating fibres by length but also able to separate fibres on the basis of wall thickness, leading to fractions of long fibres enriched in latewood and fractions of short fibres enriched of earlywood.

Introduction

Over the years, mechanical pulps have been greatly improved either in quality and energy consumption mainly by the development of the defibrating and refining processes. Nevertheless, there is still an increasing request of better quality mechanical pulps in order to meet the increasing exigencies on the quality and on the costs of the papers made with these pulps. The improvements also allow the use of these pulps as a replacement of more expensive chemical pulp in quality demanding products [1]. Besides, as in many other industries, the pressure for environmental protection also requires a mechanism of constant improvement of the processes directed toward the reduction of the pollutant emissions and the energy consumption. Therefore, new orientations are required to produce better and lower cost mechanical pulps. Extensive investigations have been developed all around the world in order to increase the quality of mechanical pulps by the mean of fractionation. Most of them have been carried out on fully refined pulp (i.e. posterior to secondary high consistency refining stage) and using different fractionation devices like spray disk [2], flotation cells [3] or even a tube [4], but mainly hydrocyclones [5, 6, 7, 8] and pressure screens [9, 10, 11, 12, 13].

The quality of the fibres, which is deeply related to their morphological properties, is very important for the quality of the final sheet of paper. The long fibres create the main fibre network upon what the shorter fibres will be retained and agglomerate to form the sheet. The mechanical resistance of the sheet is closely related to this long fibres network. But in the same time, the long fibres are coarser and less flexible and prone to increase the roughness of the sheet. It is then interesting to develop the bonding ability of the long fibres what will produce a stronger network and, in the same time, increase the flexibility of the fibres and reduce the roughness of the sheet [14]. The long fibres have also a higher wall thickness which makes them have a smaller specific surface than that of thin wall fibres [15]. This is specifically true for the earlywood fibres. The short fibres in turn fill the long fibres network, consolidate the whole sheet and create a suitable surface for printing. The fines complete this structure contributing to opacity, roughness and porosity and thus the ink-paper relationship. Nevertheless, the role of the fines must be distinguished whether the fines are primary fines or secondary fines [16]. In the first case fines are produce during the first refining stage. They are mainly originated by the delamination of the primary wall, with a flake-like shape and contain a high amount of lignin. Secondary fines are generated in posterior refining stage by the delamination of the secondary wall. Because of their higher content of cellulose and fibrillary shape, they have better bonding ability than primary fines but less contribution to opacity. All those aspects validate a process with a specific approach for refining separately each type of fibres.

¹ CIPP, C.P.550, Trois-Rivieres, QC, Canada, G9A 5H7

² Corresponding author : robert.lanouette@uqtr.ca

³ Metso Paper Inc.

⁴ Papier Masson Inc.

Objectives of the Study

The main goal of our study is to propose a new way for enhancing thermomechanical pulp by the mean of refining selective fractions of primary refining stage pulp and recombining them. In order to achieve this goal, an industrial pulp from a Canadian newsprint mill has been used. This mill experiences TMP pulp quality variations during the year because of the seasonal variations of chips quality. Several reasons can explain those variations: one is that chips are stored a longer time in the wood yard during winter time than during the other seasons when chips come almost immediately from the forest, another is that the wood is harvested in different places during winter and the rest of the year for the same specie of tree. The first step of this study was the fractionation of the pulp followed by the refining of the fractions with several processes and finally the analysis of the recombined pulp properties.

Experimental Results

Fractionation:

Two series of trials are carried out with the industrial pulp and each one with a specific fractionation process involving slotted baskets and drilled baskets with low profile or smooth surface as shown in Figure 1. The screen baskets and the operational parameters are chosen in order to optimize the fractionation effect [17, 18, 11]. All trials are performed in batch sequences with the Black Clawson model 8P pressure screen at CIPP. This screen is equipped with a two foils rotor with a tangential speed of 20 m/s. Those processes are tested in order to evaluate their abilities to separate the fibres on the bases of length, flexibility, coarseness and other morphological characteristics such as wall thickness.

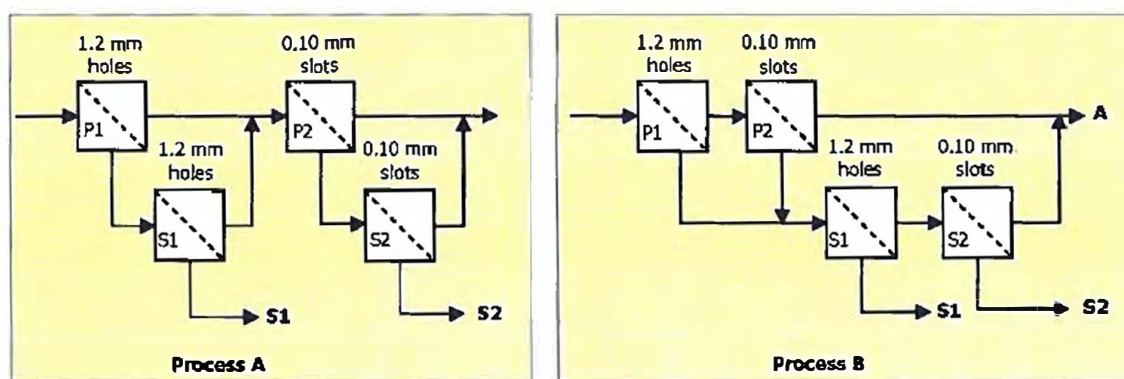


Figure 1: Fractionation processes used to create the fractions for refining and recombination trials.

The pulp was originated from Papier Masson Inc. and chosen at two key periods of the year: during spring when the pulp quality is expected to be optimum – this pulp is fractionated with process A – and in winter when the pulp is expected to have the lowest mechanical properties – this pulp is fractionated with process B. The pulps were sampled in the blow-line of the primary high consistency refiner and shipped to CIPP pilot plant. They were then diluted at 4% consistency and maintained at a temperature of 75°C for at least 45 min to remove the latency prior to the trials. A third pulp has also been sampled to test a third fractionation process – process C – involving small apertures screen baskets (figure 5). This process will be discussed later. The sheets properties have not been measured because of the high freeness. But to establish a reference, these pulps were refined in one stage at high consistency simulating the second refining stage of a TMP process and the properties were measured at 100 mL CSF.

Fractionation efficiency can be assessed using commonly used indexes such as Nelson index [19], Wahren retention probability [20] or passage ratio [21, 22]. Nevertheless, because of the type of the rotor and the high rotation speed, this pressure screen produces a mixed flow rather than plug flow. Therefore, preference is given to Wahren index. This index has also the advantage of providing a good way to make predictions [23] of length based fractions. This index is equal to unity when the fractionation of a specific fraction is perfect toward the reject flow and tends to ∞ when fractionation is perfect toward the accept flow. A null value does not mean zero fractionation efficiency as for

the Q index. The zero fractionation efficiency for the Wahren index is actually reached at a critical value W_c which is specific of the pulp, the pressure screen configuration and the operational parameters. This value can be calculated by equation 1 where RTF is the thickening ratio and RR_w is the mass reject rate.

$$W_c = \frac{RTF - 1}{RTF - RR_w} \quad \text{Equation 1}$$

The Wahren retention probability, and also the Nelson index, does not allow comparing fractionation efficiency on the same basis whether a fraction is rejected or accepted. For example, the Q index of a fraction separated toward the reject flow will be in a range of 0 to 1. For a fraction separated toward the accept flow, the values will be between 0 and $-\infty$. As a solution the indexes can be calculated inverting the role of reject and accept flows. The absolute values of indexes can then be compared. Fractions can be defined according to several criteria such as length (Bauer McNett fractions, fibre analyser's length classes), earlywood-latewood classes, etc. Bauer McNett fractions are very commonly used: they are easy to obtain and they can be precisely predicted with the Wahren index over a wide range of operational parameters with a few set of preliminary trials.

Refining:

The fractionation of pulps with processes A and B generates two long fractions and one short fraction. Those fractions are refined with the Metso CD-300 refiner available at CIPP at several levels of consistency: low consistency, one stage at high consistency and two stages at high consistency. High consistency refining is conducted at 30% consistency and atmospheric pressure, in one step or two steps and changing the distance between the plates to control the amount of energy applied to the pulp. Low consistency refining is conducted in the same refiner, at 6 to 8% consistency, with constant gap between the plates. Increasing amounts of energy are applied to the pulp by several passes through the refiner. Several pulps are obtained in a range of 200 to 50 mL CSF.

Recombining the Fractions:

The refined fractions are recombined together to recreate to original pulp i.e. the fractions are mixed according to the fractionation mass ratios. This stage is rather critical and care has been taken not to loose fines between every step of the process, specifically thickening for high consistency refining, as far as this could introduce some bias in the results. Care has also been taken in the calculations of the fractionation mass ratios : as far as the fractionation is performed in batch mode, the mass balances must be carefully reconstituted stage by stage.

The refined fractions are chosen to produce a recombined pulp with a CSF of 100 mL approximately (± 10 mL). The amount of possible mixes being elevated, some mixes are chosen and the other one are simulated with mathematical models established with the properties measured on the real mixes. The chosen model is a logarithmic model (equation 2) using 10 parameters and based on refining specific energy (first stage specific energy not included), freeness and tensile index. These expressions were suggested by studies from other authors [24, 25, 26] but adapted to increase the quality of the model and use it as a predictive model. For each component, an overall value is calculated as a linear combination of the logarithmic value of each property (equation 3). Then the value for the mix is calculated also as a linear combination of the logarithmic value affected by the mass ratio of each component in the mix (equation 2).

$$Y = KY_1^{a_1} Y_2^{a_2} Y_3^{a_3} \quad \text{Equation 2}$$

$$Y_i = E_i^{a_i} CSF_i^{b_i} IR_i^{c_i} \quad \text{Equation 3}$$

Fibres Analysis:

Fibres wall thickness is measured using the Morphi Wall Thickness (MWT) measurement device (figure 2) from CTP/TechPap: the device takes a sample of fibres from a diluted suspension of pulp (3 mg/L) and deposits it on a slotted plate (about 0.06 mm width). Then a micrograph of pulp is taken by means of a microscope and a digital camera. An image analysis algorithm measures the fibres wall thickness on each image. Series of 30 to 50 pictures

analysis are performed until stabilisation of the average wall thickness. For better assessment, the pulp has been splitted into the Bauer McNett fractions and measurements have been carried out on fractions R28, R48, R100 and R200. R14 fraction was measured with the MWT because the long fibres and shives could plug the device.



Figure 2: Morpho Wall Thickness measurement device (CTP/TechPap)

Additional analysis has been made on those pictures to assess earlywood/latewood ratio, fibre width and wall thickness of earlywood and latewood. The fibres are classified into earlywood fibres and latewood fibres according to their morphological characteristics such as width, wall thickness and punctuations (amount and size). The transition fibres have been classified into one or the other category according to the most seemingly characteristics. The earlywood and latewood ratios obtained this way are number ratios. In order to achieve a mass balance of each fraction in the fractionation process, they have to be converted into mass ratios. This is obtained considering typical cross-sectional shapes for earlywood and latewood fibres (Table I) and average width and wall thickness.

Table I: Typical cross-sectional shapes of earlywood and latewood fibres of first refining stage pulp

| Earlywood | Latewood | Shape |
|-----------|----------|---------------------|
| | | Squared |
| | | Rounded |
| | | Flattened |
| | | Partially collapsed |
| | | Collapsed |

Latewood fibres of primary pulp are very stiff and coarse fibres and keep more likely their original squared shape. On another hand, earlywood fibres are more flexible and tend to collapse. The coarseness can be calculated by equation 4 where ρ is the fibre wall density and A the surface area of the fibre wall cross-section. For squared cross-section and collapsed cross-section, coarseness can be approximated respectively by equation 5 and equation 6 where W is the fibre width and w_t the wall thickness. The fibre wall density still needs to be determined but for the purpose of our calculations, it is not necessary if assumed equal for latewood and for earlywood fibres.

$$\sigma = \rho A \quad \text{Equation 4}$$

$$\sigma_L = 4\rho(2W - w_t) \quad \text{Equation 5}$$

$$\sigma_E = 2\rho W w_t \quad \text{Equation 6}$$

Considering a mass balance on a unit length of fibres for a fraction of pulp obtained on the basis of fibre length fractionation such as Bauer McNett fractions R28 to R200 (earlywood fibres and latewood fibres have almost the same average length), the average coarseness of the pulp can be expressed as a function of the coarseness and number ratios of earlywood fibres and latewood fibres as expressed in equation 7 where p_E , p_L , and σ_E , σ_L are respectively the number ratios and coarseness of earlywood and latewood fibres.

$$\bar{\sigma} = p_E \sigma_E + p_L \sigma_L \quad \text{Equation 7}$$

With the same consideration, each part of the right member of equation 7 can be considered as the mass fraction of earlywood and latewood fibres. Then the mass ratios can be calculated by equation 8, which can be rearranged as equation 9 replacing the average coarseness by equation 7. These expressions are used to quantify and compare the amount of earlywood and latewood in the fractionated pulps throughout the process. To compare weight fractions instead of number fractions is important because of the morphological differences between earlywood and latewood fibres.

$$\omega_E = p_E \frac{\sigma_E}{\bar{\sigma}} \quad \text{Equation 8}$$

$$\omega_E = \frac{1}{1 + \frac{p_L \sigma_L}{p_E \sigma_E}} \quad \text{Equation 9}$$

$$\omega_L = \frac{1}{1 + \frac{p_E \sigma_E}{p_L \sigma_L}} \quad \text{Equation 10}$$

Discussion

Fractionation Efficiency:

Fractionation efficiency is assessed by the Bauer McNett for length based fractionation. Two fractionation processes have been used in order to generate the fractions (figure 1). Screen baskets with 1.2 mm smooth holes and 0.10 mm slots have been used. Those two processes provide two fractions enriched of long fibres and a fraction enriched of short fibres. Figure 3 presents the Bauer McNett distribution of each fraction. The reject flows S1 and S2 have significantly higher amount of long fibres (R48) and lower amount of short fibres (P48).

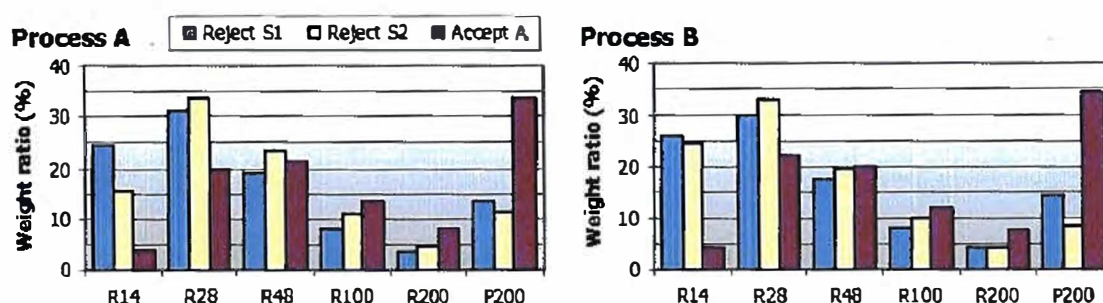


Figure 3: Bauer McNett distributions of the long and short fractions obtained with fractionation processes A and B.

Along with the mass balance, these processes generate three different fractions (figure 4): S1 flow contains most of R14 fibres and a important part of R28 and R48 fibres while S2 flow is mainly made of P14/R100 fibres and the accept A flow contains P48 fibres with a very high fines (P200) content. Nevertheless overlapping of fractions can be observed between the different flows. The accept flow still contains a significant amount of R28 and R48 fibres

and the difference between the two long fibres fractions is also quite thin so that the two long fractions could actually be considered similar. Nevertheless, as described in the next part of the discussion, the recombined pulps have different properties even when the unrefined fractions do not. When the fractions present higher differences, it is possible to obtain more different behaviours of the recombined pulp and even better properties than the pulp refined at high consistency without fractionation. This behaviour validates the refining of splitted pulp and shows the need of a better separation of fibres.

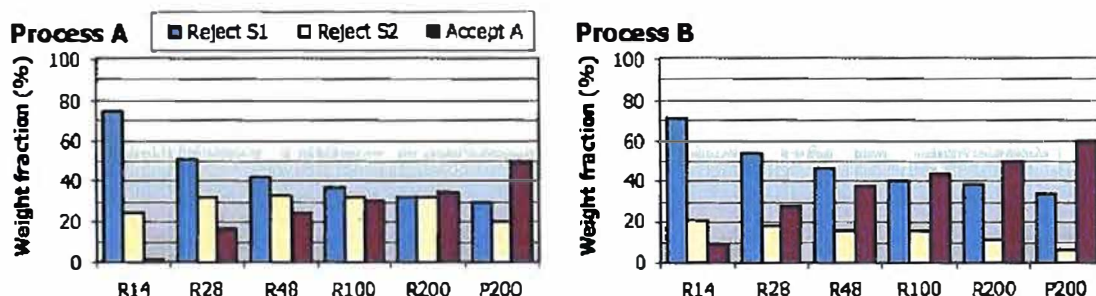


Figure 4: Mass balance of the Bauer McNett fractions for the fractionation processes A and B.

On that basis, a new process for fractionation has been proposed to separate more efficiently the fibres according to their length. This is achieved by the use of screen baskets with much smaller aperture than that of the screen baskets used in process A and B. This process is shown in figure 5.

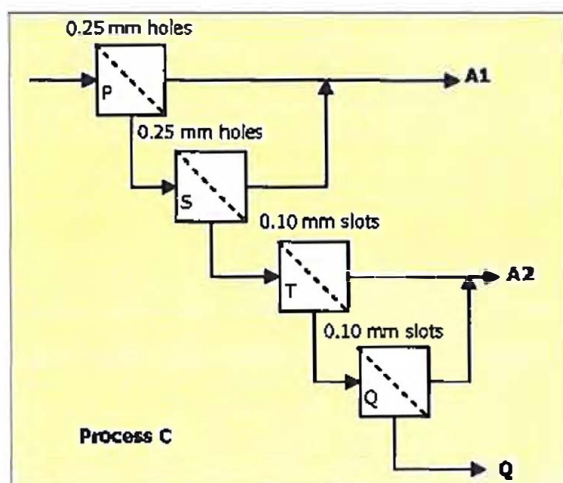


Figure 5: Fractionation process C featuring four screens in cascade with small aperture baskets

Because of the high thickening ratio of the small aperture screen baskets, several pressure screens have been placed in cascade. The first two screens with the smaller apertures (0.25 mm smooth holes) split the pulp between R48 and R100; the next two screens with bigger apertures (0.10 mm slots) split the reject pulp between R28 and R48 as shown in figure 6 below. The rejects of the last screen (Q) contains mainly R14 and R28 fibres. The accept flows of the last two screens (accept A2) contain the fraction R48 and R100 of the initial pulp and the accept flows of the first two screens (accept A1) contain most of the short fibres of the initial pulp. These figures show that the classes of fibres length are well separated across those three fractions. The average fibre wall thickness is also affected by the fractionation process.

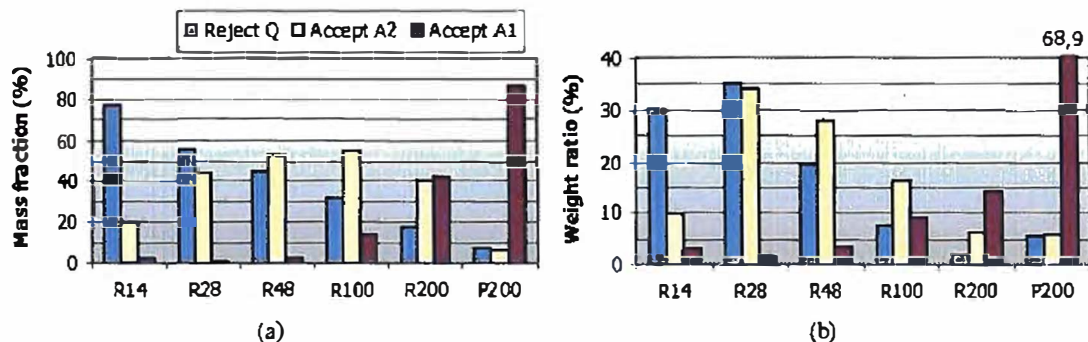


Figure 6 : (a) Mass balance of the Bauer McNett fractions and (b) Bauer McNett distributions of the long and short fractions obtained with fractionation process C.

As shown in Figure 7, the long fibres fractions R28 and R48 have an increase in fibres wall thickness during the last two screens whereas no change is observed with the first two screens. Actually the first two screens fractionate the fibres on the basis of length because of the very small apertures. Those fractions are separated from R100, R200 and P200 but not modified as far as the corresponding fibres are not able to pass through the baskets. In the next screens (T and Q), the pulp is almost only composed of R14, R28 and R48 fractions. Some of those fibres are able to pass through the bigger apertures (0.10 mm slots) according to their length, coarseness and flexibility. The increase of fibres wall thickness for fractions R28 and R48 indicates that coarser and less flexible fibres are preferentially retained by the baskets. There is also a competition between fractionation by length versus fractionation by coarseness which is traduced by a smaller increase of fibres wall thickness for the R48 fraction than the R28 fraction. As far as the fibres are not physically modified by the fractionation process, those changes in fibres wall thickness are closely related to earlywood/latewood fractionation.

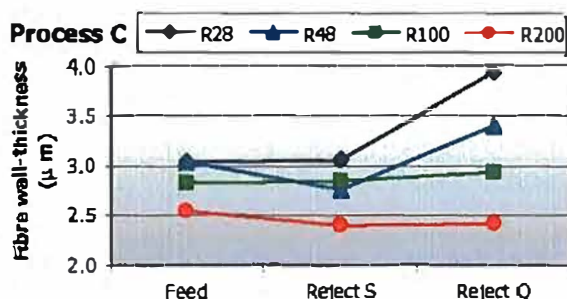


Figure 7 : Effect of the fractionation process C on the average fibre wall thickness

Separate Refining of Fractions:

The refining of each fraction with different refining processes and different operational parameters leads to different quality of recombined pulp. For a same freeness of the recombined pulp, fractions treated with different amounts of energy and different consistencies, generate recombined pulps with distinctive properties. Figure 8 shows the mechanical properties of several mixes obtained with fractions refined either at low consistency or high consistency. The mixes have been classified according to the refining process that have been used to develop the long fibres fractions, the short fractions being refined either at low or high consistency. It clearly appears that low consistency refining generates a loss of tear index while the tensile index remains unchanged or slightly higher. The way the short fibres are refined do not change this tendency but differences can be observed between the mixes where the short fibres are refined at low consistency and those at high consistency. Similar conclusions can be drawn for tensile energy absorption (TEA). In the case of the scattering coefficient, no significant differences are observed.

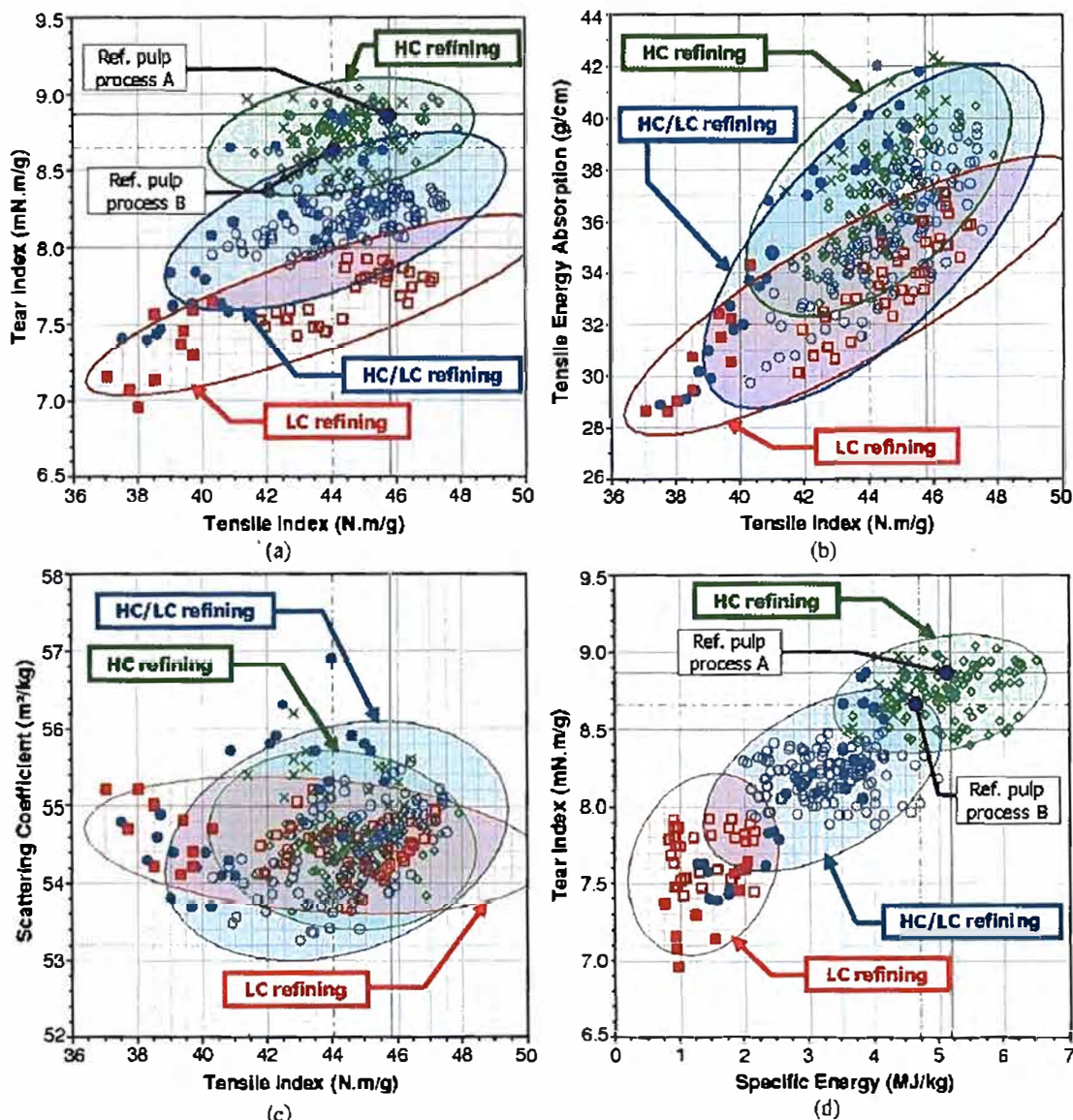


Figure 8: 95% probability density ellipses of recombined pulp mechanical properties according to the refining process applied on the long fibres fractions S1 and S2. Empty markers stand for process A and filled markers and crosses for process B; (a) Tear index vs. Tensile Index, (b) Total Energy Absorption vs. Tensile Index, (c) Scattering Coefficient vs. Tensile Index and (d) Tensile Index vs. Specific Refining Energy.

The way the long fibres have been refined is a key factor for the overall quality of the recombined pulp. Low consistency refining leads to poor tear index whereas high consistency allows better tear index. The refining of the short fibres has much less effect on the recombined pulp properties, most probably because the cut of fibres is not so critical for the mechanical properties of the short fibres and leads more to wall exposure by cross sectioning, splitting or delamination, contributing therefore to increase the capacity of fibre bonding. At constant freeness, the reduction in fibre length between high consistency refining and low consistency refining is higher for the long fibre fractions than for the short fibre fraction. Figure 9 below shows that at a freeness of 100 mL, the reduction of length is 2 to 4 times higher for the long fractions than for the short fractions when it is refined at low consistency instead

of high consistency. Therefore, the refining strategy must be carefully defined for the fractions in order to improve the quality of the recombined pulp and this strategy should consider mainly high consistency refining.

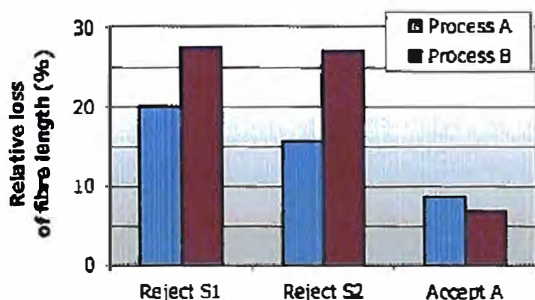


Figure 9: Relative loss in fibre length (length weighted average) for each fraction between refining at high consistency and low consistency at 100 mL CSF.

Most importantly, refining by fractions allows obtaining better properties than the whole pulp refined at high consistency like in a traditional TMP process. As shown in figure 10 where the mixes with best mechanical properties have been selected, an improvement can be observed between each reference pulp and its corresponding recombined pulps. Also, it can be observed that the lower quality pulp (B) can reach the properties of the higher quality pulp (A). This process could therefore be used to compensate the seasonal pulp quality variations and maintain constant quality all the year.

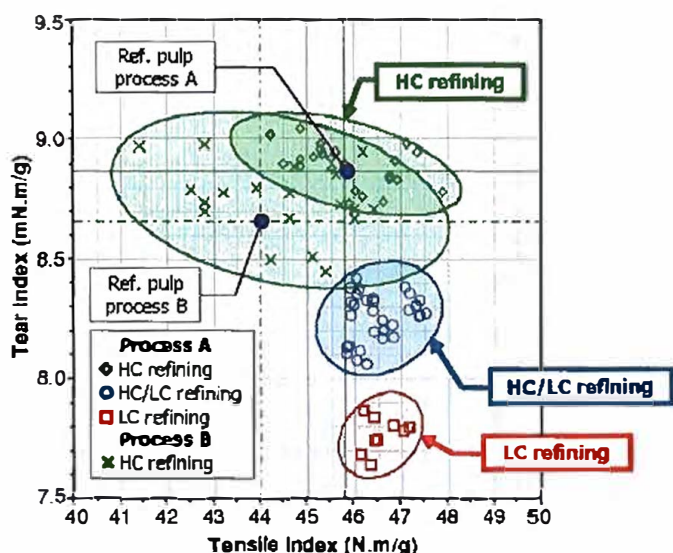


Figure 10: Recombined pulps showing best mechanical properties with HC refining, HC/LC refining and LC refining on process A fractions compared with best results obtained with HC refining on process B fractions.

Conclusions

Two original aspects have been developed throughout this study: the use of a screen basket with very small apertures as a mean of fractionation and the use of mechanical pulp from the primary refining stage.

The small aperture basket by itself is a very good length-based fractionator but because of this, it does not allow to fractionate efficiently according to other characteristics such as coarseness or cell wall-thickness. Besides, this screen basket requires low reject rates because of its high thickening ratio in order to have a proper balance between the reject flow and the accept flow. Therefore, another screen with bigger apertures is required as a posterior stage.

This sequence provides a way to increase the amount of latewood fibres in the reject flow and the amount of earlywood fibres in the accept flow of the slotted baskets.

The way the specific energy is applied to the fractionated pulp has a significant effect on the properties of the recombined pulp. Low consistency can be used to reduce the energy consumption but the pulp can be damaged. For the long fibres, high consistency is preferable and several stages can be performed to reduce the refining intensity while maintaining the same specific energy. The impact of short fibres and fines in the quality of the recombined pulp is lower than that of long fibres regarding the consistency of refining.

This study is still in progress and the new process should allow studying more precisely the effect of the refining stage on long and short fibres by means of well separated fractions. It should also provide a better insight on earlywood and latewood fibres role during refining and their contribution on the recombined pulp quality.

Acknowledgements

We acknowledge gracefully the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) for its financial support. Our thanks also go Alain Marchand, Pierre Gendron and Gaston Michaud for their help at CIPP pilot plants and laboratories.

References

1. Höglund, H.; Mechanical pulp fibres for new and improved paper grades; 7th International Conference On New Available Technologies, p.158-163, Stockholm, 2002
2. Brew, M., A., Bennett, S., Schmidt, J. R.; Mechanical Pulp Fractionation with a Spray Disk Filter; Canadian Patent n°2,108,321, Issued May 11th, 1994
3. Eckert, W., F., Afacan, A., Masliyah, J., H.; Fractionation of wood pulps by continuous flotation; TAPPI Journal, vol. 83, n°8, p.93, 2000
4. Krogerus, B., Fagerholm, K.; Analytical fractionation of pulps by tube flow; Paperi Ja Puu – paper and Timber, vol.85, n°4, p.209-213, 2003
5. Gavelin, G.; Fractionation with hydrocyclones; TAPPI Pulping Conference Proceedings, p.753-774, Orlando, 1991
6. Rehmat, T., Branion, R., M., R.; Fibre fractionation in hydrocyclones; 81st Annual Meeting, Technical section B, CPPA, p.105-125, 1995
7. Kure, K.,-A., Dahlqvist, G., Ekström, J., Helle, T.; Hydrocyclone separation and reject refining of thick-walled mechanical pulp fibres; Nordic Pulp and Paper Research Journal, vol.14, n°2, p.100-110, 1999
8. Ho, S.,-L., Rehmat, T., Branion, R.; Fibre fractionation in hydrocyclones; 86th PAPTAC Annual Meeting, Preprints C, p.193-215, 2003
9. Olson, J.; Fibre Length Fractionation Caused by Pulp Screening. Slotted Screen Plates; Journal of Pulp and Paper Science, vol.27, n°8, p.255-261, 2001
10. Olson, J.; Allison, B.; Roberts, N.; Fibre Length Fractionation Caused by Pulp Screening. Smooth-Hole Screen Plates; Journal of Pulp and Paper Science, vol.26, n°1, p.12-16, 2000
11. Julien Saint Amand, F., Perrin, B.; Characterization and Simulation of Fibre Separation in Screen and Cleaners; International Mechanical Pulping Conference, p.245-257, Québec, 2003

12. Wakelin, R., F.; Paul, T., S.; Effects of some process variables on screen fractionator performance; APPITA Journal, vol. 54, n° 4, p. 357-363, 2001
13. Ämmälä, A., Jussila, T., Niinimäki, J.; On the explanatory nature of reject rates for the fractionation of pulp with slotted pressure screens; Paperi Ja Puu – Paper and Timber, vol.83, n° 2, p.128-131, 2001
14. Corson, S., R.; Aspect of mechanical pulp fibre separation and development in a disc refiner; Paperi Ja Puu – Paper and Timber, n°7, p.801-814, 1989
15. Braaten, K., R.; Fibre and Fibril Properties Versus Light Scattering and Surface Smoothness for Mechanical Pulps; Pulp and paper Canada, vol.101, n°5, p.122-126, 2000
16. Corson, S., R., Flowers, A., G., Morgan, D., G., Richardson, J., D.; Manipulation of paper structure and printability by control of the fibrous elements; International Mechanical Pulping Conference, p.33-42, Québec, 2003
17. Wakelin, R., F.; Corson, S., R.; TMP long fibre fractionation with pressure screens; International Mechanical Pulping Conference, p.257-265, Ottawa, 1995
18. Braaten, K., R.; Wakelin, R., F.; Fiber length fractionation of TMP using pressure screens; TAPPI Journal, vol.82, n°6, p.129-135, 1999
19. Nelson, G., L.; – The screening quotient – a better index of screen performance; TAPPI Journal, vol.64, n°5, p.133-139, 1981
20. Wahren, D.; Fundamentals of suspension screening; Svensk Papperstidning, n°18, p.539-546, 1979
21. Gooding, R., W.; Kerekes, J.; Derivation of Performance Equations for Solid-Solid Screens; The Canadian Journal of chemical Engineering, vol.67, n°10, p.801-805, 1989
22. Gooding, R., W.; Kerekes, J.; Consistency changes caused by pulp screening; TAPPI Journal, Vol.75, n°11, p.109-118, 1992
23. Wakelin, R., F.; Prediction of fractionation efficiency for pressure screens; APPITA Journal, vol. 50, n°4, p. 295-300, 1997
24. Partanen, K., Koivo, H.; On-Line Freeness Control at a Thermomechanical Pulping Plant; ISA International Conference, Advance Instrumentation, Part 2, p. 877-884, Philadelphia, 1984
25. Qian, X; Modeling and Dynamic Simulation of a CTMP Plant; Ph. D. Thesis, The University of British Columbia (Canada), 162 pages, 1997
26. Roux, J., -C., Joris, G., Caucal, G.; Raffinage séparé ou en mélange, quels outils à mettre en œuvre pour optimiser la composition fibreuse, réduire la consommation énergétique pour la régularité de la qualité; Revue ATIP, vol.56, n°3, p.9-16, 2002

OPTIMIZATION OF TMP PROCESS AND PULP QUALITY BY MEANS OF PRIMARY PULP FRACTIONATION

Alexandre Ferluc^{1,2}, Robert Lanouette^{1,3}, Jean-Pierre Bousquet⁴, Sylvain Bussière⁵

¹ CIPP, C.P.550, Trois-Rivières, QC, Canada, G9A 5H7

² Conference speaker

³ Corresponding author: robert.lanouette@cipp.ca

⁴ Metso Paper Inc.

⁵ Papier Masson Inc.

ABSTRACT

This paper presents a study of TMP fractionation to improve energy consumption and pulp quality. We sampled the pulp in the primary refiner blow line and fractionated it with sequences of pressure screens. The fractions are refined at high consistency or at low consistency. The quality of the recombined pulp is related to the fractionation strategy and the refining process. Screen baskets with small apertures have the ability to separate fibres efficiently. Higher aperture dimensions provide smaller reject rate and lower fractionation on the base of fibre length. The fractionation is also influenced by fibres wall thickness.

RÉSUMÉ

Cet article présente une étude de fractionnement de pâte thermomécanique pour améliorer la qualité de la pâte et la consommation d'énergie. La pâte est échantillonnée dans la ligne de soufflage du raffineur primaire et fractionnée par des séquences de tamis pressurisés. Les fractions sont raffinées à haute ou à basse consistance. La qualité de la pâte recombinaison est reliée à la stratégie de fractionnement et au procédé de raffinage. Les paniers avec de petites ouvertures permettent de séparer efficacement les fibres. Des ouvertures plus grandes offrent un taux de rejets plus faible et un fractionnement moindre sur la base de la longueur des fibres. Le fractionnement est également influencé par l'épaisseur de paroi des fibres.

INTRODUCTION

The developments of the defibrating and refining processes over the years have permitted to improve the mechanical pulps either in quality or in energy consumption. There is however an increasing request for better quality mechanical pulps in order to meet the increasing exigencies on the quality and on the costs of the papers made with these pulps. The improvements also allow the use of these pulps as a replacement of more expensive chemical pulp in quality demanding products [1, 2]. Besides, as in many other industries, the pressure for environmental protection also requires a mechanism of constant improvement of the processes directed towards the reduction of the pollutant emissions and the energy consumption. Therefore, new orientations are required to produce better mechanical pulps at

lower cost. Extensive investigations have been done in order to increase the quality of mechanical pulps by the mean of fractionation. Most of them have been carried out on fully refined pulp (i.e. posterior to secondary high consistency refining stage) and using different fractionation devices like spray disk [3], flotation cells [4, 5, 6] or even a tube [7], but mainly hydrocyclones [8, 9, 10, 11] and pressure screens [12, 13, 14, 15, 16].

The quality of the fibres, which is deeply related to their morphological properties, is very important for the quality of the final sheet of paper. The long fibres create the main fibre network upon what the shorter fibres and fines will be retained and agglomerate to form the sheet. The mechanical resistance of the sheet is closely related to this long fibres network. But in the same time, the long fibres are coarser, less flexible and prone to increase the roughness of the sheet, even more when the sheet is printed with water-based ink or offset where water can break bonds between fibres, release tensions created during the drying and calendering, and generate swelling of the fibres. It is interesting to develop the bonding ability of the long fibres what will strengthen the network and, in the same time, increase the flexibility of the fibres and reduce the roughness of the sheet [17]. The long fibres have also a higher wall thickness which makes them have a smaller specific surface than that of thin wall fibres [18]. This is especially true for the earlywood fibres. The short fibres in turn fill the long fibres network, consolidate the whole sheet and create a suitable surface for printing. The fines complete this structure contributing to opacity, roughness and porosity and thus the ink-paper relationship. The role of the fines must be distinguished whether the fines are primary fines or secondary fines [19]. In the first case fines are produced during the first refining stage. They are mainly originated by the delaminating of the primary wall, with a flake-like shape and contain a high amount of lignin. Secondary fines are generated in posterior refining stage by the delaminating of the secondary wall. Because of their higher content of cellulose and fibrillar shape, they have better bonding ability than primary fines but less contribution to opacity. All those aspects validate a process with a specific approach for refining separately each type of fibres.

METHODOLOGY

The purpose of this study is to propose a new method for enhancing thermomechanical pulp by the mean of the refining of selective fractions of primary refining stage pulp and their recombination. The first step of this study is the fractionation of the pulp with small apertures baskets followed by the refining of the fractions with several processes and finally the analysis of the recombined pulp properties.

The pulp is originated from Papier Masson Inc. It is obtained from a mix of sawmill chips consisting mainly of black spruce, white spruce and balsam fir. The pulp is sampled in the blow-line of the primary high consistency refiner and shipped to CIPP (Centre Intégré en Pâtes et Papiers) pilot plant. It is then diluted at 4% consistency and maintained at a temperature of 75°C for at least 45 min to remove the latency

prior to the trials. The sheets properties have not been measured because of the high freeness. But to establish a reference, the pulp is refined in one stage at high consistency simulating the second refining stage of a TMP process.

The pulp is fractionated with a Black Clawson model 8P pressure screen equipped with a two foils open rotor rotating at a tangential speed of 20 m/s. The fractionation process is composed by a four-stage cascade (Figure 1), the first two stages with a 0.25 mm smooth holes basket, and the last two stages with a 0.10 mm low profile slotted basket. Each stage is performed in batch mode at CIPP pilot plant. The operational parameters are chosen in order to optimize the fractionation effect, according to literature [20, 21, 14] and preliminary trials [22]. Feed consistency is 1% for all stages, volumetric reject rates is 25% for the 0.25 mm drilled basket and 50% for the 0.10 mm slotted basket.

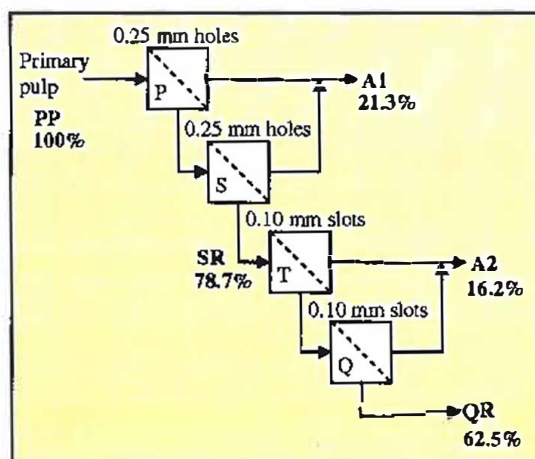


Figure 1. 4-stage cascade fractionation process (mass ratios used for pulp recombination are indicated for each fractions)

Several fractions are obtained: the accepted of the first two stages are mixed into a fraction of short fibres A1, the reject of the secondary screens SR and two long fractions A2 and QR, respectively the accepted of the last two screens and the final reject.

Wall-thickness measurements on the fibres are provided by the MWT device (Morphi Wall-Thickness, Techpap/CTP, France). This device takes a sample of fibres from a diluted suspension of pulp (3 mg/L) and deposits it on a slotted plate (slot width about 0.06 mm). Then a micrograph of pulp is taken by means of a microscope and a digital camera. An image analysis algorithm measures the fibres wall thickness on each image. Series of 40 to 50 pictures are analysed until stabilisation of the average wall thickness. For better assessment, the pulp is splitted into the Bauer McNett fractions and measurements are carried out on fractions R28, R48, R100 and R200. R14 fraction isn't measured with the MWT because the long fibres and shives could plug the device. Additional analysis is made on the pictures to assess earlywood/latewood ratio, width and wall-thickness of early-

and latewood fibres. The fibres are classified into earlywood fibres and latewood fibres according to their morphological characteristics such as width, wall thickness and pits (amount and size). The transition fibres have been classified into one or the other category according to the most seemingly characteristics. In order to convert number LW/EW ratios into weight ratios, an average Z parameter value is assumed for each type of fibre to characterize their cross-sectional fibre wall shape. In this case, we used 39 for EW and 91 for LW. SEM analysis of the primary pulp fibres provides these values by embedding aligned fibres into Spurr resin [23, 24, 25].

After fractionation, we refined the fractions with the Metso CD-300 refiner. The short fraction A1 can not be refined because of its low freeness. The long fractions are refined refiner at low consistency or at high consistency. High consistency refining is conducted at 20-24% consistency and atmospheric pressure, in one step or two steps and changing the plate gap to control the amount of energy applied to the pulp. Low consistency refining is conducted in the same refiner, at 6 to 8% consistency, with constant plate gap between the plates. Increasing amounts of energy are applied to the pulp by several passes through the refiner. Several pulps are obtained in a range of 200 to 50 mL CSF.

The refined fractions are finally recombined together to recreate to original pulp i.e. we mixed the fractions according to the fractionation mass ratios. Those ratios are indicated in figure 1. Several mixes are selected with freeness close to 100 mL CSF and the properties are measured on pulp and handsheets according to Canadian standards. We calculated the properties of the mixes that are not prepared with a mathematical model based on equation 1 and equation 2 where E_i , CSF_i and TI_i are the refining specific energy, the Canadian standard freeness and the tensile index respectively for each fraction and where a_i are the mass ratios for each fraction. The indexes 1 and 2 stands for fraction QR (or SR) and A2. A1 fraction properties are not taken into account in the model because this fraction is not refined and thus, its properties are constant.

$$Y = K Y_1^{a_1} Y_2^{a_2} \quad \text{Equation 1}$$

$$Y_i = E_i^{a_i} CSF_i^{b_i} TI_i^{c_i} \quad \text{Equation 2}$$

DISCUSSION

Fractionation

The fractionation process produces fractions separated primarily on the base of fibre length as assessed by the Bauer McNett classifications of the accepted A1 and A2, the secondary screen rejects SR (Figure 2) and the quaternary screen rejects QR (Figure 3). Because of the small apertures, both baskets provide a strong barrier effect against the long fibres, which is traduced by high mass reject rate (RR_m) and thickening factor (RTF) (Table I) and also high reject efficiencies for the long fibres (Figure 4). These differences are also reflected in the freeness of each fraction (Figure 5). The low freeness of the A1 fraction reflects the strong barrier effect of the 0.25 mm diameter holes.

Table I. Fractionation parameters

| Stage | RR ₁ , % | RR ₂ , % | RTF | V _{av} m/s ⁽¹⁾ |
|-------|---------------------|---------------------|------|------------------------------------|
| P | 27.0 | 85.9 | 3.19 | 0.212 |
| S | 25.8 | 91.6 | 3.55 | 0.216 |
| T | 50.5 | 89.7 | 1.78 | 0.987 |
| Q | 48.4 | 88.6 | 1.83 | 1.06 |

⁽¹⁾ Flow average velocity through the apertures

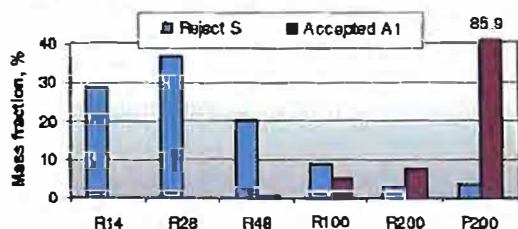


Figure 2. Comparison between secondary screen reject and accepted from the first two screens (holes 0.25 mm)

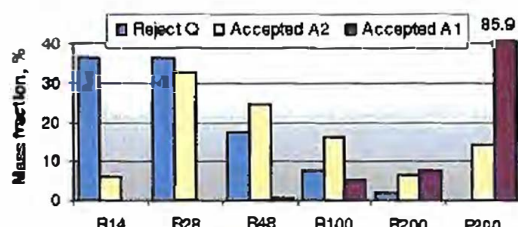


Figure 3. Comparison between final reject and mixed accepted from the first two screens (holes 0.25 mm) and from the last two screens (slots 0.10 mm)

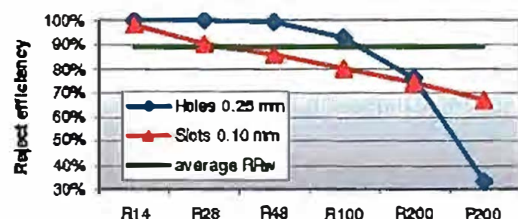


Figure 4. Bauer McNett fractions reject efficiency for each basket compared to average mass reject rate

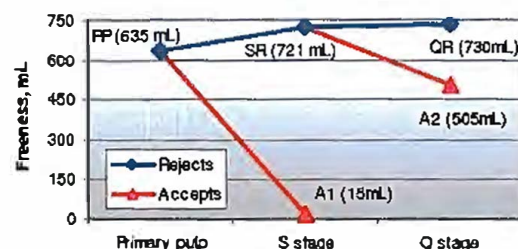


Figure 5. Canadian Standard Freeness of the primary pulp and pulp fractions

Compared with the mass reject rate which actually represents the reject efficiency of the whole pulp, the reject efficiency of each fraction allows to determine whether a fraction is preferentially separated towards the accept flow or the reject flow (Figure 4). The basket with 0.25 mm diameter holes rejects the long fractions R14, R28 and R48. The high values of reject efficiency for these fractions show again the barrier effect while the lower value for the R100 fraction indicates a probabilistic fractionation effect, even if this fraction is also preferentially rejected by this basket. In the case of the slotted basket, probabilistic fractionation already happens with fraction R28.

The increase of the latewood fibres weight ratios in the rejects fractions indicates that the pressure screens also provide fractionation based on fibre wall-thickness (Figure 6). Interestingly, the variations of coarseness measurement on pulp fractions are well correlated by the latewood weight ratios (Figure 7). In the case of the 0.25 mm drilled basket, this effect is nevertheless quite negligible because of the barrier effect that prevents the long fibres to pass through the apertures. However, it is important to notice that latewood fibres represent only about 27% of the weight of the primary pulp [26, 27, 28, 29, 30], which is an indication that the R14, R28 and R48 fractions contains most of the latewood fibres. Therefore fractionating on the base of length produces by itself an increase of latewood fibres in the reject. In the case of the 0.10 mm slotted basket, the same effect also occurs but, because of the higher probabilistic effect for the long fibres, it allows to obtain enriched fractions in latewood in the reject (QR) and enriched earlywood in the accepted (A2) that can be refined separately. This is most probably related with the flexibility of the fibres that varies significantly with the fibre wall-thickness. The earlywood fibres present higher ability to conform their shape to the openings. Yu *et al.* [31] mentioned that flexibility is a important factor in several mechanisms involved in the passage of fibres through the apertures such as stapling in slotted baskets and floccs hanging in perforated smooth baskets. Table II below shows the respective distributions of earlywood and latewood in each fraction through the fractionation process.

Table II. Mass balance of latewood/earlywood fibres for the R28, R48 and R100 fractions

| | | PP | SR | OR | A1 | A2 | MBE ⁽¹⁾ |
|------|----|----------------|----------------|---------------|--------------|--------------|--------------------|
| R28 | LW | 13.7 (100%) | 13.7 (100%) | 11.7 (86%) | 0.0 (0%) | 1.9 (14%) | -3.0% |
| | EW | 18.3 (100%) | 17.9 (98%) | 14.5 (79%) | 0.4 (2%) | 4.6 (25%) | 0.3% |
| R48 | LW | 5.7 (100%) | 5.5 (96%) | 4.2 (74%) | 0.2 (4%) | 1.0 (18%) | -2.5% |
| | EW | 11.5 (100%) | 11.0 (96%) | 7.9 (69%) | 0.4 (4%) | 3.8 (33%) | 2.2% |
| R100 | LW | 2.2 (100%) | 2.0 (93%) | 1.5 (71%) | 0.2 (7%) | 0.5 (24%) | -3.1% |
| | EW | 6.6 (100%) | 5.3 (80%) | 3.5 (53%) | 1.3 (20%) | 2.2 (34%) | -1.4% |

⁽¹⁾ Mass Balance Error for the whole fractionation process

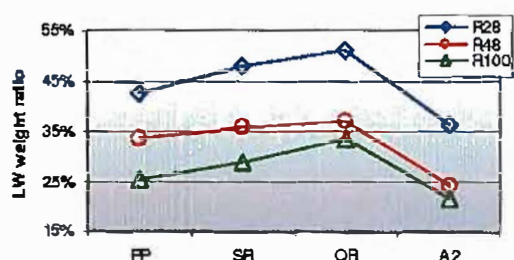


Figure 6. Latewood weight ratios in Bauer McNett fractions for primary pulp and fractions

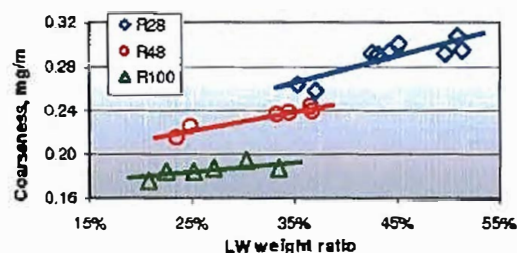


Figure 7. Pulp coarseness as a function of latewood weight ratios measured on Bauer McNett fractions

Recombined pulp

Two series of recombined pulps are discussed below: the first series is the recombination of the pulp with the rejects from secondary screen (SR) and the accepted from the first two screens (A1), the second series is the recombination with the final rejects QR, the accepted A1 and the accepted A2. In all figures presented below, refining specific energy refers to energy applied to pulp during the second refining stage. Table III, Table IV and Table V indicate the captions used in figures.

First case: two fractions separated with 0.25 holes baskets

Low consistency refining of the long fraction leads to recombined pulp of drastically reduced mechanical properties. This is probably related with the higher cutting effect of low consistency refining compared to high consistency refining. Zha *et al.* [32] also observe that cell wall-thickness reduction is lower during low consistency refining. This seems to indicate that low consistency refining have a smaller cell wall delaminating effect and produces pulp with lower fibrillar fines content and bonding ability.

High consistency refining, on the contrary, allow preserving mechanical properties, especially in the case of refining in two stages. In the case of tensile energy absorption (Figure 9) and burst index (Figure 10), it is possible to obtain an increase while tensile (Figure 11) and tear indexes (Figure 12) remain similar than that of the whole pulp.

The refining in one stage produces similar values of TEA than the reference pulp but lower values for the other mechanical properties such as burst, tensile and tear. The scattering coefficient shows similar development with refining in one

stage or in two stages (Figure 13). The values obtained for the recombined pulps are in all cases higher than that of the whole pulp, including in the case of low consistency refining. This is most probably related with the fact that primary fines are not refined in the recombined pulps, thus providing higher diffusion effect. This is also supported by the brightness where recombined pulp show lower brightness (average 49% ISO) than the whole refined pulp (52% ISO). Long fibres development seems therefore to be more sensitive to refining when short fibres and fines are removed. Less energy is required to meet same properties. The energy saving, considering 2-stage high consistency refining, can be estimated to 26% of the secondary stage refining energy (Figure 8).

Table III. Captions used in figure 8 to figure 13

| Description | Symbols | | Refining process |
|------------------------|-------------------|------------------|------------------------------|
| | Validation points | Predictive curve | |
| Reference (whole pulp) | ● | — | 1 stage high consistency |
| SR@HC2 | ◆ | — | 2 stage high consistency |
| SR@HC1 | ▲ | — | 1 stage high consistency |
| SR@LC | ■ | — | Low consistency (multi pass) |

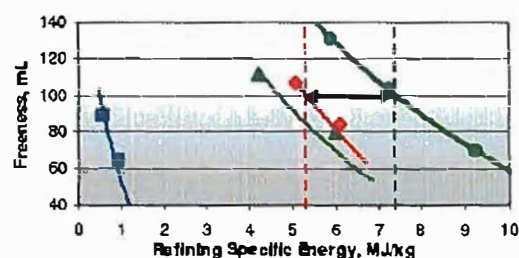


Figure 8. Freeness of recombined pulps compared to whole refined pulp as a function of specific energy

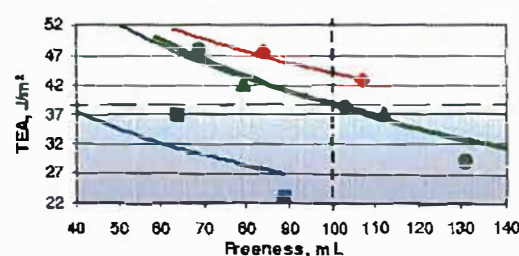


Figure 9. Tensile energy absorption of recombined pulps compared to whole refined pulp as a function of freeness

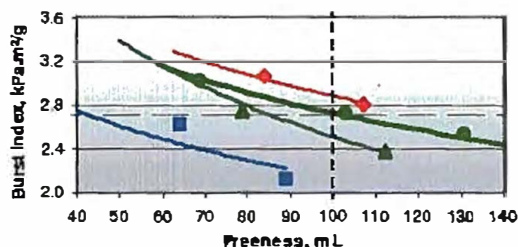


Figure 10. Burst index of recombined pulps compared to whole refined pulp as a function of freeness

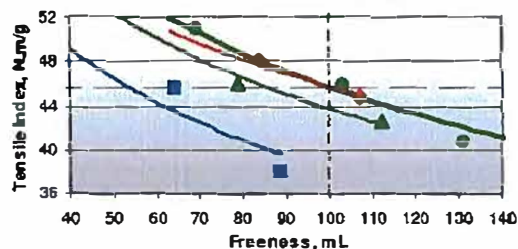


Figure 11. Tensile index of recombined pulps compared to whole refined pulp as a function of freeness

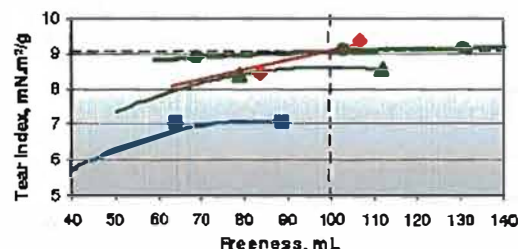


Figure 12. Tear index of recombined pulps compared to whole refined pulp as a function of freeness

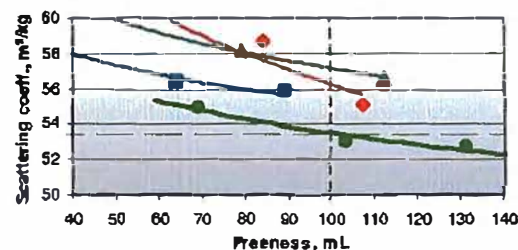


Figure 13. Scattering coefficient of recombined pulps compared to whole refined pulp as a function of freeness

Second case: three fractions

In this last case, the rejects from secondary screen have been splitted into a latewood enriched fraction (QR) and an earlywood enriched fraction (A2). Similar observations than in

the first case can be drawn: low consistency tends to produce lower properties and, with high consistency refining, similar properties than that of the whole refined pulp can be obtained. Some high consistency trials refined in two stages present value of tensile index similar to that of whole refined pulp (Figure 15) and an optimum of TEA is also observable (Figure 14). However, this optimum of TEA, about 4.2% higher than reference pulp at 100 mL CSF, corresponds to a loss of tensile index of about 5.5% (Figure 15), while tensile index was preserved in the first case and TEA was 14.2% higher. So there is a trade-off to be made between the pulp properties that need to be improved, which clearly depends on each mill strategy and needs.

It is interesting to notice that, when refined at high consistency, fraction A2 has been refined in one stage only. Experimental conditions didn't allow to perform a 2-stage high consistency refining of that fraction, nevertheless pulp with QR refined the same way could be expected to produce recombined pulp with similar properties than that where SR were refined at high consistency in 2 stages. As shown in figure 17, recombined pulps where higher amount of specific energy is applied at high consistency in 2 stages, and lower amount in fraction A2 at high consistency in 1 stage, have TEA values close to that of recombined pulp where SR is refined at high consistency in 2 stages. It means that, when fraction QR is refined at high consistency in two stages and A2 in one stage only, lower energy consumption is made than for the SR fraction for the same level of development of the recombined pulp in terms of freeness. Thus, considering pulp properties, additional energy saving is possible compared to first case. This energy saving is even greater when considering low consistency refining for fraction A2 (Figure 16) but some strength loss may result. Similar behaviours can also be observed between recombined pulps obtained with SR refined at high consistency in 1 stage and recombined pulps obtained with QR refined at high consistency in 2 stages and A2 with low amount of specific energy at low consistency (high HC2/LC) or A2 with high amount of specific energy at high consistency in 1 stage (low HC2/HC). Table VI proposes several strategies to meet different targets of energy savings and pulp quality. A detailed quantitative analysis is also provided by Zha *et al.* [32].

Table IV. Captions used in figure 14 and figure 15

| Description | Symbols | | Refining process | |
|-------------|-------------------|------------------|---|------------------------------|
| | Validation points | Predictive curve | QR | A2 |
| Reference | ● | — | 1 stage high consistency (whole refined primary pulp) | |
| HC2/HC | ◆ | — | 2-stage high consistency | 1-stage high consistency |
| HC2/LC | ◇ | - - - | | Low consistency (multi-pass) |
| HC1/HC | ▲ | — | 1-stage high consistency | 1-stage high consistency |
| HC1/LC | △ | - - - | | Low consistency (multi-pass) |
| LC/HC | ■ | — | Low consistency (multi-pass) | 1 stage high consistency |
| LC/LC | □ | - - - | | Low consistency (multi-pass) |

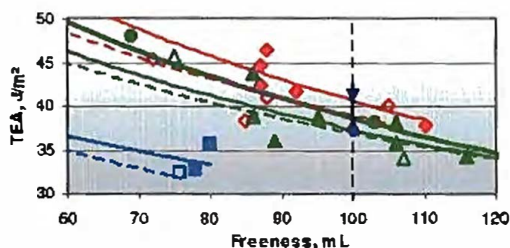


Figure 14. Tensile energy absorption of recombined pulps compared to whole refined pulp as a function of freeness

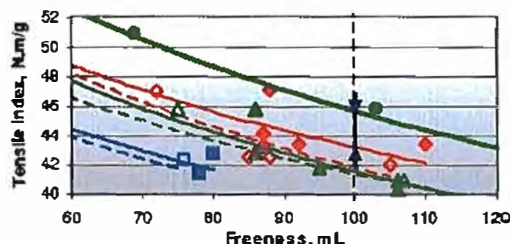


Figure 15. Tensile index of recombined pulps compared to whole refined pulp as a function of freeness

Table V. Captions used in figure 16 and figure 17

| Description | Symbols | | Refining process |
|-------------|-----------------|----------------|---|
| | Validat. points | Predict. curve | |
| Reference | ● | — | 1 stage high consistency (whole refined primary pulp) |
| SR@HC2 | ▲ | — | SR 2 stage high consistency |
| SR@HC1 | △ | - - - | SR 1 stage high consistency |
| QR high HC2 | ● | — | QR higher energy 2-stage high consistency |
| A2 low HC | ● | — | A2 lower energy 1-stage high consistency |
| QR low HC2 | ◇ | - - - | QR lower energy 2-stage high consistency |
| A2 high HC | ◇ | - - - | A2 higher energy 1-stage high consistency |
| QR high HC2 | ■ | — | QR higher energy 2-stage high consistency |
| A2 low LC | ■ | — | A2 lower energy low consistency |
| QR low HC2 | □ | - - - | QR lower energy 2-stage high consistency |
| A2 high LC | □ | - - - | A2 higher energy low consistency |

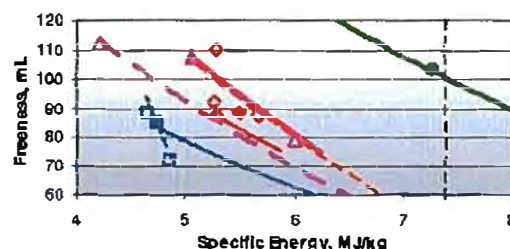


Figure 16. Freeness as a function of specific energy for recombined pulps where long fraction QR is refined at high consistency in 2 stages with higher and lower amounts of specific energy

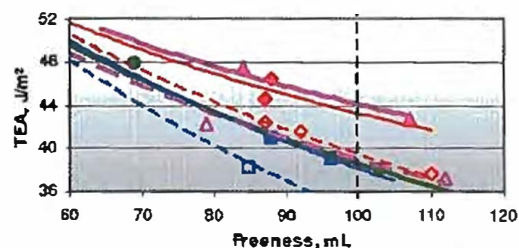


Figure 17. Tensile energy absorption as a function of freeness for recombined pulps where long fraction QR is refined at high consistency in 2 stages with higher and lower amounts of specific energy

CONCLUSIONS

Both types of baskets provide mainly length-based fractionation but the slotted basket is also able to fractionate according to fibre flexibility and coarseness. The proposed process separates fines and short fibres with the first two screens and increase coarse fibres amount in final reject with the last two screens. Small apertures provide an efficient way to separate the fibres according to their length but at the cost of high reject rate. Cell wall-thickness is also affected by fractionation with bigger apertures such as 0.10 mm slots which suggests that length-based fractionation, earlywood/latewood fractionation and operational conditions are a trade-off based on aperture size. Better operational conditions could probably be found with bigger holes such as 0.4 to 0.6 mm diameter. Such size would have lower barrier effect on R48 and R100 fibres allowing lower mass reject rate and thickening factor at same volumetric reject rate and therefore, reducing the risk of plugging, which is an important consideration for safe industrial operating conditions.

Removing fines and short fibres allows saving energy. High consistency refining is required to keep pulp properties at same freeness showing that long fibres are more sensitive to refining intensity when refined without fines and short fibres. Lower freeness could also be considered as a way to preserved mechanical properties such as tensile and tear and to produce pulps suitable for higher-value grades such as LWC or SC papers.

Pulp properties improvements and energy savings can be obtained with this kind of process as shown in Table VI below. It may also provide high flexibility allowing specific energy balance between coarse and fine fractions to meet specific quality or energy consumption requirements. But in the case of strength properties, energy savings may result in a loss. Interestingly, primary pulp fractionation doesn't require additional equipment or higher power consumption due to fractionation as far as this process doesn't need pulp screening and reject refining after the main line.

Such process could also be of interest to apply specific chemical treatment to fractions. For instance, coarse fibres have been reported to require smaller bleaching chemical consumption than thin fibres [33, 34].

Table VI. Energy savings and pulp quality obtained from different strategies of primary pulp fractionation

| | | Ref. | SR HC2 | QR HC2 A2 HC | QR HC2 A2 LC | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Freeeness | mL | 100 | 100 | 100 | 80 | 100 | 80 |
| Specific energy ⁽¹⁾ | MJ/kg | 7.40 | 5.32 (-28%) | 5.03 (-29%) | 5.91 (-20%) | 4.18 (-44%) | 5.04 (-32%) |
| Tensile index | N.m/g | 45.6 | 45.7 (0.1%) | 43.2 (-5.4%) | 45.6 (-0.1%) | 41.7 (-8.5%) | 44.5 (-2.4%) |
| TBA | J/m ² | 38.6 | 44.0 (14%) | 40.5 (5.1%) | 45.7 (18.4%) | 38.7 (0.5%) | 42.9 (11%) |
| Tear index | mN.m ² /g | 9.08 | 9.09 (0.0%) | 9.15 (0.7%) | 8.81 (-5.9%) | 8.84 (-2.7%) | 8.47 (-6.7%) |
| Burst index | kPa.m ² /g | 2.72 | 2.88 (5.7%) | 2.70 (-0.9%) | 2.88 (3.0%) | 2.51 (-7.8%) | 2.74 (0.6%) |
| Scattering Coeff. | m ² /kg | 53.5 | 56.2 (5.2%) | 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 refined pulp at 100 mL CSF)

ACKNOWLEDGEMENTS

We gracefully acknowledge the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) for its financial support. Our thanks also go to Alain Marchand, Pierre Gendron and Gaston Michaud for their help at CIPP pilot plants and laboratories.

REFERENCE

- HÖGLUND, H., Mechanical pulp fibres for new and improved paper grades, 7th International Conference On New Available Technologies, p.158-163, Stockholm, 2002
- GRANFELDT, T., The Development of Emerging Markets and Use of Hardwoods, International Mechanical Pulping Conference, 5 pages, Oslo, 2005
- BREW, M., A., BENNETT, S., SCHMIDT, J. R., Mechanical Pulp Fractionation with a Spray Disk Filter, Canadian Patent n°2,108,321, Issued May 11th, 1994
- BACKMAN, J., KEMPE, A., RYDQVIST, J., Particle removal by centrifugal cleaning and washing, Developments in Wastepaper Technology, 22 pages, March 1993
- LI, W., Fractionation of Softwood TMP, M. Sc. thesis, University of Alberta (Canada), 112 pages, 2002
- ECKERT, W., F., AFACAN, A., MASLIYAH, J., H., Fractionation of wood pulps by continuous flotation, TAPPI Journal, vol. 83, n°8, p.93, 2000
- KROGERUS, B., FAGERHOLM, K., Analytical fractionation of pulps by tube flow, Paperi Ja Puu – Paper and Timber, vol.85, n°4, p.209-213, 2003
- GAVELIN, G., Fractionation with hydrocyclones, TAPPI Pulping Conference Proceedings, p.753-774, Orlando, 1991
- REHMAT, T., BRANION, R., M. R., Fibre fractionation in hydrocyclones, 81st Annual Meeting, Technical section B, CPPA, p.105-125, 1995
- KURE, K.,-A., DAHLQVIST, G., EKSTRÖM, J., HELLE, T., Hydrocyclone separation and reject refining of thick-walled mechanical pulp fibres, Nordic Pulp and Paper Research Journal, vol.14, n°2, p.100-110, 1999
- HO, S.,-L., REHMAT, T., BRANION, R., Fibre fractionation in hydrocyclones, 86th PAPTAC Annual Meeting, Preprints C, p.193-215, 2003
- OLSON, J., Fibre Length Fractionation Caused by Pulp Screening. Slotted Screen Plates, Journal of Pulp and Paper Science, vol.27, n°8, p.255-261, 2001
- OLSON, J., ALLISON, B., ROBERTS, N., Fibre Length Fractionation Caused by Pulp Screening. Smooth-Hole Screen Plates, Journal of Pulp and Paper Science, vol.26, n°1, p.12-16, 2000
- JULIEN SAINT AMAND, F., PERRIN, B., Characterization and Simulation of Fibre Separation in Screen and Cleaners, International Mechanical Pulping Conference, p.245-257, Québec, 2003
- WAKELIN, R., F., PAUL, T., S., Effects of some process variables on screen fractionator performance, APPITA Journal, vol. 54, n° 4, p. 357-363, 2001
- ÄMMÄLÄ, A., JUSSILA, T., NINIMÄKI, J., On the explanatory nature of reject rates for the fractionation of pulp with slotted pressure screens, Paperi Ja Puu – Paper and Timber, vol.83, n°2, p.128-131, 2001
- CORSON, S., R., Aspect of mechanical pulp fibre separation and development in a disc refiner, Paperi Ja Puu – Paper and Timber, n°7, p.801-814, 1989
- BRAATEN, K., R., Fibre and Fibril Properties Versus Light Scattering and Surface Smoothness for Mechanical Pulps, Pulp and paper Canada, vol.101, n°5, p.122-126, 2000
- CORSON, S., R., FLOWERS, A., G., MORGAN, D., G., RICHARDSON, J., D., Manipulation of paper structure and printability by control of the fibrous elements, International Mechanical Pulping Conference, p.33-42, Québec, 2003
- WAKELIN, R., F.; CORSON, S., R., TMP long fibre fractionation with pressure screens, International Mechanical Pulping Conference, p.257-265, Ottawa, 1995
- BRAATEN, K., R.; WAKELIN, R., F.; Fiber length fractionation of TMP using pressure screens; TAPPI Journal, vol.82, n°6, p.129-135, 1999

22. FERLUC, A., LANOUE, R., BOUSQUET, J.-P., BUSSIÈRE, S.; Optimum Refining of TMP Pulp by Fractionation after the First Refining Stage; International Mechanical Pulping Conference, 11 pages, Minneapolis, 2007
23. LAW, K., N., BALATINECZ, J., J., GARCEAU, J., J., A technique for making oriented fiber sheet, TAPPI Journal, vol.557, n°12, p.153-154, 1974
24. DYKSTRA, M., J., A Manual of Applied technical for Biological Electron Microscopy, p.38-42, New York : Plenum Press, 257 pages, 1993
25. WILLIAMS, G., J., DRUMMOND, J., G., Preparation of large sections for the microscopical study of paper structure, TAPPI Papermakers Conference, p.517-523, San Francisco, 1994
26. KOUBAA, A., ZHANG, S., Y., ISABEL, N., BEAULIEU, J., BOUSQUET, J., Phenotypic correlations between juvenile-mature wood density and growth in black spruce, Journal of Wood and Fiber Science, vol.32, n°1, p.61-71, 2000
27. KOUBAA, A., ISABEL, N., ZHANG, S., Y., BEAULIEU, J., BOUSQUET, J., Transition from juvenile to mature wood in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.), Journal of Wood and Fiber Science, vol.37, n°3, p.445-455, 2005
28. WEHNER, K., Influence of seed provenance on specific gravity and radial growth increment of *Picea glauca*, M. Sc. thesis, Michigan State University (USA), 110 pages, 2006
29. KOGA, S., ZHANG, S., Y., BÉGIN, J., Effects of precommercial thinning on annual radial growth and wood density in balsam fir (*Abies balsamea*), Journal of Wood and Fiber Science, vol.34, n°4, p.625-640, 2002
30. KOGA, S., ZHANG, S., Y., Relationships between wood density and annual growth rate components in balsam fir (*Abies balsamea*), Journal of Wood and Fiber Science, vol.34, n°1, p.146-157, 2002
31. YU, C., J., DEFOE, R., J., Fundamental Study of screening hydraulics, Part 2: Fiber orientation in the feed side of a screen basket, TAPPI Journal, vol.77, n°9, p.119-124, 1994
32. ZHA, Q., LANOUE, R., LAW, K.-N., BOUSQUET, J.-P., BUSSIÈRE, S., Refining of Long Fibre Fractions after Fractionation, 94th PAPTAC Annual Meeting, 2008
33. HAUGAN, M., GREGERSEN, O., Fractionating – A Way to Save Bleaching Chemicals ?, Journal of Pulp and Paper Science, vol.33, n°3, p.121-124, 2007
34. BRÄNNVALL, E., TORMUND, D., BÄCKSTRÖM, M., BERGSTRÖM, J., TUBEK-LINDBLOM, A., Separate Bleaching of Pulp Fractions Enriched in Earlywood and Latewood Fibres, Journal of Wood Chemistry and Technology, vol.27, n°9 p.99-112, 2007