

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

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

COMME EXIGENCE PARTIELLE DU
DOCTORAT EN GÉNIE PAPETIER

PAR
GRACIELA BEATRIZ GAVAZZO

« VALORISATION DE LA PÂTE MOULÉE »

JUILLET 2003

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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

Remerciements

Je tiens à souligner la profonde reconnaissance que j'ai envers mes directeurs de recherche, les professeurs Robert Lanouette et Jacques L. Valade, qui ont supervisé cette thèse. Ce travail n'aurait pu être accompli sans le support, la confiance et l'amitié qu'ils m'ont témoignés pendant ce travail.

Je tiens aussi à remercier la Dre. Julie Giasson, le Dr. Christian Lauzier, M. Sylvain Laramée et M. Simon Gosselin, ainsi que l'entreprise Cascades Kingsey Falls, pour leur précieuse collaboration dans le développement de ce travail.

Mes remerciements vont encore à M. Alain Marchand, à M. Robert Drolet et à toute l'équipe de chercheurs, techniciens et étudiants au Centre de Recherche en Pâtes et Papiers de l'Université du Québec à Trois-Rivières.

J'exprime enfin ma gratitude à ceux qui ont apporté une contribution financière à mes études : l'Université du Québec à Trois-Rivières, l'Universidad Nacional de Misiones et le Fondo de Mejoramiento Universitario (FOMEC).

Juillet 2003

RÉSUMÉ

La pâte moulée, connue depuis les années 30, se présente à notre époque comme un produit de substitution au plastique moulé sous vide ou polystyrène expansé. Cependant, l'évaluation de la qualité des produits moulés utilisés en emballage et de leur procédé d'obtention est presque inconnue. En vue de cette situation, nous proposons une étude de base qui relie la matière première, les variables de préparation de la pâte et de moulage de même que la qualité du produit fini. Ainsi, les objectifs principaux du travail ont été d'obtenir les relations qui existent entre trois groupes de variables servant à décrire une opération de fabrication de pâte moulée. Ces groupes sont : les caractéristiques et les propriétés de la fibre et de la pâte, les propriétés des caissettes moulées et les variables du procédé. Comme objectifs secondaires, le travail porte sur l'identification des variables les plus importantes dans un procédé industriel de référence et de la reproduction à l'échelle du laboratoire du procédé de moulage. Le travail a été exécuté en phases consécutives. Tout au long du travail les pâtes ont été évaluées en suivant la composition et les caractéristiques fibreuses, le drainage et les propriétés de résistance physique (feuilles de 1,2 et de 3 grammes, formées avec recirculation des eaux blanches). La composition fibreuse des pâtes et papiers a été estimée en microscopie. Les produits moulés ont été évalués en mesurant leur résistance à l'écrasement. La teneur en matières solides, dissoutes et inorganiques des eaux blanches a aussi été évaluée. Quant à l'exploitation des résultats, différentes techniques d'analyse multivariable furent utilisées. Grâce à la collaboration

d'une usine de moulage, il nous a été permis d'initier le travail par la caractérisation de ses matières premières et de ses pâtes. Trois types de papiers furent recueillis : papier journal avant et post consommation et bottins téléphoniques. Après la mise en pâte de ces papiers, les pâtes furent évaluées seules, en mélange et en y ajoutant certains produits chimiques d'usage normal et ce dans le procédé industriel de référence. Les pâtes de papier journal possédaient les caractéristiques les moins favorables au développement des résistances physiques. L'évaluation des produits finaux et des pâtes de sept campagnes d'échantillonnage en usine (pâtes de cuvier de réserve et provenant de la désintégration de caissettes humides) nous indique que la matière première, les pâtes et les caissettes varient lors des différents échantillonnages. Par la suite, le développement d'un moule et d'une technique de moulage en laboratoire nous a permis de faire des essais à petite échelle. À l'aide d'un plan d'essai Plackett-Burman, nous avons étudié sept variables à deux niveaux, à savoir : quantité de papier journal post consommation, température, consistance et temps de désintégration, et charges de floculant, de coagulant et de conditionneur. Trois variables sont d'importance : le papier journal post consommation, lequel est le responsable des conditions moins favorables au développement des résistances physiques et à la rétention des matières solides; le floculant qui contrôle la rétention de matières en suspension et de cendres; et finalement la consistance de désintégration, laquelle influe négativement sur la morphologie des fibres. Des trois variables plus dominantes, deux furent sélectionnées pour étude postérieure. Ainsi, le floculant et le papier journal post consommation, conjointement avec la consistance de la

pâte en cuvier de tête de machine, ont été variés en usine (plan d'essais factoriel, 16 scénarios à deux niveaux). Les deux niveaux de papier journal (100 % et mélange 50/50 avec bottins téléphoniques) se comportent comme un système différent. Les conditions les moins favorables à une bonne qualité des eaux blanches sont obtenues avec la pâte 100 % journal. Cependant, cette pâte est la plus résistante et permet un contrôle plus efficace de la formation de caissettes autant en usine qu'en laboratoire. Le poids des caissettes détermine leur résistance et il est directement relié à la consistance de la pâte en tête de machine. Les caissettes de laboratoire reproduisent bien les caissettes d'usine. La résistance à la compression des caissettes peut être représentée par le rapport entre la charge, l'épaisseur des parois et le poids des caissettes. La dernière phase du travail fut la reproduction en laboratoire du comportement des variables d'importance observé en usine: quantité de papier journal post consommation, consistance de la pâte en cuvier de tête de machine et pourcentage de floculant du procédé industriel sur les propriétés des pâtes, des eaux et des caissettes. Il a été possible de reproduire le tout en laboratoire. Lors du bilan des travaux, des conclusions additionnelles sont tirées. La qualité des papiers journaux post consommation et des bottins téléphoniques n'est pas constante. Les variations des propriétés de la matière première peuvent être suivies par l'établissement d'indices de qualité. Dans le milieu industriel, ces indices pourraient être définis avec des propriétés nécessitant des temps courts de détermination et qui, en même temps, sont importantes pour prédire le comportement de la pâte et des additifs chimiques utilisés. En outre, le floculant (ou sa dose) n'agit pas adéquatement avec des pâtes chimiques avec un fort

contenu de feuillus. Les propriétés des feuilles de 3 grammes ne sont pas adéquates pour prédire la résistance des caissettes. La technique de moulage en laboratoire est appropriée pour reproduire les variables industrielles. Les caissettes et les eaux blanches de laboratoire suivent bien les résultats d'usine. Les méthodes d'analyse multivariable utilisées dans ce travail (analyse de composantes principales (PCA) et régression des moindres carrés partiels après projection sur une structure latente (PLS)) nous ont permis d'évaluer les nombreuses variables simultanément. Des recommandations pour des travaux futurs sont données.

Mots Clés : Pâtes moulées, papiers recyclés, qualité pâtes recyclées, moule prototype, rétention, eaux blanches, PLS, PCA.

Table des Matières

Remerciements	ii
RÉSUMÉ	iii
Table des Matières.....	vii
Liste des Figures.....	x
Liste des Tableaux	xvi
Liste des Équations.....	xix
Liste des Abréviations	xxi
Chapitre 1- Introduction.....	1
1.1. Objectifs.....	1
1.2. Approche de recherche	1
1.3. Organisation de la thèse.....	5
Chapitre 2- Revue de la littérature.....	8
2.1. Pâte moulée	8
2.1.1. Introduction	8
2.1.2. Matière première	12
2.1.3. Procédés d'obtention.....	12
Le moulage par succion	14
Brevets	16
2.1.4. Tests employés pour évaluer les produits d'emballage moulés	18
Résistance à la compression et taux d'élasticité	18
2.1.5. Les propriétés dynamiques	21
2.2. L'emballage	26
2.2.1. Concepts de base de l'emballage	26
2.2.2. Les dommages mécaniques	27
2.2.3. Le comportement à la compression des boîtes en carton	30
Résistance à la compression.....	30
Rigidité	33
Résistance à l'éclatement.....	33
Chapitre 3 - Étude de cas : compréhension des relations entre les variables du système.....	35
3.1. Objectifs.....	35
3.2. Les procédés d'analyse multivariable : analyse des composantes principales	35
3.3. Description du procédé de référence.....	42
3.4. Méthodologie	43

3.4.1. Structure d'échantillonnage	44
3.4.2. Évaluation des papiers recyclés	45
3.4.3. Évaluation des pâtes	52
3.4.4. Évaluation des caissettes	53
3.5. Résultats et discussion	56
3.5.1. Papiers recyclés	57
3.5.2. Première journée d'échantillonnage	63
3.5.3. Deuxième et troisième journées d'échantillonnage	67
3.6. Analyse microscopique des pâtes	72
3.7. Conclusions	75
 Chapitre 4 - Formation et essais de caissettes au laboratoire	80
4.1. Objectifs	80
4.2. Développement d'un moule de formation	80
4.3. Technique de moulage	83
 Chapitre 5 -Identification de facteurs principaux	88
5.1. Objectifs	88
5.2. Le design d'expériences par la méthode Plackett-Burman	88
5.3. Les procédés d'analyse multivariable : régression linéaire multiple	89
5.4. Les procédés d'analyse multivariable : méthode de régression des moindres carrés partiels après projection sur une structure latente	89
5.5. Méthodologie	96
5.5.1. Sélection de variables et leurs niveaux	96
5.5.2. Matières premières	98
5.5.3. Plan Plackett-Burman	99
5.6. Résultats et discussion	102
5.6.1. Évaluation des matières premières	102
5.6.2. Évaluation du plan Plackett-Burman	104
5.6.3. Analyse microscopique des pâtes	112
5.7. Conclusions	113
 Chapitre 6 - Essais à l'échelle industrielle	115
6.1. Introduction	115
6.2. Méthodologie	116
6.2.1. Essais en usine	116
6.2.2. Déterminations en laboratoire	118
6.3. Résultats et discussion	121
6.3.1. Pâtes de cuvier de réserve	121
6.3.2. Essai factoriel – Méthode PLS	134
6.4. Conclusions	167
 Chapitre 7 - Validation des résultats au laboratoire	170
7.1. Objectifs	170

7.2. Méthodologie	170
7.3. Résultats et discussion	173
7.3.1. Analyse PLS.....	173
7.3.2. Comparaison de moyennes	179
7.4. Conclusions	185
Chapitre 8 - Conclusion.....	186
8.1. Bilan de travaux.....	186
8.2. Conclusions	196
ANNEXE A Résultats chapitre 3.....	201
ANNEXE B Résultats chapitre 5.....	223
ANNEXE C Résultats chapitre 6.....	227
ANNEXE D Résultats chapitre 7.....	235
ANNEXE E Travail présenté au “CONGRESO IBEROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN EN CELULOSA Y PAPEL 2000”, 18 au 20 Octobre 2000, Iguazú, Misiones, Argentina.	239
BIBLIOGRAPHIE.....	255

Liste des Figures

FIGURE 1.1 Diagramme cause-effet des facteurs qui affectent le degré de résistance physique des caissettes en pâte moulée.	3
FIGURE 1.2 Organigramme du travail.	7
FIGURE 2.1 Produits en pâte moulée.	8
FIGURE 2.2 Produits moulés utilisés comme (a) calage et comme rembourrage.....	10
FIGURE 2.3 Système <i>Emery</i> de production de caissettes	15
FIGURE 2.4 Courbes P-x de trois structures moulées.....	20
FIGURE 2.5 Géométrie de trois structures étudiées (mesures en mm).....	20
FIGURE 2.6 Courbe charge-déformation pour deux structures tronquées.....	20
FIGURE 2.7 Relation entre la résistance à la compression et l'épaisseur de la paroi.....	21
FIGURE 2.8 Plateaux à fossettes coniques et à fossettes pyramidales.....	22
FIGURE 2.9 Courbes d'amortissement pour un impact de chute d'une hauteur de 30 cm.....	23
FIGURE 2.10 Courbes d'accélération pour différentes densités de surface. ..	25
FIGURE 2.11 Courbes d'accélération pour différentes hauteurs de chute.....	25
FIGURE 2.12 Courbe contrainte-déformation d'un papier.....	31
FIGURE 2.13 Relation entre la contrainte maximale et le coefficient de minceur.	32
FIGURE 3.1 Construction d'un diagramme de pointage et de charges.....	37
FIGURE 3.2 Exemple d'un diagramme de charges.....	40
FIGURE 3.3 Exemple d'un diagramme de pointage.....	41
FIGURE 3.4 Points d'échantillonnage.....	43
FIGURE 3.5 Coloration de pâtes de référence : (a) pâte PTM commerciale de résineux, (b) pâte kraft commerciale de résineux, (c) pâte kraft commerciale de feuillus.....	52
FIGURE 3.6 Échantillons découpées.....	55
FIGURE 3.7 Appareils de compression.....	56
FIGURE 3.8 Courbe charge-déformation obtenue à partir d'un échantillon découpé des plaques du troisième échantillonnage (MSa7).....	56
FIGURE 3.9 Diagramme de charges pour les matières premières.	60
FIGURE 3.10 Diagramme de pointage pour les matières premières.	61

FIGURE 3.11 Coefficients de corrélation et de prédiction pour les matières premières.....	62
FIGURE 3.12 Fines (%) et coefficient de diffusion de la lumière (m^2/kg) des pâtes avec produits chimiques.....	62
FIGURE 3.13 Indice d'égouttage et volume spécifique des pâtes avec produits chimiques.....	63
FIGURE 3.14 Résistances à l'éclatement, à la déchirure et à la traction des pâtes avec produits chimiques.....	63
FIGURE 3.15 Diagramme de charges de la première journée d'échantillonnage.....	65
FIGURE 3.16 Diagramme de pointage de la première journée d'échantillonnage.....	66
FIGURE 3.17 Coefficients de corrélation et de prédiction pour la première journée d'échantillonnage.....	67
FIGURE 3.18 Diagramme de charges des composantes 1 et 2 des deuxième et troisième journées d'échantillonnage.....	69
FIGURE 3.19 Diagramme de charges des composantes 1 et 3 des deuxième et troisième journées d'échantillonnage.....	69
FIGURE 3.20 Diagramme de pointage des composantes 1 et 2 des deuxième et troisième journées d'échantillonnage.....	71
FIGURE 3.21 Diagramme de pointage des composantes 1 et 3 des deuxième et troisième journées d'échantillonnage.....	71
FIGURE 3.22 Coefficients de corrélation et de prédiction pour les deuxième et troisième journées d'échantillonnage.....	72
FIGURE 3.23 Microphotographies des pâtes.....	75
FIGURE 4.1 (a) Vue d'une extrémité des pièces assemblées, (b) vue supérieure (côté succion) des pièces assemblées.....	82
FIGURE 4.2 (a) Vue frontale du déflecteur, (b) vue supérieure du déflecteur (côté succion).....	82
FIGURE 4.3 (a) Couverture extérieure et (b) assemblage du moule.....	82
FIGURE 4.4 (a) Réservoir auxiliaire de vide, (b) cuve de formation.....	83
FIGURE 4.5 Schéma de montage du moule et de ses accessoires.....	85
FIGURE 4.6 Photographie de l'ensemble de formation de caissettes.....	86
FIGURE 4.7 (a) Décollage d'une caisse, (b) support utilisé pour le transport et le séchage.....	86
FIGURE 4.8 (a) et (b) Caissettes obtenues en laboratoire.....	87
FIGURE 5.1 Projection des observations dans les espaces X et Y.....	90

FIGURE 5.2 Diagramme de pointage t vs u , (a) relation linéaire, (b) relation non linéaire.....	91
FIGURE 5.3 Exemple de diagramme de charges	93
FIGURE 5.4 Diagramme de pointage t vs t	94
FIGURE 5.5 Diagramme de pointage t vs u	94
FIGURE 5.6 Rotor du trituateur de laboratoire	100
FIGURE 5.7 Schéma du récipient de drainage dynamique.....	102
FIGURE 5.8 Diagramme de charges de la première composante	107
FIGURE 5.9 Diagramme de charges de la deuxième composante	108
FIGURE 5.10 Diagramme de charges des composantes 1 et 2.....	109
FIGURE 5.11 Diagramme de pointage des composantes 1 et 2.....	110
FIGURE 5.12 Diagramme u vs t pour la première composante	110
FIGURE 5.13 Diagramme u vs t pour la deuxième composante	111
FIGURE 5.14 Coefficients de corrélation et de prédiction	112
FIGURE 5.15 Microphotographies des pâtes, (a) journal post consommation, (b) bottin	113
FIGURE 6.1 Variation de l'indice d'égouttage.....	124
FIGURE 6.2 Variation des cendres des pâtes.....	125
FIGURE 6.3 Variation de la courbure des fibres.	125
FIGURE 6.4 Variation de l'angle de cassure des fibres.	126
FIGURE 6.5 Variation de la fraction R14.....	127
FIGURE 6.6 Variation de la fraction R28.....	127
FIGURE 6.7 Variation de la fraction P200.....	128
FIGURE 6.8 Variation des fines pondérées en poids.....	128
FIGURE 6.9 Variation du TEA.....	129
FIGURE 6.10 Variation de la résistance à la compression en anneau.....	129
FIGURE 6.11 Variation du coefficient de diffusion de la lumière.....	130
FIGURE 6.12 Variation du volume spécifique des feuilles standards.....	130
FIGURE 6.13 Variation du volume spécifique des feuilles épaisses.	131
FIGURE 6.14 Variation de la rigidité.	131
FIGURE 6.15 Variation de la composition fibreuse.	132
FIGURE 6.16 Microphotographies des pâtes (a) CR81 et (b) CR82	133
FIGURE 6.17 Variation de l'indice de qualité	134

FIGURE 6.18 Modèle mélange 50/50 - Diagramme de charges des composantes 1 et 2.....	142
FIGURE 6.19 Modèle mélange 50/50 - Diagramme de pointage composantes 1 et 2.....	143
FIGURE 6.20 Modèle mélange 50/50 - Diagramme de charges composantes 3 et 4.....	143
FIGURE 6.21 Modèle mélange 50/50 - Diagramme de pointage composantes 3 et 4.....	144
FIGURE 6.22 Modèle mélange 50/50 - Diagramme de charges composantes 5 et 6.....	144
FIGURE 6.23 Modèle mélange 50/50 - Diagramme de pointage composantes 5 et 6.....	145
FIGURE 6.24 Modèle mélange 50/50 – Coefficients de corrélation et de prédiction après six composantes.....	145
FIGURE 6.25 Modèle mélange 50/50 – Variation de la consistance et des cendres des eaux blanches avec le floculant.....	146
FIGURE 6.26 Modèle mélange 50/50 – Variation du contenu en fines de la pâte et de la consistance des eaux blanches avec le floculant.....	146
FIGURE 6.27 Modèle mélange 50/50 – Variation de la fraction P200 de la pâte et de la consistance des eaux blanches avec le floculant.....	147
FIGURE 6.28 Modèle mélange 50/50 – Variation du contenu en fines de la pâte et des cendres des eaux blanches avec le floculant.....	147
FIGURE 6.29 Modèle mélange 50/50 – Variation de la fraction P200 de la pâte et des cendres des eaux blanches avec le floculant.....	148
FIGURE 6.30 Modèle mélange 50/50 – Cendres des pâtes comparé avec les cendres des pâtes de cuvier de réserve (CeP_CR).....	148
FIGURE 6.31 Solides dissous des eaux blanches d'usine et de laboratoire.	149
FIGURE 6.32 Modèle pâte 100 % - Diagramme de charges composantes 1 et 2.....	154
FIGURE 6.33 Modèle pâte 100 % - Diagramme de pointage composantes 1 et 2.....	154
FIGURE 6.34 Modèle pâte 100 % - Diagramme de charges composantes 1 et 3.....	155
FIGURE 6.35 Modèle pâte 100 % - Diagramme de pointage composantes 1 et 3.....	155
FIGURE 6.36 Modèle pâte 100 % - Diagramme de charges composantes 4 et 5.....	156

FIGURE 6.37 Modèle pâte 100 % - Diagramme de pointage composantes 4 et 5	156
FIGURE 6.38 Modèle pâte 100 % - Coefficients de corrélation et de prédiction après cinq composantes.....	157
FIGURE 6.39 Matières en suspension des eaux blanches	157
FIGURE 6.40 Consistance des eaux blanches	158
FIGURE 6.41 Cendres pâtes.	158
FIGURE 6.42 Cendres des eaux blanches	159
FIGURE 6.43 Cendres caissettes.	159
FIGURE 6.44 Résistance des caissettes en fonction de leur poids et de l'épaisseur de ces parois.....	160
FIGURE 6.45 Résistance des caissettes en fonction de leur poids.....	160
FIGURE 6.46 Modèle pâte 100 % journal – Variation de la consistance et des cendres des eaux blanches avec le floculant	167
FIGURE 7.1 Diagramme de charges composantes 1 et 2	176
FIGURE 7.2 Diagramme de pointage des composantes 1 et 2.....	177
FIGURE 7.3 Diagramme de charges composantes 3 et 4.	178
FIGURE 7.4 Diagramme de pointage composantes 3 et 4.	178
FIGURE 7.5 Coefficients de corrélation et de prédiction après quatre composantes.....	179
FIGURE 7.6 Variation des solides dissous des essais d'usine et de laboratoire.	181
FIGURE 7.7 Variation des matières en suspension des essais d'usine et de laboratoire.	182
FIGURE 7.8 Variation de la consistance des eaux blanches des essais d'usine et de laboratoire.	182
FIGURE 7.9 Variation des cendres des eaux blanches des essais d'usine et de laboratoire.	183
FIGURE 7.10 Variation des cendres des caissettes d'usine et de laboratoire.	183
FIGURE 7.11 Variation du poids des caissettes de laboratoire.....	184
FIGURE 7.12 Variation de la résistance des caissettes en fonction de leur poids.	184
FIGURE 7.13 Variation de la résistance des caissettes en fonction de leur poids et de l'épaisseur de ces parois.	185
FIGURE A.1 Indice d'égouttage (mL) et fines FQA (%)	207
FIGURE A.2 Fractions R100 (%) et P200 (%).....	207

FIGURE A.3 Courbure de fibres (longueur pondérée en poids) et angle de cassure (indice).....	208
FIGURE A.4 Indice de traction (Nm/g) et indice d'éclatement (kPa*m2/g)....	208
FIGURE A.5 Indice de déchirure (mN*m2/g) et rigidité Taber (103 mNm/(g/m2))	209
FIGURE C.1 Diagramme de pointage du modèle rejeté.	232

Liste des Tableaux

TABLEAU 2.1 Classification des produits en pâte moulée selon leur utilisation finale	9
TABLEAU 2.2 Causes d'endommagement d'un produit.....	27
TABLEAU 3.1 Structure d'échantillonnage et nomenclature utilisée	46
TABLEAU 3.2 Nomenclature des pâtes de laboratoire	47
TABLEAU 3.3 Liste d'essais	48
TABLEAU 3.4 Liste de variables et observations et leur nomenclature	58
TABLEAU 3.5 Composition des pâtes, exprimée en pourcentage des différentes sortes de fibres.....	73
TABLEAU 5.1 Niveau des variables du plan expérimental.....	98
TABLEAU 5.2 Propriétés des matières premières utilisées pour le plan Plackett- Burman.....	103
TABLEAU 5.3 Résultats de la régression linéaire multiple.....	106
TABLEAU 5.4 Composition des matières premières, exprimée en pourcentage des différentes sortes de fibres	113
TABLEAU 6.1 Niveau des variables du plan expérimental.....	117
TABLEAU 6.2 Propriétés de la pâte de cuvier de réserve, mélange 50 % papier journal post consommation – 50 % bottins téléphoniques.....	122
TABLEAU 6.3 Propriétés de la pâte de cuvier de réserve, 100 % papier journal post consommation	123
TABLEAU 6.4 Variables mesurées et nomenclature utilisée.....	136
TABLEAU 6.5 Paramètres modèles PLS	137
TABLEAU 7.1 Conditions expérimentales.....	171
TABLEAU 7.2 Paramètres modèle PLS	174
TABLEAU 7.3 Résultats des tests de comparaison de moyennes	181
TABLEAU A.1 Résultats de l'analyse de fibres (FQA)	204
TABLEAU A.2 Résultats de l'analyse de fibres (FQA). Pâtes avec produits chimiques.....	204
TABLEAU A.3 Classification de fibres Bauer Mc Nett (%)	205
TABLEAU A.4 Propriétés des pâtes. Feuilles de 60 g/m ²	205
TABLEAU A.5 Propriétés des pâtes avec produits chimiques. Feuilles de 60 g/m ²	205

TABLEAU A.6	Propriétés optiques des pâtes sans produit chimique	206
TABLEAU A.7	Propriétés optiques des pâtes avec produits chimiques	206
TABLEAU A.8	Propriétés feuilles de 150 g/m ²	206
TABLEAU A.9	Siccité des caissettes humides, (%)	210
TABLEAU A.10	Contenu en papier non désintégré. Première journée d'échantillonnage	210
TABLEAU A.11	Résultats de l'analyse de fibres (FQA). Première journée d'échantillonnage	211
TABLEAU A.12	Résultats de l'analyse de fibres (FQA). Deuxième journée d'échantillonnage	211
TABLEAU A.13	Résultats de l'analyse de fibres (FQA). Troisième journée d'échantillonnage	212
TABLEAU A.14	Classification de fibres Bauer Mc Nett (%). Première journée d'échantillonnage	212
TABLEAU A.15	Classification de fibres Bauer Mc Nett (%). Deuxième journée d'échantillonnage	213
TABLEAU A.16	Classification de fibres Bauer Mc Nett (%). Troisième journée d'échantillonnage	213
TABLEAU A.17	Propriétés des pâtes. Feuilles de 60 g/m ² . Première journée d'échantillonnage	214
TABLEAU A.18	Propriétés des pâtes. Feuilles de 60 g/m ² . Deuxième journée d'échantillonnage	215
TABLEAU A.19	Propriétés des pâtes. Feuilles de 60 g/m ² . Troisième journée d'échantillonnage	215
TABLEAU A.20	Propriétés optiques. Première journée d'échantillonnage	216
TABLEAU A.21	Propriétés optiques. Deuxième journée d'échantillonnage ..	216
TABLEAU A.22	Propriétés optiques. Troisième journée d'échantillonnage ..	216
TABLEAU A.23	Propriétés des feuilles de 150 g/m ² . Première journée d'échantillonnage	217
TABLEAU A.24	Propriétés des feuilles de 150 g/m ² . Deuxième journée d'échantillonnage	217
TABLEAU A.25	Propriétés des feuilles de 150 g/m ² . Troisième journée d'échantillonnage	218
TABLEAU A.26	Propriétés des caissettes, moyennes des 4 plateaux par machine. Machines A et B	218
TABLEAU A.27	Propriétés des caissettes, moyennes des 2 plateaux par machine. Machine C	219

TABLEAU A.28 Résistance à la compression des caissettes. Première journée d'échantillonnage	219
TABLEAU A.29 Résistance à la compression des caissettes. Deuxième et troisième journée d'échantillonnage Machines A et B.....	220
TABLEAU A.30 Résistance à la compression des caissettes. Deuxième journée d'échantillonnage. Machine C	220
TABLEAU A.31 Résultats utilisés pour la construction du modèle PLS. Première journée d'échantillonnage (en gris les propriétés enlevées du modèle).....	221
TABLEAU A.32 Résultats utilisés pour la construction du modèle PLS. Deuxième et troisième journées d'échantillonnage (en gris les propriétés enlevées du modèle)	222
TABLEAU B.1 Design de tamisage Plackett-Burman- Propriétés feuilles 1,2 g	223
TABLEAU B.2 Design de tamisage Plackett-Burman - Propriétés feuilles 3 g	224
TABLEAU B.3 Design de tamisage Plackett-Burman – Propriétés pâtes et eaux blanches.....	225
TABLEAU B.4 Design de tamisage Plackett-Burman – Résistance à la compression des caissettes.....	226
TABLEAU C.1 Composition fibreuse des matières premières des essais d'usine	227
TABLEAU C.2 Caractéristiques fibreuses des pâtes des essais d'usine	228
TABLEAU C.3 Propriétés physiques et optiques des pâtes des essais d'usine (Feuilles standards et feuilles 3 g)	229
TABLEAU C.4 Caractéristiques des pâtes, des caissettes et des eaux des essais d'usine (échantillons d'usine et de laboratoire)	230
TABLEAU C.5 Propriétés des caissettes des essais d'usine (échantillons d'usine et de laboratoire)	231
TABLEAU C.6 Modèle 50/50 – Valeur des charges des composantes	233
TABLEAU C.7 Modèle pâte 100 % - Valeur des charges des composantes.	234
TABLEAU D.1 Caractéristiques fibreuses des pâtes des essais de laboratoire	235
TABLEAU D.2 Propriétés physiques et optiques des essais de laboratoire..	236
TABLEAU D.3 Caractéristiques des pâtes et des eaux des essais de laboratoire	237
TABLEAU D.4 Propriétés des caissettes des essais de laboratoire.....	238

Liste des Équations

$E = \int P(x) dx$	ÉQUATION 2.1	19
$T = C \times H/G$	ÉQUATION 2.2	29
$X = 1 * X' + T * P' + E$	ÉQUATION 3.1	37
$R^2 = 1 - SCR/SCX_{TOTALE}$	ÉQUATION 3.2	39
$Q^2 = 1 - PRESS/ SCX_{TOTALE}$	ÉQUATION 3.3	39
$PRESS = \sum (X_{ik} - X'_{ik})^2$	ÉQUATION 3.4	39
$L_p \text{ (mm)} = \frac{\sum n_i L_i^3}{\sum n_i L_i^2}$	ÉQUATION 3.5	48
$Fines \text{ (\%)} = 100 * \frac{\sum n_i L_i}{L_T}$	ÉQUATION 3.6	49
$IC = (L/L) - 1$	ÉQUATION 3.7	49
$IC_p = \frac{\sum IC_i L_i}{\sum L_i}$	ÉQUATION 3.8	49
$Angle \text{ de cassure, indice} = \frac{2N_{(21-45)} + 3N_{(46-90)} + 4N_{(91-180)}}{L_T}$	ÉQUATION 3.9	50
$P_M \text{ (\%)} = (F_M N_M) / (F_M N_M + F_{CR} N_{CR} + F_{CF} N_{CF})$	ÉQUATION 3.10	51
$P_{CR} \text{ (\%)} = (F_{CR} N_{CR}) / (F_M N_M + F_{CR} N_{CR} + F_{CF} N_{CF})$	ÉQUATION 3.11	51
$P_{CF} \text{ (\%)} = (F_{CF} N_{CF}) / (F_M N_M + F_{CR} N_{CR} + F_{CF} N_{CF})$	ÉQUATION 3.12	51
$F_M N_M = N_T - (F_{CR} N_{CR} + F_{CF} N_{CF})$	ÉQUATION 3.13	52
$X = 1 * X' + T * P' + E$	ÉQUATION 5.1	91
$Y = 1 * Y' + U * C' + F$	ÉQUATION 5.2	91
$CoE \text{ (\%)} = [\text{POIDS MATIÈRE RETENUE (G)} / \text{VOLUME FILTRÉ (ML)}] * 100$	ÉQUATION 5.3	99
$CeE \text{ (\%)} = [\text{POIDS CENDRES (G)} / \text{POIDS MATIÈRE SÈCHE (G)}] * 100$	ÉQUATION 5.4	99
$RPP \text{ (\%)} = [(CoP - CoE) / CoP] * 100$	ÉQUATION 5.5	101
$= [\text{POIDS SEC SOLIDES RETENUS} / \text{VOLUME ÉCOULÉ EN 30 s.}] * 100$	ÉQUATION 5.6	101
$RPPC \text{ (\%)} = [(CeP * CoP - CeE * CoE) / (CoP * CeP)] * 100$	ÉQUATION 5.7	101

$$InH = \frac{\sum_{n=1}^{17} \left[\frac{CR_i - CR_{min}}{CR_{max} - CR_{min}} \right]}{17}$$

ÉQUATION 6.1.....119

$$InB = 1 - \frac{\sum_{n=1}^7 \left[\frac{CR_i - CR_{min}}{CR_{max} - CR_{min}} \right]}{7}$$

ÉQUATION 6.2.....119

$$t_o = \frac{X_a - X_b}{S_{X_a - X_b}}$$

ÉQUATION 7.1.....172

$$S_{X_a - X_b} = S_m \sqrt{\frac{1}{n_a} + \frac{1}{n_b}}$$

ÉQUATION 7.2.....172

$$S_m = \sqrt{\frac{S_a^2(n_a - 1) + S_b^2(n_b - 1)}{n_a + n_b - 2}}$$

où

ÉQUATION 7.3.....172

S_a^2 : variance de la propriété a

S_b^2 : variance de la propriété b

Liste des Abréviations

#	Numéro
\$CAN	Dollars canadiens
angle	Indice d'angle de cassure
anneau	Résistance à la compression en anneau (N m/g)
ANOVA	Analyse de variance
ASTM	American Society for Testing and Materials
bl	Blancheur ISO
Bott	Bottins téléphoniques
c	Ce sont les poids qui dans la méthode PLS combinent les variables originales Y pour former les nouvelles variables, points u
C	Coagulant
cd	Coefficient de diffusion de la lumière
CeE	Cendres eaux blanches
CeE_U (CeE_L)	Cendres eaux blanches usine (laboratoire)
CeM_U (CeM_L)	Cendres caissettes usine (laboratoire)
CeP	Cendres pâtes
CeP_CR	Cendres pâte cuvier réserve
ChF	Pâte chimique de feuillus

ChR	Pâte chimique de résineux
COAG	coagulant
CoE	Consistance eaux blanches
CoE_U (Co_L)	Consistance eaux blanches usine (laboratoire)
coeff.	Coefficient
Compress.	Compression
Cond. ou COND	Conditionneur
CONSIST	Consistance de désintégration
courb	Courbure, longueur pondérée en poids (mm)
CP	Composante principale
CP1	Première composante principale
CPPA	Association canadienne des producteurs de pâtes et papiers
CR	Pâte de cuvier de réserve
DADMAC	Chlorure de diallydiméthyl-ammomium
déch	Indice de déchirure (mN m ² /g)
diff.	Diffusion
drain	Temps de drainage feuilles 1,2 g
drain3	Temps de drainage feuilles 3 g
DURÉE	Temps de désintégration

éclat	Indice d'éclatement (kPa m ² /g)
Éclat3	Indice d'éclatement (kPa m ² /g), feuilles 3 g
ed.	édition
éd.	édition
égoutt	Indice d'égouttage (mL)
F	Floculant
FCEQyN	Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales
fines	Fines pondérées en poids (%)
FLOC	floculant
FPL	Forest Products Laboratory
FQA	Fiber Quality Analyzer
g	Décélération
lnB	Indice de qualité bas
Ind.	Indice
lnH	Indice de qualité haut
Ja	Journal avant consommation
J-C-F	Niveau variables journal, consistance pâte en cuvier de tête de machine et floculant
Jp	Journal post consommation
Lf ou lf	Longueur de fibres pondérée en poids (mm)

LOM	Laminated object manufacturing
M.Sc.	Master Science
MecR	Pâte mécanique de résineux
Mélange 50/50	Pâte mélangée 50 % papier journal post consommation et 50 % bottins téléphoniques
MES_U (MES_L)	Matières en suspension totales usine (laboratoire)
MES _{avec Floc}	Matières en suspension totales scénarios avec floculant
MES _{sans Floc}	Matières en suspension totales scénarios sans floculant
MH	Pâte obtenue à partir des caissettes humides
MSE	Means square of error
MU/g (ML/g)	Résistance à la compression des caissettes d'usine (laboratoire) par rapport au grammage (kg cm ² /g)
MU/vs (ML/vs)	Résistance à la compression des caissettes d'usine (laboratoire) par rapport au volume spécifique (kg g/cm ³)
N.D.	Non déterminé
N.S.	Ajustement non significatif
ON	Ontario
p	Les charges des CP. Ce sont les poids qui, dans la méthode PCA, combinent les variables originales X pour former les nouvelles variables ou points t
P200	Fraction qui passe par le tamis de 200 mailles/pouce

PAM	Polyacrylamide cationique
Pâte 100 %	Pâte constituée de 100 % papier journal post consommation
PCA	« Principal Components Analysis », analyse des composantes principales
PLS	“Partial Least Squares Regression After Projection to Latent Structure”, méthode de régression des moindres carrés partiels après projection sur une structure latente
pp.	pages
PRESS	« Predictive Residual Sum of Squares », somme de carrés prédictive résiduelle
PSE	Polystyrène expansé
pU (pL)	Poids caisse usine (laboratoire)
Q^2	Variation prédictive
QC	Québec
R.	résistance
R100	Fraction retenue sur un tamis de 100 mailles/pouce
R14	Fraction retenue sur un tamis de 14 mailles/pouce
R^2	Variation expliquée
R200	Fraction retenue en tamis de 200 mailles/pouce
R^2_{100}	Variation expliquée scénarios pâte 100 % papier journal post consommation

$R^2_{50/50}$	Variation expliquée scénarios pâte mélangée 50 % papier journal post consommation et 50 % papier bottins téléphoniques
R28	Fraction retenue sur un tamis de 28 mailles/pouce
R48	Fraction retenue sur un tamis de 48 mailles/pouce
Résist.	résistance
rigid	Rigidité Taber (10^3 mN m (g/m^2))
RPP	Rétention première passe
RPPc	Rétention première passe cendres
s.f.s.	Sur fibres sèches
SCR	Somme de carrés de l'erreur résiduelle
SD_U (SD_L)	Solides dissous totales usine (laboratoire)
S_k	Écart-type
SK	Saskatchewan
SQC	« Statistical Quality Control », contrôle statistique de la qualité
STFI	Résistance à la compression STFI (N m/g)
t	Les points des variables X : coordonnées dans l'hyper plan de l'espace X
T	Pâte de cuvier de tête de machine
TAPPI	Technical Association of the Pulp and Paper Industry

TEA	Énergie absorbée en tension (g/cm)
TEMP	Température de désintégration
TMI	Nom d'un appareil de compression
trac	Indice de traction (N m/g)
u	Les points des variables Y dans PLS : coordonnées dans l'hyper plan de l'espace Y, quand Y est multidimensionnelle
UF	Urée formaldéhyde
UNaM	Universidad Nacional de Misiones
VC	Validation croisée
vol.	Volume
vs	Volume spécifique feuilles 1,2 g (cm ³ /g)
vs3	Volume spécifique feuilles 3 g (cm ³ /g)
w*	Ce sont les poids qui, dans la méthode PLS, combinent les variables originales X pour former les nouvelles variables, points t

Chapitre 1 Introduction

1.1. Objectifs

Dans ce travail, nous avons concentré nos efforts sur l'étude des paramètres reliés à la fabrication et à la qualité de produits de pâte moulée destinés à l'emballage.

Le projet vise, en premier lieu, à obtenir les relations qui existent entre trois groupes de variables servant à décrire une opération de fabrication de pâte moulée. On cherche à expliquer la relation entre :

- les caractéristiques et les propriétés de la fibre et de la pâte, et les variables du procédé.
- les caractéristiques et les propriétés de la fibre et de la pâte, et les propriétés des caissettes.
- les variables du procédé et les propriétés des caissettes.

Afin d'atteindre ces objectifs principaux, les objectifs secondaires suivants sont visés :

- l'identification des variables les plus importantes dans un procédé industriel de référence;
- la reproduction à l'échelle de laboratoire du procédé de moulage.

1.2. Approche de recherche

La fibre moulée, normalement fabriquée à partir de 100 % de vieux papiers, se présente comme un produit de substitution au plastique moulé sous vide ou au polystyrène expansé. Connue depuis les années 30 grâce à son utilisation pour les boîtes à œufs, elle se diversifie depuis 1993 avec l'apparition de nouveaux

produits industriels. Elle devient une véritable solution d'emballage aussi bien pour les produits alimentaires, pour les biens de grande consommation que pour plusieurs produits industriels.

Les pièces en pâte moulée se prêtent au recyclage en même temps que la boîte ayant servi d'emballage de vente et/ou de transport, facteur venant s'ajouter à un bilan qui s'avère positif en tenant compte de toutes les étapes d'un cycle de vie commençant par l'approvisionnement des matières premières et se terminant par la valorisation des rebuts collectés en aval de la consommation.

Les facteurs qui pourraient affecter les caractéristiques principales d'une caisse en pâte moulée utilisée comme emballage protecteur sont nombreux. En tenant compte des connaissances de base reliées aux emballages de protection, à la production de produits à partir de fibres papetières et aux caractéristiques des pâtes moulées, nous pouvons effectuer un inventaire des facteurs les plus pertinents. Ces facteurs sont montrés à l'aide du diagramme cause-effet de la figure 1.1.

Comme on peut observer, nous sommes en présence d'un produit qui réunit la problématique associée à deux grands groupes de connaissance : la fabrication d'un produit à partir de fibres papetières et l'évaluation d'un produit utilisé en emballage.

Cependant, et malgré son utilisation accrue, le secteur des produits moulés et de leur production a été peu étudié. La revue de la bibliographie reliée au domaine de la pâte moulée présente très peu d'information pertinente. Une bonne partie des articles sont de type « publicitaire ». Ils discutent des avantages de l'utilisation de la pâte moulée pour différentes applications et font généralement référence à certaines entreprises particulières.

De plus, en dépit de l'image verte associée avec ce matériau, il y a peu d'informations statistiques complètes sur le marché actuel. Le secteur des pâtes

moulées est bien souvent inclus à l'intérieur du groupe « autres produits papetiers », ce qui réduit grandement l'accès à l'information.

Dans la revue bibliographique, nous trouvons qu'une partie des publications consiste en brevets d'invention. Les brevets consultés signalent de nombreuses modifications aux procédés et aux appareils de moulage, soit pour améliorer la capacité de production, soit pour atteindre des buts spécifiques (formes, épaisseur, résistance, etc.). Ils apportent peu d'information pertinente à notre travail.

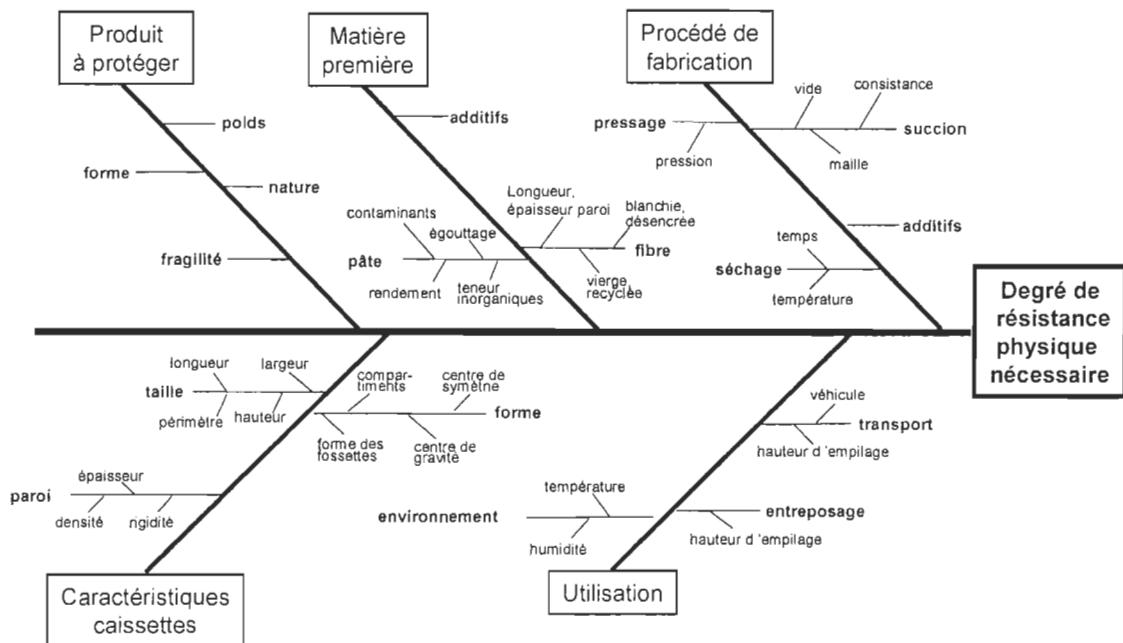


FIGURE 1.1 Diagramme cause-effet des facteurs qui affectent le degré de résistance physique des caissettes en pâte moulée.

L'évaluation de la qualité des produits moulés et du procédé de production est presque inconnue, du moins en ce qui touche la littérature publiée. À ce jour, les travaux de recherche effectués se concentrent sur une branche du diagramme cause-effet : *les caractéristiques des caissettes*. Ces travaux sont axés sur l'effet de la forme et des dimensions des fossettes (ou alvéoles) en ce qui touche principalement à la résistance des caissettes. L'absence de normes spécifiques a conduit certains chercheurs à adapter des normes confectionnées pour l'essai du matériel d'emballage du type « foam-in-place » afin d'étudier le

comportement de caissettes destinés au calage. Dans ces travaux, nous trouvons que des alvéoles (fossettes) de différentes formes (pyramidale, prismatique ou conique) ont été évaluées en compression statique (1, 2), en compression dynamique (2, 3, 4) et sous vibration (4). Ces trois mesures de la résistance évaluent respectivement l'effet de l'empilage, les dommages dus aux chutes et l'effet des mouvements durant le transport. L'influence de l'épaisseur de la paroi (1) et de la hauteur (2, 4) des alvéoles, du périmètre (4) ou de la surface (2) en contact pendant le test de compression sur la résistance à la compression dynamique ont été évalués. Dans les travaux indiqués précédemment, un seul auteur (4) signale comment les éprouvettes de pâte moulée furent obtenues. Celui-ci mentionne que les éprouvettes sont obtenues en les découpant d'un plateau à alvéoles. Aussi, dans un autre travail, cet auteur est aussi le seul à mentionner la matière première des produits moulés. Dans ce rapport, des caissettes fabriquées avec papier journal recyclé sont comparées aux caissettes de polystyrène expansé (3). Les résultats montrent que la pâte moulée possède de bonnes propriétés amortissantes, qui peuvent être comparées au polystyrène expansé sous certaines conditions d'utilisation.

Les produits moulés proviennent de fibres cellulosiques, mais leur fabrication et leur utilisation diffèrent des autres produits papetiers. Cependant, il faut souligner l'absence d'études systématiques qui explorent deux autres branches de notre diagramme de la figure 1.1 : l'influence de la *matière première* et du *procédé de fabrication*.

À travers les années, l'impact de la source et de la qualité des fibres sur différents papiers et cartons est bien documenté. Néanmoins, ce type d'étude n'a pas été entrepris dans le domaine de la pâte moulée.

Par rapport au procédé de fabrication, il y a une croyance populaire soutenant que nous pouvons fabriquer des produits en pâte moulée avec « n'importe quel type de matière fibreuse ». Tel n'est pas toujours le cas. Nous avons détecté divers besoins particuliers du secteur industriel. Un problème commun est le fonctionnement de la machine à moules avec certains types de vieux papiers.

Les caissettes collent aux matrices formatrices, se déforment, ne sèchent pas bien, etc.

En vue de la situation dans le domaine de la pâte moulée exposée ci-dessus, nous proposons une étude de base qui relie la matière première, les variables de préparation de la pâte et du moulage et la qualité du produit fini. Jusqu'à présent, une étude de ce type est inédite pour les pâtes moulées. Les résultats obtenus serviront pour amorcer l'intérêt pour des recherches futures dans ce secteur papetier.

1.3. Organisation de la thèse

Nous proposons une étude plus approfondie des variables impliquées dans le procédé de moulage. Depuis le début de notre travail, nous avons compté sur l'aide inestimable d'une usine de référence. Pour cette raison, tout le travail se centre autour du procédé et des variables reliées associés directement à cette usine. Cette collaboration nous a permis d'être en contact avec des conditions réelles de fabrication de la pâte moulée à partir de fibres recyclées.

Faute de données disponibles sur le sujet d'étude proposé, nous l'avons abordé par la caractérisation des pâtes et produits finaux de l'usine de référence (chapitre 3). En parallèle, nous avons testé les matières premières soit le papier journal avant et post consommation ainsi que les annuaires téléphoniques. Ces matières premières ont été évaluées seules, mélangées et avec ou sans ajout de produits chimiques.

L'absence d'une méthodologie adéquate pour la fabrication d'éprouvettes moulées à petite échelle, nous a amené à développer un prototype de moulage de laboratoire. Les détails de fabrication du prototype, ainsi que la méthode de moulage sont donnés au chapitre 4.

Dans la section suivante (chapitre 5), une étude d'identification des facteurs qui pourraient être importants dans une usine de moulage est présentée.

Les deux facteurs sélectionnés dans la phase précédente plus une troisième variable considérée importante ont été essayés dans l'usine de référence. Dans cette étape, simultanément à l'évaluation des pâtes et des caissettes d'usine, des caissettes de laboratoire furent formées (chapitre 6). Grâce à une collaboration unique avec la direction de l'usine de référence incluant le personnel de production, il nous a été permis de réaliser un plan d'essais sur une partie de l'usine, avec les risques de production de produits non vendables qu'engendre un tel plan d'expérience, pour certaines conditions critiques de fabrication.

La dernière étape fut de valider les résultats obtenus en usine en laboratoire. Nous cherchons à dupliquer en laboratoire les conditions du plan d'essais réalisé en usine, de façon à vérifier l'efficacité de la reproduction du procédé de moulage (chapitre 7).

Chaque chapitre présente ses conclusions. Cependant, un bilan total du travail est présenté au chapitre final de conclusion (chapitre 8).

De façon à ne pas trop encombrer le texte, la plupart des résultats sont présentés comme tableaux en annexes. Dans le texte principal figurent seulement les propriétés des matières premières (chapitres 5 à 7), les diagrammes de l'analyse statistique et les graphiques les plus pertinents.

La figure 1.2 résume les étapes suivies dans cette étude. Cette figure présente aussi les matières premières utilisées dans chaque étape, ainsi que les outils de design expérimental et d'analyse statistique utilisés.

Dans le chapitre suivant (chapitre 2), nous présentons une revue de la bibliographie disponible. Dans cette section, nous donnons plus d'information sur les références mentionnées que dans le chapitre actuel de même que sur des sujets reliés.

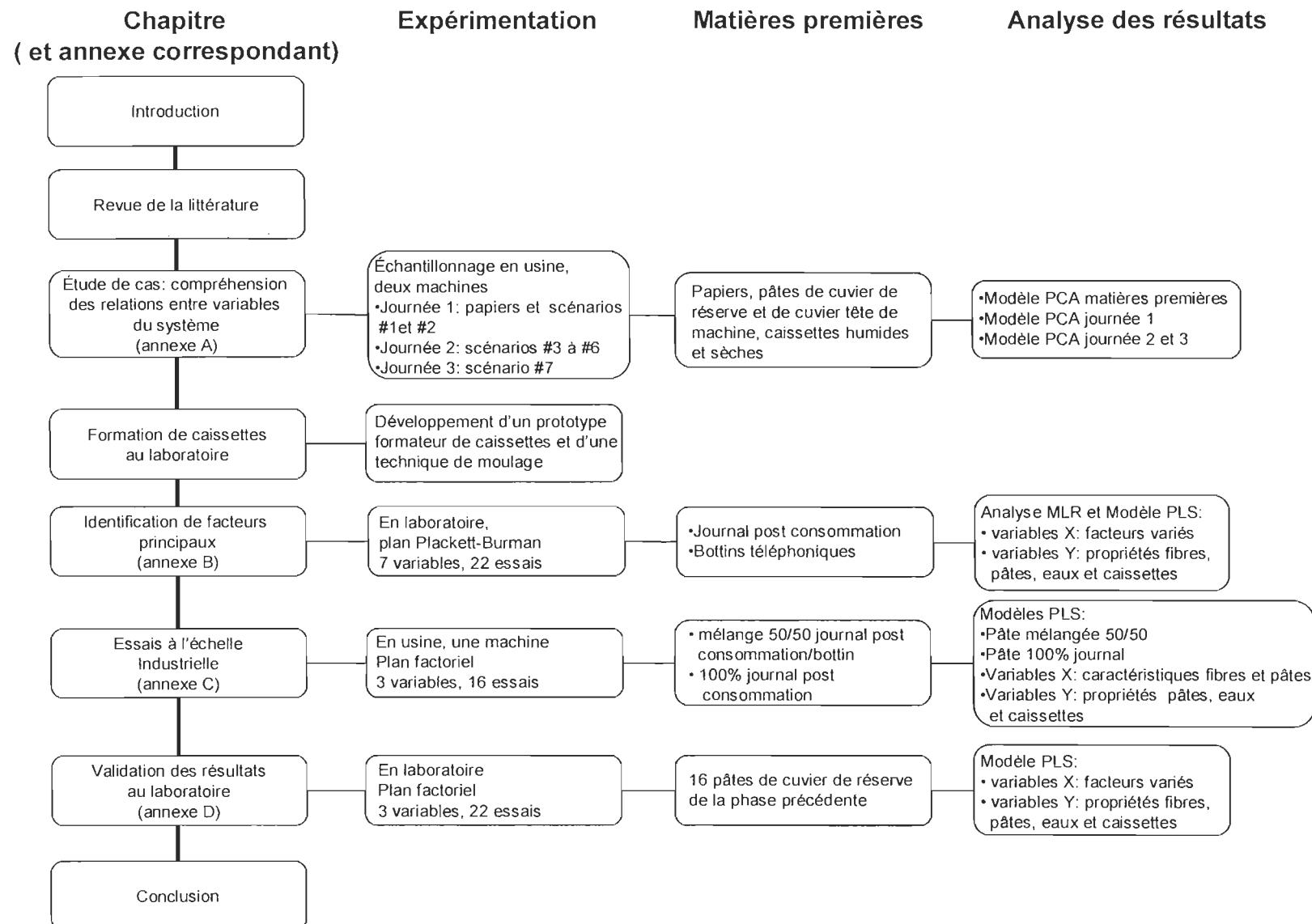


FIGURE 1.2 Organigramme du travail

Chapitre 2 - Revue de la littérature

2.1. Pâte moulée

2.1.1. Introduction

La pâte moulée, habituellement fabriquée avec des fibres recyclées, est manufacturée sous diverses formes servant à différentes applications.

En raison du design à trois dimensions, seule l'imagination fixe la limite de l'usage possible des produits moulés (figure 2.1).



FIGURE 2.1 Produits en pâte moulée (5).

La fibre moulée comporte de nombreux avantages. Elle donne de nouvelles possibilités quant à la flexibilité des formes. De plus, les aspects de présentation

et d'utilisation pratiques sont valorisés. La protection pendant les manoeuvres et le transport est augmentée. La réduction des temps de conditionnement est importante. Fabriquée en une seule entité, la pâte moulée ne nécessite aucun pliage ni manipulation avant son utilisation sur la ligne de conditionnement (6).

Nous retrouvons au tableau 2.1, une classification personnalisée à partir d'une classification typique (7).

TABLEAU 2.1 Classification des produits en pâte moulée selon leur utilisation finale

Produits pour le consommateur	Ustensiles de table Assiettes Plats
Emballage de restauration	Assiettes Barquettes Plateau pour 4 verres Plateau pour entrées
Distribution et emballage d'aliments	Boîtes à œufs Barquettes d'œufs Containants de fruits Barquettes de volaille Cercles pour gâteaux
Produits de spécialités	Pots à fleurs et à grains Vases pour fleuristes Containants de bulbes de fleurs Récipients médicaux jetables Remplisseurs de chaussures
Emballage	Plateaux pour lampes et tubes fluorescents Calage insert à téléphones mobiles, rasoirs, outils, appareils ménagers, pièces et accessoires pour ordinateur, bouteilles médicales, lentilles cornéennes, etc. Matériaux de rembourrage Matériaux en feuilles tridimensionnelles

La forme de pâte moulée la plus utilisée et la plus connue est utilisée dans le secteur de l'emballage. Sa fonction principale est de protéger son contenu pendant le transport et la manipulation.

Un produit moulé destiné au calage est un matériel formé de compartiments pour amortir, bloquer ou immobiliser (8) (figure 2.2 (a)). D'autre part, la cellulose moulée possède un remarquable pouvoir amortisseur de chocs et de vibrations (9).

Comme matériel de rembourrage, la pâte moulée est utilisée sous forme de cubes (10) ou de moitiés d'arachides (11), placés à l'intérieur d'un emballage en carton ou en bois aux fins de fixation et de protection antichoc (figure 2.2 (b)).

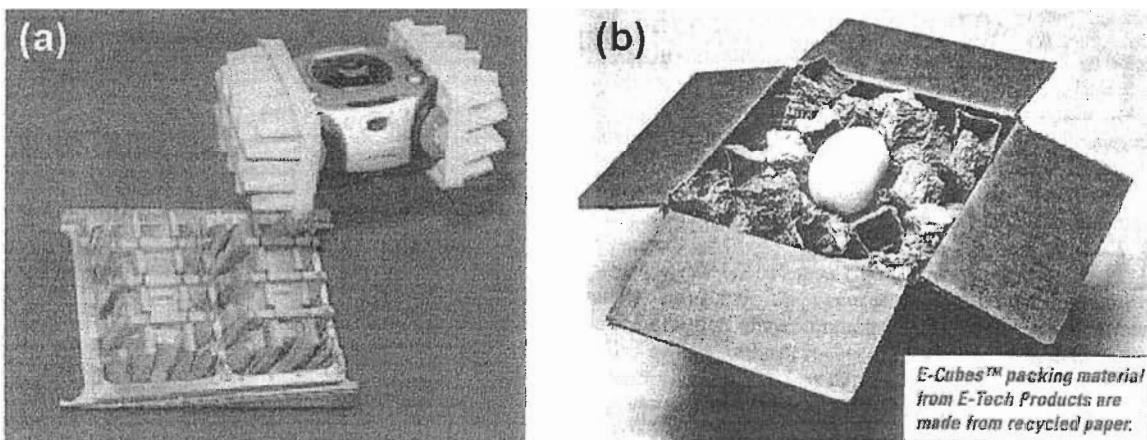


FIGURE 2.2 Produits moulés utilisés comme (a) calage (5) et comme rembourrage (10).

La pâte moulée formée par pressage et conçue en feuilles tridimensionnelles, est plus résistante et plus rigide que le carton ondulé (une flûte) lorsque les feuilles sont collées les unes sur les autres formant ainsi une structure en sandwich appelée « Forest Products Laboratory « FPL » Spaceboard » (12, 13). Les combinaisons plus épaisses (89 mm) peuvent être utilisées dans la construction de panneaux, de parois, de planchers et de plafonds (14).

Le marché de la pâte moulée est l'un des secteurs les moins documentés de toute l'industrie de la conversion des pâtes et papiers. En revanche, nous savons qu'en Amérique du Nord, après une diminution des ventes entre 1973 et 1983 due à la croissance de la production des produits en plastique et en polystyrène, l'industrie de la pâte moulée a récupéré une partie du marché, grâce à sa réputation d'être bénéfique pour l'environnement. Les données indiquent qu'en 1989 (dernière année disponible) les ventes de produits moulés et pressés étaient évaluées à 495 millions \$CAN (7). En 1999, l'estimation des ventes a atteint 732 millions \$CAN. Actuellement, vingt-sept usines produisent des produits moulés en Amérique du Nord, dont trois au Canada : *Cascades inc.* à Kingsey Falls (QC), *Fripp Fibre Forms* à Tisdale (SK) et *Cascades Dominion* à Brantford (ON) (7, 15). Les 27 usines génèrent environ 500 000 tonnes/an de produits divers avec une capacité unitaire de production variant entre 3 et 150 tonnes/jour (7,16). Au Canada, les articles moulés ou pressés livrés par les fabricants en 1995 atteignent environ 927,774 milliers d'unités, pour une valeur de 56,2 millions \$CAN (17).

En Europe, le marché est estimé à 718 millions \$CAN (1996), pour une production d'environ 300 000 tonnes/an (18). À présent, les principaux producteurs sont l'Allemagne, avec cinq usines, suivi par la Norvège et le Portugal, avec une usine chacun (19).

En Amérique du Nord, le marché des boîtes à œufs a subi des changements considérables et avantageux pour la pâte moulée. En 1987, plus de la moitié des contenants étaient en polystyrène, tandis qu'au début des années 1990, 61 % de la production annuelle des boîtiers était en pâte moulée (15).

En Amérique du Sud, nous savons qu'il y a des installations industrielles dans la plupart des pays, mais il n'existe de données statistiques qu'au Brésil. Dans ce pays, le secteur de la pâte moulée connaît une croissance remarquable. La production montre une augmentation de 18 % entre 1996 et 1997. L'augmentation estimée atteint 34 % entre 1997 et 1998, avec une production annuelle de 33 018 tonnes (20).

2.1.2. Matière première

Parmi toutes les sortes de papiers et de cartons qui utilisent des fibres recyclées dans leur composition, les produits en pâte moulée se distinguent du fait qu'ils peuvent être fabriqués à partir de 100 % de rebuts de post consommation, de post commercialisation ou de fabrication. Cependant, le choix de la sorte et de la qualité de ces matières recyclables dépend du procédé de mise en caisse ainsi que des caractéristiques et propriétés du produit final.

Généralement, pour la production de caisses de catégorie alimentaire, les grades substituts de la pâte sont utilisés. Cependant, pour la fabrication d'emballages, de boîtes à œufs, d'emballage de produits fragiles et de pots horticoles ou agricoles, les rebuts de post consommation sont plutôt choisis (15).

La pâte provenant de carton ondulé présente une plus grande résistance à la compression comparativement à la pâte de vieux journaux (21). Elle est donc généralement choisie pour la production d'emballages de produits lourds (16). Par ailleurs, la société danoise *Brodrone Hartmann* met en évidence la qualité de sa surface lisse, la netteté du gaufrage, la résistance et la blancheur des produits obtenus avec 100 % de fibres recyclées blanchies pour un procédé sans chlore (6, 22).

Les grades propres et blancs peuvent être aussi obtenus en utilisant des rebuts avec des fibres de haute qualité. Les cassés de fabrication d'une usine de cartons de lait sont utilisés pour la fabrication de boîtes d'œufs de qualité en Norvège. Aux États-Unis, les emballages de restauration pouvant aller au four à micro-ondes sont produits en utilisant 100 % de cartons de lait comme matière première (23).

2.1.3. Procédés d'obtention

Les produits moulés peuvent être classés en quatre catégories selon leur qualité, habituellement reliées au procédé d'obtention (24).

Dans le *type 1* de pâte moulée, « à parois épaisses », les produits ont des épaisseurs de paroi de 5 à 1,3 mm et sont utilisés principalement pour l'emballage de support. Les surfaces sont très rugueuses d'un côté et modérément lisses de l'autre. La finesse des produits est moyenne en raison de l'utilisation de caissettes fabriquées en une simple passe et de l'utilisation de papiers mélangés et de papier kraft. On utilise typiquement les produits à parois épaisses comme protecteurs de bords et de coins, pour l'emballage de matériel lourd et de pièces de rechange, pour barquettes, etc.

Les produits de pâte moulée de *type 2*, « moule de transfert », ont habituellement des parois minces, de 3 à 5 mm, et sont les plus répandus aujourd'hui. Le procédé utilise des moules de formation et de transfert qui donnent une surface relativement lisse d'un côté et une surface très lisse et bien définie du côté opposé. Ces produits sont typiquement utilisés pour l'emballage de matériel électronique, de téléphones cellulaires et d'autres appareils ménagers ou informatiques. Les équipements de grande capacité et à haute vitesse de transfert sont, quant à eux, utilisés pour produire des barquettes de boissons, boîtes d'œufs, barquettes de fruits, etc.

La pâte moulée de *type 3*, « fibre thermoformée », possède la plus haute qualité parmi les produits à parois minces. Le procédé utilise la technologie « Cure-In-The-Mold » pour produire des éléments forts ayant une surface lisse et bien définie. Après sa formation, le produit est capturé par des moules chauds qui le pressent et le densifient. Les produits sont finalement éjectés des moules de chauffage à leur état final, par opposition aux produits qui ont besoin d'un four de chauffage. L'utilisation typique de ce type de produits est l'emballage de produits présentés directement à la vente dans son contenant, pour lesquels l'aspect et la finesse sont d'une importance primordiale.

Le *type 4* de pâte moulée « traitée », inclut les produits moulés qui ont subi un traitement secondaire généralement différent ou qui s'ajoute au procédé de formation de base. Les procédés secondaires peuvent être le couchage,

l'impression, le pressage à chaud, le découpage ou l'addition d'agents chimiques ou de colorants.

Certains auteurs distinguent deux procédés d'obtention de pâte moulée : le procédé « injection par pression » et le procédé « moulage par succion » (25).

Dans le procédé *d'injection pressurisé*, les caissettes sont produites par des machines semi-automatiques. Une quantité de suspension de pâte est admise dans le moule et les produits sont formés par soufflage d'air pressurisé (environ 4 kg/cm²) et chauffé (480 °C). Le produit ainsi obtenu a 45 à 50 % d'humidité. Il est séché lors d'une opération ultérieure qui stérilise aussi les caissettes. Les produits sont très résistants et rigides, en plus d'être légers. L'épaisseur de la paroi est généralement de 2 ½ mm, et le procédé conduit à l'obtention de formes très diverses. À titre d'exemple, il sert à la fabrication de jouets, etc. Les produits obtenus par injection pressurisée peuvent avoir des caractéristiques spéciales, comme celle de résister à l'eau, en ajoutant des agents appropriés au mélange fibreux.

Dans le procédé de *moulage par succion*, la suspension de pâte, en contact avec seulement un côté du moule, est formée par un vide appliqué sur le côté opposé du moule. Le produit, après la formation, contient davantage d'eau, c'est-à-dire environ 75 %. L'eau résiduelle est enlevée lors d'un procédé ultérieur de séchage. Dans certaines applications, le produit formé est pressé sur des matrices chaudes, ce qui en donne des produits plus rigides et plus lisses qui peuvent être imprimés avec différentes couleurs. Le procédé de moulage par succion est normalement complètement automatisé. Il est utilisé pour la production de produits en grosse quantité.

Le moulage par succion

Le fournisseur de systèmes de produits moulés le plus important au Canada est l'entreprise *Emery International Developments Ltd.*

Les systèmes de moulage de pâte d'*Emery* (figure 2.3) se composent d'une section de préparation de la pâte, suivie d'une formation humide des caissettes. Les caissettes sont ensuite transférées à l'aide de matrices, séchées et finalement empaquetées automatiquement (26).

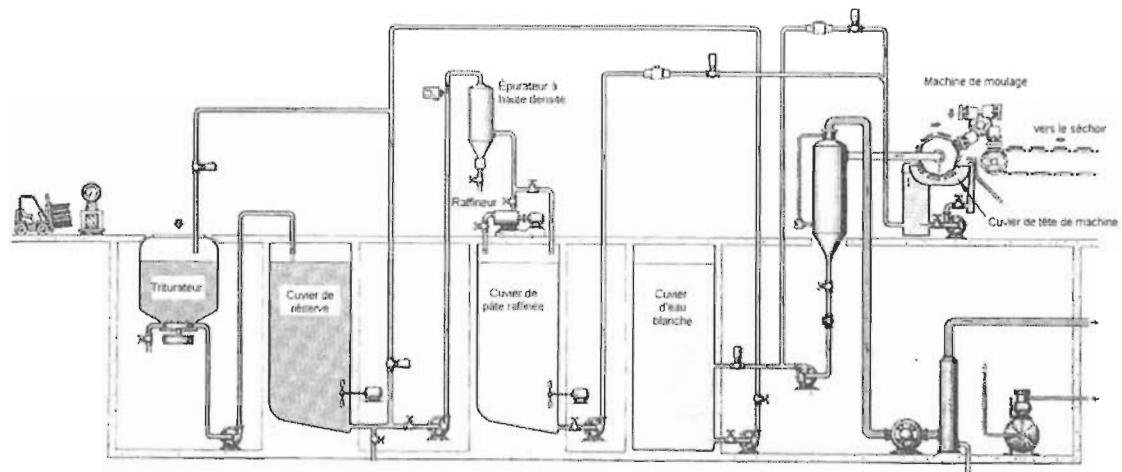


FIGURE 2.3 Système *Emery* de production de caissettes (16).

Le triturateur mélange des vieux papiers avec l'eau à une consistance uniforme (4 %), avant l'ajout de colophane, de cire ou d'autres produits chimiques si nécessaire. La pâte est ensuite nettoyée à l'aide d'un épurateur à haute densité avant d'être raffinée.

Les épurateurs centrifuges enlèvent des particules qui peuvent affecter la qualité du produit final de la pâte ou causer des bris ou une usure prématuée des machines. La force centrifuge générée dans l'appareil pousse les particules plus pesantes vers l'extérieur (vers la paroi) tandis que les particules légères sont orientées vers le centre. Pour une opération efficace d'un épurateur à haute densité, les particules doivent avoir une densité supérieure à celle de l'eau et avoir une taille et une forme différente des particules qui composent la suspension de pâte (par exemple, sable, morceaux de métal ou de verre, agglomérats de fibres).

La section de formation consiste en une série de matrices immergées dans une cuve contenant la pâte à 0,6 -1 % de consistance. Ces matrices sont recouvertes d'un tamis et montées sur un tambour tournant à une vitesse uniforme. Un système sous vide attire les fibres sur les matrices. Après leur formation sur le tambour de moulage, les caissettes sont transférées sur une deuxième matrice qui, à son tour, transfère les produits moulés au convoyeur d'entrée du séchoir.

Les systèmes conçus par *Emery* recyclent toute l'eau du procédé.

La section de séchage utilise une circulation d'air chaud. À l'aide d'un passage simple ou d'un convoyeur à multipasses, le matériel est transporté dans le séchoir. Les produits secs sont alors déchargés dans un convoyeur où ils sont triés, empilés, comptés et enveloppés.

Brevets

Les brevets consultés signalent des modifications aux procédés et aux appareils de moulage, soit pour améliorer la capacité de production, soit pour atteindre des buts spécifiques.

Un bref résumé des brevets consultés est présenté ci-dessous :

- Transfert en continu des caissettes à la section de séchage. Pour le transfert, la caissette est prise par succion, puis soufflée (air comprimé) sur le convoyeur de séchage (27).
- Les caissettes d'œufs ont des bords dans le couvercle qui s'insèrent dans les perforations de la base. On élimine les couvercles avec des « locking flap » (28).
- Une deuxième matrice comprime le moule de formation (qui est sur la caissette formée). La deuxième matrice possède une chambre où l'on introduit de l'air chaud pour le séchage (29).

- Méthode pour former des caissettes avec des zones de différentes épaisseurs (30). Les zones plus épaisses donnent de la résistance et les zones plus minces, qui sont en contact avec le contenant, offrent une section plus faible, qui briseront en premier sous l'application de forces externes. La différence d'épaisseur entre les zones confère un milieu d'absorption d'énergie. Le système est constitué par une toile sous un support avec des perforations en canal. Les deux zones peuvent être construites dans une seule pièce. La différence d'épaisseur est obtenue en variant les ouvertures de la toile ou en variant le diamètre des perforations du support. Les toiles peuvent être construites avec des résines acryliques par la méthode SCAM (Stereolithography). Le support est construit par la méthode LOM (Laminated Object Manufacturing). L'objet est construit par superposition de feuilles d'un matériel déterminé, par exemple, des feuilles de papier couché d'un film plastique. Les feuilles sont découpées au laser. La méthode permet une grande précision des formes.
- Toile de résine avec des perforations qui peuvent varier entre 0,1 et 2 mm. (procédé laser stéréolytographique). Support en métal ou en résine. Autre modèle : support rempli avec des particules (31).
- Procédé pour fabriquer des moules qui ne se bouchent pas, qui donnent des produits lisses, qui ne s'endommagent pas avec l'utilisation répétée et qui peuvent être construits en peu de temps (32). Les moules ont deux couches : une première couche de formation (en contact avec la pâte), formée par des particules de 0,2-1,0 mm en verre, céramique, résine synthétique ou métal (des matériaux insolubles dans l'eau) liées avec une résine époxy ; la couche de support est formée par des particules plus grosses, entre 1,0-10,0 mm, plus un agent liant, monté sous un support rigide en métal ou en plastique. Le produit est formé par succion et son expulsion est facilitée par l'injection d'air comprimé.

- Mélanges pour le moulage des panneaux, des planchers, des ornements, par exemple (33). Les mélanges sont formés par un agent liant primaire (UF, mélamine, latex), des vieux papiers journaux, et un liant secondaire (optionnel). Les mélanges donnent des produits très denses (55 lb/pi et plus).
- Pots agricoles. Ajout d'un agent biocide en présence d'un agent de rétention et d'un agent de couchage. Le produit possède une bonne résistance structurelle et résiste bien à la croissance microbienne (34).
- Pré-séchage des caissettes formées par aspiration d'air chaud à travers l'ensemble caissette-toile avant le démoulage. Le procédé permet d'augmenter la siccité à 38% (les procédés conventionnels donnent des siccités autour de 25%) (35).

2.1.4. Tests employés pour évaluer les produits d'emballage moulés

Les structures moulées destinées aux emballages peuvent être fabriquées selon le poids, la fragilité, la forme et la dimension du produit à protéger. Ainsi, la pâte moulée a pour fonction de placer, de supporter et, la plus importante, d'amortir.

Très peu d'études ont été faites en relation avec le comportement des pâtes moulées utilisées en emballage. La résistance à l'écrasement a été mesurée comme résistance à la compression statique; la capacité d'absorber un impact a été mesurée par des essais de compression dynamique, et les effets dus à la vibration pendant le transport ont été mesurés comme transmission. Nous présentons, à la section suivante, un bref résumé des références consultées.

Résistance à la compression et taux d'élasticité

Les pâtes moulées ont l'habileté d'absorber l'énergie générée par un choc ou une vibration. Elles se déforment quand les forces agissent sur leur structure. La

relation entre l'énergie absorbée, la charge et la déformation peut être exprimée comme suit (1) :

$$E = \int P(x) dx$$

ÉQUATION 2.1

où

E = l'énergie absorbée par la déformation de la caissette (J);

P = charge exercée sur la structure de la caissette (N);

X = déformation de la structure amortissante, selon un axe vertical.

Par intégration graphique, on peut obtenir l'énergie absorbée E .

La courbe charge-déformation d'une structure amortissante peut être obtenue au moyen de l'essai de compression. La base du design d'un emballage amortisseur est la propriété de compression statique de différentes structures moulées. Généralement, plus grande est la superficie sous la courbe $P-x$, plus grande sera l'énergie absorbable par la structure lors d'une déformation x (1). À la figure 2.4 nous observons des courbes $P-x$ de trois structures : pyramidale, prismatique et conique (1).

La compression statique a été aussi étudiée par un autre auteur sur des structures similaires, figure 2.5 (2). Dans ce cas, la résistance maximale est atteinte par le cône tronqué (figure 2.6). Le graphique charge-déformation montre aussi que la forme prismatique tronquée a une chute importante dans sa résistance à la compression après que la charge maximale est atteinte.

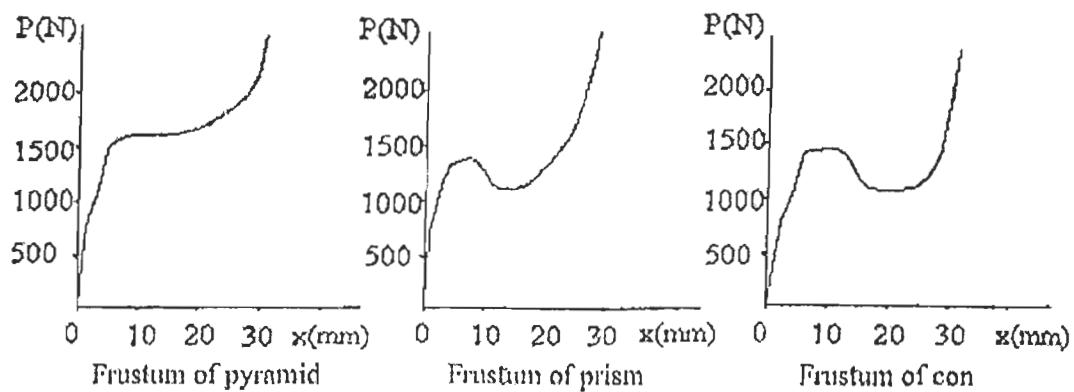


FIGURE 2.4 Courbes P-x de trois structures moulées (1).

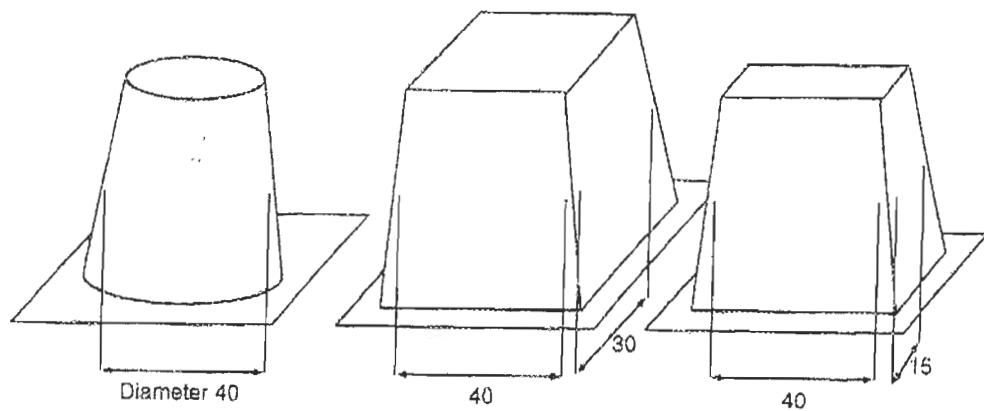


FIGURE 2.5 Géométrie de trois structures étudiées (mesures en mm) (2).

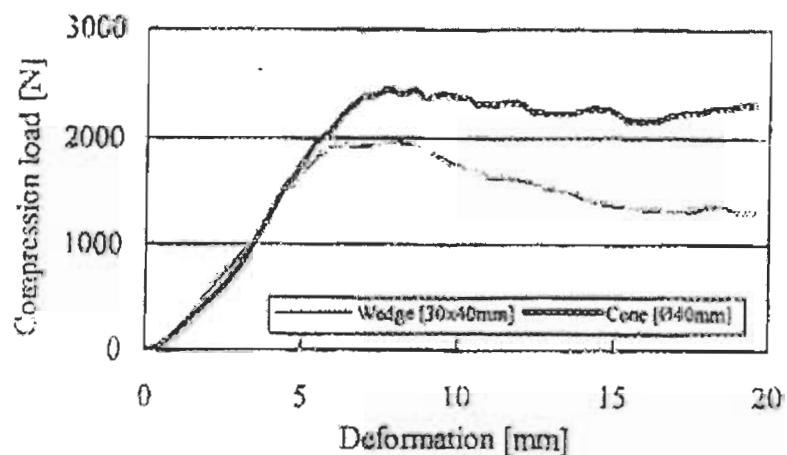


FIGURE 2.6 Courbe charge-déformation pour deux structures tronquées (2).

Quant à l'influence de l'épaisseur de la paroi, des expériences sur différentes structures (pyramidal, conique, et prismatique) ont révélé que la résistance à la compression est directement proportionnelle à l'épaisseur de la paroi, tel qu'indiqué à la figure 2.7 (1).

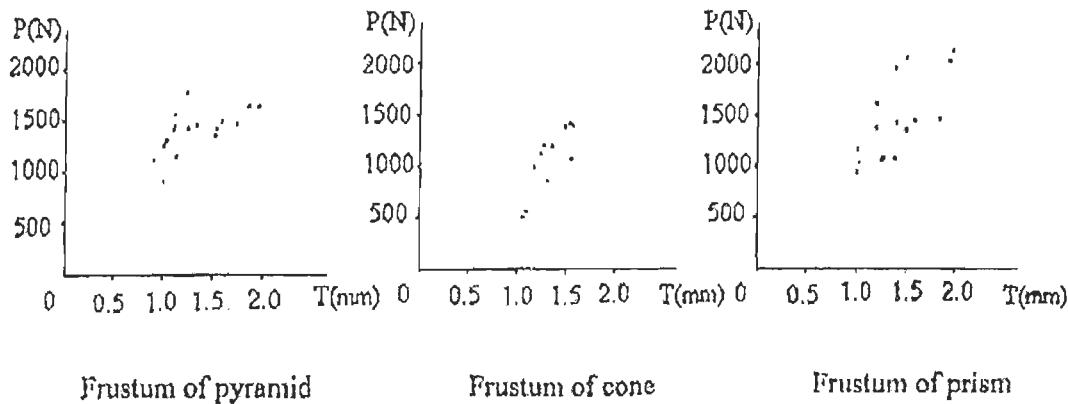


FIGURE 2.7 Relation entre la résistance à la compression et l'épaisseur de la paroi (1).

La résistance à la compression est proportionnelle au périmètre et dépend aussi de la pente de la paroi latérale, mais malheureusement, ces auteurs ne démontrent pas comment ils en arrivent à ces conclusions (1). L'effet d'une augmentation de l'angle a été rapporté comme défavorable dans un autre travail (2).

Le taux d'élasticité est très important aussi. La structure se déforme excessivement lors d'une surcharge. L'expérience démontre qu'une structure amortissante atteint son meilleur taux d'élasticité (autour de 95 %) quand la déformation est en dessous de 25 % de sa hauteur (1). Pour les effets de design, on peut prendre cette valeur de déformation comme optimale.

2.1.5. Les propriétés dynamiques

Certaines propriétés mécaniques des pâtes moulées ont été étudiées selon des méthodes d'évaluation modifiées pour différents matériaux amortissants. Des éléments des normes ASTM D1596 et D4168 d'essai de matériaux amortissants

ont été employés pour évaluer des plateaux à fossettes coniques et à fossettes pyramidales (figure 2.8) (3). L'absorption du choc des caissettes en pâte moulée et en PSE (polystyrène expansé) pendant la chute a été comparée. L'épaisseur des caissettes était de 3 mm et leur hauteur, de 20 mm. Les échantillons en PSE étaient d'une épaisseur de 20 mm et d'une densité de 27 kg/m^3 (3). Les auteurs ont obtenu des courbes d'amortissement pour plusieurs impacts et différentes hauteurs de chute. À la figure 2.9, nous observons des courbes d'amortissement pour l'impact d'une chute de 30 cm. Dans ce graphique, la mesure de décélération est obtenue avec un accéléromètre monté sur la masse en chute, de façon à mesurer la décélération dans la direction verticale. La décélération est notée en terme de « g », où $1 \text{ g} = \text{accélération due à la pesanteur}$.

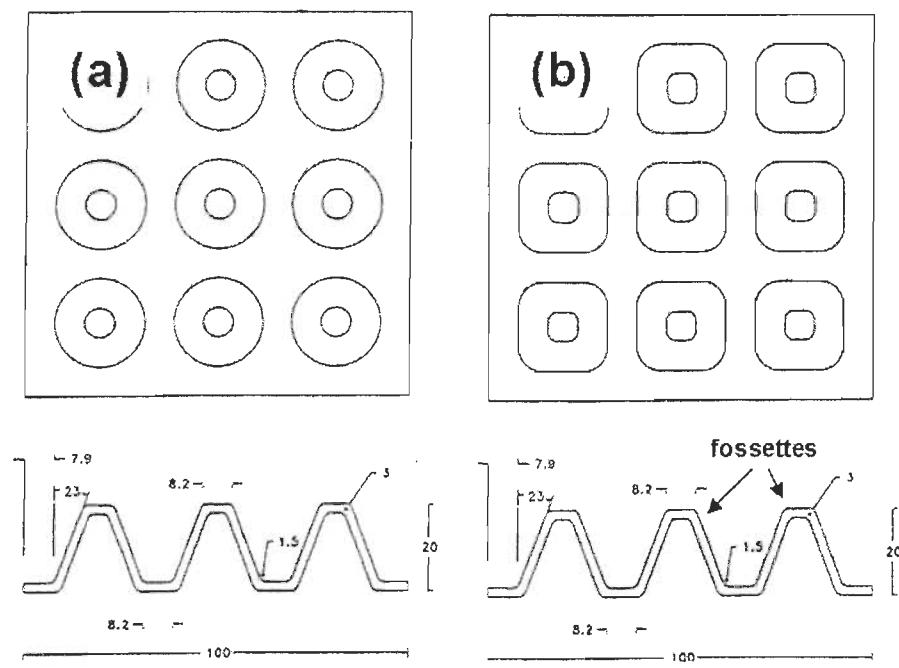


FIGURE 2.8 Plateaux à fossettes coniques et à fossettes pyramidales (3).

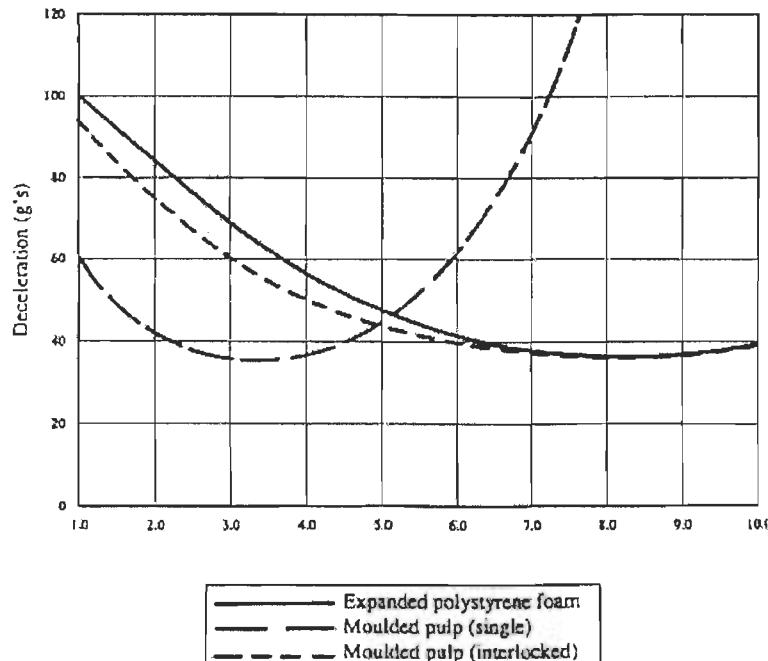


FIGURE 2.9 Courbes d'amortissement pour un impact de chute d'une hauteur de 30 cm (3).

Les conclusions de ce travail (3) sont :

- Il n'y a pas de différence significative entre les propriétés amortissantes des profils de barquettes essayées ;
- Les profils de barquettes essayées présentent de bonnes propriétés amortissantes à faible charge et pour un impact simple ;
- La pâte moulée est supérieure au PSE pour des charges inférieures à 5 kPa, et inférieure pour des charges statiques plus élevées ;
- La pâte moulée a des caractéristiques amortissantes négligeables après le premier impact et pour des chutes de 60 et 90 cm (résultats non montrés dans l'article) ;
- Quand les barquettes sont essayées ensemble, avec leurs fossettes emboîtées, la qualité amortissante est similaire au PSE pour un impact

simple ; après quatre impacts, la barquette double est meilleure que la simple, mais plus faible que le PSE à une charge d'environ 4 kPa.

Dans un autre travail, les composantes d'une caissette ont été évaluées en découpant des fossettes de différentes dimensions (4). Ici, les essais de transmission de choc ont été accomplis à diverses hauteurs et pour plusieurs impacts. Aussi, des poids distincts ont été utilisés pour créer des charges statiques de 0,15 lb/po², 0,5 lb/po² et 0,8 lb/po². L'absorption de l'impact a été représentée en fonction de la charge statique et en fonction de la charge de périmètre des fossettes. Les résultats démontrent qu'une courbe amortissante est mieux représentée en fonction de la charge de périmètre. En général, les impacts multiples ont un effet négatif sur les fossettes, et l'ampleur de l'effet dépend de la hauteur des chutes et de la hauteur des fossettes (4).

Un autre auteur a étudié aussi l'effet de la compression dynamique sur différentes structures moulées (figure 2.5) (2). Dans ce cas, les courbes ont été obtenues pour des éprouvettes de différente densité de surface (c'est-à-dire, de la surface en contact pendant l'essai), différents angles de la paroi latérale de l'éprouvette, différentes hauteurs d'éprouvette et différentes hauteurs de chute. Une augmentation dans la densité de la surface n'influe pas sur l'accélération « G », mais augmente la charge statique (figure 2.10). Contrairement aux résultats de compression statique, l'angle de la paroi latérale n'influe pas sur la résistance dynamique. La hauteur de l'éprouvette n'influe pas sur la valeur de « G » à basses valeurs de charge. Quand la hauteur de l'éprouvette augmente (de 30 à 50 mm), la valeur de « G » diminue à mesure que la charge augmente (figure 2.11). Cette tendance s'observe aussi quand la hauteur de chute augmente.

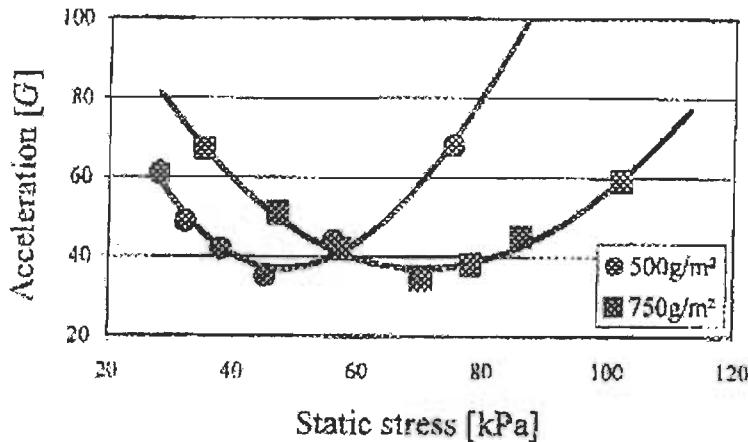


FIGURE 2.10 Courbes d'accélération pour différentes densités de surface (2).

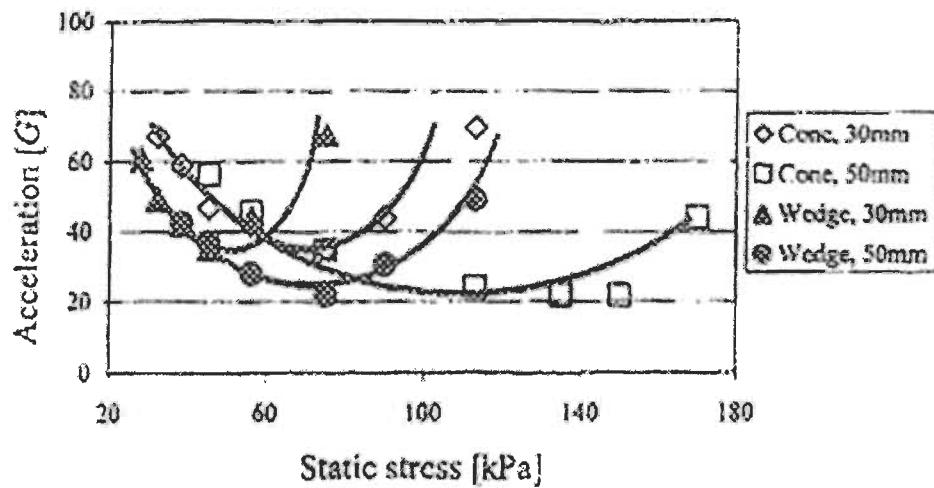


FIGURE 2.11 Courbes d'accélération pour différentes hauteurs de chute (2).

Des essais de vibration ont été réalisés pour déterminer comment différentes configurations de pâte moulée atténuent ou amplifient la vibration (4). Un accéléromètre, placé sur la masse amortie par la pâte moulée, mesure l'accélération transmise. Le test est fait à différentes fréquences et l'amplification est mesurée comme la différence entre l'accélération d'entrée et celle de sortie. Les résultats démontrent que l'amplification de la vibration occasionnée par les fossettes est très basse et en dessous des valeurs normalement observées pour des caissettes en mousse plastique.

En tenant compte de la fonction protectrice d'un produit moulé pour emballage, et en regardant les méthodes utilisées dans les références mentionnées

précédemment, nous abordons dans les points suivants une étude plus approfondie des propriétés des emballages.

Due à la similitude d'utilisation d'une boîte de carton et d'une caisse destinée à l'emballage, nous prêtons une attention spéciale au comportement en compression des boîtes de carton. Les propriétés qui déterminent ce comportement sont la résistance à la compression sur chant, la résistance à l'éclatement et la rigidité des matériaux composants. Les méthodes d'évaluation de ces propriétés sont déjà standardisées et nous permettent d'étudier les propriétés des différentes pâtes. En plus, ces propriétés sont étroitement liées à la résistance à la compression statique du produit final.

2.2. L'emballage

2.2.1. Concepts de base de l'emballage

Il existe un certain nombre de façons d'isoler un objet des effets dus au choc pendant son transport (36).

- La façon la plus commune est par blocage du produit (calage).
- Par flottaison : le produit est entouré d'un matériel de rembourrage constitué de petites pièces qui entourent le produit.
- Une autre façon d'emballer est d'envelopper les petites pièces avec des feuilles.
- Par bourrage : consiste à préparer une base de matériel élastique, à la placer sous le produit et à remplir l'espace autour avec des morceaux du même matériel.
- Par suspension : le produit est suspendu sur les côtés de la caisse.
- Par l'utilisation des caissettes qui prennent la forme du produit.

- Par la technique « mousse en place » : le contenant et le produit servent de caisse au matériau moussant.

La fonction de base d'un emballage est la protection du produit.

Pour concevoir le design et évaluer un emballage, nous devons connaître les caractéristiques du produit à emballer, c'est-à-dire sa forme physique, sa nature et les facteurs qui peuvent endommager l'emballage (37).

Dans le tableau 2.2, nous résumons les facteurs d'endommagement des produits et les méthodes qui permettent de les qualifier.

TABLEAU 2.2 Causes d'endommagement d'un produit (37)

Facteur	Méthode
Choc mécanique	Facteur de fragilité
Vibration	Plage de fréquences critiques
Abrasion	Qualité de finition de surface
Écrasement	Charge de sécurité
Changements de température	Limites critiques
Changements d'humidité	Plage d'humidité relative critique et isothermes d'humidité
Oxydation	Mécanismes impliqués
Gain ou perte d'odeur	Types d'odeurs associées
Lumière	Longueurs d'onde critiques
Détérioration microbiologique	Nature des micro-organismes

2.2.2. Les dommages mécaniques

L'écrasement survient normalement lors de l'empilement, pendant l'entreposage ou le transport. Dans l'empilement, la charge maximale expérimentée sous la pile

(ou pour chaque boîte) est fonction de la hauteur de la pile, de la hauteur et du poids de l'emballage ainsi que de la charge à supporter. Pour tenir compte du temps d'empilement, il est nécessaire d'utiliser un facteur de sécurité (37).

D'autre part, pendant le transport, l'emballage est aussi sujet à des vibrations. Le dommage dû à la vibration peut être causé par une faille due à la résonance ou à la fatigue (37).

Les impacts proviennent des chutes ou des chocs entre les emballages. L'ASTM a défini un « niveau de sécurité » basé sur le poids de l'emballage et la hauteur de chute. Ce niveau de sécurité est choisi en fonction de la valeur des produits et/ou de la facilité de remplacement, etc. Les impacts horizontaux causés par l'arrêt ou à la mise en marche des véhicules peuvent être mesurés par des équipements de nature similaire à ceux qui sont utilisés pour évaluer les chutes (37).

La résistance à l'écrasement est mesurée par un essai d'empilage ou par un essai de compression. Il faut remarquer que parfois, une partie de la résistance à l'écrasement peut être incluse dans le produit à emballer. Dans ce cas, l'essai à l'écrasement est réalisé directement sur le produit (37).

Pour obtenir la force maximale à l'écrasement, on utilise des matériaux rigides formés en structures de sections circulaires, polyédriques, carrés ou rectangulaires. Plus rigide est le matériau, meilleure sera la résistance à l'écrasement (37).

Tous les contenants peuvent être formés par un certain nombre de panneaux assemblés. Plus gros sont les panneaux, plus la structure aura la possibilité de courber ou de s'incliner sous une charge verticale (37). Ainsi, un panneau isolé, haut et étroit, aura plus de possibilités de fléchir qu'un panneau court et large, comme nous pourrons le constater plus loin, à la figure 2.13. Une fois que les panneaux verticaux sont assemblés, le flambage est considérablement restreint et les tensions sont transférées, en partie, aux jonctions et aux coins des

panneaux. Les unions élastiques souffrent moins des chocs que les unions rigides.

Le facteur de fragilité G, ou le facteur « charge-impact », peut être exprimé comme un multiple de l'accélération due à la pesanteur (g) (36). Ainsi, si un produit a un facteur G égal à 50, cela signifie qu'il peut résister aux impacts équivalents à 50 fois son poids sans s'endommager. Quand, par exemple, un produit reçoit un impact de 50 g, au moment de l'impact il se conduit comme si chaque partie du composant pesait 50 fois son poids normal. Il y a trois façons de déterminer le facteur de fragilité : par calcul, par essai ou par estimation (36).

Une fois que sont établies la nature et la hauteur des chutes pouvant endommager le produit, ainsi que sa fragilité, il est possible de concevoir l'emballage pour la protection mécanique. D'autres facteurs importants comme la valeur du produit, son poids, sa taille et le niveau d'assurance requis sont à considérer. Par exemple, certains instruments de précision peuvent être classés comme « extrêmement fragile », avec un facteur de fragilité G de 15 à 25 g, tandis qu'une machine à laver peut être classée comme « assez robuste », avec un facteur de 85 à 100 g (36).

Il est possible d'évaluer les besoins d'amortissement d'un produit en tenant compte de la formule suivante, qui calcule l'épaisseur d'amortissement minimal (T) nécessaire (37):

$$T = C \times h/G$$

ÉQUATION 2.2

où

C = facteur d'amortissement du matériel utilisé

h = hauteur de dessin

G= facteur de fragilité

Le facteur C est calculé comme le rapport f/e , où f est la tension exercée sur le matériau amortissant (force par unité de surface), et e , l'énergie d'impact par unité de volume ((masse de l'article x hauteur de la chute)/(surface amortissante

(x épaisseur)). Plus petit est le facteur C, plus efficace est le coussin et moindre l'épaisseur requise pour faire face à un choc donné.

2.2.3. Le comportement à la compression des boîtes en carton

La fonction primordiale d'une boîte en carton est de protéger son contenu des forces de compression exercées pendant la manutention, le stockage, le transport et la distribution. Il est entendu que la résistance à la compression, la rigidité et la résistance à l'éclatement sont les propriétés fondamentales pour remplir ce rôle (38, 39). La résistance à la compression est particulièrement importante pendant l'empilage des boîtes. La rigidité contribue à maintenir la forme plate des faces, en minimisant le renflement. La résistance à l'éclatement est nécessaire pour faire face aux pressions internes et externes.

Pour évaluer la résistance à la compression d'une boîte, différents modèles ont été proposés (38, 40). Ces modèles mettent en jeu la rigidité et l'épaisseur des panneaux constituant la caisse, la contrainte à la compression sur chant, et le périmètre de la caisse.

Résistance à la compression

La résistance à l'écrasement d'une caisse vide peut être évaluée par la compression sur chant des matériaux constituant la caisse. La résistance à la compression sur chant est la capacité d'un matériau comme le papier, le carton ou le carton ondulé, de supporter une contrainte en compression sur sa face mince pour une largeur donnée et s'exprime en kN/m ou kg force/cm (38).

Le papier est beaucoup plus faible en compression qu'en tension. La résistance à la compression d'un papier n'équivaut qu'à 30-40 % de sa résistance à la tension, et le taux de déformation à la rupture est aussi plus faible en compression qu'en tension, soit de l'ordre de 0,5 % contre 3 % (41). Une courbe typique contrainte-déformation d'un papier, figure 2.12, démontre que le papier

possède, au début, une capacité de charge égale en compression et en tension, donc, un module d'élasticité égal dans les deux cas. Ainsi, on peut conclure que lorsqu'une caisse s'effondre dans la majorité des cas, la cause principale est un manque de résistance à la compression.

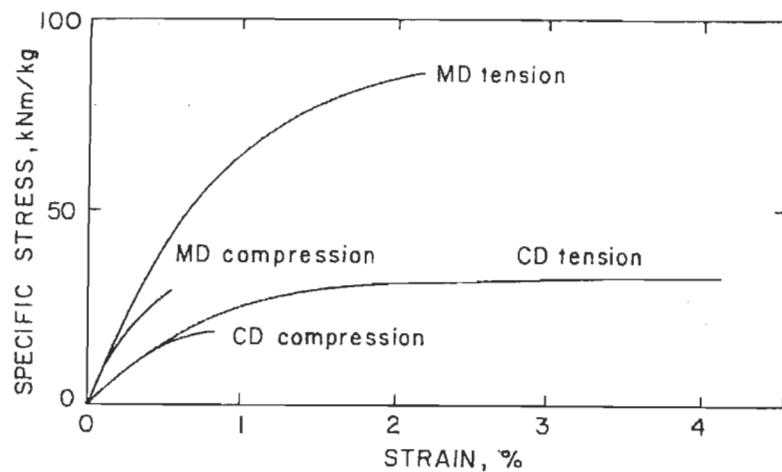


FIGURE 2.12 Courbe contrainte-déformation d'un papier.

Différents essais ont été proposés pour évaluer les cartons et les papiers composant un carton ondulé. Le mode de faille en compression dépend de la dimension de la structure. La charge maximale qu'une bande de papier ou de carton peut supporter s'exprime en fonction de son coefficient de minceur, défini comme le rapport entre la longueur et l'épaisseur de la bande (39, 42). Suivant la valeur du coefficient de minceur, la contrainte de compression maximale suit une courbe aux régions bien définies (figure 2.13). Dans la région III, on mesure la vraie résistance à la compression. Les régions I et II représentent la résistance à l'écrasement de la bande, et se divisent respectivement en une zone de flambage élastique et une zone de flambage plastique. Dans un modèle donné pour un cylindre, le coefficient de minceur représente la relation entre sa hauteur, son diamètre et son épaisseur (39). Les différentes valeurs du coefficient de minceur expliquent le comportement des cylindres sous une contrainte.

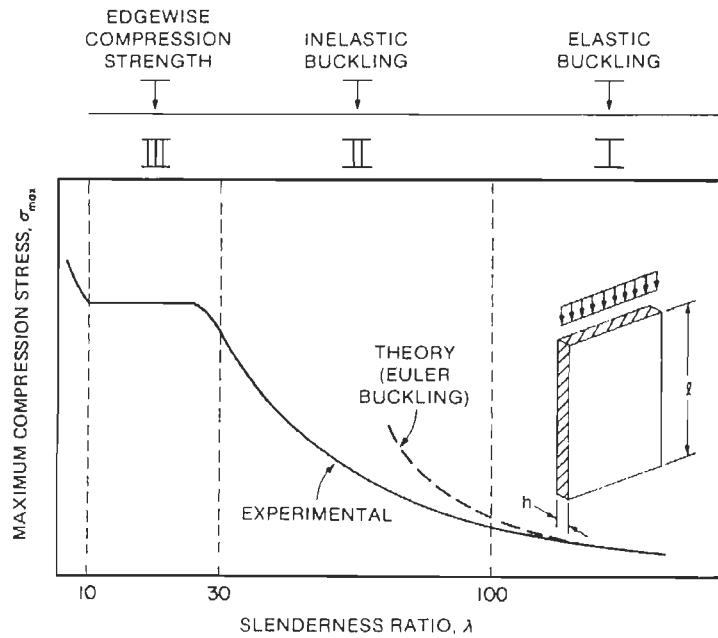


FIGURE 2.13 Relation entre la contrainte maximale et le coefficient de minceur (39).

Le phénomène de résistance sur chant peut être expliqué par différents modèles. Parmi les modèles, on trouve le flambage, mode caractéristique d'un écrasement, et le cisaillement, mode caractéristique d'une compression (43).

Bien que plusieurs méthodes aient été proposées pour mesurer la résistance à la compression sur chant, la méthode de compression en anneau est la plus utilisée. Cependant, cette méthode ne mesure pas la vraie résistance intrinsèque sur chant, c'est-à-dire, la résistance d'une feuille en absence de fléchissement ou flambage (44). Pour pallier à ce problème, la méthode de mesure de la résistance à la compression sur une distance courte a été introduite (méthode STFI). En comparant les indices de compression obtenus avec les deux méthodes, on observe que l'indice de résistance de compression en anneau représente entre 30 % et 60 % de la valeur de l'indice de résistance à la compression STFI, et que la corrélation entre les deux mesures est extrêmement pauvre (44). Ainsi, on peut conclure que la méthode STFI mesure la vraie résistance à la compression du matériau (région III dans la figure 2.13), et que les essais de compression sur chant mesurent la résistance à l'écrasement (régions I et II).

Cependant, l'introduction de la valeur de l'épaisseur du carton et de sa rigidité (méthode Taber) permet d'obtenir une forte corrélation entre la résistance en compression mesurée par les deux méthodes mentionnées ci-haut (45).

Les facteurs principaux qui agissent sur la résistance en compression sont : la résistance en compression intrinsèque des fibres et les liaisons fibres à fibres (41). Ces facteurs peuvent être influencés par le pressage humide et le raffinage (46), le rendement de la pâte (47), la courbure des fibres (42), la propreté de la pâte, la formation de la feuille et l'addition d'adjuvants (41), la densité de la feuille, l'épaisseur de la paroi des fibres et le degré de liaison interfibres (48).

Rigidité

La rigidité est reconnue comme une propriété fonctionnelle importante des cartons. Pendant la conversion, une paroi plate et rigide améliore la « *runnability* ». Pendant l'utilisation finale, un matériau rigide prévient le bombage de la boîte et aide à la protection du produit. La rigidité se définit comme la résistance d'un échantillon à se courber sous l'effet d'une charge. La rigidité est fonction du module d'élasticité, de la densité et du grammage du carton. Sous conditions constantes de fabrication (battage, pressage et séchage) et de module d'élasticité spécifique (module d'élasticité divisée par la densité), la rigidité augmente relativement à la puissance trois du grammage (39). La densité peut affecter ou non la rigidité, tandis que le séchage contraint augmente le coefficient d'élasticité spécifique et, par conséquent, la rigidité (39).

Résistance à l'éclatement

La résistance à l'éclatement dépend principalement des liaisons fibres à fibres, bien que cette propriété soit également influencée par la longueur des fibres. Ainsi, tous les facteurs qui augmentent la surface spécifique, la flexibilité et la conformabilité des fibres contribuent à la résistance à l'éclatement.

Dans le chapitre suivant, nous abordons la partie expérimentale. Dans cette première étape, nous présentons les résultats préliminaires d'une relève d'échantillons de matières premières, pâtes et caissettes de l'usine de référence. Les échantillons ont été pris pendant trois journées, et ils comptent sept scénarios au total.

Chapitre 3 - Étude de cas : compréhension des relations entre les variables du système

3.1. Objectifs

Caractériser les matières premières, les pâtes et les produits moulés d'une usine de référence.

Établir les paramètres reliés à la performance de la machine.

3.2. Les procédés d'analyse multivariable : analyse des composantes principales

La méthode d'analyse des composantes principales PCA (Principal Components Analysis), est un outil puissant qui permet d'examiner une grande quantité de variables simultanément, et indique les liens de corrélation entre celles-ci.

Le point de départ du PCA est une matrice X de données avec N lignes (observations) et K colonnes (variables).

Comme les variables ont des valeurs numériques très différentes, il est préférable de normaliser toutes les séries de variables dans une échelle de variance unitaire. Pour chaque variable, on calcule l'écart-type S_k et on obtient le facteur de correction, $1/S_k$, lequel sera multiplié par la colonne. Ensuite, afin d'améliorer l'interprétation des résultats, il est recommandé de centrer les moyennes. Dans ce cas, la valeur moyenne de chaque variable est soustraite des données de la colonne correspondante (49).

Nous pouvons construire, pour une matrice, un espace ayant autant de dimensions que le nombre de variables. Par exemple, pour $K = 3$ et $N = 20$, nous pouvons construire un système avec 3 axes, où chaque axe représente une variable et possède une longueur standardisée en accord avec le critère

d'échelle de variance unitaire. Ensuite, nous plaçons chaque observation (chaque ligne de la matrice) dans l'espace tridimensionnel, et nous obtenons un nuage de points dans cet espace. L'analyse des données correspond à la formulation d'une description quantitative de la forme du nuage de points, c'est-à-dire, à l'énonciation d'un modèle. Après la normalisation des données, nous pouvons construire la ligne qui représente la première composante principale, CP1. Cette composante est la ligne dans l'espace qui représente la mieux les données en terme de moindres carrés. La deuxième composante principale, CP2, est aussi une ligne, orthogonale à la première composante. Ainsi, les deux composantes définissent un plan dans l'espace. Si nous projetons toutes les observations sur ce plan, le graphique résultant nous donne la structure du système étudié. Les coordonnées des observations sur ce plan sont appelées *points* et le graphique résultant un *diagramme de pointage*. À la figure 3.1, nous observons un exemple de construction d'un diagramme de pointage pour le système de trois variables et deux composantes principales. Un système peut se composer de plusieurs plans, dans ce cas, l'étude s'accomplit en prenant deux composantes à la fois.

Si nous voulons savoir quelles variables ont le plus d'influence dans la structure de points observée et comment ces variables sont corrélées, nous devons construire un *diagramme de charges*, c'est-à-dire, nous devons connaître la charge de chaque composante principale. Les charges des composantes principales représentent géométriquement l'orientation du plan dans l'espace des K variables. La direction de la CP1 en relation aux variables est donnée pour le cosinus des angles α_1 , α_2 et α_3 . Ces valeurs indiquent comment les variables X_1 , X_2 et X_3 « chargent » CP1 (figure 3.1).

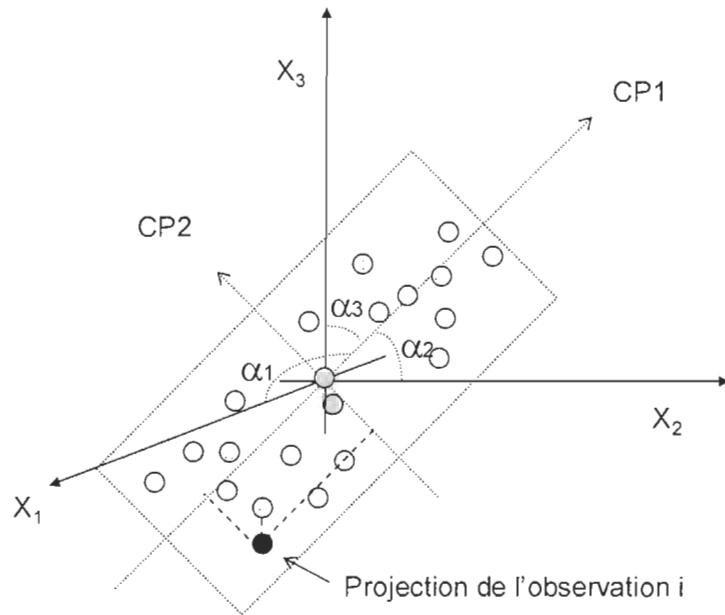


FIGURE 3.1 Construction d'un diagramme de pointage et de charges.

Les diagrammes de points et de charges sont complémentaires et peuvent se superposer. Ainsi, si nous observons une structure dans le diagramme de points, nous pouvons reconnaître les variables responsables dans le diagramme de charges.

D'un point de vue mathématique, une table de données X est modélisée selon les composantes principales comme :

$$X = 1^*x' + T^*P' + E \quad \text{ÉQUATION 3.1}$$

où :

$1^*x'$ = matrice des variables après normalisation

T = matrice des points ($t_1, t_2, t_3 \dots$)

P' = matrice transposée des charges ($p_1, p_2, p_3 \dots$).

E = matrice résiduelle

Pour trouver la dimension optimale (quantité de composantes principales), nous utilisons la validation croisée. Dans la validation croisée, une portion des données est exclue du modèle. Ensuite, la portion des données réduite est utilisée pour la construction d'une série de modèles parallèles qui servent à la prédiction des données enlevées. Finalement, les données prédictives sont comparées avec les données réelles. La sommation des différences au carré entre les valeurs prédictives et les valeurs observées nous donne la somme des carrés des résidus des valeurs prédictives (PRESS : predictive residual sum of squares). Cette valeur est une mesure du pouvoir prédictif du modèle.

Le logiciel utilisé réalise la validation croisée (VC) pour chaque dimension consécutive. À chaque dimension additionnelle, la VC donne une valeur de PRESS qui se compare avec la somme de carrés résiduelle (SCR) de la dimension précédente. Quand PRESS > SCR la dimension considérée est non significative et l'inclusion de nouvelles composantes est arrêtée.

La performance d'un modèle de composantes principales est évaluée simultanément par deux paramètres : la variation expliquée R^2 et la variation prédictive Q^2 . En outre, il est possible de répartir les valeurs de R^2 et Q^2 du modèle dans les valeurs de R^2 et Q^2 des réponses individuelles.

La valeur R^2 est une mesure de l'ajustement, c'est-à-dire, comment le modèle s'ajuste aux données, ou quelle est la portion de la variation de la réponse expliquée par le modèle. Une valeur haute de R^2 est une condition nécessaire mais non suffisante. Nous pouvons avoir un modèle avec un R^2 élevé mais qui n'a pas de pouvoir prédictif, par exemple, quand il y a peu de degrés de liberté pour le calcul des résidus (degrés de liberté utilisés pour le calcul de l'erreur). Une valeur basse de R^2 nous indique une reproductibilité pauvre (contrôle insuffisant de l'erreur expérimentale) ou un modèle incorrect.

La valeur Q^2 nous indique la capacité de notre modèle de prédire de nouvelles données ou la variation de la réponse prédictive par le modèle selon la VC. Une valeur basse de Q^2 nous indique une reproductibilité pauvre (contrôle insuffisant

de l'erreur expérimentale) et/ou un modèle incorrect. Si la valeur de R^2 est bonne, et si le plan d'expériences compte un nombre élevé de degrés de liberté des résidus, une valeur basse de Q^2 est due fréquemment à la présence de termes non significatifs dans le modèle (Q^2 négatif). Dans ce cas, nous pouvons améliorer la capacité prédictive du modèle en enlevant les réponses qui ne sont pas corrélées, ou les réponses qui ont une valeur de Q^2 individuelle basse. En général, une valeur de $Q^2 > 0,5$ est bonne, et la différence entre R^2 et Q^2 ne doit pas être très grande, de préférence, elle ne doit être pas supérieure à 0,2 - 0,3.

Les paramètres définis dans les paragraphes précédents sont exprimés mathématiquement par :

$$R^2 = 1 - \text{SCR/SCX}_{\text{totale}} \quad \text{ÉQUATION 3.2}$$

$$Q^2 = 1 - \text{PRESS/ SCX}_{\text{totale}} \quad \text{ÉQUATION 3.3}$$

$$\text{PRESS} = \sum (x_{ik} - x'_{ik})^2 \quad \text{ÉQUATION 3.4}$$

où :

SCR = somme des carrés des résidus

SCX_{totale} = somme des carrés totaux de la matrice X

PRESS = somme des carrés des résidus des valeurs prédictes

x_{ik} = valeur actuelle de la variable x

x'_{ik} = valeur prédictive de la variable x

Comment interpréter les diagrammes de pointage et de charges? Prenons comme exemple l'ensemble de mesures de cinq propriétés : résistance à la traction, résistance à l'éclatement, égouttage, rugosité et porosité (variables). Ces variables sont mesurées sur le produit final (papier journal) de sept usines: U₁ à U₇. Le traitement des données à l'aide d'un logiciel statistique, nous indique que 63 % des variations observées s'expliquent avec deux composantes principales, et nous donne les graphiques de charge et de pointage tels qu'indiqués aux figures 3.2 et 3.3. Dans un diagramme de

charges, les variables qui contribuent de la même façon sont groupées ensemble, c'est-à-dire, elles sont corrélées positivement. Quand les variables varient de façon inverse, elles sont placées en sens opposé, dans les cadans adjacents ou diagonalement opposés. Ainsi, à la figure 3.2, nous pouvons dire que la résistance à l'éclatement et la résistance à la traction sont directement corrélées et varient dans le même sens. En même temps, quand ces propriétés augmentent, la résistance à la déchirure et l'égouttage diminuent. D'autre part, nous observons que la rugosité et la porosité varient en sens contraire l'une de l'autre. Aussi, quand la distance au centre des axes d'une variable est plus grande, cette variable influence plus le modèle. Ainsi, d'après la figure 3.3, nous pouvons dire que les usines U_1 , U_2 et U_3 sont les usines qui ont des papiers avec les résistances à l'éclatement et à la traction les plus élevées, et que l'usine U_7 fabrique le papier avec la plus haute porosité.

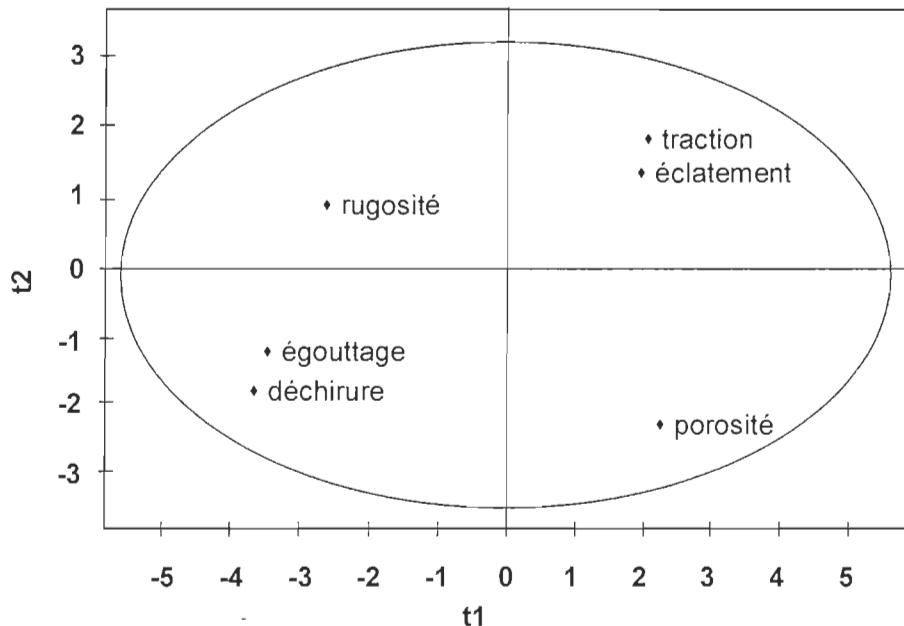


FIGURE 3.2 Exemple d'un diagramme de charges.

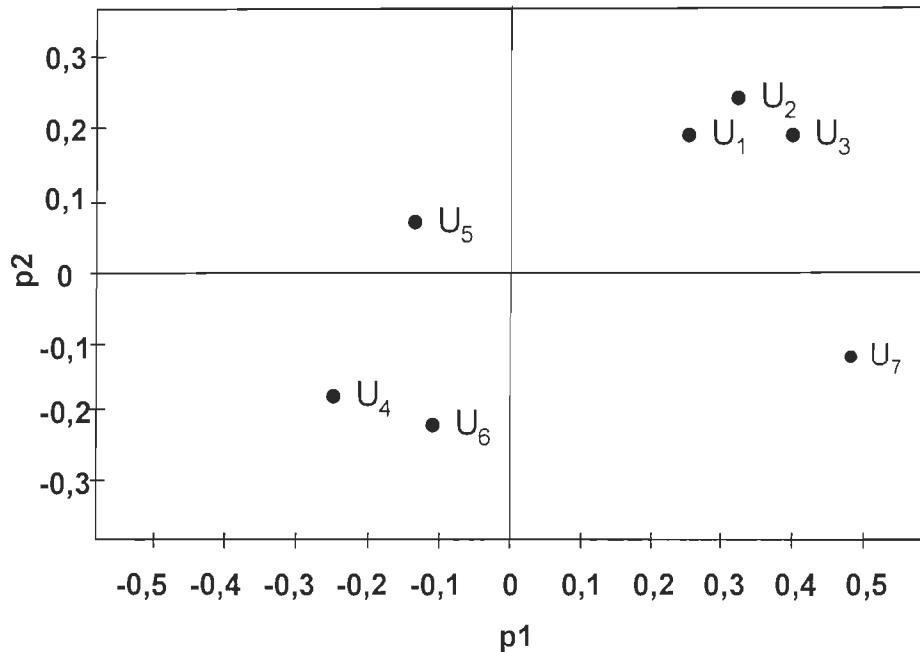


FIGURE 3.3 Exemple d'un diagramme de pointage.

La technique d'analyse multivariable PCA a été utilisée pour développer un modèle basé sur les sources de variations d'un procédé (50). L'évaluation du procédé de traitement de l'eau usée a été effectuée grâce à un modèle PCA, lequel a indiqué les changements dans l'opération du système et a également montré les variables contribuant à ces changements. En outre, dans une étude utilisant la méthode PCA, la qualité de 19 pâtes chimicomécaniques a été évaluée (51). Les résultats indiquent que quatre variables composites suffisent pour expliquer plus de 90 % de la variation dans 11 propriétés papetières. De plus, dans ce cas, les données servent à illustrer l'utilisation d'une carte SQC (Statistical Quality Control) dans l'identification des variations dans la qualité de la pâte. D'autre part, une modification des algorithmes d'analyse PCA a permis l'analyse de données fonctionnelles (52) : les mesures du profil sens travers du papier servent à identifier les réponses des vannes de dilution de la caisse d'arrivée, et les perturbations à la partie humide sont diagnostiquées à l'aide de mesures du facteur de brillance. D'ailleurs, la technique PCA est très souvent utilisée dans les analyses de données en même temps que la technique d'analyse multivariable PLS (Partial Least Squares Regression After Projection

to Latent Structure). Plus de détails sur l'utilisation conjointe de ces deux méthodes ainsi que sur la méthode PLS sont présentés au chapitre 5.

3.3. Description du procédé de référence

L'usine Cascades Forma-Pak inc. est la seule qui fabrique des produits en pâte moulée au Québec, et cela depuis plus de 30 ans. L'usine compte cinq machines pour la fabrication de produits en pâte moulée, dont des caissettes à œufs (20, 30 et 36 œufs), des fournitures médicales jetables pour le secteur hospitalier et des porte-gobelets pour la restauration rapide. La capacité de production de l'usine est autour de 250 millions d'unités par année.

L'intérêt de ce travail, au départ, était centré sur trois machines, qui utilisent 25 tonnes/jour de pâte, et qui partagent le cuvier de réserve et le cuvier des eaux blanches. La matière première, bottins téléphoniques et papier journal avant et post consommation, est désintégrée dans un triturateur à une consistance qui varie entre 5 et 8 %. La pâte obtenue est envoyée, après dilution à environ 2,5 % de consistance, au cuvier de réserve.

L'usine travaille avec récupération interne des eaux. Les eaux blanches provenant des machines alimentent deux cuviers d'eau blanche. Ces eaux blanches servent à la dilution dans les machines, à la dilution dans les triturateurs, et comme eau de scellement des pompes. Une partie des eaux blanches est clarifiée et envoyée aux douches des machines et au triturateur. Dans la majorité des cas, l'eau blanche est totalement recyclée dans le procédé. Une ouverture du circuit pour permettre l'entrée d'eau fraîche s'effectue habituellement une fois par mois.

À la sortie du cuvier de réserve, on ajoute un coagulant et un floculant comme adjuvants de rétention, et la pâte est diluée avant d'arriver aux cuviers de tête de la machine. La brosse rotative qui nettoie les matrices de formation applique également un savon. Un conditionneur est ajouté dans les douches nettoyantes, un agent antimousse et un biocide dans le circuit d'eaux blanches. Les plateaux

hors spécifications sont réintroduits dans le trituateur. À la figure 3.4 on observe un schéma du circuit pour une machine, où sont signalés les points d'échantillonnage.

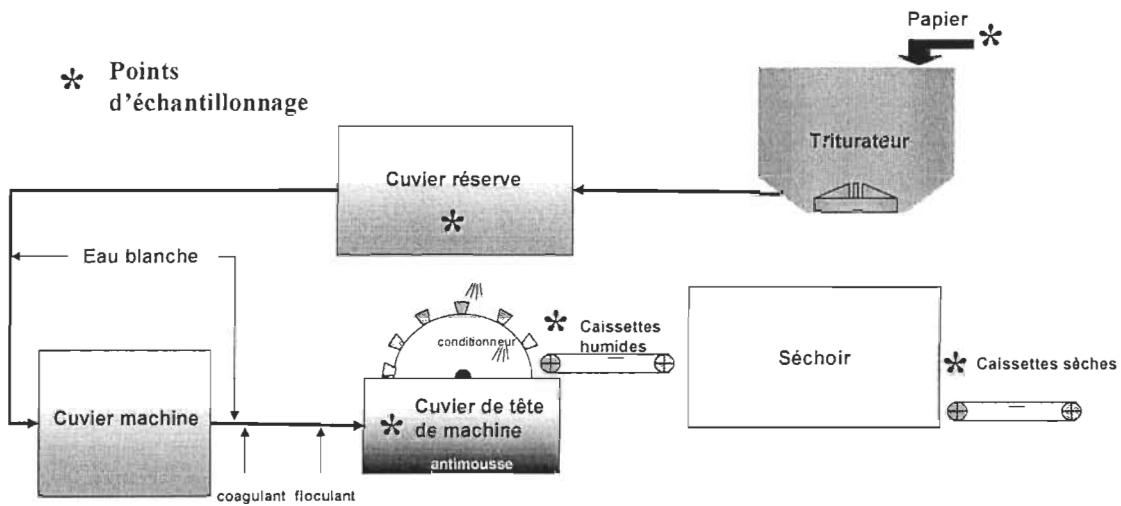


FIGURE 3.4 Points d'échantillonnage.

La section de formation se compose d'une série de matrices couvertes par un tamis, montées sur un tambour tournant à une vitesse uniforme, immergé dans le cuvier de tête de machine contenant la pâte à 0,6 % -1 % de consistance. Un système de vide attire le matériel fibreux sur les matrices. Après la formation sur le tambour de moulage, les caissettes formées sont attirées par succion sur les matrices de transfert qui transfèrent les produits moulés au convoyeur d'entrée du séchoir. La section de séchage se compose d'un convoyeur à passage multiple, qui transporte le matériel dans le séchoir à air chaud. Les produits secs passent ensuite à un convoyeur de décharge où ils sont triés, empilés, comptés et enveloppés.

3.4. Méthodologie

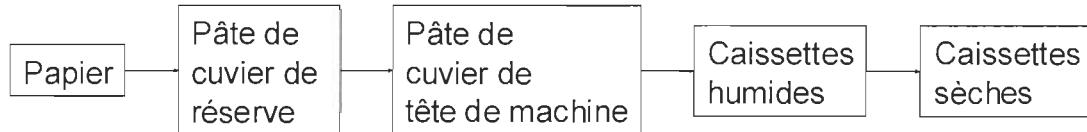
Les échantillons ont été pris à l'usine durant trois périodes d'échantillonnage. Quelques échantillons furent pris à plusieurs reprises dans la même journée de

façon à évaluer la variabilité du système. Les matières premières furent échantillonnées pendant la première journée de prise d'échantillons. La pâte de cuvier de réserve, la pâte des cuviers de tête de machine, les caissettes humides et les caissettes sèches ont été échantillonnées durant les trois périodes. Lors du premier échantillonnage, deux machines qui produisaient des plateaux à alvéoles pouvant contenir 30 œufs, furent échantillonnées.

Durant la deuxième journée d'échantillonnage, ces deux machines plus une troisième qui produisait des porte-gobelets pour le secteur de l'alimentation ont été échantillonnées. La troisième période de prise de matériel fut une journée où l'une des machines présentait des problèmes de fonctionnement. Dans ce cas, les échantillons furent pris seulement sur la ligne qui présentait des problèmes.

3.4.1. Structure d'échantillonnage

Le schéma de prise de matériel lors les trois journées d'échantillonnage a été le suivant :



Durant la prise d'échantillons sur deux machines en même temps, la pâte de cuvier de réserve correspondant est la même pour les deux machines. La pâte de cuvier de réserve est obtenue après la trituration. La pâte du cuvier de tête de machine est une pâte diluée avec l'eau blanche et peut contenir différents produits chimiques additionnés au procédé. Les différents moments d'échantillonnage ont été numérotés successivement de façon à faciliter la lecture des résultats. Les matières premières, les pâtes et les caissettes, les périodes d'échantillonnage, ainsi que la nomenclature utilisée dans la présentation des résultats sont décrites au tableau 3.1.

3.4.2. Évaluation des papiers recyclés

Nous avons pris des échantillons des papiers utilisés comme matière première lors de notre première visite à l'usine. Les trois sortes de papiers recyclés utilisés étaient des bottins téléphoniques, des journaux avant consommation (non vendus) et des journaux post consommation (composés principalement de dépliants publicitaires). Les matières premières furent évaluées après leur désintégration et mise en pâte. Les trois sortes de papiers ont été trempées dans l'eau pendant une heure, puis désintégrés à une consistance de 2 % s.f.s. et 80°C pendant 2 minutes (conditions du désintégrateur de type Domtar, normalement utilisé pour désintégrer la pâte qui sera utilisée pour la formation des feuilles). Les pâtes obtenues ont été évaluées individuellement et en mélange. Une addition d'adjuvants chimiques dans le mélange a été effectuée, dans une proportion plus forte que celle qui est faite en usine, de façon à évaluer leur influence sur la qualité de la pâte. Dans le tableau qui suit, on décrit les pâtes obtenues et leur nomenclature (tableau 3.2).

TABLEAU 3.1 Structure d'échantillonnage et nomenclature utilisée

	Nomenclature	Pâte	Additifs
Premier échantillonnage			
Bottins téléphoniques	Bott		
Journal post consommation	Jp		
Journal avant consommation	Ja		
Cuvier de réserve	CR1, CR2	Bott+Jp+Ja	
Cuvier de tête de machine A et caissettes humides	Ta1, Ta2, MHa1, MHa2	Bott+Jp+Ja	F, Cond.
Cuvier de tête de machine B et caissettes humides	Tb1, Tb2, MHb1, MHb2	Bott+Jp+Ja	F, Cond., C, antimousse
Deuxième échantillonnage			
Cuvier de réserve	CR3, CR4, CR5, CR6	Bott+Jp	
Cuvier de tête de machine A et caissettes humides	Ta3, Ta4, MHa3, MHa4	Bott+Jp	F, Cond., C, antimousse
Cuvier de tête de machine B et caissettes humides	Tb5, Tb6, MHb5, MHb6	Bott+Jp	F, Cond., C, antimousse
Cuvier de tête de machine C et caissettes humides	Tc3, Tc4, MHc3, MHc4, Tc6, MHc6	Bott+Jp	F, Cond., C, antimousse, colorant
Troisième échantillonnage			
Cuvier de réserve	CR7	Jp	
Cuvier de tête de machine A et caissettes humides	Ta7, MHa7	Jp	F, Cond., C, antimousse

a, b, c : échantillon de la machine A, B ou C

F : flocculant

CR : pâte de cuvier de réserve

C : coagulant

T : pâte cuvier de tête de machine

Cond. : conditionneur

MH : caissettes humides

TABLEAU 3.2 Nomenclature des pâtes de laboratoire

Nomenclature des pâtes	Description de la source
Bottin	Bottins téléphoniques
Ja	Journaux avant consommation
Jp	Journaux post consommation
Bottin/Ja	Mélange 50 % Bottins téléphoniques et 50 % journaux avant consommation
Bottin/Jp	Mélange 50 % Bottins téléphoniques et 50 % Journaux post consommation
Bottin/Ja + C	Mélange Bottin/Ja + 10 % s.f.s. coagulant
Bottin/Ja + F	Mélange Bottin/Ja + 10 % s.f.s. flocculant
Bottin/Ja + C/F	Mélange Bottin/Ja + 10 % s.f.s. coagulant + 10 % s.f.s. flocculant
Bottin/Ja + Cond.	Mélange Bottin/Ja + 10 % s.f.s. conditionneur

Les pâtes furent évaluées en mesurant les caractéristiques des fibres, de la pâte, des feuilles standards (60 g/m²) et des feuilles épaisses (150 g/m²). Afin de minimiser l'impact de pertes de fines et de matières en suspension sur les propriétés des pâtes, les feuilles ont été formées en utilisant un système de recirculation des eaux adapté à la formette conventionnelle. Les feuilles épaisses ont été formées en suivant la technique traditionnelle, mais en utilisant 3 g secs pour la formation de chacune. L'identification et l'analyse quantitative des mélanges de fibres composantes des pâtes furent réalisées par microscopie. Dans le tableau 3.3 figure la liste des essais effectués, ainsi que la méthode normalisée ou l'appareillage utilisé. À la suite du tableau, une brève description des mesures obtenues avec l'appareil FQA (Fiber Quality Analyzer) et de la technique de quantification de fibres par microscopie est donnée. L'analyseur de qualité de fibre (FQA) emploie des systèmes hydraulique, optique et de traitement d'image pour mesurer la courbure, l'angle de cassure, et la distribution de la longueur des fibres dans un échantillon de pâte. Le système transporte une suspension diluée de fibres à travers une cellule d'écoulement isolée. La cellule oriente des fibres hydrodynamiquement dans

une plan mince et presque bidimensionnelle. Le détecteur d'image est une camera CCD (camera de résolution élevée) [53, 54].

TABLEAU 3.3 Liste d'essais

Indice d'égouttage	Norme TAPPI T 227 om-94
Classification de fibres Bauer McNett	Norme TAPPI T 233 cm-95
Longueur, courbure et angle de cassure des fibres. Pourcentage de fines	Appareil FQA
Formation de feuilles de 60 g/m ²	Norme TAPPI T 205 sp-95
Grammage et épaisseur	Norme TAPPI T 220 sp-96
Propriétés physiques : rupture, déchirure, éclatement	Norme TAPPI T 220 sp-96
Coefficient de diffusion de la lumière	Norme TAPPI T 220 sp-96
Blancheur ISO	Norme TAPPI T 452 om-92
Résistance à la compression en anneau	Norme TAPPI T 822 om-93
Résistance à la compression STFI	Norme TAPPI T 826 pm-92
Rigidité	Norme TAPPI T 489 om-92
Identification et analyse quantitative des mélanges de fibres	Normes CPPA B.3P, B.7 et B.21

Longueur moyenne des fibres pondérée en poids

$$L_p \text{ (mm)} = \frac{\sum n_i L_i^3}{\sum n_i L_i^2}$$

ÉQUATION 3.5

où :

L : longueur de fibre (supérieure à 0,07 mm), en mm

n : nombre de fibres comptées

i : 1,2,... N

Pourcentage de fines pondéré en poids

Le pourcentage de fines pondéré en poids est une estimation du poids de la fraction de fines de longueur comprise entre 0,05 et 0,2 mm.

$$\text{Fines (\%)} = 100 * \frac{\sum n_i L_i}{L_T}$$

ÉQUATION 3.6

où :

n : nombre de fines comptées

L : longueur de fibre (entre 0,05 et 0,2 mm)

L_T : longueur totale de fibres

Courbure des fibres

L'indice de courbure des fibres est calculé en fonction de la longueur L de la fibre (d'un bout à l'autre) et la longueur l projetée comme :

$$IC = (L/l) - 1$$

ÉQUATION 3.7

L'appareil FQA mesure les fibres plus longues que 0,5 mm. Ainsi, la courbure de fibres individuelles exprimée en fonction de la longueur pondérée en poids devient :

$$IC_p = \frac{\sum IC_i L_i}{\sum L_i}$$

ÉQUATION 3.8

Angle de cassure

Les angles de cassure sont déterminés par des changements d'angle de l'axe longitudinal de la fibre. Ces changements d'orientation correspondent à des fractures de la paroi ou à des points faibles. L'indice de l'angle de cassure est la sommation du nombre d'angles, N_x , de retournements des fibres, qui sont comprises à l'intérieur d'un rang d'angles déterminé (rang « x »). Cet indice est

basé sur l'indice de Kibblewhite (55). Pour chaque retournement dans la fibre, nous assignons un poids qui dépend de l'angle de la courbe. La sommation de tous les poids nous donne l'indice. Le poids est zéro pour des angles inférieurs à 10°, et varie entre 1 et 4 pour les catégories suivantes : (10°-20°), (21° -45°), (46° -90°) et (90°-180°). Le FQA mesure seulement les angles supérieurs à 20° et les fibres plus longues que 0,5 mm, ainsi, dans notre cas, l'indice d'angle de cassure est :

$$\text{Angle de cassure, indice} = \frac{2N_{(21-45)} + 3N_{(46-90)} + 4N_{(91-180)}}{L_T} \quad \text{ÉQ. 3.9}$$

Identification et analyse microscopique des mélanges de fibres

L'identification des différentes sortes de fibres qui composent les pâtes obtenues à partir des papiers recyclés a été faite par microscopie optique. Le but principal était de quantifier le contenu en pâte chimique et en pâte mécanique de chaque variété de papier.

Le principal inconvénient consiste à quantifier adéquatement les fibres de pâtes mécaniques, étant donné les diverses grosseurs et formes des fibres et fragments contenus dans cette pâte. Une méthode (56) propose d'obtenir la masse de pâte mécanique par différence. Un nombre connu de fibres de type différent et de masse connue est ajouté à une masse connue du mélange étudié. La quantité de fibres comptées de pâte chimique et de pâte ajoutée permet de déterminer, par différence avec la masse totale, la masse de pâte mécanique contenue dans le mélange. Comme notre but était d'utiliser une technique qui permettrait une identification et qualification rapide d'une pâte recyclée, cette méthode a été modifiée.

La méthodologie utilisée dans notre travail pour l'analyse de la composition fibreuse des pâtes recyclées est la suivante:

- 1) Préparer des lames servant à l'examen microscopique selon la norme CPPA B.21.
- 2) Colorer de la lame avec le colorant Graff C (norme CPPA B.3P). Placer une lamelle sur la lame et enlever l'excès de colorant.
- 3) Compter au moins 150 fibres par lamelle, en les différenciant par leur couleur. Même si la norme CPPA B.3P (où son équivalent, TAPPI T401) donne une bonne description des couleurs qui peuvent être observées, nous avons utilisé une carte de couleurs (57) et des lamelles obtenues avec pâtes connues (figure 3.5) comme référence.
- 4) Les fibres observées, en fonction de leur couleur et de leur état (entières ou coupées) ont été regroupées dans trois groupes principaux :
 - Pâte mécanique : fibres coupées, de couleur jaune brillant à jaune intense jusqu'à orange. Seulement les fibres coupées ont été comptées. Les fragments de parois, les fibres très courtes et les fines ne sont pas comptés.
 - Pâte chimique de résineux : fibres longues entières, de couleur gris bleuâtre.
 - Pâte chimique de feuillus : fibres courtes entières, de couleur bleu foncé.
- 5) Les pourcentages en masse de chaque sorte de pâte sont calculés comme suit :

$$P_M (\%) = (f_M N_M) / (f_M N_M + f_{CR} N_{CR} + f_{CF} N_{CF}) \quad \text{ÉQUATION 3.10}$$

$$P_{CR} (\%) = (f_{CR} N_{CR}) / (f_M N_M + f_{CR} N_{CR} + f_{CF} N_{CF}) \quad \text{ÉQUATION 3.11}$$

$$P_{CF} (\%) = (f_{CF} N_{CF}) / (f_M N_M + f_{CR} N_{CR} + f_{CF} N_{CF}) \quad \text{ÉQUATION 3.12}$$

où

f_M = facteur de masse de la pâte mécanique, inconnu

f_{CR} = facteur de masse de la pâte chimique de résineux = 0,9

f_{CF} = facteur de masse de la pâte chimique de feuillus = 0,5

N_M , N_{CR} , N_{CF} = nombre de fibres comptées de pâte mécanique, de pâte chimique de résineux et de pâte chimique de feuillus, respectivement

Le facteur de masse de la pâte mécanique inconnu est calculé en supposant un facteur de masse pour la pâte entière de 1 selon :

$$f_M N_M = N_T - (f_{CR} N_{CR} + f_{CF} N_{CF})$$

ÉQUATION 3.13

où

N_T = nombre total de fibres comptées

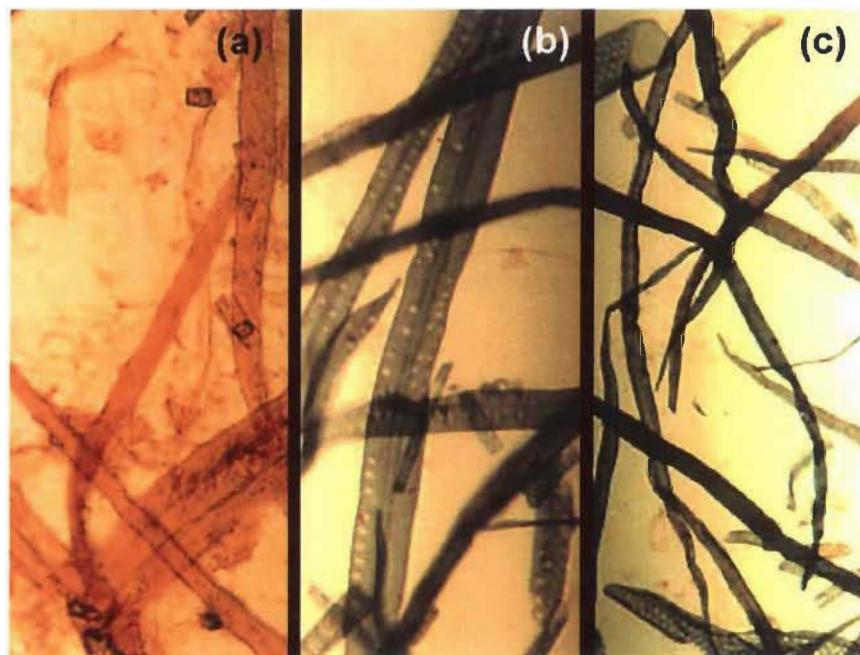


FIGURE 3.5 Coloration de pâtes de référence : (a) pâte PTM commerciale de résineux, (b) pâte kraft commerciale de résineux, (c) pâte kraft commerciale de feuillus.

3.4.3. Évaluation des pâtes

Les échantillons des pâtes des cuviers de réserve (CR) et des cuviers de tête de machine (T) furent évalués en laboratoire. Également, à la suite de la détermination de leur siccité, les caissettes humides obtenues après formation et avant séchage (MH), ont été mises en pâte par désintégration à chaud à 2 %

de consistance. Ces trois sortes de pâtes et leurs caractéristiques fibreuses furent évaluées en utilisant la même méthodologie que celle décrite dans la section antérieure (section 3.4.2) et le tableau 3.3.

3.4.4. Évaluation des caissettes

Premier échantillonnage

Les produits moulés ont été ramassés en fonction de la largeur de la machine. Ainsi, pour chaque période d'échantillonnage, quatre plateaux à alvéoles pouvant contenir 30 œufs furent recueillis dans les machines A et B. Les caissettes furent coupées en quatre pour obtenir des échantillons adéquats à l'appareil utilisé pour les essais de compression (figure 3.6a et 3.6b). Après conditionnement dans une salle à 25 °C et 50 % d'humidité, les caissettes furent écrasées pour mesurer leur résistance à la compression. La résistance à la compression des caissettes a été déterminée comme la force (ou la charge) nécessaire pour produire la faille de la caissette. Les essais ont été accomplis dans un appareil à compression TMI Monitor/Compression, modèle 17-70 (figure 37.a). La charge a été exercée à vitesse uniforme de 20 mm/min. La résistance à la compression a été enregistrée comme la charge mesurée par rapport au grammage ou au volume spécifique des caissettes.

Les mesures d'épaisseur des parois des caissettes ont été réalisées sur des petites rondelles d'environ 9,6 mm de diamètre découpées avec un emporte-pièce. Vingt rondelles ont été découpées par caissette, et l'épaisseur de chaque rondelle a été mesurée avec un micromètre de précision 0,01 mm. Le poids moyen des 20 rondelles a été relié à la surface d'une rondelle (valeur constante) pour obtenir le grammage des caissettes. Par la suite, le volume spécifique a été calculé comme épaisseur/grammage. Il faut remarquer que, tant le grammage que le volume spécifique sont des mesures apparentes : nous avons découpé les petites rondelles dans des parties homogènes des parois, sans prendre en compte les rebords, toujours présents dans les caissettes de pâte moulée.

Deuxième et troisième échantillonnages

Pendant la deuxième période d'échantillonnage, en plus des machines A et B produisant des plateaux à alvéoles pouvant contenir 30 œufs, fut échantillonnée la machine C, qui produisait des porte-gobelets pouvant contenir quatre verres. Dans le troisième échantillonnage, seulement la machine A fut échantillonnée. Les quatre morceaux découpés d'un plateau du premier échantillonnage différant en quantité de points d'appui, nous avons décidé de changer la forme de l'échantillon destiné aux essais de compression. Ainsi, des plateaux à œufs furent découpés en quatre morceaux identiques de quatre alvéoles chacun (figure 3.6c). De la même façon, les porte-gobelets furent coupées en quatre pièces égales (figure 3.6d).

Après conditionnement à 25 °C et 50 % d'humidité, les échantillons furent écrasés dans un appareil Instron modèle 401 (figure 3.7b), muni d'une cellule de charge de 500 kg et relié à un ordinateur, lequel nous a permis de mesurer et d'enregistrer le développement des efforts subis jusqu'au flambage de la pièce (raison qui nous avait amené à changer l'appareil utilisé pour mesurer la résistance à la compression). Le logiciel permet d'établir les paramètres reliés au développement et aux résultats du test. Ainsi, la vitesse d'essai était fixée à 20 mm/s et la fréquence d'enregistrement de données à 10 points/s. Le début de l'essai est défini pour une distance entre plaques égale à la hauteur d'une caisse, 4,8 mm, et la fin de l'essai était déterminée après un déplacement en compression de 25 mm. Le logiciel permet d'enregistrer le point de rupture de différentes façons. Le point de rupture a été choisi en observant comment la caisse se déforme pendant l'essai et en regardant une courbe typique, comme celle montrée à la figure 3.8. Ainsi, nous avons choisi comme point de rupture le premier point où la pente de la courbe traverse le zéro, point A dans la figure 3.8. Dans ce point, les parois latérales de la caisse fléchiront soudainement de façon abrupte, mais si l'on enlève la charge, la caisse récupère sa forme initiale (fraction élastique de la courbe charge-déformation). À partir du point A jusqu'au point B, les parois de la caisse fléchissent

davantage. Durant cette période, si l'on enlève la charge, les parois récupèrent leur forme mais les surfaces d'appui, supérieures et inférieures, restent écrasées (point B de la courbe : début de la période de déformation plastique). À partir du point C, les parois se plient sur elles-mêmes et la structure se compacte davantage : si l'on enlève la charge, la caisse reste complètement déformée. Conséquemment, à partir du point A, même si la structure supporte plus de charges, nous considérons que les déformations subies par la caisse mettent en péril l'objet protégé par le contenant en pâte moulée. Ainsi, le point choisi comme déterminant la résistance à la compression d'une caisse est le point A.

La charge supportée en compression est enregistrée en fonction du grammage et du volume spécifique, lesquels ont été calculés comme décrit précédemment. Il faut souligner que, pour des échantillons identiques, le rapport mesuré entre les résultats de la charge obtenue avec les deux méthodes utilisées est « charge TMI=1,275 charge Instron ». De toute façon, pour l'analyse des résultats nous considérons les deux groupes de données de façon indépendante.

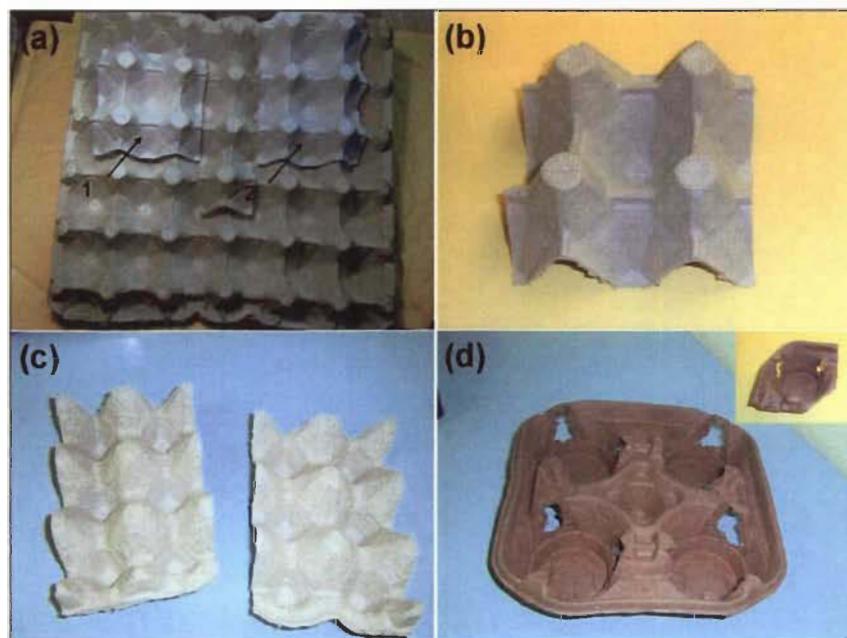


FIGURE 3.6 Échantillons découpées.

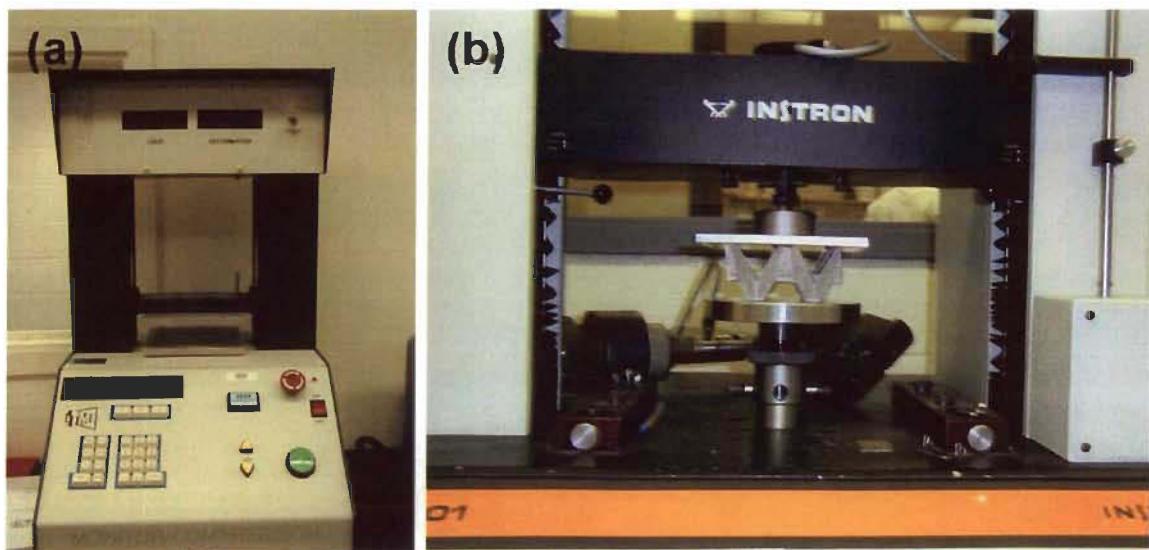


FIGURE 3.7 Appareils de compression.

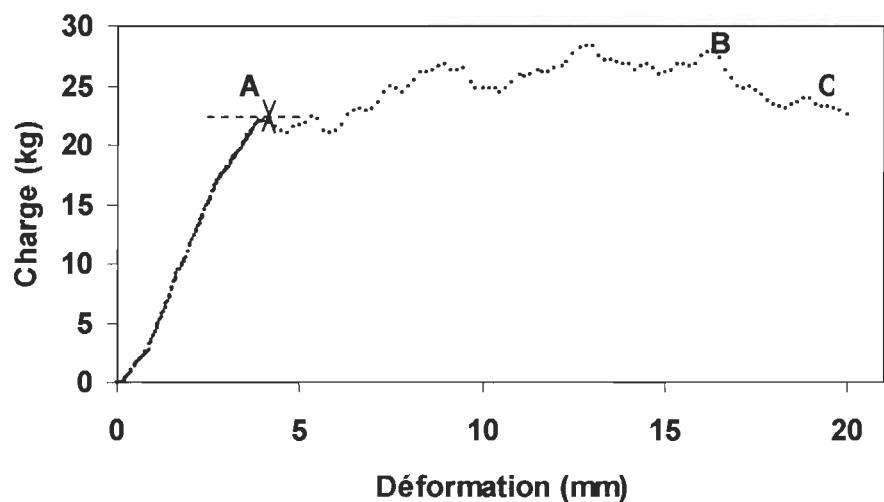


FIGURE 3.8 Courbe charge-déformation obtenue à partir d'un échantillon découpé des plaques du troisième échantillonnage (MSa7).

3.5. Résultats et discussion

Les résultats sont présentés en fonction des composantes principales reliées aux groupes de données obtenues avec la même méthodologie. Ainsi, étant donné que la taille de l'échantillon et l'appareil de détermination de la résistance

à la compression diffèrent entre le premier et le deuxième échantillonnage, pour l'analyse des composantes principales, nous avons divisé les résultats en trois groupes : matières premières, premier échantillonnage, et deuxième et troisième échantillonnages. Dans le groupe de matières premières, nous n'incluons pas les mélanges avec produits chimiques, pour lesquels nous n'avons pas les résultats de classification de fibres de ces pâtes. Les résultats des essais sur pâtes (incluant les pâtes de tête de machine) et produits finaux figurent dans l'annexe A, tableaux A.1 à A.29.

3.5.1. Papiers recyclés

La méthode PCA nous a permis d'étudier vingt et une variables interdépendantes (propriétés) reliées à cinq observations différentes (pâtes). Dans le tableau 3.4 figurent, la liste des variables et observations ainsi que la nomenclature utilisée dans le modèle PCA.

De façon à normaliser la distribution, les résultats d'énergie absorbée en tension et la variable fraction R100 ont été transformés selon :

$TEA = \log [(x - 29,23)/(38,6 - x)]$ et $R100 = \log [(x - 11,79)/(17,45 - x)]$. Pour ce type de transformation (transformation logistique), les valeurs qui ajustent mieux l'équation de distribution sont les valeurs près des valeurs maximale et minimale de la série de données.

Afin d'améliorer la variance expliquée par le modèle et leur capacité prédictive, les variables qui avaient une valeur de Q^2 basse ou négative ont été éliminées. Ces propriétés ne sont pas corrélées avec aucune autre, et sont faiblement définies dans le diagramme de charges. En supprimant la longueur de fibres pondérée en poids et la résistance à la compression en anneau, 90,3 % des variations observées dans la qualité des pâtes étudiées peuvent être représentées par deux composantes principales.

TABLEAU 3.4 Liste de variables et observations et leur nomenclature

Variables		Observations	
Indice d'égouttage (mL)	égoutt	Bottins téléphoniques	Bott
Fines pondérées en poids (%)	fines	Journaux avant consommation	Ja
Longueur de fibres pondérée en poids (mm)	lf	Journaux post consommation	Jp
Courbure, longueur pondérée en poids (mm)	courb	Mélange bottins et journaux avant consommation	Bott/Ja
Indice d'angle de cassure	angle	Mélange bottins et journaux post consommation	Bott/Jp
Fraction R14 (%)	R14		
Fraction R28 (%)	R28		
Fraction R48 (%)	R48		
Fraction R100 (%)	R100		
Fraction R200 (%)	R200		
Fraction P200 (%)	P200		
Volume spécifique : feuilles 1,2 g (cm ³ /g)	vs		
Indice d'éclatement (kPa m ² /g)	éclat		
Indice de déchirure (mN m ² /g)	déch		
Indice de traction (N m/g)	trac		
Énergie absorbée en tension (g/cm)	TEA		
Rigidité Taber (10 ³ mN m (g/m ²))	rigid		
Résist. à la compress. en anneau (N m/g)	anneau		
Résistance à la compress. STFI (N m/g)	STFI		
Blancheur ISO	bl		
Coef. de diffusion de la lumière	cd		

Les poids relatifs des deux composantes sont montrés à la figure 3.9. La première composante principale, qui explique 60 % de la variation totale dans la qualité de la pâte, représente bien la plupart des résistances physiques, l'égouttage, les propriétés optiques et les fractions plus longues (R14 et R28) et plus courtes (R200 et P200) des fibres. La variation restante, 30 %, est expliquée par la deuxième composante, associée aux fractions de fibres

intermédiaires (R48 et R100), au pourcentage des fines, à l'angle et à la courbure des fibres et à la résistance à la compression STFI. Ainsi, nous pouvons observer que les résistances physiques les plus favorisées par le contenu en fibres longues et par une augmentation de l'indice d'égouttage sont l'éclatement, la déchirure et le TEA et qu'elles sont défavorisées par une augmentation des fractions R200 et P200. La résistance à la traction et la rigidité sont aussi définies dans la première composante, mais elles sont également influencées positivement par la fraction R48 et négativement par les fines, la fraction R100, l'angle et la courbure de fibres. En ce qui touche les propriétés optiques, autant la blancheur que le coefficient de dispersion de la lumière sont influencés par les fractions R200 et P200. De plus, la résistance à la compression STFI est la seule propriété de résistance qui n'est pas favorisée par une augmentation du volume spécifique, de l'égouttage et de la fraction R48. Toutes ces observations nous laissent entendre que la première composante représente les changements dans la longueur de fibres qui ont une forte influence sur la résistance, tandis que la deuxième composante est plutôt reliée à la proportion de fibres et aux caractéristiques qui ont une influence sur la capacité de liaison entre les fibres.

Si nous examinons le diagramme de pointage correspondant, figure 3.10, nous pouvons observer que les pâtes situées à droite dans le diagramme sont les plus favorables au développement de la résistance. Également, les pâtes situées à gauche dans le même diagramme, sont les pâtes qui présentent des caractéristiques qui nuisent à la résistance mais qui montrent les valeurs de blancheur les plus hautes. Ainsi, les pâtes obtenues à partir de papiers de bottins téléphoniques et de journaux avant consommation et leur mélange sont les plus fortes. Par contre, la pâte de papier journal post consommation et la pâte du mélange avec des bottins sont les plus faibles. Une autre observation que nous pouvons retenir de ces résultats est que, dans ce cas, les matières plus fines (fractions R100, R200 et P200 et fines FQA) ne contribuent pas à la formation de liaisons, et que la principale source de ces éléments est les deux sortes de papiers journaux.

La plupart des observations extraites de ce modèle pourraient être tirées des graphiques des propriétés individuelles, comme illustrés dans l'annexe A, aux figures A.1 à A.5. Mais une telle analyse n'aurait pas permis de voir les interrelations existantes entre les propriétés, comme c'est le cas du modèle PCA.

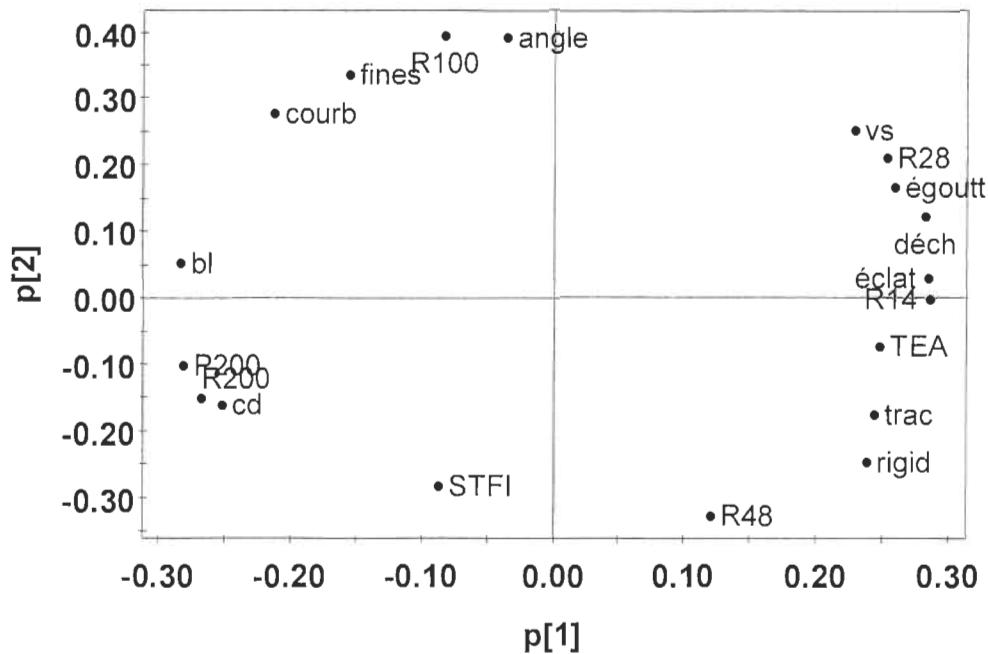


FIGURE 3.9 Diagramme de charges pour les matières premières.

La plupart des variables étudiées sont bien définies par le modèle choisi, avec des valeurs de R2 supérieures à 70 % (figure 3.11). Les seules variables qui répondent moins au modèle choisi sont la fraction R48 (R2 élevé mais Q2 négatif) et la résistance à la compression STFI (R2 bas et Q2 négatif). Généralement, une valeur de Q2 plus grande que 0,5 est considérée comme bonne, et il est préférable que la différence entre R2 et Q2 ne soit pas plus grande que 0,3 (49). Ainsi, la vision de l'ensemble nous indique que le modèle représente bien le comportement des variables.

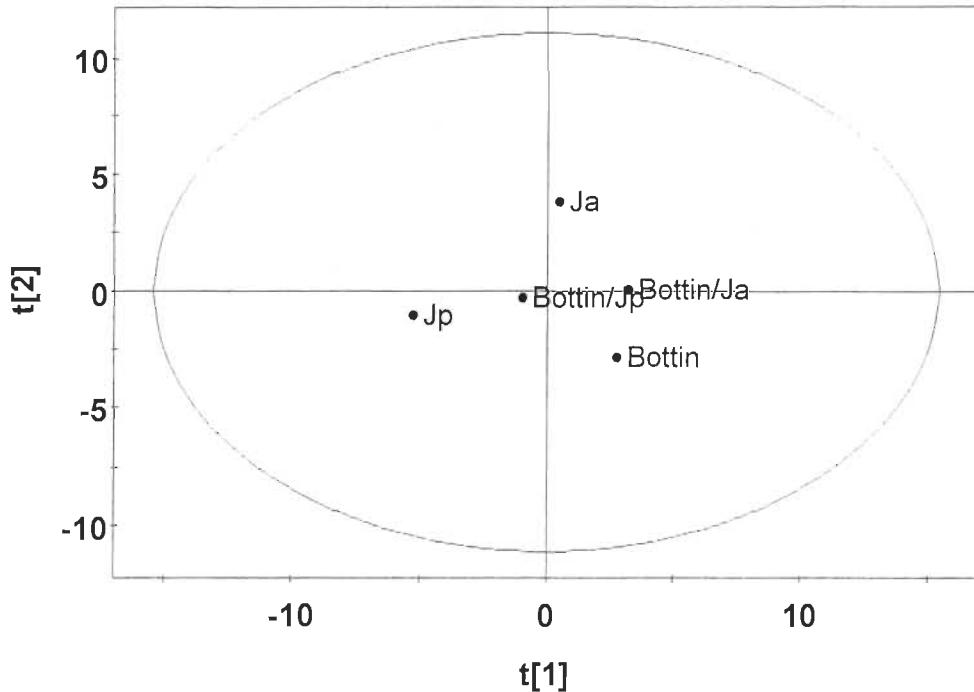


FIGURE 3.10 Diagramme de pointage pour les matières premières.

L'effet de l'ajout des produits chimiques a été évalué en prenant comme référence la pâte d'un mélange bottin et journal avant consommation. Dans ce cas, nous observons que le contenu en matières fines diminue avec l'ajout des produits chimiques (figure 3.12). Cette diminution est probablement due à la formation d'agglomérats lesquels, en même temps, provoquent une légère augmentation de la longueur de fibres pondérée en poids (tableau A.1 et A.2, annexe A). La diminution du contenu en fines s'accompagne d'une augmentation du coefficient de diffusion de la lumière sauf pour le cas de pâte avec floculant (figure 3.12). L'augmentation du coefficient de diffusion de la lumière pourrait être due à la rétention dans la pâte de matières qui diffusent la lumière comme les encres et les colorants.

D'autre part, l'indice d'égouttage augmente avec l'ajout de floculant et du conditionneur, figure 3.13. L'agglomération de fibres et fines rend le réseau fibreux plus ouvert (formation de canaux) et permet un drainage plus élevé. L'augmentation de l'indice d'égouttage de la pâte avec floculant est une indication de la diminution de la capacité de liaison, aussi observée par la

diminution des résistances physiques de cette pâte (figure 3.14). Cependant, la diminution de la résistance de la pâte avec floculant ne s'accorde pas avec leur chute en volume spécifique (figure 3.13).

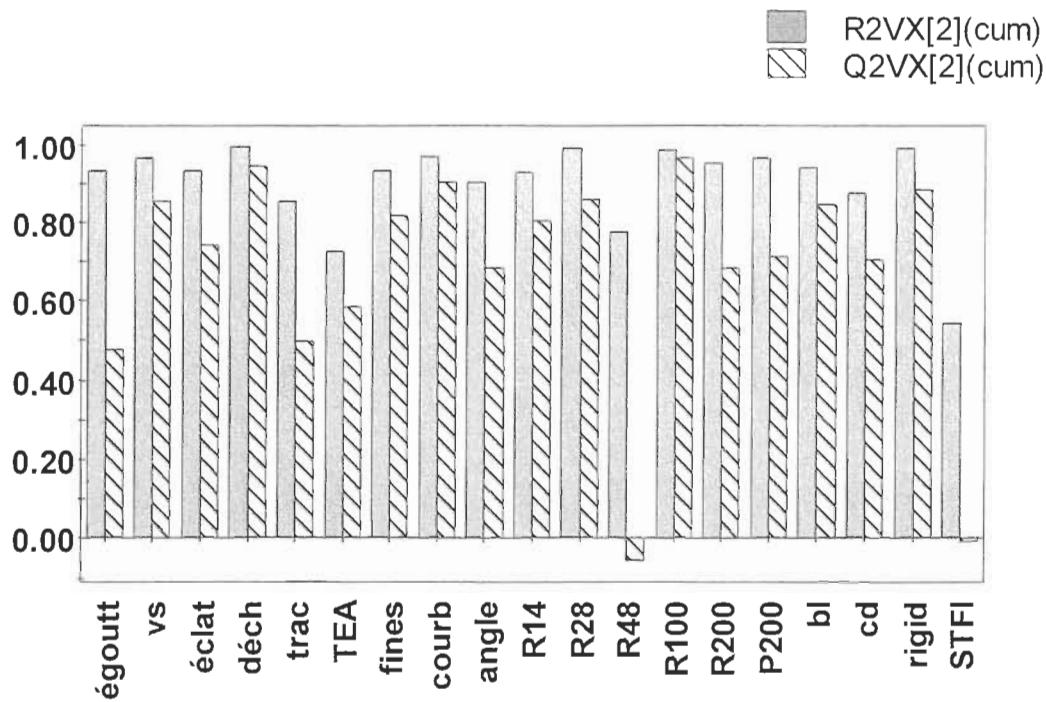


FIGURE 3.11 Coefficients de corrélation et de prédiction pour les matières premières.

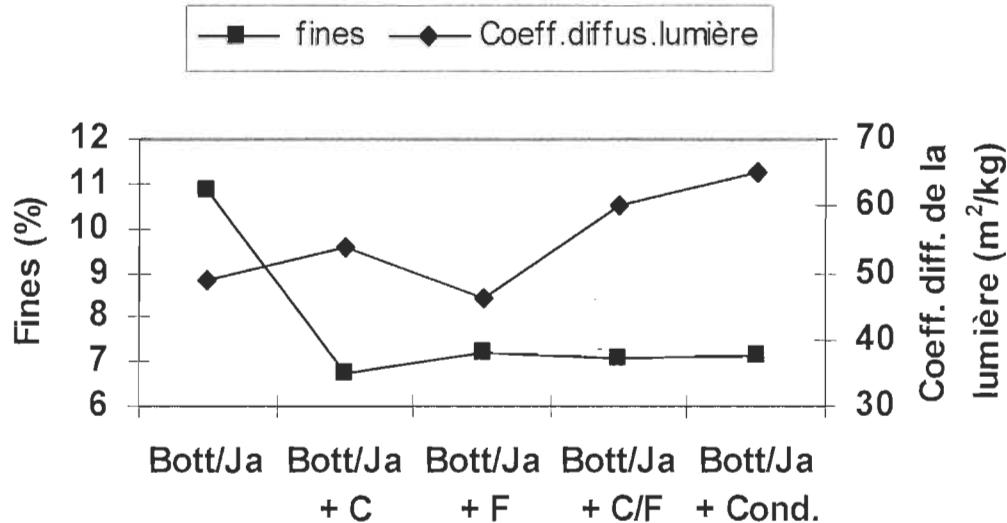


FIGURE 3.12 Fines (%) et coefficient de diffusion de la lumière (m^2/kg) des pâtes avec produits chimiques.

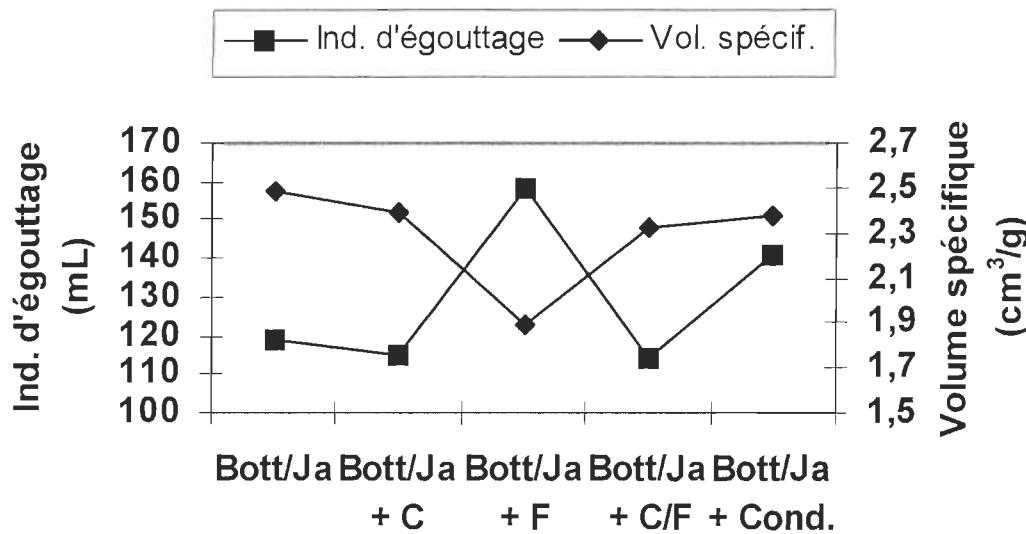


FIGURE 3.13 Indice d'égouttage et volume spécifique des pâtes avec produits chimiques.

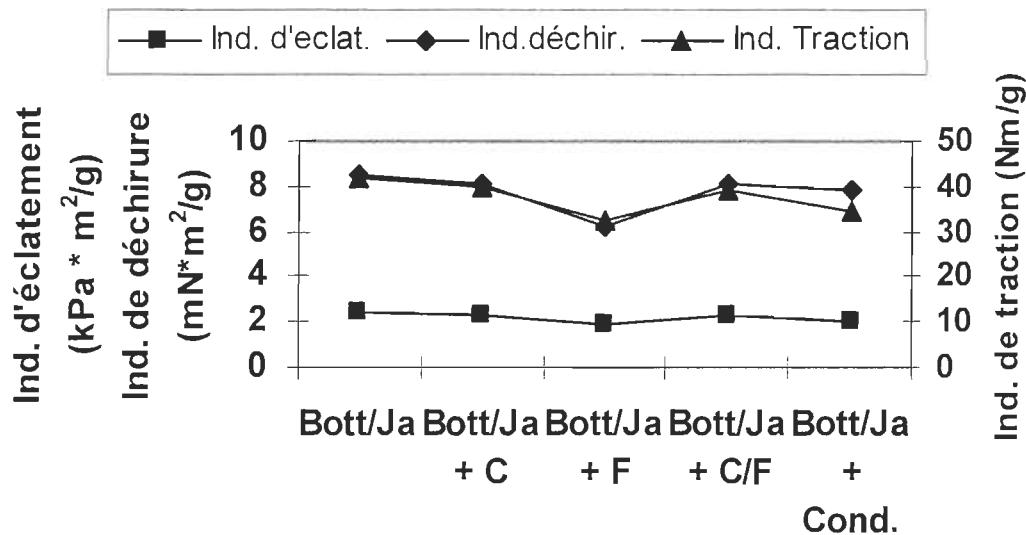


FIGURE 3.14 Résistances à l'éclatement, à la déchirure et à la traction des pâtes avec produits chimiques.

3.5.2. Première journée d'échantillonnage

Les échantillons pris lors de la première journée d'échantillonnage, ainsi que les machines et les matières premières utilisées sont décrites au tableau 3.1.

Dans ce cas, nous avons utilisé la méthode PCA pour établir le lien entre la pâte obtenue à la désintégration (pâte de cuvier de réserve), la pâte après l'addition

des produits chimiques et après le moulage (pâte obtenue avec les caissettes humides) et le produit final (plateaux à alvéoles pouvant contenir 30 œufs). La nomenclature et les essais sur pâtes testées sont les mêmes que ceux décrits au tableau 3.4. La résistance à la compression a été évaluée par rapport au grammage des caissettes (nomenclature : MU/g; unités : kg cm²/g) et par rapport au volume spécifique des caissettes (nomenclature : MU/vs; unités : kg g/cm³).

Le modèle PCA choisi est constitué de deux composantes principales, qui expliquent 87,9 % de la variabilité du système et qui prédit à 63,7 %. Dans le but d'améliorer le modèle, les variables qui avaient une valeur de Q^2 basse ont été éliminées (volume spécifique, déchirure, fractions R14 et P200, coefficient de diffusion de la lumière, résistance à la compression en anneau et rigidité). De ces propriétés, quelques unes ne varient pas (voir tableau A.31 annexe A : écart-type plus bas que l'erreur pure (MSE)) tandis que les autres ne sont pas définies dans l'ensemble des propriétés étudiées (elles ne corrèlent pas avec les autres propriétés et ont une valeur de p basse dans le diagramme de charges). La distribution des variables indice d'égouttage et résistance à la compression STFI ont été normalisés selon une équation logistique : $\text{égoutt} = \log [(x - 103)/(120 - x)]$ et $\text{STFI} = \log [(x - 48,25)/(57,41 - x)]$. La première composante principale explique 66,6 % de la variabilité du système, et nous pouvons observer à la figure 3.15 que la plupart des propriétés sont définies avec la première composante. La résistance à la traction et le TEA sont des propriétés qui dépendent plus de la capacité de liaison des fibres et de la résistance des fibres individuelles que de la longueur de fibres. Ainsi, nous observons que la seule fraction qui favorise les liaisons est la fraction R28. Par contre, les résistances à l'éclatement et à la compression STFI sont favorisées pour une augmentation de la longueur de fibres et défavorisées par une augmentation des fractions R48, R100, R200 et les fines FQA. La courbure de fibres, l'angle de cassure des fibres et l'indice d'égouttage s'opposent aussi au développement des résistances à l'éclatement et à la compression STFI, et sont directement reliés aux fractions R100, R200 et fines FQA. En contrepartie, la

résistance à la compression des caissettes, exprimée en fonction du grammage ou du volume spécifique, évolue en sens contraire à la traction et au TEA, et est favorisée par une augmentation de la fraction R48.

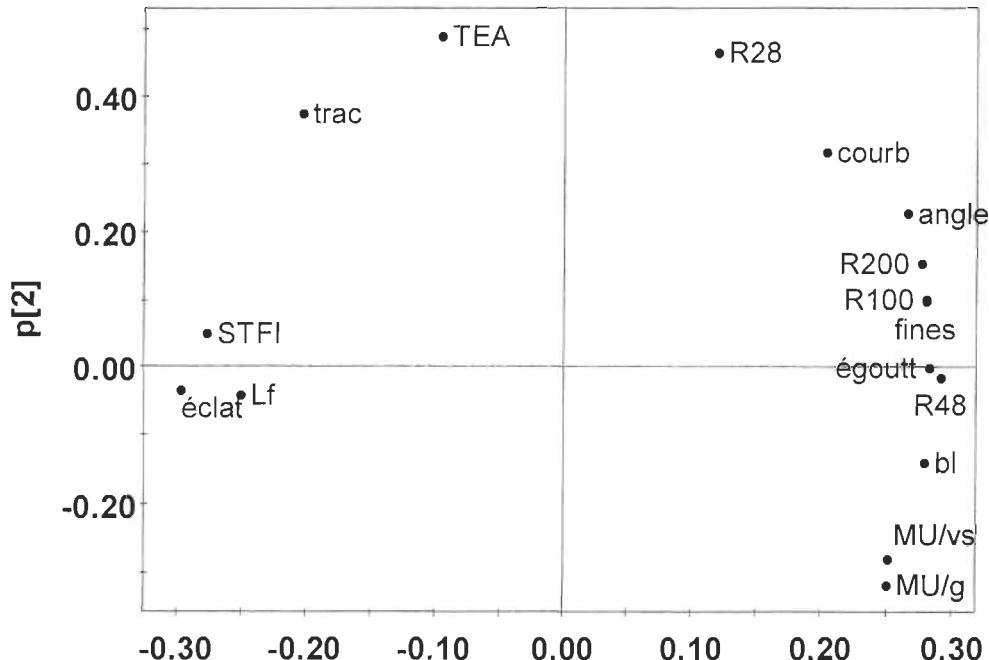


FIGURE 3.15 Diagramme de charges de la première journée d'échantillonnage.

Si nous observons le diagramme de pointage de la figure 3.16, nous pouvons noter qu'il n'y a pas de différences entre les matières premières (pâtes CR) ni entre machines (A et B), mais que les pâtes de caissettes humides obtenues dans les deux instants (1 et 2) de prise d'échantillons se différencient. Si nous examinons les conditions (tableau 3.1) pour chaque machine, il semble que l'antimousse et le coagulant, présents dans la machine B et absents dans la machine A ne changent pas les caractéristiques des pâtes. Par contre, le floculant et le conditionneur, absents dans les pâtes de CR, pourraient être les responsables du comportement différent des pâtes MH. Les différences entre les échantillons des pâtes MH prises dans ces deux moments distincts sont difficiles à expliquer. Ces différences pourraient être causées par une variation non mesurée dans le dosage des produits chimiques (par exemple, mauvais fonctionnement d'une valve de dosage ou de dilution du produit) ou par des

conditions qui modifient l'efficacité des produits ajoutés (par exemple, une modification dans le drainage, la température ou la charge en matières fines des eaux blanches). Ainsi, et selon la correspondance entre les diagrammes de charges et de pointage, figures 3.15 et 3.16, nous pouvons dire que les pâtes de CR ont le contenu en fines, les fractions R48, R100 et R200, l'égouttage, l'angle de cassure et la courbure les plus élevés. D'autre part, les pâtes de caissettes humides obtenues au moment « 1 » sont les pâtes les plus résistantes, et les caissettes obtenues au moment « 2 » sont les caissettes les plus fortes.

Le modèle proposé, en plus d'avoir de bonnes valeurs de R^2 et Q^2 pour l'ensemble des propriétés, présente une bonne résolution pour les variables individuelles, comme le démontre la figure 3.17.

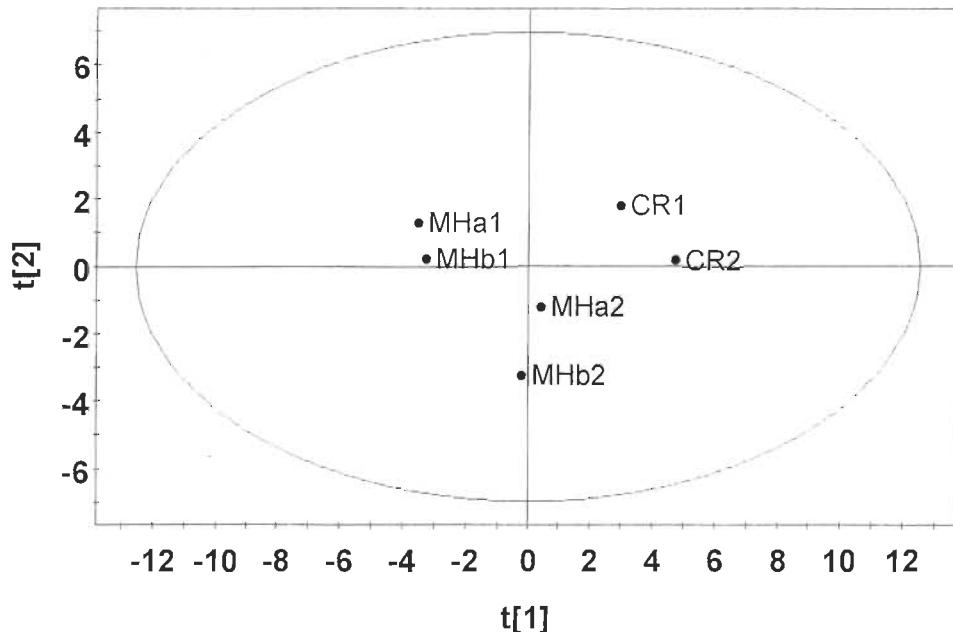


FIGURE 3.16 Diagramme de pointage de la première journée d'échantillonnage.

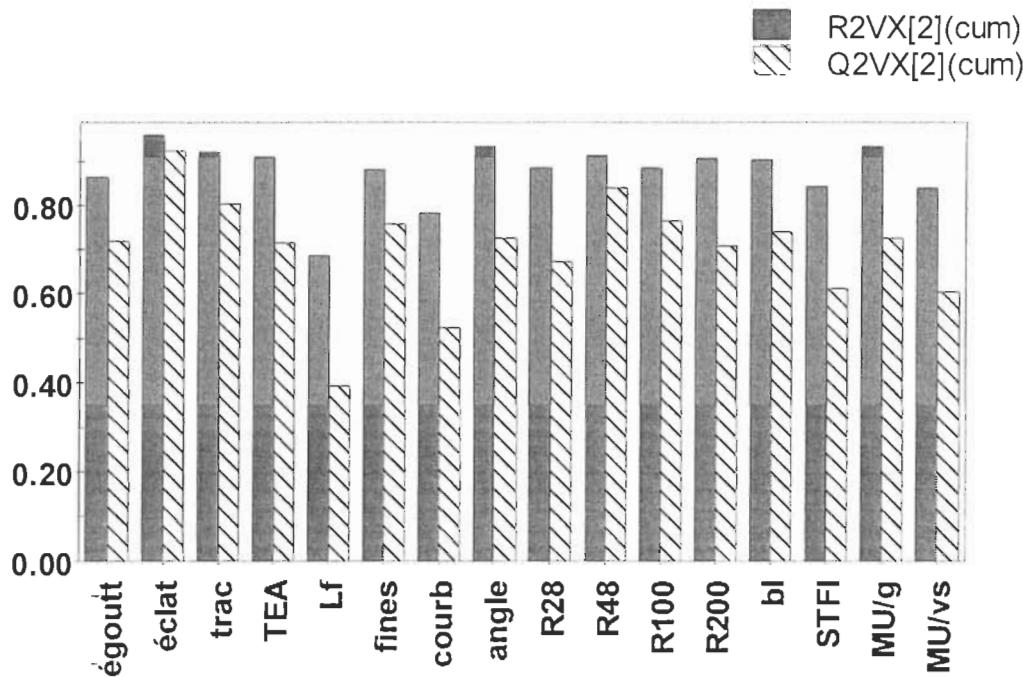


FIGURE 3.17 Coefficients de corrélation et de prédiction pour la première journée d'échantillonnage.

3.5.3. Deuxième et troisième journées d'échantillonnage

La méthodologie utilisée dans l'obtention des résultats des deuxième et troisième journées d'échantillonnage ayant été rigoureusement la même, les données ont été évaluées ensemble. Avec le même critère, et même si la machine C était échantillonnée et les pâtes et caissettes évaluées, dans le modèle PCA nous incluons seulement les résultats reliés aux machines A et B. L'exclusion des données de la machine C du modèle est due au produit final (porte-gobelets), qui diffère des produits finaux des machines A et B (plateaux à alvéoles pouvant contenir 30 œufs).

Dans ce cas, le modèle proposé compte trois composantes principales, avec un R^2 de 84,4 % et une valeur de Q^2 de 46,3 %. La première composante principale explique 50 % des variations trouvées dans le système, tandis que la deuxième explique 24,8 % et la troisième 9,6 %. Afin d'augmenter les valeurs de R^2 et Q^2 du modèle, les variables volume spécifique, déchirure, fractions R14, R28 et P200, longueur de fibres, résistance à la compression en anneau et

résistance à la compression STFI ont été éliminées. Les fractions R14, R28 et P200 et la résistance à la compression STFI présentent un écart-type inférieure à l'erreur expérimentale (tableau A.32, annexe A). Les autres variables enlevées du modèle ne montrent aucune relation avec les propriétés restantes (faible valeur de p dans le diagramme de charges). La distribution des variables courbure de fibres, la fraction R100 et la blancheur ont été normalisées selon une équation logistique : $coub = \log [(x - 0,039)/(100 - x)]$, $R100 = \log [(x - 13,9)/(16,5 - x)]$ et $bl = \log [(x - 34,09)/(41,1 - x)]$.

La première composante, figure 3.18 est dominée par un groupement de propriétés semblable au modèle de la première journée d'échantillonnage. Encore une fois, nous trouvons que les fractions R100 et R200, les fines FQA, la blancheur, l'égouttage, la courbure et l'angle de cassure des fibres varient ensemble. Mais, dans ce cas, la fraction R48 n'appartient pas à ce groupe, et apparaît comme une fraction qui favorise les liaisons entre fibres. Elle est directement reliée à la résistance à la traction, au TEA et à la rigidité, propriétés qui apparaissaient définies par la deuxième composante.

En ce qui touche la résistance des caissettes, nous remarquons la relation inverse entre la résistance des caissettes et les fractions R100 et R200 et la courbure et angle de cassure des fibres. Cette relation est inverse aux tendances observées dans le modèle précédent, section 3.6.2. Cependant, encore une fois nous observons qu'elle n'est pas favorisée par l'augmentation de la résistance des pâtes.

Dans la représentation de la première composante vs la troisième composante (figure 3.19), nous observons que la troisième composante est définie principalement par la fraction R48, la résistance à l'éclatement et l'indice d'égouttage, et nous indique l'influence de l'égouttage sur la résistance à l'éclatement.

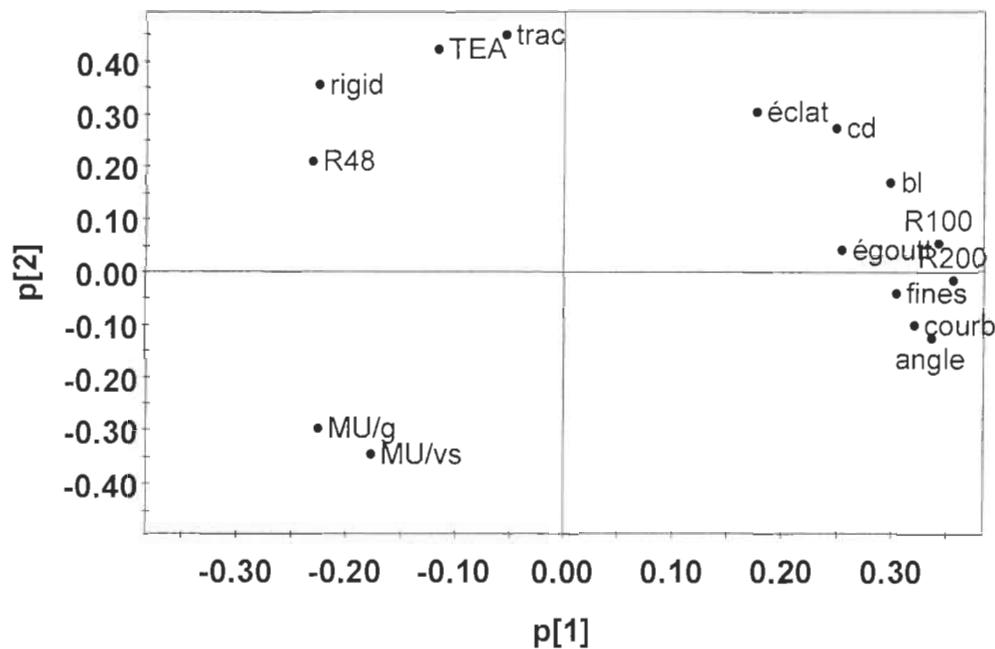


FIGURE 3.18 Diagramme de charges des composantes 1 et 2 des deuxièmes et troisièmes journées d'échantillonnage.

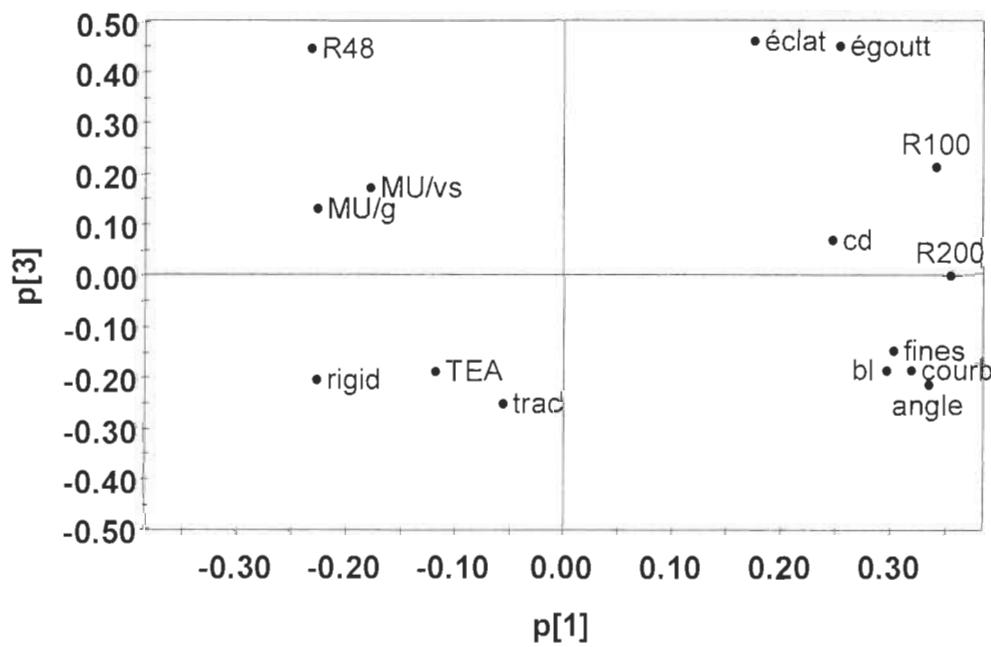


FIGURE 3.19 Diagramme de charges des composantes 1 et 3 des deuxièmes et troisièmes journées d'échantillonnage.

En examinant les diagrammes de pointage, figures 3.20 et 3.21, nous pouvons identifier les pâtes responsables des caractéristiques observées. De cette façon, les pâtes qui apportent les fines, les fibres courtes (fractions R100 et R200) et les fibres courbées et retournées sont les pâtes composées par 100 % papier journal post consommation. Leurs caractéristiques nuisent à la plupart des résistances physiques des feuilles et des caissettes, sauf la résistance à l'éclatement, et augmentent la blancheur et l'égouttage. Dans ce cas, il faut remarquer qu'il n'y a pas de différences entre les caractéristiques des pâtes du cuvier de réserve et celles de la pâte de caissettes humides (CRa7 et MHa7 des figures 3.20 et 3.21). Ce résultat nous indique qu'il n'y a pas eu d'action des additifs chimiques, probablement due à un dosage inadéquat.

D'autre part, les pâtes qui présentent les caractéristiques adéquates au développement de la résistance à la traction, de la rigidité et du TEA sont les pâtes de caissettes humides obtenues dans les périodes « 3 » et « 4 » d'échantillonnage. En outre, les résistances à la compression des caissettes sont favorisées par la qualité des pâtes obtenues dans les échantillonnages « 5 » et « 6 ».

Dans ce modèle, nous pouvons apprécier que la qualité de la pâte des caissettes humides n'est pas la même dans les deux machines étudiées. D'une part, les échantillons « 3 » et « 4 » de la machine A sont semblables, mais ils diffèrent appréciablement des échantillons « 5 » et « 6 » de la machine B, semblables entre eux. Comme la qualité de la matière première ne change pas appréciablement pendant la journée (définition de toutes les pâtes CR sur la même composante), cette différence pourrait indiquer une variation dans le dosage des produits chimiques de chaque machine, une variation dans la qualité des eaux blanches ou l'influence des conditions de moulage. Une différence entre les deux machines est le transfert des caissettes humides après leur formation : la machine B emploie un double transfert, tandis que la machine A utilise un transfert simple. Mais cette différence ou le vide appliqué ne semblent pas être la cause des variations observées. En effet, les valeurs de

siccité des caissettes humides après leur formation sont identiques dans les deux machines (tableau A.9 de l'annexe A).

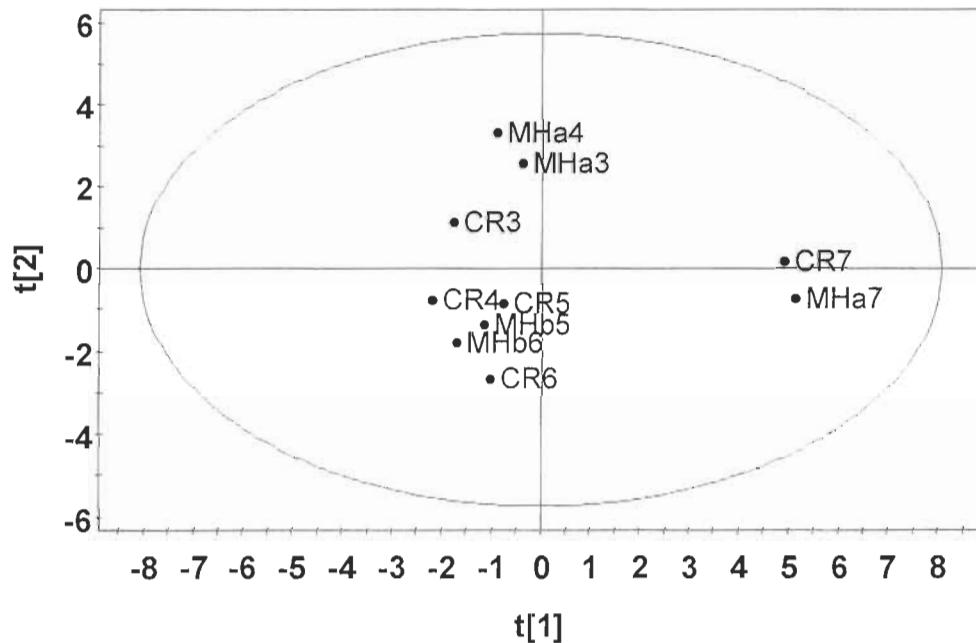


FIGURE 3.20 Diagramme de pointage des composantes 1 et 2 des deuxièmes et troisièmes journées d'échantillonnage.

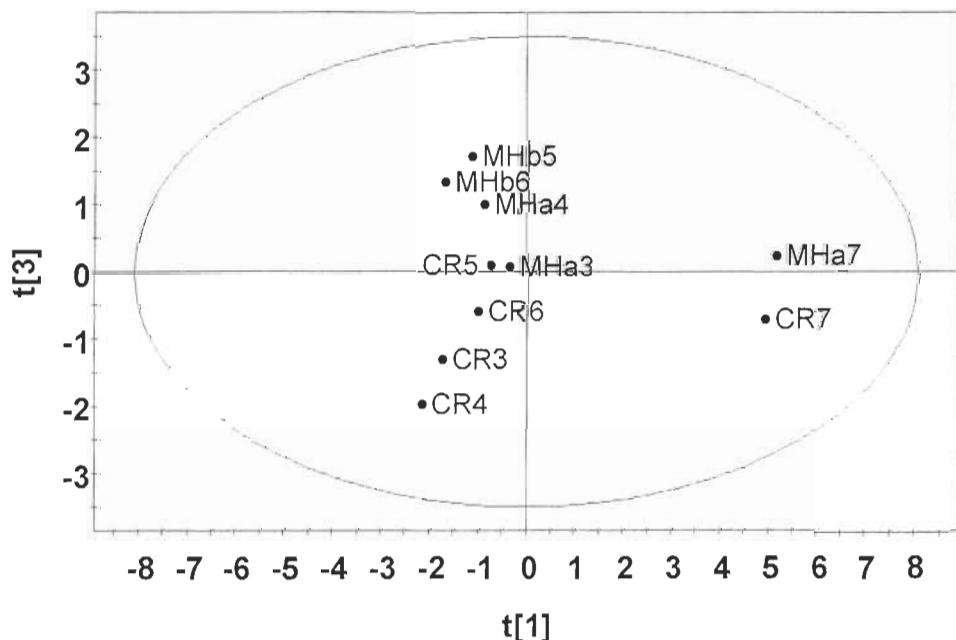


FIGURE 3.21 Diagramme de pointage des composantes 1 et 3 des deuxièmes et troisièmes journées d'échantillonnage.

Après trois composantes, les valeurs de R^2 des variables individuelles sont hautes, mais la prédictibilité se présente plus basse pour certaines propriétés.

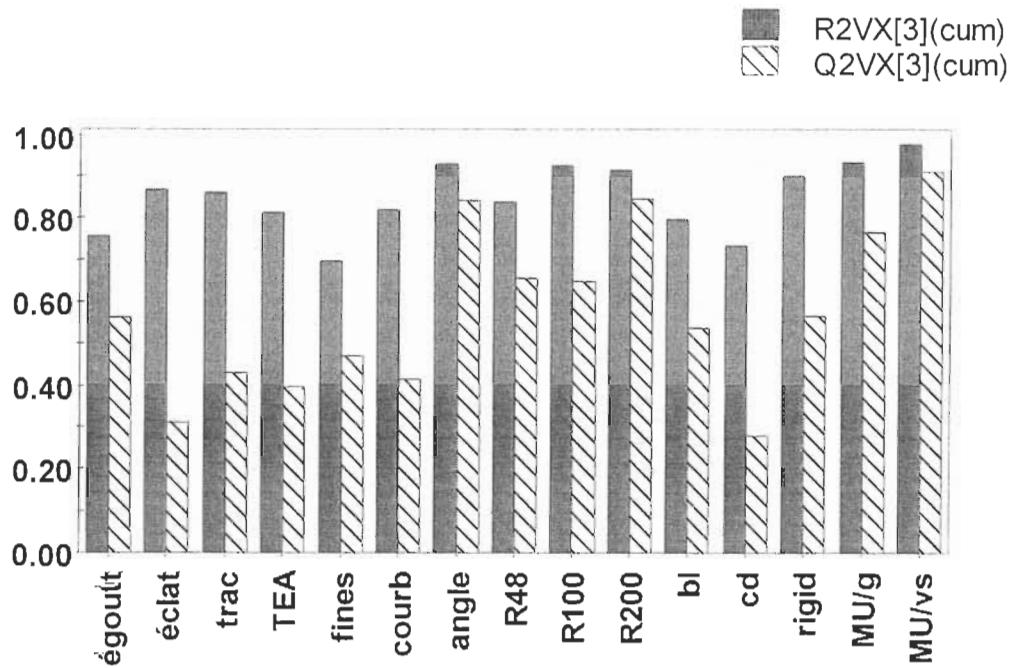


FIGURE 3.22 Coefficients de corrélation et de prédiction pour les deuxième et troisième journées d'échantillonnage.

3.6. Analyse microscopique des pâtes

De l'analyse qualitative et quantitative des pâtes comprises dans cette partie du travail nous avons obtenu les résultats observés au tableau 3.5.

Les pâtes obtenues à partir du papier journal avant et post consommation ont un contenu en pâte mécanique plus élevé. Cette sorte de pâte pourrait être responsable du contenu plus élevé en matières fines de ces types de papiers, observé dans l'analyse PCA.

Les pâtes de la première journée d'échantillonnage, CR1 et CR2 ont un contenu en différentes sortes de fibres similaire et concordant avec la composition des papiers recueillis la même journée. Ce résultat s'accorde avec les observations retenues du modèle PCA.

Par contre, les pâtes de cuvier de réserve de la deuxième journée d'échantillonnage, montrent une variation pendant la journée. D'une part, les pâtes CR3 et CR4 ont une composition semblable aux pâtes CR1 et CR2. Les pâtes CR5 et CR6 sont comparables entre elles mais présentent un contenu en pâte chimique de résineux plus élevé et en pâte mécanique plus faible que les pâtes CR3 et CR4. Dans le modèle PCA on avait observé que les pâtes de cuvier de réserve ne diffèrent pas appréciablement dans ses propriétés, mais que les pâtes de caissettes humides MHa3 et MHa4 diffèrent des pâtes MHb5 et MHb6. Ainsi, nous pouvons envisager que la différence en composition n'affecte pas les propriétés des pâtes sans produits chimiques (pâtes de CR) mais qu'elle influence l'action des produits chimiques, conduisant aux différences observées dans les pâtes MH.

Quant à la pâte obtenue la troisième journée d'échantillonnage, CR7, elle montre un contenu en pâte chimique de feuillus plus élevé, et c'est la pâte qui se présente comme la moins favorable au développement des résistances dans le modèle PCA.

TABLEAU 3.5 Composition des pâtes, exprimée en pourcentage des différentes sortes de fibres

	Bott	Jp	Ja	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6	CR7
ChR	14	12	7	16	18	13	12	22	23	18
ChF	9	6	5	4	4	6	6	9	9	17
MecR	77	81	88	80	78	81	82	68	68	65

ChR : pâte chimique de résineux

ChF : pâte chimique de feuillus

MecR : pâte mécanique de résineux

À la figure 3.23 nous pouvons observer certaines caractéristiques des pâtes analysées par microscopie. La figure 3.23a, montre les impuretés (i) très présentes dans la pâte de papier journal post consommation. Certaines d'entre

elles pourraient être reliés à des particules de pigments colorés, mais d'autres sont difficiles à identifier. Dans la pâte de papier journal avant consommation on observe une quantité importante de fines provenant de pâte mécanique. Ces fines sont de type « non fibrillaires », et sont constituées de morceaux de parois et de fibres (f), figure 3.23b. À la figure 3.23c, on observe la coloration typique des trois sortes de pâtes présentes dans la plupart de pâtes analysées. Les pâtes chimiques de résineux (R), les pâtes chimiques de feuillus (F) et les pâtes mécaniques (M) exhibaient des colorations faciles à différencier. La figure 3.23c montre aussi des cellules de parenchymes (p) de pâte chimique de feuillus, présentes dans les fines du papier bottin. À la figure 3.23d, on peut observer une pâte de cuvier de réserve (CR2). On observe ici que les fibres de printemps de pâte chimique de résineux sont plus pâles que les fibres d'été, dû aux parois plus minces. Cette différence ne s'observe pas dans les pâtes chimiques de feuillus. Les figures 3.23e et 3.23f ont été obtenues à partir de la pâte de cuvier de réserve du troisième échantillonnage (CR7). Cette pâte a un contenu plus élevé en fibres chimiques de feuillus (F). Pour cette raison, les fines contiennent une grande quantité de cellules de parenchyme (p). On a observé aussi dans cette pâte un grand nombre d'impuretés (i).

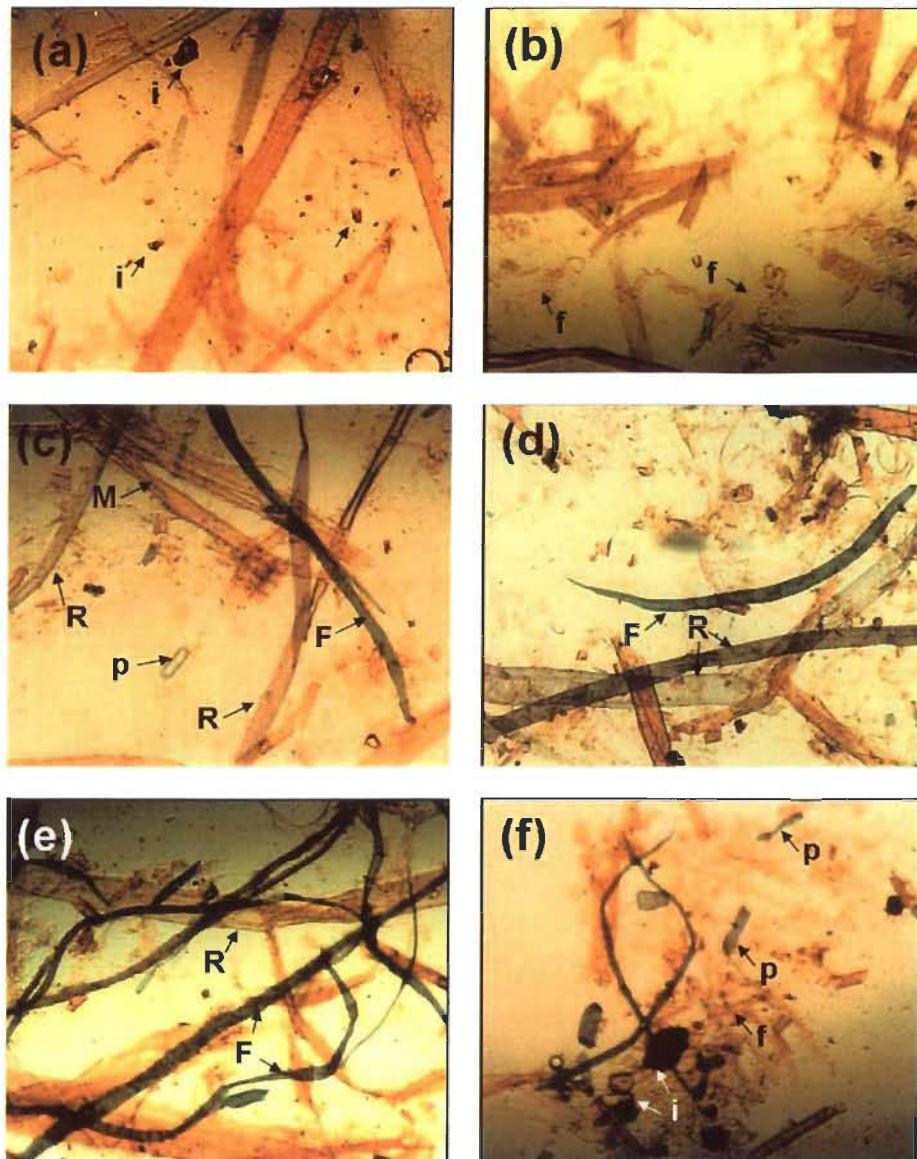


FIGURE 3.23 Microphotographies des pâtes.

3.7. Conclusions

De l'évaluation des matières premières, nous concluons que :

- Les pâtes plus favorables au développement de la résistance de feuilles, standards et épaisses, proviennent des papiers de bottins téléphoniques et de journaux avant consommation et de leur mélange.
- La pâte de papier journal post consommation et son mélange avec bottins téléphoniques sont les pâtes les plus faibles.

- Les principales sources de fibres courtes et de fines (fractions R100, R200 et P200 et fines FQA) qui, dans les pâtes étudiées, ne contribuent pas à la formation de liaisons, sont les journaux avant et post consommation.
- L'ajout de coagulant, floculant ou conditionneur à une pâte mélangée de bottins et journaux avant consommation, produit des agglomérats qui diminuent le contenu en fines de la pâte, et augmente légèrement la longueur moyenne de fibres pondérée en poids.
- L'ajout de coagulant, floculant ou conditionneur à une pâte mélangée de bottins et journaux avant consommation entraîne une diminution des résistances à l'éclatement, à la traction et à la déchirure. Cette diminution est plus importante quand le floculant est ajouté seul, et s'accompagne d'une diminution dans le volume spécifique et une augmentation dans l'indice d'égouttage.

Des résultats obtenus lors de la première journée d'échantillonnage, nous pouvons déduire que :

- La qualité de la matière première fut homogène pendant la période d'échantillonnage.
- Il n'y a pas de différences entre les pâtes obtenues dans les deux machines étudiées. Même si dans les deux circuits les produits chimiques additionnés sont différents, les seuls qui semblent avoir une influence sur les caractéristiques des pâtes sont le floculant et le conditionneur, étant donné les différences entre la pâte de CR et celle de MH.
- Pendant la même journée d'échantillonnage, les pâtes de caissettes humides obtenues dans la période « 1 » sont les plus fortes, par contre, les produits finaux (caissettes) sont plus forts dans la période « 2 ». En résumé, les pâtes plus fortes ne correspondent pas à un produit final plus

résistant, et il y a des facteurs non mesurés qui donnent des caractéristiques différentes aux pâtes obtenues dans chaque période.

En observant les résultats de l'évaluation des échantillons pris lors des deuxième et troisième journées nous pouvons voir que :

- Les pâtes de la troisième journée d'échantillonnage (CR7 et MHa7), composées de 100 % papier journal post consommation, sont les pâtes qui présentent une proportion forte de fibres courtes (fractions R100 et R200) et de fines et les valeurs les plus hautes d'angle de cassure et de courbure des fibres. Ces caractéristiques favorisent l'augmentation de la blancheur, du coefficient de diffusion de la lumière, de l'indice d'égouttage et de la résistance à l'éclatement, mais ne sont pas favorables au développement de la résistance à la traction et le TEA, à la rigidité et à la résistance des caissettes. En plus, pour ce scénario, il n'a pas de différences entre les pâtes de CR et de caissettes humides : un indice de l'inefficacité des additifs chimiques ajoutés ou d'un dosage inadéquat. Même si l'indice d'égouttage est plus élevé que celui observée pour les autres pâtes, la quantité de fines ou la proportion plus forte de pâte chimique de feuillus (en dépit de la quantité de pâte mécanique) pourraient être responsables de cette inefficacité et des problèmes observés en usine la journée d'échantillonnage (les caissettes collaient aux moules).
- Les pâtes de caissettes humides obtenues dans chaque machine ne s'équivalent pas. Les pâtes de la machine A présentent des caractéristiques adéquates au développement de la résistance à la traction, du TEA et de la rigidité. Les pâtes de la machine B sont les plus adéquates au développement de la résistance des caissettes.
- La composition en différentes sortes de fibres des pâtes de la deuxième journée d'échantillonnage est variable. Les pâtes des scénarios #5 et #6 montrent une augmentation dans le contenu en

pâte chimique de résineux (et une diminution dans le contenu en pâte mécanique) par rapport aux pâtes des scénarios #3 et #4. Durant la troisième journée d'échantillonnage, nous observons une augmentation dans le contenu en pâte chimique de feuillus.

En général, nous pouvons retenir que :

- Les fractions R100 et R200, les fines FQA, la courbure de fibres, l'angle de cassure de fibres, la blancheur et le coefficient de diffusion de la lumière varient ensemble dans tous les types de pâtes étudiées. Ces propriétés varient en sens contraire aux propriétés de résistance physique des feuilles, donc elles s'opposent à la formation de liaisons entre les fibres. Les responsables des valeurs hautes de ces propriétés sont les pâtes de papier journal et les pâtes sans produit chimique.
- La résistance à la compression des caissettes, quant à elle, se comporte aussi de façon variable : elle peut bénéficier de l'action de remplissage de fibres plus courtes et des fines ou peut être affectée négativement par leur présence.
- L'efficacité des produits chimiques varie pendant la journée ou dans les différents circuits. Cette variation pourrait être reliée aux changements dans la composition en différentes pâtes de la matière première, elle serait susceptible d'être causée par une variation dans le dosage (dilution?, valves bouchées?) ou pour une modification dans la composition des eaux blanches.

Ces résultats nous ont encouragés à étudier le procédé plus en profondeur. Nous avons aussi détecté l'importance de reproduire le procédé de moulage en laboratoire. La possibilité d'essayer sur une échelle plus petite, différentes pâtes et conditions de moulage nous a incité à mettre au point un prototype de formation de caissettes en laboratoire. Une description de ce prototype et de la

technique de formation et d'essais de caissettes est fournie dans le chapitre suivant, chapitre 4. Dans le chapitre 5, nous avons étudié comment les conditions de mise en pâte, la qualité de la matière première ou l'ajout de certains produits chimiques pourraient influencer le procédé.

Chapitre 4 - Formation et essais de caissettes au laboratoire

4.1. Objectifs

Développer un prototype de moule et une technique de moulage de caissettes au laboratoire.

La formation des caissettes à une échelle laboratoire permettra l'essai de différentes conditions associées à la fabrication de pâte moulée.

4.2. Développement d'un moule de formation

Dans le procédé de moulage par succion, la suspension de pâte en contact avec un côté du moule est formée par application de vide sur le côté opposé. Le moule consiste, fondamentalement, en un support rigide recouvert d'un matériau possédant une porosité adéquate à la rétention des fibres.

Les matrices de formation de l'usine de référence consistent en plusieurs pièces de fer fondu, qui donnent la forme au produit final une fois assemblées. Chaque pièce est recouverte par un tamis, moulé aussi à la forme du support, et le groupe de pièces est réuni par des vis.

Le principal problème au moment de concevoir un moule de petites dimensions était de donner à un tamis la forme adéquate. La forme des tamis industriels est obtenue par moyen d'appareils et techniques non disponibles dans les ateliers de l'UQTR. Comme notre but était de mettre au point un moule à petite échelle qui s'approche le plus possible du moule industriel, nous avons décidé d'utiliser les parties composantes d'une matrice d'usine (pour caissettes de 30 œufs).

Ainsi, deux pièces (B), qui réunies donnent une rangée de cinq alvéoles (cinq œufs), ainsi que deux pièces qui permettent de regrouper toutes les parties de la matrice industrielle (A) furent assemblées à l'aide de vis qui les traversent (figures 4.1a et 4.1b).

Sur les pièces assemblées du moule, nous avons ajouté un déflecteur d'aluminium. Cette plaque a pour but d'uniformiser la distribution de l'air utilisé pour le décollage (figures 4.2a et 4.2b).

Le moule est fixé et scellé à l'intérieur d'un boîte en aluminium (figures 4.3a et 4.3b). Après la fermeture de l'ensemble, quatre pattes servant d'appui ont été ajoutées.

Toutes les modifications apportées à la conception du prototype depuis le début ont été faites pour augmenter la siccité de la caissette et ainsi faciliter son décollage. L'entrée A (figure 4.3a) sert tant à faire le vide qu'à appliquer l'air sous pression pour décoller la caissette. Au début, nous avions essayé avec deux entrées d'air pour le décollage (orifices bouchés), mais la distribution d'air à l'intérieur était inégale et une partie de la caissette ne se séparait pas du moule. L'ajout du déflecteur a amélioré un peu le problème, mais il restait encore trop d'eau à l'intérieur du moule après formation. L'eau restante produisait des trous au moment d'appliquer l'air sous pression, et la caissette restait complètement collée au tamis. Par la suite, la courbure de la partie supérieure du réservoir et l'ajout d'une sortie (B, figure 4.3a) nous a permis d'enlever l'eau excédentaire avant d'appliquer l'air sous pression.

Le vide nécessaire pour la formation était obtenu, au départ, avec une pompe à vide. Postérieurement, afin d'augmenter la succion pendant la formation, nous avons ajouté une deuxième pompe à vide. Comme la siccité atteinte de la caissette était encore basse, nous avons annexé un réservoir de vide (figure 4.4a). La fonction du réservoir auxiliaire est de donner une aspiration d'eau additionnelle à la caissette, une fois qu'elle est formée. Les détails sur l'utilisation du réservoir auxiliaire sont donnés dans la section 4.3 suivante.



FIGURE 4.1 (a) Vue d'une extrémité des pièces assemblées, (b) vue supérieure (côté succion) des pièces assemblées.

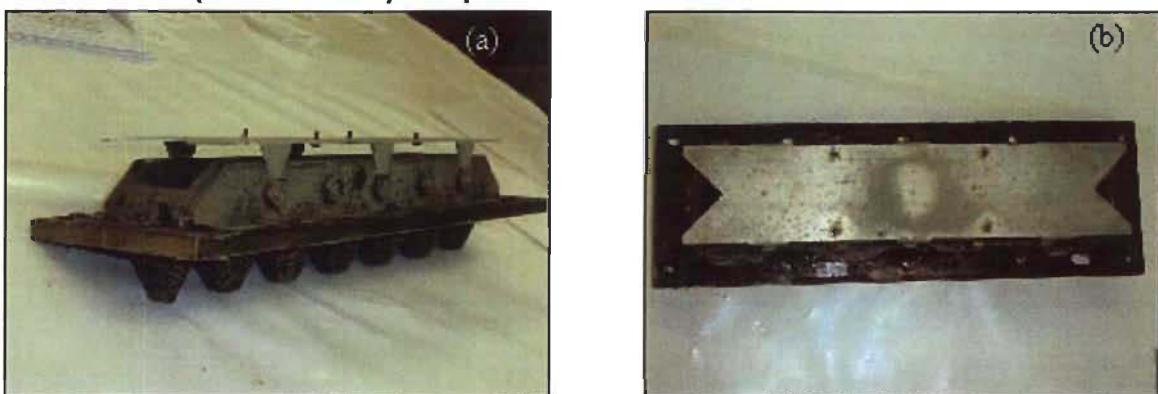


FIGURE 4.2 (a) Vue frontale du déflecteur, (b) vue supérieure du déflecteur (côté succion).

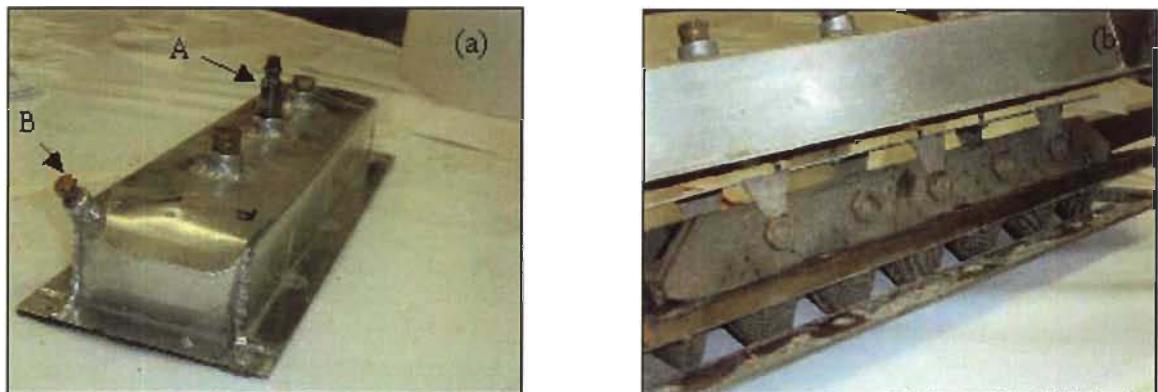


FIGURE 4.3 (a) Couverture extérieure et (b) assemblage du moule.

Une cuve rectangulaire contient la suspension de fibres utilisée pour la formation. Cette cuve est agitée par deux agitateurs hélicoïdaux placés verticalement (figure 4.4b). La position des agitateurs, leur vitesse et les dimensions du réservoir ont été ajustées pour obtenir une agitation homogène de la suspension et une bonne formation des caissettes.



FIGURE 4.4 (a) Réservoir auxiliaire de vide, (b) cuve de formation.

4.3. Technique de moulage

Un schéma du montage du prototype et ses accessoires et une photographie de l'ensemble sont montrés aux figures 4.5 et 4.6. Deux pompes à vide sont connectées aux trappes d'eau puis au réservoir auxiliaire A. Ce réservoir est branché, à son tour, à un entonnoir B relié au moule. L'entonnoir permet de recueillir les eaux blanches après la formation d'une caissette. L'ensemble se complète par une cuve C qui contient la suspension de pâte et deux agitateurs.

Les étapes de formation de caissettes en laboratoire sont les suivantes :

1. Verser la suspension de pâte diluée (6,7 litres) à la consistance désirée dans la cuve agitée C.
2. Pulvériser du conditionneur sur le moule, quand les conditions l'exigent.
3. Faire le vide dans le réservoir A jusqu'à une pression de 28 kPa, en fermant la vanne ② tandis que les vannes ① et ③ restent ouvertes.
4. Garder le vide dans le réservoir A en fermant la vanne ③.
5. Ouvrir la vanne ② : le vide des pompes est appliqué dans l'entonnoir B et le moule.

6. Immerger le moule pendant 3 secondes dans la cuve contenant la suspension fibreuse.
7. Enlever le moule de la cuve sans interrompre le vide et tourner le moule de façon que l'orifice d'évacuation d'eau soit au-dessous.
8. Lorsque l'eau cesse d'entrer dans l'entonnoir, fermer la vanne ① et ouvrir la vanne ③ : un apport de vide additionnel est ainsi fait à la caissette déjà formée.
9. Ouvrir la vanne ① jusqu'à ce que la pression se stabilise. Éteindre les pompes.
10. Avec le moule toujours en position inversée, ouvrir la sortie B (figure 4.3a) et laisser s'écouler l'eau résiduelle. Fermer la sortie.
11. Débrancher le tuyau servant à faire le vide de la sortie A (figure 4.3a) et brancher à la place le conduit d'air sous pression. Insuffler rapidement de l'air dans le moule pour décoller la caissette (figure 4.7a).
12. Placer la caissette humide sur un support construit avec deux parties composant le moule industriel (figure 4.7b); ce support facilite la manipulation et le transport.
13. Placer la caissette avec son support dans le four à 105 C° pendant 15 minutes.
14. Pour la formation de la deuxième caissette, ajouter à la cuve une quantité de suspension fibreuse équivalant à 11,5 g de pâte sèche. Dans cette étape il y a deux possibilités : soit la pâte en étude est déjà à la consistance désirée (par exemple, la pâte du cuvier de tête de machine d'usine), soit la pâte est concentrée et doit être diluée pour arriver à la consistance de formation (par exemple, pâte du cuvier de réserve d'usine).

- Si la pâte est à la consistance désirée, verser la quantité équivalant à 11,5 g secs à la cuve, et réserver l'eau blanche obtenue pendant la formation de la caissette précédente pour les analyses des eaux blanches.
 - Si la pâte doit être diluée, utiliser l'eau blanche obtenue pendant la formation de la caissette précédente pour arriver à la consistance désirée. Verser une quantité de suspension fibreuse équivalant à 11,5 g secs à la cuve, et réserver l'eau blanche restant pour les analyses des eaux blanches. Cette procédure nous permet de simuler la recirculation des eaux blanches.

Cette méthode est suivie jusqu'à l'obtention de treize caissettes. Des treize caissettes, les dix meilleures formées sont destinées aux essais de compression.

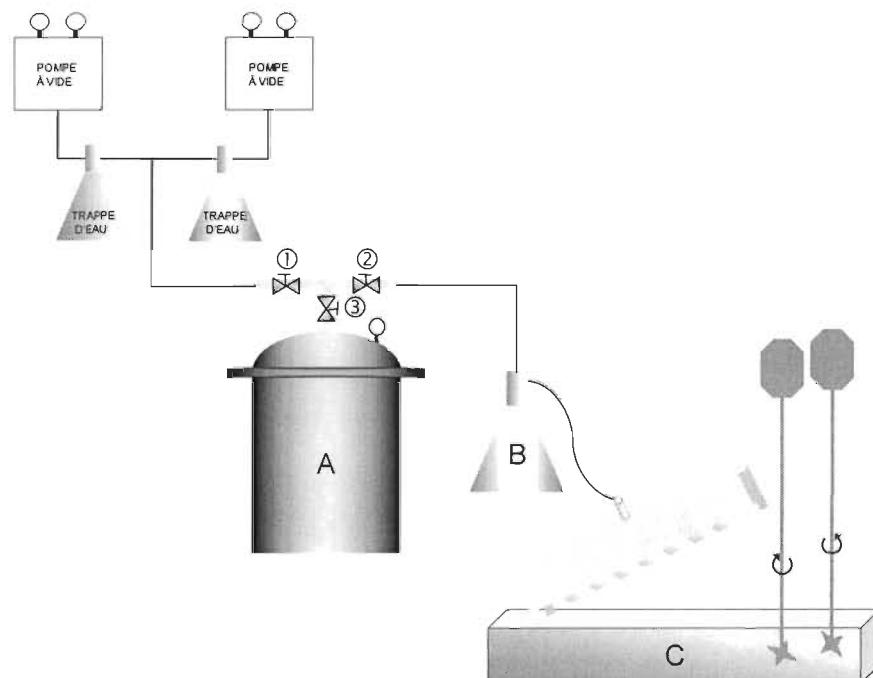


FIGURE 4.5 Schéma de montage du moule et de ses accessoires.



FIGURE 4.6 Photographie de l'ensemble de formation de caissettes.

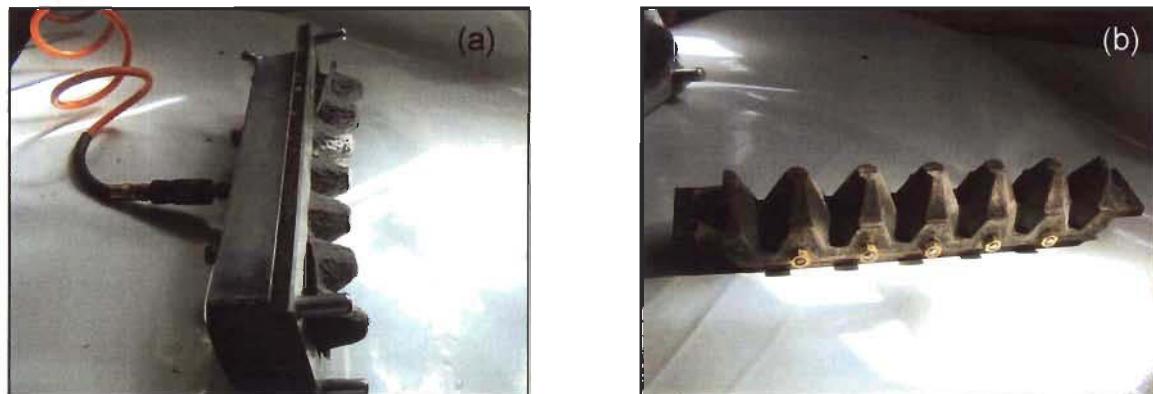


FIGURE 4.7 (a) Décollage d'une caissette, (b) support utilisé pour le transport et le séchage.

Les caissettes (figures 4.8a et 4.8b), après 15 minutes de séchage au four à 105 °C, sont conditionnées dans une salle à 25 °C et 50 % d'humidité pendant au moins 24 heures avant d'accomplir l'essai de compression

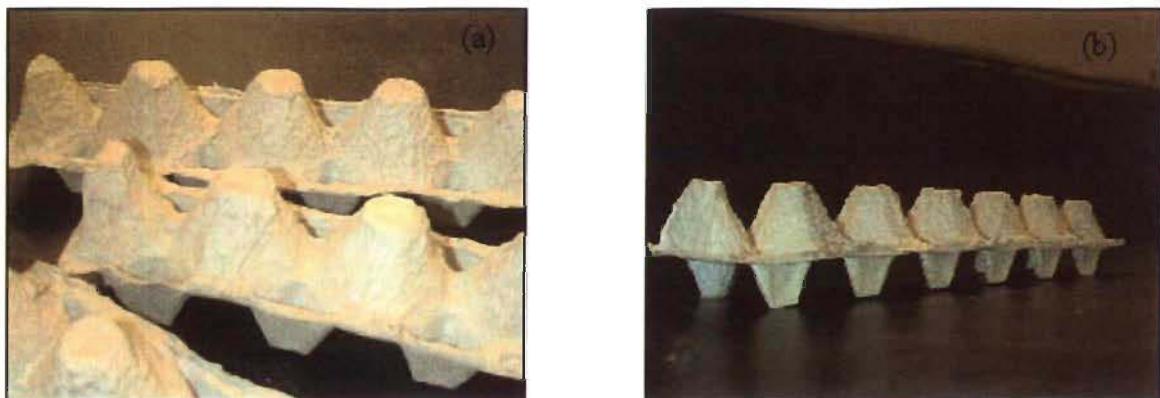


FIGURE 4.8 (a) et (b) Caissettes obtenues en laboratoire.

En somme, la conception d'un moule qui permet de former des caissettes au laboratoire nous a permis d'établir des relations entre les caractéristiques des pâtes et du produit moulé dans les analyses des résultats des chapitres 5 à 7 suivants.

Chapitre 5 -Identification de facteurs principaux

5.1. Objectifs

Les objectifs poursuivis dans cette étape du travail sont l'identification des facteurs dominants entre les variables plus importantes reliées au procédé industriel de référence. Les variables visées sont celles qui pourraient affecter la qualité de la pâte et celles susceptibles d'avoir une influence sur le procédé de moulage.

5.2. Le design d'expériences par la méthode Plackett-Burman

Le plan expérimental de type Plackett-Burman fut développé pour tamiser un grand nombre de facteurs, c'est-à-dire, réduire un grand nombre de facteurs à un groupe plus restreint de facteurs importants pour les expériences subséquentes.

Le plan factoriel, habituellement utilisé dans un design de tamisage, a le désavantage que le nombre de scénarios est fonction d'exposants de 2. Ainsi, dans notre cas, un plan factoriel complet pour étudier sept variables à deux niveaux suppose 128 (2^7) scénarios possibles. Le plan Plackett-Burmann permet d'étudier (n-1) facteurs avec n scénarios (dans notre cas, n = 8).

Le principal avantage du plan Plackett-Burmann reste dans le nombre limité de scénarios nécessaires pour évaluer un grand nombre de facteurs. Les désavantages de ce plan d'expériences sont liés aux hypothèses nécessaires pour évaluer (n-1) facteurs avec n scénarios (58). Les suppositions sont que les interactions, si elles existent, ne sont pas assez importantes pour masquer les effets principaux. En somme, le plan permet d'estimer tous les effets linéaires, mais les interactions restent confondues.

5.3. Les procédés d'analyse multivariable : régression linéaire multiple

La méthode de régression linéaire multiple nous permet de mesurer le degré d'association entre variables et/ou prédire la valeur d'une variable à partir de la connaissance des valeurs d'une ou plusieurs variables indépendantes.

Cette méthode fut utilisée pour étudier, dans un premier pas, l'influence des facteurs utilisés dans le plan Plackett-Burman. Le but de cette analyse n'était pas de construire des modèles pour chaque réponse, mais plutôt de connaître l'effet de chaque facteur à l'étude sur la propriété examinée. Cette méthode consiste à introduire les variables indépendantes dans la fonction de la réponse une à la fois, en commençant par celle qui capture le maximum de variation dans la réponse pour le niveau de signification choisi (95 %). Le procédé se poursuit en ajoutant les variables indépendantes, une à la fois, jusqu'à ce que l'ajout d'une nouvelle variable ne capture pas une portion jugée statistiquement significative de la variation résiduelle.

L'analyse statistique des résultats se fait à l'aide de l'analyse de variance (ANOVA). L'influence des variables indépendantes sur les variables en étude est évaluée par le coefficient de régression au carré (R^2) et par le test de signification du rapport F . Si la valeur du rapport F du modèle est supérieure à la valeur de F critique ($F_{modèle} > F_c$) le modèle est significatif. La valeur du rapport F_c dépend du niveau de probabilité et des degrés de liberté assignés au modèle et à l'erreur. Les degrés de liberté du modèle se calculent comme $d_M = (\text{paramètres estimés} - 1)$. Les degrés de liberté de l'erreur se calculent comme $d_E = (n - \text{paramètres estimés})$, où n représente le nombre d'observations.

5.4. Les procédés d'analyse multivariable : méthode de régression des moindres carrés partiels après projection sur une structure latente

La méthode de régression des moindres carrés partiels après projection sur une structure latente ou méthode PLS (Projections to latent structures by means of

partial least squares) est une extension de la méthode PCA, utilisée pour connecter l'information entre deux blocs de variables : X et Y (59).

La méthode PLS, comme la méthode PCA, peut être expliquée géométriquement. Considérons le système constitué de trois variables indépendantes X ($K = 3$) et trois variables dépendantes Y ($M = 3$), ayant chacun N observations. Chaque observation peut être considérée comme un point dans l'espace X et un autre point dans l'espace Y (49). Les points, une fois centrés et leur variance normalisée (description dans l'item 3.2) forment un nuage de points autour des deux systèmes de trois axes (figure 5.1). Avec une analyse PLS, nous pouvons connaître la relation qui existe entre des points dans l'espace « prédictif » et les points dans l'espace « réponse ». La première composante PLS est une ligne qui s'ajuste bien au nuage de points en X et en Y, et passant par le centre des axes, donc la ligne qui capture un maximum de variation en X et en Y simultanément. En projetant chaque observation sur cette ligne, nous obtenons les vecteurs de points t_1 et u_1 , figure 5.1.

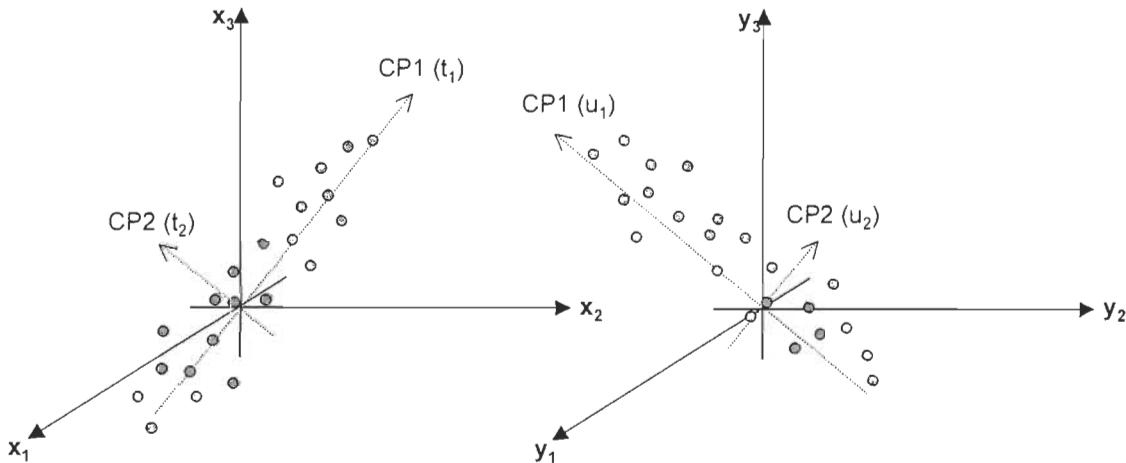


FIGURE 5.1 Projection des observations dans les espaces X et Y.

La corrélation entre X et Y, en termes des deux vecteurs de points, peut être visualisée dans un diagramme de pointage, figure 5.2a. Les vecteurs sont connectés entre eux par la relation $u_{i1} = t_{i1} + h_{i1}$, où h est le résiduel. Le diagramme de pointage t_1/u_1 est une vue de la structure de corrélation entre X

et Y. Le diagramme permet de détecter les points écartés ainsi que l'absence de linéarité entre X et Y, comme à la figure 5.2b.

Si la première composante ne décrit pas bien toute la variation des données Y, nous pouvons étendre le modèle PLS avec une deuxième composante. La deuxième composante est orthogonale à la première, et forme un plan dans les espaces X et Y. Par projection des observations dans ce plan, nous obtiendrons les vecteurs de points t_1 et t_2 dans l'espace X et u_1 et u_2 dans l'espace Y.

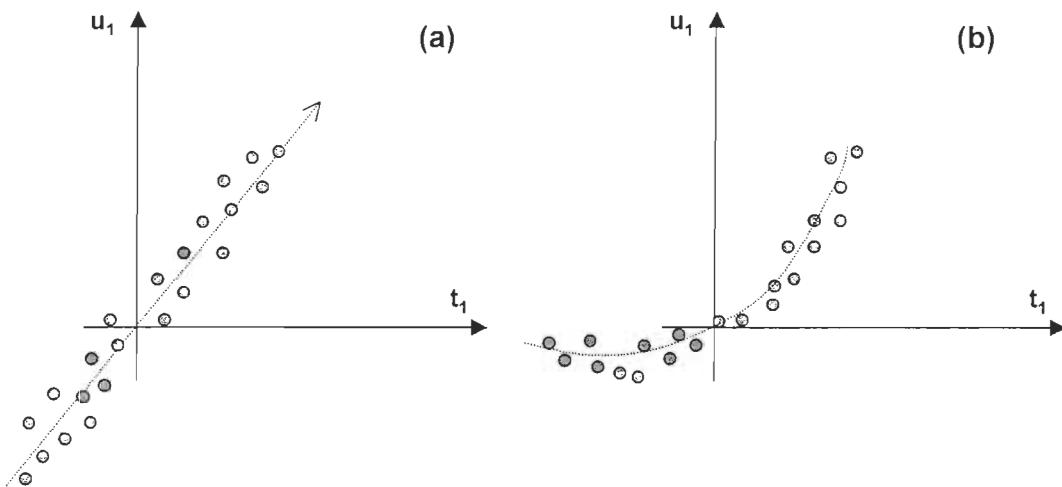


FIGURE 5.2 Diagramme de pointage t vs u , (a) relation linéaire, (b) relation non linéaire.

En somme, la modélisation PLS des relations entre deux blocs de variables peut être décrite comme 1) l'ajustement de deux modèles PCA, un pour X et l'autre pour Y ; 2) l'alignement de ces modèles, c'est-à-dire, prédire Y à partir de X. Ces relations peuvent être décrites par :

$$X = 1^*x' + T^*P' + E \quad \text{ÉQUATION 5.1}$$

$$Y = 1^*y' + U^*C' + F \quad \text{ÉQUATION 5.2}$$

où :

1^*x et 1^*y = matrices des variables x et y après normalisation

T et U = matrices des points de x et y

P' = matrice de charges des X

C' = matrice de poids des Y

E et F = matrices résiduelles

La matrice des points des X, T, est formée par la combinaison linéaire de la matrice des poids w et les variables x. Ces poids sont choisis afin de maximiser la covariance entre les matrices T et U, de cette façon indirectement T et Y.

Pour établir dans quelle mesure les variables originales contribuent à la formation des plans du modèle, nous construisons un *diagramme de charges*. Les poids des variables X et Y, nommés w^* et c respectivement, peuvent être tracés ensemble dans le même diagramme. Ce diagramme peut être un diagramme de barres, de lignes ou de points. Les poids dans un diagramme de points s'interprètent de la même façon que les charges dans une analyse PCA : plus ils s'éloignent du centre plus ils sont significatifs, les variables qui sont proches sont positivement corrélées, et les variables qui s'opposent dans le sens diagonal sont négativement corrélées.

Reprendons l'exemple donné au chapitre 3. Nous avons mesuré la résistance à la traction, la résistance à l'éclatement, l'égouttage, la rugosité et la porosité sur le produit final (papier journal) de sept usines: U1 à U7. Si ces propriétés ont été mesurées pour deux niveaux de surface spécifique de fibres (SS) et deux niveaux de longueur de fibres (Lf), nous pouvons étudier l'effet de ces deux variables (X) sur l'ensemble de propriétés mesurées (réponses Y). À la figure 5.3 nous avons un diagramme de charges pour les première et deuxième composantes. Dans cet exemple, la résistance à la traction et la résistance à l'éclatement sont influencées positivement par la surface spécifique de fibres, et, avec un effet moindre, négativement par la longueur de fibres. L'indice d'égouttage et la résistance à la déchirure présentent un comportement contraire : ils augmentent quand la longueur de fibres augmente et diminuent

quand la surface spécifique de fibres augmente. La rugosité, quant à elle, augmente quand la longueur de fibres augmente, mais n'est pas affectée par la surface spécifique des fibres. En outre, la porosité ne dépend d'aucune des deux variables mesurées.

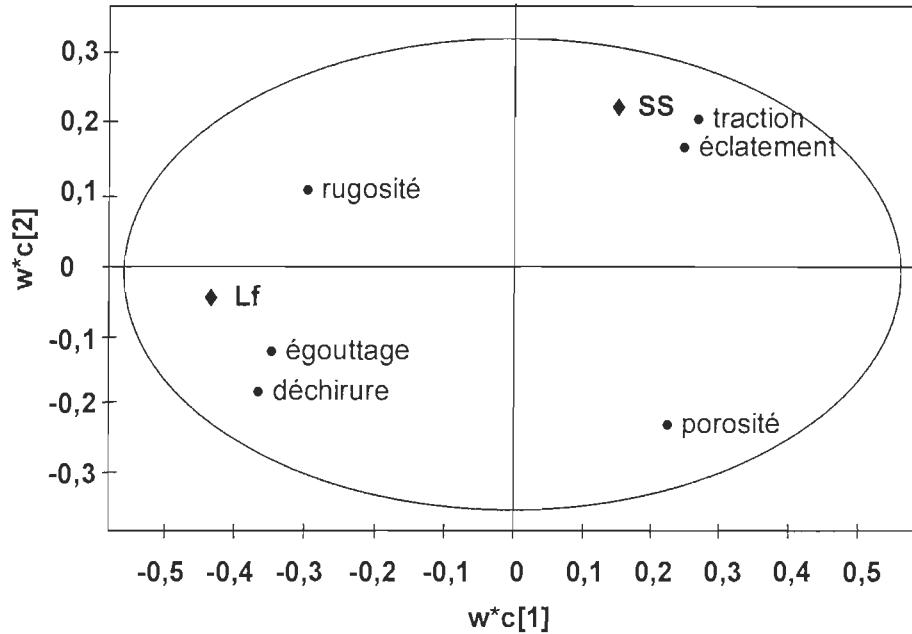


FIGURE 5.3 Exemple de diagramme de charges

Le *diagramme de pointage t1 vs t2* correspondant, figure 5.4, comme dans le cas d'une analyse PCA, équivaut au diagramme de charges, et permet d'apprécier quelles sont les observations qui ont une influence sur certaines caractéristiques. Par exemple, les usines U_1 , U_2 et U_3 (cadran en haut et à droite) ont les pâtes avec la surface spécifique des fibres la plus développée, ce qui rend les papiers plus résistants à la traction et à l'éclatement. Dans une analyse PLS, nous pouvons établir les limites de confiance du modèle. Cette limite est établie dans notre étude à 95 %, et figure comme une ellipse dans le diagramme de pointage. Un point hors de l'ellipse signifie une déviation hors norme et devra, par conséquent, être étudiée plus attentivement.

Le *diagramme de pointage t vs u* est un autre diagramme utile. Ce diagramme montre les observations dans l'espace $X(T)$ et $Y(U)$ projeté, et indique comment

l'espace Y corrèle avec l'espace X . À la figure 5.5, nous observons que les données de notre exemple sont bien corrélées, sauf dans le cas de l'usine U_7 , qui dévie légèrement de la ligne de corrélation.

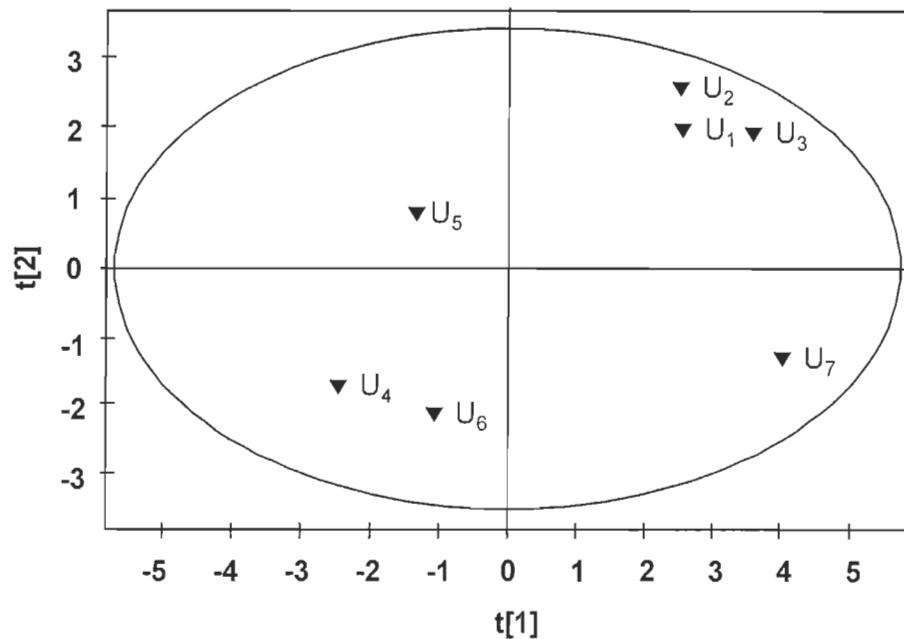


FIGURE 5.4 Diagramme de pointage t vs t

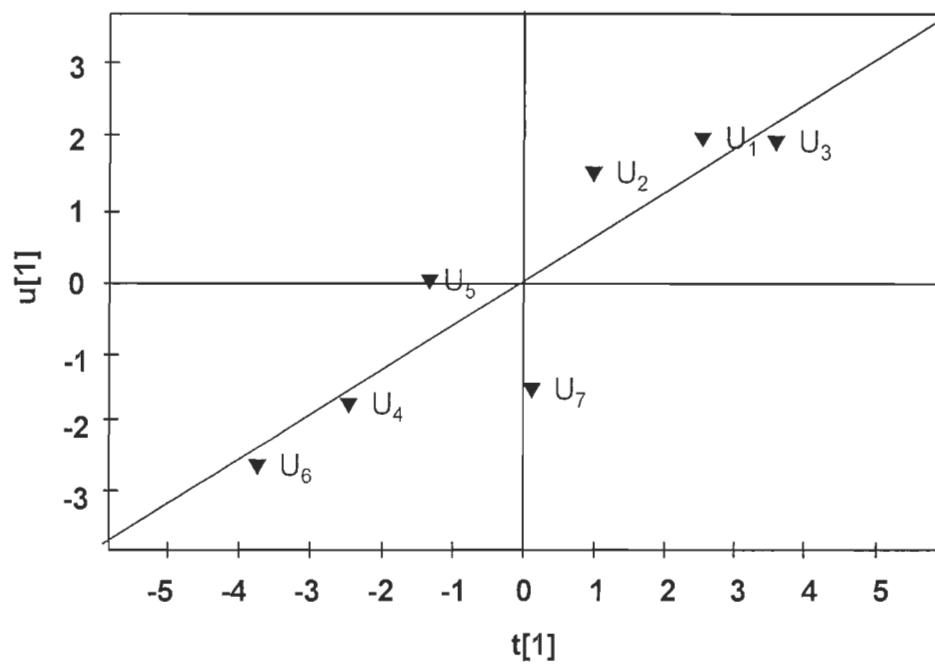


FIGURE 5.5 Diagramme de pointage t vs u

La méthode PLS a déjà été utilisée pour étudier les variations dans les propriétés de la feuille en fonction des changements des caractéristiques fibreuses. Ainsi, 75% de la variation dans les propriétés des feuilles des pâtes chimicomécaniques s'expliquent par les caractéristiques physiques et chimiques de leurs fibres (60). Cette technique a permis aussi d'établir quels sont les pré-traitements les plus convenables pour développer les liaisons inter-fibres et la résistance d'une pâte chimicomécanique (61), ainsi que d'étudier l'influence des conditions de raffinage sur les propriétés des fibres et des pâtes (62, 63).

Dans le milieu industriel, les applications des analyses multivariées sont nombreuses. En utilisant les méthodes PLS et PCA (Principal Component Analysis), une procédure de contrôle multivarié analogue aux graphiques Shewhart de contrôle univarié a été mise au point afin de superviser la performance des procédés et d'en détecter les fluctuations (64). Ces deux techniques ainsi que la méthode PLS-DA (PLS discriminant) ont été utilisées pour étudier les données historiques, surveiller le procédé et prédire certaines propriétés du produit. Dans ce cas, des modèles « hors ligne » ont été utilisés pour mieux connaître le procédé et investiguer des événements du passé. De même, des modèles « en ligne » ont été utilisés pour contrôler la production en temps réel (65). Dans le cas d'une usine de papier journal, la méthode PLS a été utilisée pour identifier les variables importantes et, en conséquence, définir les limites optimales pour les paramètres d'opération afin de maximiser certaines propriétés du papier (66). D'autres applications de la méthode indiquent l'étude de l'interrelation entre variables mesurées en continu dans une étape de blanchiment (67), l'étude de l'influence des variables du procédé sur la couleur et la blancheur des cartons (68) et l'effet des changements saisonniers sur la distribution de la taille de copeaux sur les propriétés des feuilles (69).

5.5. Méthodologie

5.5.1. Sélection de variables et leurs niveaux

Les variables étudiées ont été sélectionnées en tenant en compte du procédé industriel de référence et en choisissant celles qui pouvaient être variées facilement au niveau laboratoire.

Sept variables ont été sélectionnées : le pourcentage de papier journal post consommation en mélange avec le papier bottin (annuaire téléphonique); la température, la consistance et le temps de désintégration, et les quantités de floculant, de coagulant et de conditionneur ajoutés au système. Le choix de chaque variable se justifie comme suit:

Journal post consommation (Jp, %), : Des trois papiers de rebut utilisés en usine, le papier journal post consommation semble avoir un effet critique sur le fonctionnement des machines de l'usine de référence. En outre, en regard des propriétés des pâtes recyclées obtenues en laboratoire (chapitre 3), les sortes de papiers dont les propriétés diffèrent le plus sont le papier journal post consommation et le papier d'annuaires téléphoniques. Donc, le papier d'annuaires téléphoniques a été choisi pour évaluer l'influence sur la composition.

Température de désintégration (TEMP, °C); *Consistance de désintégration (CONSIST, %)*; et *Temps de désintégration (DURÉE, min)*: La température et la consistance sont reliées à l'efficacité de la désintégration et conséquemment, à la capacité du trituateur. L'utilisation de températures élevées permet de diminuer le temps de désintégration, et le choix de la combinaison optimale dépend de la sorte de papier (70, 71). Dans les papiers riches en pâtes mécaniques, une température basse (40°C) facilite le détachement de l'encre et prévient le jaunissement alcalin si le pH de trituration est haut (72). Comme l'optimisation de la blancheur, de la propreté et de la couleur ne sont pas d'intérêt dans cette étude, les limites de la température sont choisies en tenant

compte du fait que le procédé industriel de référence est discontinu (à pression atmosphérique) et qu'il utilise principalement les eaux blanches, normalement chaudes, pour la désintégration. Les niveaux de consistance de trituration choisis sont limités par la capacité du trituateur de laboratoire disponible. Au niveau industriel, la désintégration peut être conduite à basse, moyenne ou haute consistance. Le type de procédé (continu ou discontinu) et le design du rotor (plat ou hélicoïdal) déterminent la consistance qui peut être atteinte (70,72). À mesure que la consistance diminue, la demande d'énergie spécifique pour atteindre un contenu en pastilles déterminé augmente [73]. Les temps de trituration ont été sélectionnés en fonction d'obtenir une désintégration optimale avec le désintégrateur disponible (74), en fonction de la relation temps/température (70) et en fonction du temps normalement utilisé dans l'usine de référence (20 minutes).

Coagulant (COAG, % sfs); Floculant (FLOC, % sfs) ; et Conditionneur (COND, % sfs): nous avons utilisé des produits chimiques employés dans l'usine de référence. Le coagulant est un chlorure de diallydiméthyl-ammonium (DADMAC), le floculant est une polyacrylamide cationique (PAM) et le conditionneur est un surfactant cationique. Malheureusement, nous n'avons pas plus d'information sur les produits chimiques (par exemple, longueur de la chaîne du polymère).

Le floculant et le coagulant sont ajoutés dans le circuit entre le cuvier de machine et la tête de la machine de moulage. Ils agissent comme adjuvants de rétention et de drainage, et ils sont ajoutés dans une proportion d'environ 2,8 % et 0,042 % (base fibre sèche) respectivement. Le conditionneur est ajouté en douches nettoyantes des matrices, dans une proportion de 0,56 % (base fibre sèche). L'ajout de ce produit, requis dans cette étude, a amélioré sensiblement la performance des machines de l'usine. La fonction primordiale d'un conditionneur ou d'un nettoyant de toiles est d'augmenter l'élimination d'eau uniformément et, en même temps, d'augmenter la vie de la toile. La formulation de quelques produits pour le conditionnement permet une élimination d'eau

additionnelle en augmentant la vitesse d'évaporation d'eau de la feuille (75). La quantité de conditionneur à utiliser dépend de la quantité d'eau utilisée aux douches et peut varier entre 200 et 1000 ppm (75). Pour connaître son action sur les propriétés de la pâte, nous avons calculé les doses de produits chimiques utilisées en usine en fonction de la production, et les niveaux de variables choisis dans le plan expérimental sont voisines de ceux de la fabrique.

Les niveaux des variables étudiées avec le plan expérimental sont montrés dans le tableau qui suit.

TABLEAU 5.1 Niveau des variables du plan expérimental

	JP (%)	TEMP (°C)	CONSIST (%)	DURÉE (min)	COAG (kg/tonne)	FLOC (kg/tonne)	COND (% sfs)
Niveau bas (-1)	50	30	4	10	0	0	0
Niveau zéro	75	55	6	17	0,3	0,3	0,6
Niveau haut (+1)	100	80	8	25	0,6	0,6	1,2

5.5.2. Matières premières

Les papiers recyclés utilisés dans le plan Plackett-Burman furent évalués sous la forme de pâte.

Il faut remarquer ici que, les échantillons de papier pris en usine pour cette partie du travail, différaient des premiers échantillons évalués (chapitre 3). La qualité « journal post consommation », comprenait des papiers de différentes sortes; en plus des dépliants publicitaires, il y avait des papiers typiques de la cueillette domiciliaire : contenants en carton de nourriture, papiers d'emballage de cadeaux, magazines, cartes postales, etc. La qualité « bottin » correspondait aux annuaires téléphoniques de la ville de Mexico. Ils ne contenaient ni feuilles jaunes ni feuilles couchées de publicité.

Les papiers furent trempés dans l'eau pendant une nuit, puis désintégrés à une consistance de 2 % s.f.s. et 80 °C pendant 2 minutes, en utilisant un désintégrateur type Domtar.

En plus des essais listés au tableau 3.3 (chapitre 3), les essais suivants ont été accomplis :

- les cendres des papiers furent obtenues par incinération à 900 °C des échantillons de papiers secs à 105 °C (norme TAPPI T413).
- consistance et cendres des eaux blanches : un volume connu d'eaux blanches obtenues pendant la formation de feuilles avec recirculation fut filtrée sur un papier filtre libre de cendres. Le papier plus les matières retenues sont séchés au four à 105 °C. La consistance est calculée comme :

$$\text{CoE} (\%) = [\text{poids matière retenue (g)}/\text{volume filtré (ml)}] * 100 \quad \text{ÉQUATION 5.3}$$

Ensuite, le papier filtre plus les matières retenues sont brûlés dans un four à cendres à 900 °C (norme TAPPI T413). Les cendres des eaux blanches sont calculées comme :

$$\text{CeE} (\%) = [\text{poids cendres (g)}/\text{poids matière sèche (g)}] * 100 \quad \text{ÉQUATION 5.4}$$

5.5.3. Plan Plackett-Burman

Les papiers, déchiquetés en gros morceaux à la main, furent désintégrés sans trempage préalable en utilisant de l'eau de robinet.

La mise en pâte des vieux papiers fut accomplie dans un trituateur de laboratoire de 15 litres à une vitesse de rotor fixe (45 rév/s). Le rotor du trituateur est d'un modèle hélicoïdal (figure 5.6).

La consistance de désintégration est réglée par le rapport fibre sèche/eau ajoutée au trituateur. D'abord, le niveau de température choisi est mesuré dans l'eau avant son mélange avec le papier. Une fois atteint le temps du plan d'expériences, le trituateur est vidé et la consistance vérifiée. Ensuite, la pâte est diluée à 1,7 % de consistance avec de l'eau chaude de robinet. Ensuite, selon le scénario à accomplir, les produits chimiques furent ajoutés et mélangés à la pâte à l'aide d'un mélangeur de laboratoire. L'agitation de la pâte, à basse

vitesse, continue pendant le temps nécessaire pour former les feuilles de 1,2 et de 3 g, la classification des fibres et la mesure de l'indice d'égouttage. Pour les autres essais, la pâte est gardée sans dilution au réfrigérateur. La dilution et l'ajout des produits chimiques sont accomplis au moment de l'utilisation.

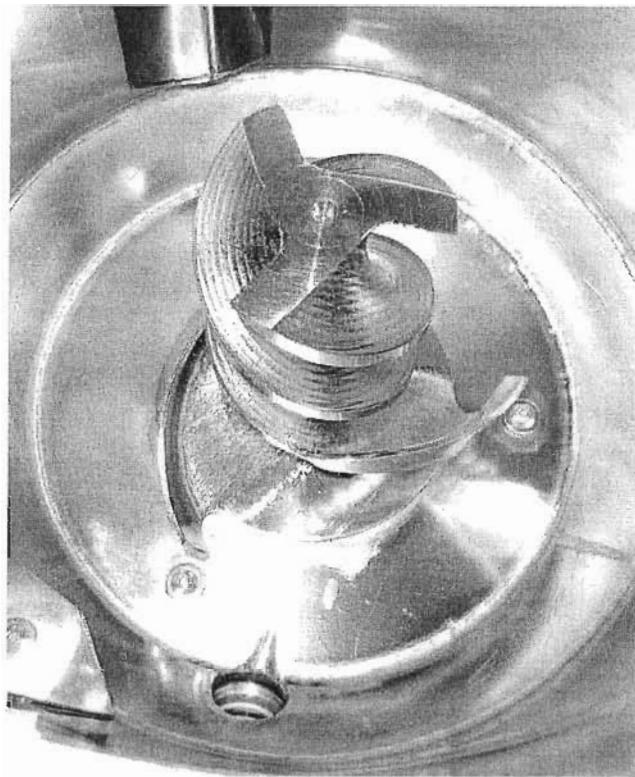


FIGURE 5.6 Rotor du triturateur de laboratoire

En plus des essais listés au tableau 3.3 (chapitre 3) et les essais mentionnés au point 5.5.2 précédent, les essais suivants ont été accomplis :

- temps de drainage feuilles 1,2 et 3 g : le temps pendant la formation des feuilles a été mesuré à l'aide d'un chronomètre. Le résultat est colligé comme [temps moyen (s) / grammage (g/m^2)].
- % rétention première passe et % rétention cendres : les essais de rétention furent accomplis en utilisant un réservoir de drainage dynamique (« Britt jar ») muni d'un tamis de 100 mailles au pouce, en suivant la procédure suggérée dans la brochure de l'équipement. Cinq cents mL d'une suspension de pâte à 1 % de consistance (consistance typique en cuvier de tête de machine dans l'usine de référence) sont

versés dans le réservoir. La pâte est mélangée pendant 5 s. à une vitesse de 750 RPM. Ensuite, le coagulant, le floculant et le conditionneur, dans cet ordre, sont ajoutés à intervalles de 10 s. Ensuite, la vitesse du mélangeur est réduite à 500 RPM pendant 10 s. La vanne s'ouvre et le liquide est drainé pendant 30 s. et recueilli. Le volume écoulé est filtré en utilisant un papier filtre libre de cendres. La rétention première passe est calculée comme :

$$RPP (\%) = [(CoP - CoE) / CoP] * 100 \quad \text{ÉQUATION 5.5}$$

où

CoP = consistance de la pâte = 1%

CoE = consistance des eaux blanche (%)

$$= [\text{poids sec solides retenus/volume écoulé en 30 s.}] * 100 \quad \text{ÉQUATION 5.6}$$

La rétention de cendres fut calculée comme (76):

$$RPPc (\%) = [(CeP * CoP - CeE * CoE) / (CoP * CeP)] * 100 \quad \text{ÉQUATION 5.7}$$

où

CeP = cendres (900 °C) de la suspension de pâte utilisée, en %

CeE = cendres (900 °C) des solides retenus sur le papier filtre, en %

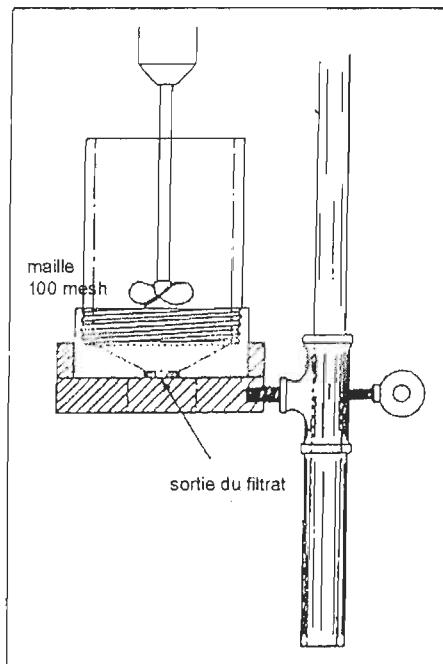


FIGURE 5.7 Schéma du récipient de drainage dynamique (77).

5.6. Résultats et discussion

5.6.1. Évaluation des matières premières

Les résultats des essais accomplis sur les pâtes obtenues à partir des matières premières papier de bottin et papier journal post consommation, figurent au tableau 2. En général, on observe que la pâte de bottin présente une meilleure capacité de liaisons entre fibres et une proportion de fibres longues plus grande que pour le papier journal post consommation. Ces caractéristiques rendent les pâtes de bottin plus résistantes (feuilles de 1,2 g, feuilles de 3 g et caissettes). Par contre, l'eau blanche obtenue lors de la formation des feuilles de pâte de journal post consommation est plus chargée (consistance et cendres plus élevées) que celle obtenue pendant la formation de pâte de bottin. Ces résultats s'accordent avec le contenu plus élevé en cendres et en fines observé pour le papier journal.

TABLEAU 5.2 Propriétés des matières premières utilisées pour le plan Plackett-Burman

	Bottin	Journal post consommation
Feuilles 1,2 g		
Volume spécifique (cm ³ /g)	2,55	2,25
Indice d'éclatement (kPa * m ² /g)	2,16	1,73
Indice de déchirure (mN * m ² /g)	8,40	7,21
Indice de traction (Nm/g)	32,96	29,02
TEA (g/cm)	19,94	16,55
Blancheur (%)	45,23	47,99
Coefficient de diffusion (m ² /kg)	54,39	66,86
Feuilles 3 g		
Volume spécifique (cm ³ /g)	2,32	1,97
Indice d'éclatement (kPa * m ² /g)	2,30	1,77
Résistance à la compression STFI (Nm/g)	57,00	51,83
Rigidité Taber (10 ³ mNm/(g/m ²)	20,98	13,43
Résist. à la compression en anneau (Nm/g)	12,75	10,41
Pâtes et eaux		
Indice d'égouttage (mL)	136	285
Cendres pâtes (%)	3,11	16,33
Longueur de fibres pondérée en poids (rnm)	2,26	2,26
Fines (% arithmétique)	35,88	41,64
Fines (% pondéré en poids)	6,67	8,53
Courbure (longueur pondérée en poids)	0,04	0,05
Angle de cassure (indice)	0,41	0,67
R14 (%)	9,2	8
R28 (%)	26,8	23,3
R48 (%)	17	15,6
R100 (%)	14,5	13,6
R200 (%)	7,2	9
P200 (%)	25,3	30,5
Temps de drainage feuilles 1,2 g (s/(g/m ²))	N.D.	N.D.
Temps de drainage feuilles 3 g (s/(g/m ²))	N.D.	N.D.
Consistance eaux blanches (%)	0,018	0,029
Cendres eaux blanches (% mat. sol.)	26,06	38,71
Caissettes		
Charge/poids (kg/g)	4,97	4,86
Charge/volume spécifique (kg g/cm ³)	10436	9692

5.6.2. Évaluation du plan Plackett-Burman

Dans le but de vérifier les effets principaux sur chaque variable étudiée, nous avons accompli une régression pas à pas à un niveau de signification de 95%. Dans quelques cas de régression significative, le modèle a été amélioré en enlevant une ou deux observations, pour des raisons qui seront discutées au fur et à mesure. Les variables réponses pour lesquelles aucun modèle ne pouvait être ajusté à un niveau de 95% furent testées aux niveaux de 90% ou 75%. L'analyse du coefficient de régression au carré (R^2) et l'analyse de variance ANOVA nous permettent de qualifier le modèle retenu. Les valeurs du test de signification du modèle ont été examinées. Si la valeur du rapport F du modèle est supérieure à celle du tableau de distribution F_c , le modèle est significatif. La valeur de F pour l'effet nous permet de mesurer la contribution de la variable à la réponse à l'étude. Les résultats de l'analyse de variance sont présentés au tableau 5.3. Les propriétés pour lesquelles aucun modèle ne peut être ajusté à un seuil de signification d'au moins 75 % figurent comme N.S. (ajustement non significatif).

A partir du tableau 5.3 (organisé selon R^2 en ordre descendant), nous pouvons constater que la variable la plus impliquée dans les réponses est le papier journal, suivi par le floculant et la consistance.

Le papier journal contribue à augmenter les fines, les cendres des pâtes, le coefficient de diffusion de la lumière, les fractions R200 et P200, la blancheur, la longueur moyenne des fibres pondérée en poids et la consistance des eaux blanches. Par contre, le papier journal influe négativement dans les fractions de fibres plus longues (R14, R28 et R48), le volume spécifique, et la plupart des résistances physiques. La consistance de désintégration contribue à l'augmentation du contenu en fines, et de la courbure et la cassure des fibres, ainsi que de la résistance des caissettes (ML/vs). Elle défavorise la résistance à l'éclatement et à la traction. En ce qui touche au floculant, sa présence est favorable à la rétention (RPP et RPPc), à la résistance à l'éclatement, au TEA,

et à la résistance des caissettes (ML/vs et ML/g). Il collabore à diminuer la consistance des eaux blanches et le volume spécifique.

Par rapport aux autres variables, nous pouvons constater que la durée de la désintégration n'influe pas sur aucune propriété, que la température de désintégration est plus favorable à son niveau bas, que le coagulant est plus avantageux à son niveau haut tandis que le conditionneur a un comportement variable.

Ensuite, nous avons utilisé la méthode PLS pour étudier l'ensemble des 39 variables, dont 32 variables dépendantes et 7 variables indépendantes. Le modèle initial présente une valeur de Q^2 négative. Donc, afin d'améliorer les valeurs prédites par le modèle, une observation (#11) et 11 variables indépendantes furent enlevées. Le scénario #11 fut enlevé car il était écarté dans le diagramme t vs u . Suite à son enlèvement, nous avons obtenu une meilleure dispersion des observations autour de la ligne de corrélation. Les variables enlevées (lf, R14, R100, R200, bl, TEA, STFI, égoutt, drain, drain3, et CeE) avaient des valeurs de R^2 basses et Q^2 négatives. Il faut signaler ici que, même si ML/g et ML/vs ont une valeur de Q^2 négative, leur exclusion du modèle ne l'améliore pas beaucoup, mais leur inclusion nous permet d'apprécier les interrelations entre les propriétés des pâtes et les propriétés des caissettes. Nous pouvons noter que la plupart des propriétés enlevées du modèle PLS ont un ajustement pauvre ou nul dans l'analyse de régression multiple (en italique dans le tableau 5.3). Sauf dans le cas du temps de drainage, toutes les propriétés enlevées montrent une variabilité inférieure à l'erreur pure associée (tableaux B.1 à B.3, annexe B). Ces propriétés ne présentent pas un poids significatif dans les diagrammes de charges w^*c ; elles ne sont donc pas affectées par les variables en étude et ne sont pas corrélées avec les autres propriétés évaluées.

TABLEAU 5.3 Résultats de la régression linéaire multiple

	(signe du coefficient de corrélation) F_{effet}							$F_{\text{modèle}}$	F_c	R^2	n
	Jp	Temp	Consis	Durée	Coag	Floc	Cond				
fines	(+)	12,35	(+)	17,70	(+)	3,92				12,21	2,9568,3021
courb				(+)	33,56					33,56	4,4365,0820
rigid	(-)	33,34								33,34	4,4364,8720
vs	(-)	3,87				(-)	2,85	(-)	18,77	9,18	2,9561,8321
angle			(+)	28,93						28,93	4,4361,6520
R28	(-)	26,56								26,56	4,4359,6020
CeP	(+)	25,11								25,11	4,3956,9221
éclat3	(-)	9,01		(-)	6,85	(+)	8,26			6,99	2,9555,2421
anneau	(-)	16,05	(-)	4,63						9,78	3,5752,0821
RPPc					(+)	10,01	(+)	9,57		9,79	3,5350,7522
cd	(+)	5,37						(+)	13,79	9,58	3,5350,2122
éclat			(-)	3,07			(+)	10,89		7,42	3,6045,1920
P200	(+)	13,68								13,68	4,4343,1820
bl	(+)	3,16						(+)	8,64	6,30	3,5741,1721
CoE*	(+)	4,08			(-)	3,15	(-)	5,06		4,10	2,4240,5822
ML/vs**	(-)	1,76		(+)	4,24			(+)	5,44	3,02	1,5339,2618
ML/g**	(-)	2,61	(-)	3,03			(+)	5,41		2,90	1,5236,7419
déch*	(-)	4,27	(-)	5,23						4,75	2,6334,5521
vs3	(-)	4,83						(-)	4,48	4,66	3,5332,8922
If	(+)	9,67								9,67	4,3532,6022
CeE								(+)	9,07	9,07	4,3932,3021
RPP*					(+)	4,09	(+)	4,26		4,18	2,6130,5522
R14**	(-)	7,84								7,84	1,4130,3620
R48	(-)	5,58								5,58	4,4323,6620
trac			(-)	6,12						6,12	4,3523,4322
TEA						(+)	5,65			5,65	4,3522,0322
R100	(-)	4,79								4,79	4,3920,1421
R200	(+)	4,68								4,68	4,3919,7521
égoutt										N.S.	
drain										N.S.	
drain3										N.S.	
STFI										N.S.	

* significatif au niveau de 90 %

** significatif au niveau de 75 %

Le poids de la première composante principale est présenté à la figure 5.8. Nous pouvons voir que la première composante est définie par le papier journal post consommation et que la plupart des variables sont déterminées par cette composante. Ainsi, la courbure et l'angle de cassure des fibres, la fraction P200 et le pourcentage de fines FQA augmentent avec une augmentation de papier

journal dans le mélange. Ces augmentations sont associées à une diminution des fractions R28 et R48. L'ensemble de propriétés de résistance de feuilles varie aussi en sens contraire du papier journal : elles augmentent avec les fractions responsables des liaisons (R28 et R48), tandis que les fines et la morphologie (courbure et cassure des fibres) leurs nuisent. En outre, la consistance des eaux blanches et les cendres des pâtes augmentent aussi avec une augmentation du papier journal dans le mélange, et la rétention est défavorisée.

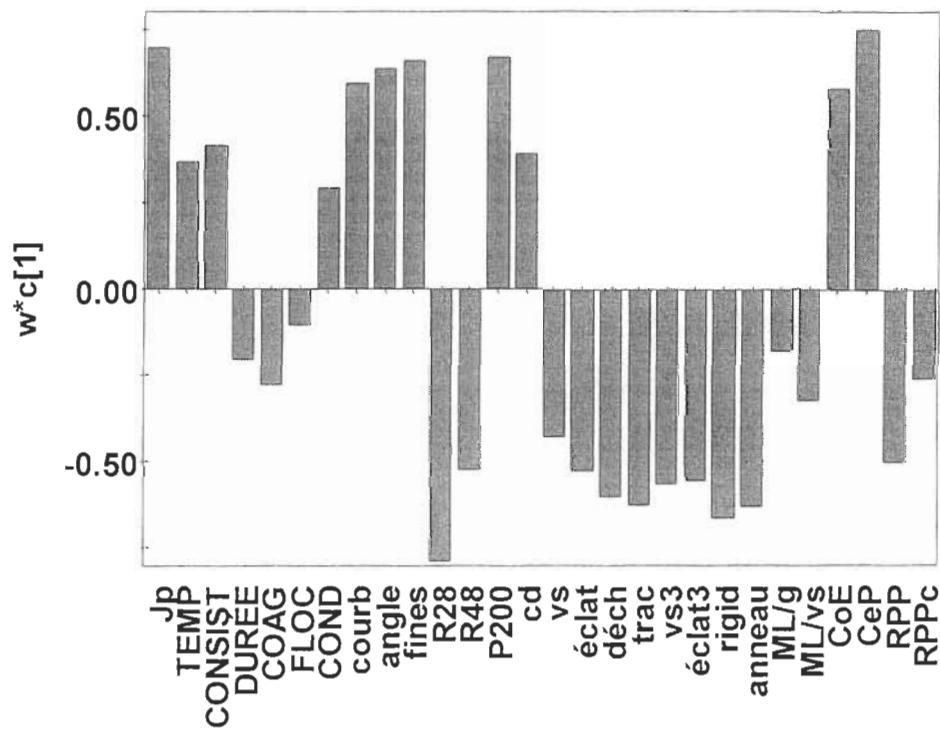


FIGURE 5.8 Diagramme de charges de la première composante

La deuxième composante est déterminée principalement par la variable floculant, mais elle présente aussi l'influence des variables température et conditionneur, figure 5.9. Le coefficient de diffusion de la lumière, propriété qui augmente avec le papier journal, augmente aussi avec la deuxième composante. Au contraire, le volume spécifique des feuilles conventionnelles et des feuilles épaisses diminuent tant pour une augmentation de papier journal

que pour une augmentation de floculant ou de conditionneur. Les résistances des caissettes sont définies dans la deuxième composante, et indiquent l'influence positive d'une augmentation du floculant et du conditionneur sur ces propriétés. La rétention en première passe des cendres (RPPc) est mieux définie dans la deuxième composante, ce qui indique une influence positive du floculant et du conditionneur sur cette propriété.

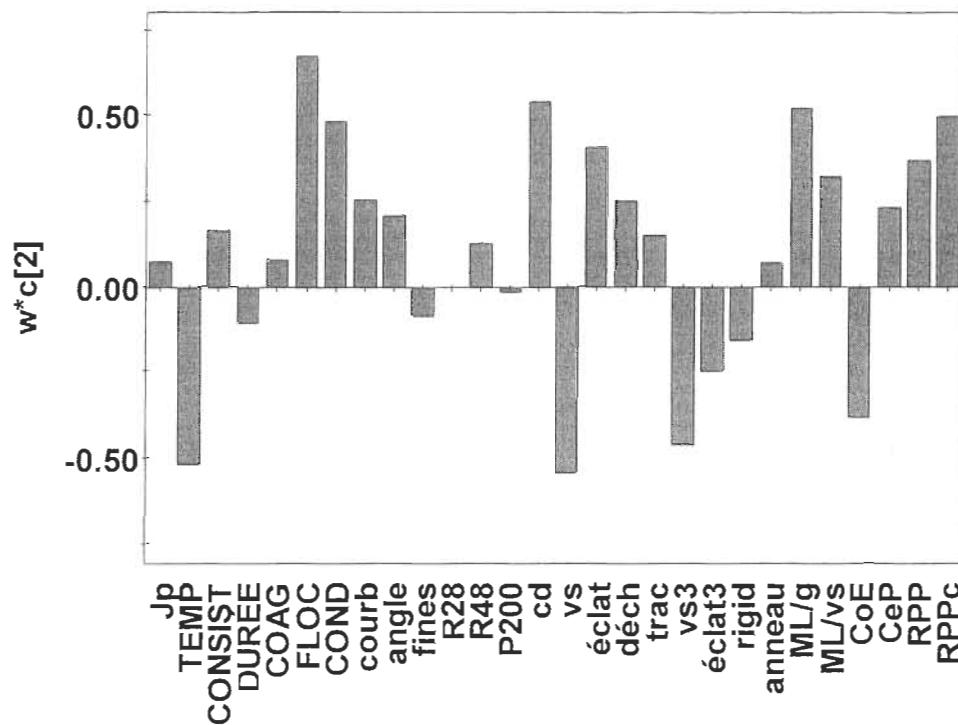


FIGURE 5.9 Diagramme de charges de la deuxième composante

La charge des composantes 1 et 2 peuvent être reliées dans un diagramme unique, comme dans la figure 5.10. Ce diagramme a un diagramme de pointage associé, figure 5.11. En observant les diagrammes, nous pouvons voir que les conditions les plus favorables au développement de la résistance de feuilles et des caissettes et à une bonne rétention, sont les conditions des scénarios 1 et 7 (et ses répétitions), figure 5.11. Par contre, les conditions moins favorables aux résistances physiques (génération de fines sans capacité de former liaisons et courbage et cassure des fibres), et aussi moins favorables à la rétention (augmentation des cendres des pâtes et de la consistance des eaux blanches),

sont les conditions des scénarios situés à droite : 17, 4 et 6 (et ses répétitions). En regardant les conditions des scénarios mentionnés (tableau B.1, annexe B), et en prenant en compte les variables définies dans les composantes principales, les conditions favorables au développement des résistances et à une bonne rétention se retrouvent lors de l'ajustement des variables journal et température à leurs niveaux bas et de la variable conditionneur à son niveau le plus haut. Les variables principales associées aux conditions d'augmentation de fines et de la courbure et de l'angle de cassure des fibres sont le papier journal et la consistance avec un ajustement à leur niveau supérieur. Dans ce dernier cas, si le floculant est à son niveau haut, la quantité de cendres des pâtes augmente (rétention meilleure, scénarios 4 et 17)), et si le floculant est à son niveau bas, la consistance des eaux blanches augmente (rétention basse, scénario 2). La plupart des scénarios cités permettent un bon ajustement du modèle tel que montré dans les diagrammes u vs t , figures 5.12 et 5.13. Cette observation nous aide au moment de choisir les conditions adéquates au développement de différentes propriétés.

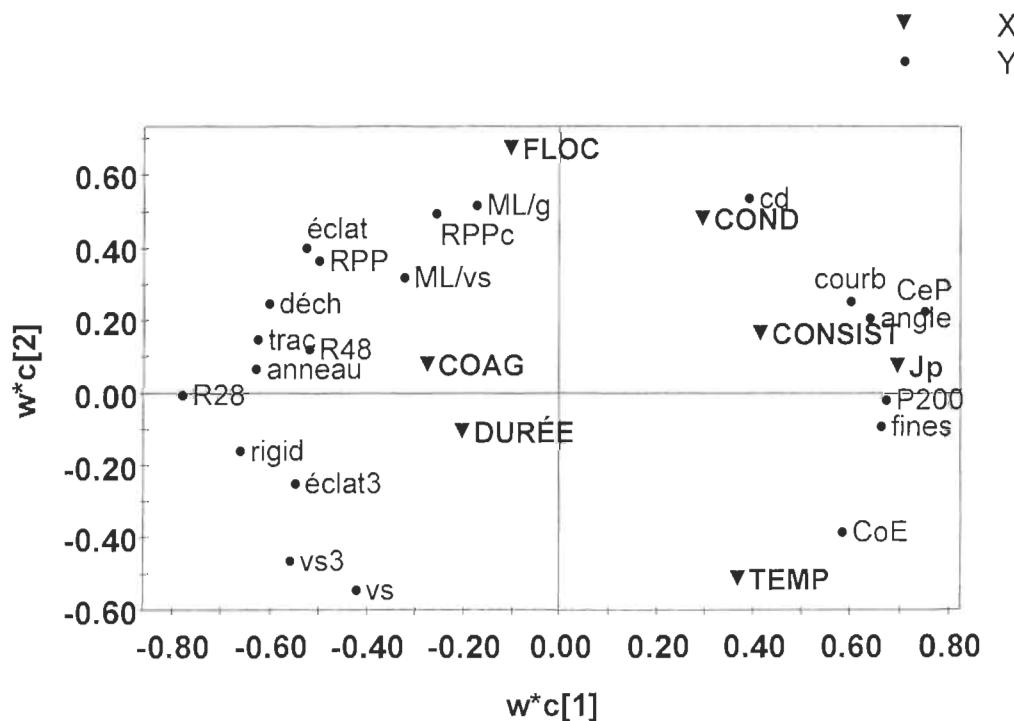


FIGURE 5.10 Diagramme de charges des composantes 1 et 2

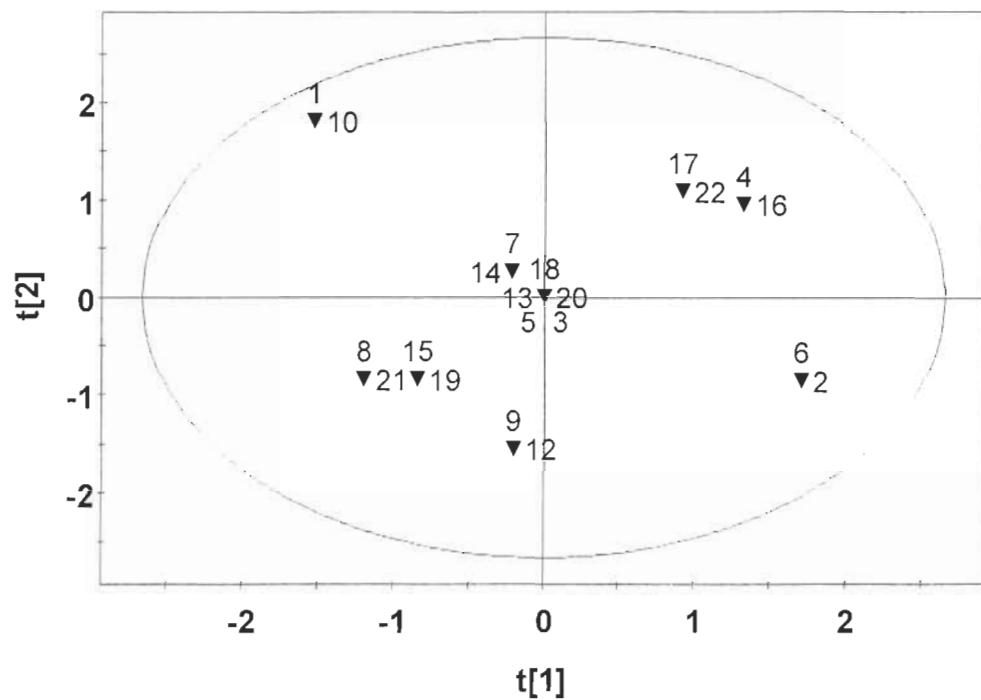


FIGURE 5.11 Diagramme de pointage des composantes 1 et 2

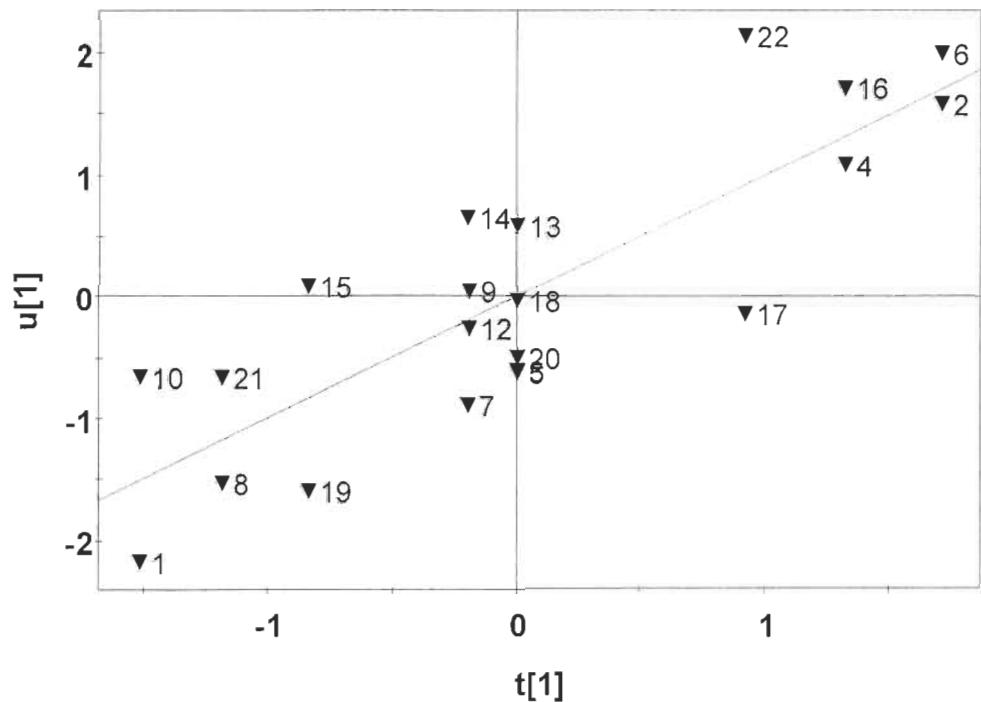


FIGURE 5.12 Diagramme u vs t pour la première composante

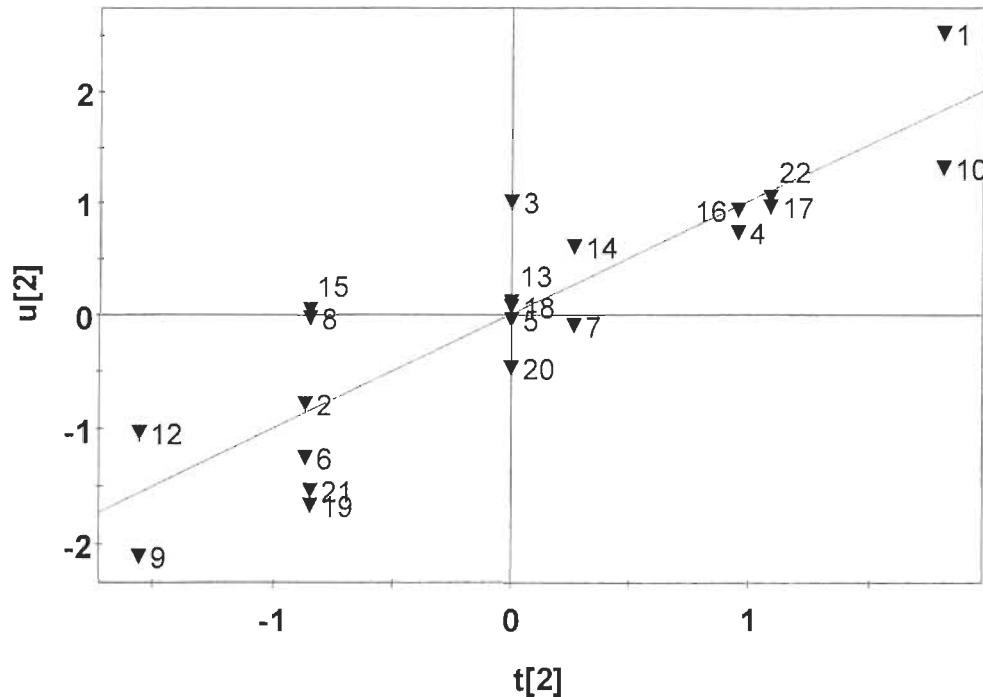


FIGURE 5.13 Diagramme u vs t pour la deuxième composante

Les valeurs de R^2 et Q^2 des variables dépendantes retenues dans ce modèle sont relativement basses, figure 5.14. Cependant, l'utilisation de la méthode d'analyse PLS nous a permis d'observer des interrelations variables-propriétés et propriétés-propriétés, difficiles à discerner dans un analyse de régression multiple conventionnelle. Par exemple, le diagramme de charge des composantes principales permet de voir que la courbure et l'angle de cassure augmentent à mesure que la consistance augmente (aussi observé dans les résultats de régression multiple) et que ces valeurs sont plus élevées quand le papier journal augmente (résultat non observé en régression multiple). En même temps, ces deux caractéristiques des fibres nuisent aux propriétés de résistance physique, définies sur la même composante mais qui varient en sens contraire.

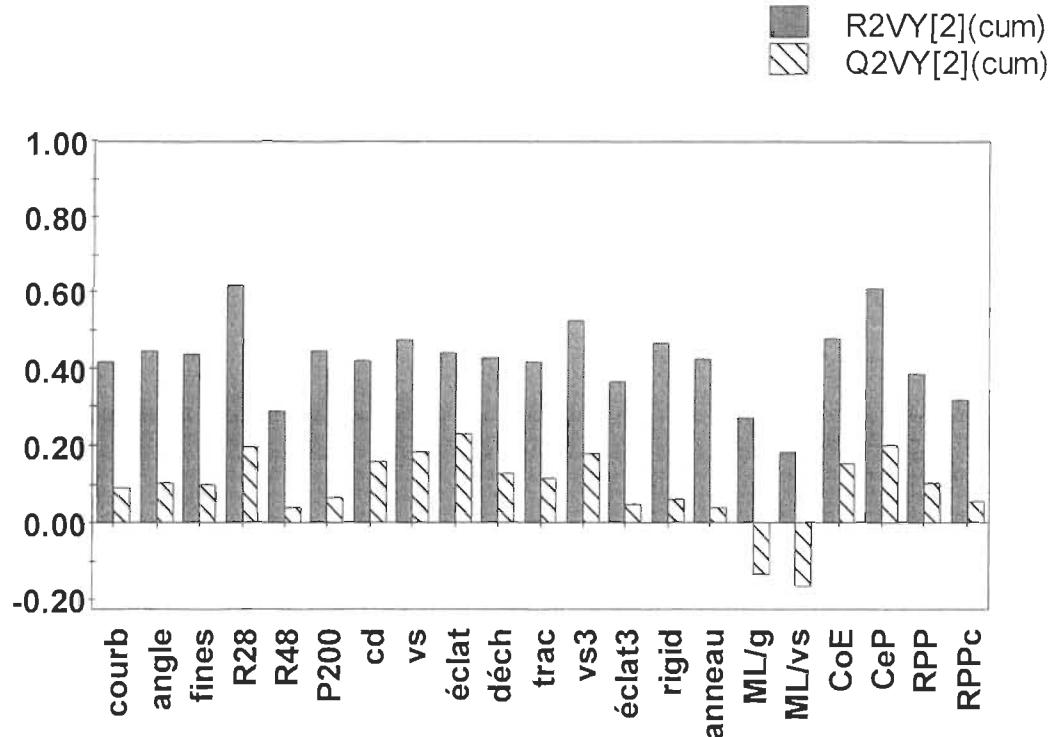


FIGURE 5.14 Coefficients de corrélation et de prédiction

5.6.3. Analyse microscopique des pâtes

L'analyse microscopique fut réalisée sur les pâtes désintégrées, obtenues des papiers bottin et journal post consommation, tableau 5.4.

Si nous comparons les résultats avec ceux obtenus lors notre première visite à l'usine (voir tableau 3.1, chapitre 3), nous observons que le papier bottin montre de faibles différences de composition en pâte chimique. Cependant, le papier de journal post consommation présente une quantité fortement supérieure en pâte chimique de résineux, au détriment du contenu en pâte mécanique, comparativement au papier journal échantillonné en premier.

À la figure 5.15 nous observons deux photographies des pâtes. Le papier journal post consommation, figure 5.15(a), présente des impuretés (i) observées précédemment. Ces impuretés pourraient être les responsables de la consistance des eaux blanches plus élevée observée dans les pâtes 100 %

papier journal post consommation. Les fines sont composées de fines typiques de pâte mécanique (f) et de cellules de parenchyme (p) de pâte chimique de feuillus. À la figure 5.15(b) nous observons les fibres des trois types de pâtes qui composent le papier bottin.

TABLEAU 5.4 Composition des matières premières, exprimée en pourcentage des différentes sortes de fibres

	Bott	Jp
Chimique de résineux (ChR)	11	28
Chimique de feuillus (ChF)	12	8
Mécanique de résineux (MecR)	77	64

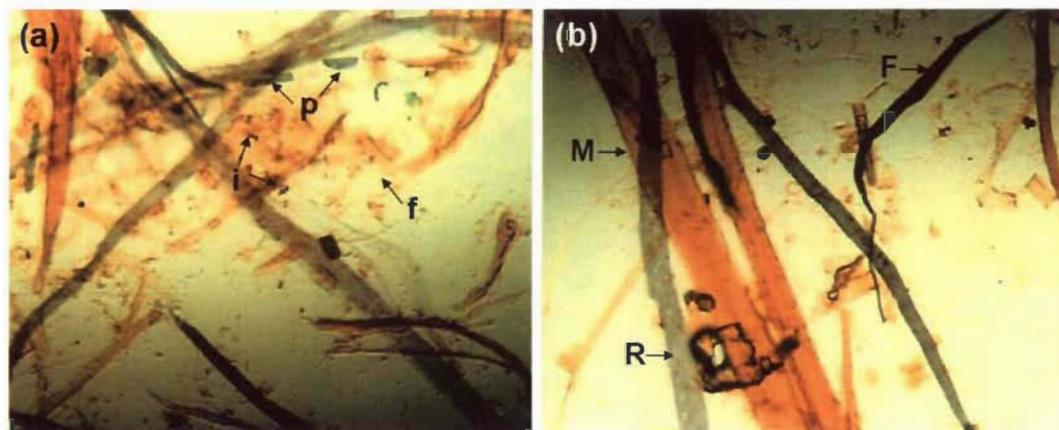


FIGURE 5.15 Microphotographies des pâtes, (a) journal post consommation, (b) bottin

5.7. Conclusions

L'évaluation des résultats par la méthode de régression multiple et par la méthode PLS nous permet d'arriver aux conclusions suivantes :

Des sept variables étudiées, les variables les plus importantes sont le papier journal post consommation, le floculant et la consistance de désintégration, dans cet ordre.

Le papier journal post consommation est responsable des conditions moins favorables au développement des résistances physiques et à la rétention de matières solides. Il apporte des fines et des cendres au système et la qualité de ses fibres est moins adéquate pour la formation de liaisons. Le floculant contrôle la rétention de fines et de cendres dans la feuille. Cette rétention est favorable aux eaux blanches moins chargées, aux résistances des caissettes et à la résistance à l'éclatement des feuilles standards.

La consistance de désintégration influe sur la morphologie des fibres. Une augmentation de la consistance augmente la courbure et la cassure des fibres, caractéristiques qui nuisent à la résistance physique des feuilles.

Ces conclusions nous ont permis de choisir le papier journal post consommation et le floculant comme les variables importantes dans le système à l'étude. Ces variables ont été testées à l'échelle industrielle, afin de vérifier leur importance. Les résultats des essais réalisés dans l'usine de référence sont présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 6 - Essais à l'échelle industrielle

6.1. Introduction

En tenant compte des variables importantes dans le procédé de moulage, telles que sélectionnées lors des essais de tamisage, nous avons accompli un plan factoriel de huit scénarios avec répétitions dans l'usine de référence. Aux variables choisies, soit la quantité de papier journal et de floculant, nous avons ajouté la consistance en cuvier de tête de machine. Cette dernière variable ne faisait pas partie des essais de tamisage mais semblait importante à inclure en usine. Elle pourrait avoir un impact sur la finition de surface des caissettes, de même que sur sa résistance.

Les essais ont été réalisés sur la machine A. Cette machine est celle qui présente le plus souvent des problèmes de fonctionnement.

Nous avons considéré que le suivi des papiers entrant au système aurait été difficile à relier aux scénarios d'échantillonnage, à cause des retards existants entre la trituration et la formation. Ainsi, afin de suivre la qualité de la matière première, nous avons pris des échantillons de pâte de cuvier de réserve tout au long de la journée d'essais. Le cuvier de réserve reçoit la pâte du trituateur après sa dilution avec l'eau blanche. Avant d'arriver au cuvier de tête de machine, la pâte est de nouveau diluée et certains produits chimiques sont ajoutés.

La qualité de la pâte du cuvier de réserve des 16 scénarios a été évaluée en ce qui touche les caractéristiques fibreuses et les propriétés de la pâte. Lors de cette évaluation, nous avons détecté des variations importantes dans la qualité de la pâte 100 % journal tout au long des 8 scénarios correspondants. Afin de minimiser l'effet de ces variations non désirées, deux indices de qualité, haut et bas, ont été obtenus et utilisés comme variables dans l'analyse postérieure

(analyse PLS du plan factoriel). Ces indices seront décrits en détails à la section 6.2.2.1.

Pour l'analyse des essais du plan factoriel, nous avons utilisé la pâte de cuvier de tête de machine, les eaux blanches de la machine et le produit final soit les caissettes pouvant contenir 30 œufs. La pâte a été évaluée en suivant les caractéristiques fibreuses et d'écoulement, la résistance physique des feuilles standards et épaisses et la résistance à l'écrasement des caissettes formées en laboratoire. Les eaux blanches d'usine et celles obtenues après la formation de caissettes en laboratoire ont été évaluées suivant leur contenu en matières solides et dissoutes. Les caissettes d'usine furent évaluées en entier, sans les découper, en adaptant des plaques à l'appareil de compression.

Dues aux variations de la matière première tout au long des scénarios 100 % papier journal, nous n'avons pas pu évaluer directement l'influence des variables du procédé sur les variables dépendantes. Cependant, l'utilisation des indices de qualité de la pâte entrant au système conjointement avec certaines caractéristiques fibreuses et d'égouttage des pâtes évaluées comme variables indépendantes, nous a permis d'analyser à titre de variables dépendantes les propriétés des feuilles, des caissettes et des eaux blanches dans un modèle PLS.

6.2. Méthodologie

6.2.1. Essais en usine

Les essais en usine ont été réalisés suivant un plan d'essais factoriel à trois variables et deux niveaux (un niveau haut (1) et un niveau bas (-1)), pour lequel les variables sont : la quantité de papier journal post consommation (100 % ou mélange 50/50 % avec annuaires téléphoniques), la présence de floculant (avec ou sans floculant) et la consistance dans le cuvier de tête de la machine (haute et basse). Le plan d'essais étant répété, un total de 16 scénarios fut accompli.

Les essais ont été réalisés dans la même journée, avec un délai de 20-30 min entre chacun. Lors du changement de matière première (depuis le scénario 42), nous avons attendu quatre heures, pour permettre la stabilisation du système. La combinaison des niveaux pour chaque scénario est montrée au tableau 6.1. Étant donné que la dose de floculant fut ajustée à un niveau fixe de dosage de la vanne (et non basée sur la production de fibres sèches) et que la consistance avait fluctué selon les conditions d'opération de la machine, les conditions réelles furent mesurées en laboratoire et figurent au tableau 6.1. La dose réelle de floculant fut calculée en tenant compte de la concentration du floculant dilué (mesuré en laboratoire) entrant au système et la production de fibres sèches au moment de l'échantillonnage.

Les autres variables du système ont été maintenues constantes au niveau d'opération habituelle en usine : consistance de désintégration, coagulant, conditionneur et antimousse.

TABLEAU 6.1 Niveau des variables du plan expérimental

Scénario	Journal	Consistance	Consistance (%)	Floculant	Floculant (g/tonne)
11	50/50	haute	1,03	avec	165,3
12	50/50	haute	1,08	avec	154,5
21	50/50	basse	0,88	avec	186,1
22	50/50	basse	0,89	avec	182,8
31	50/50	basse	1,06	sans	0
32	50/50	basse	1,04	sans	0
41	50/50	haute	1,16	sans	0
42	50/50	haute	1,22	sans	0
51	100	haute	1,14	sans	0
52	100	haute	1,13	sans	0
61	100	basse	1,03	sans	0
62	100	basse	1,01	sans	0
71	100	basse	0,93	avec	173,4
72	100	basse	0,95	avec	177,9
81	100	haute	1,14	avec	146,1
82	100	haute	1,16	avec	142,6

Dans chaque scénario, les échantillons suivants ont été pris :

- pâte du cuvier de réserve à haute consistance,
- pâte de cuvier de tête de machine,
- caissettes humides : après la formation et avant d'entrer au séchoir,
- eaux blanches,
- produit final sec (caissettes pouvant contenir 30 œufs).

Tous les échantillons ont été essayés en laboratoire en suivant la méthodologie décrite ci-dessous.

6.2.2. Déterminations en laboratoire

6.2.2.1. *Pâtes de cuvier de réserve*

Les pâtes furent évaluées en mesurant les caractéristiques des fibres et des pâtes ainsi que les résistances physiques des feuilles standards et des feuilles épaisses.

Les feuilles furent formées avec recirculation des eaux blanches en utilisant l'eau fraîche au départ.

Les techniques utilisées pour mesurer les propriétés sont les mêmes que dans les chapitres précédents, décrites dans les points 3.4.2 et 5.5.2.

Indices de qualité. À cause des variations observées dans la qualité de la matière première, qui ne permettait pas d'isoler l'effet des variables d'opération dans l'analyse postérieure, nous avons calculé deux indices de qualité : un indice de qualité haut et un indice de qualité bas.

Pour calculer l'indice de qualité haut, InH, nous avons choisi les propriétés pour lesquelles nous désirons une valeur élevée (17 au total) : la longueur de fibres, les fractions R14, R28, R48 et R100, le volume spécifique des feuilles de 60 et 150 g/m², la résistance à l'éclatement, la résistance à la déchirure et la

résistance à la traction, l'absorption d'énergie à la tension, la résistance des feuilles de 150 g/m² (résistance à l'éclatement, résistance à la compression en anneau et résistance à la compression STFI), l'indice d'égouttage et le contenu en cendres des pâtes.

Avec le même critère, les propriétés choisies pour le calcul de l'indice de qualité bas, InB, sont celles que l'on souhaite basses (7 au total) : le contenu en fines, la courbure et l'angle de cassure des fibres, les fractions R200 et P200 et le temps de drainage pendant la formation des feuilles de 1,2 et 3 grammes.

Ainsi, la pâte de meilleure qualité sera celle qui présente les indices haut et bas les plus élevés. Les formules pour calculer les indices sont les suivantes :

$$InH = \frac{\sum_{n=1}^{17} \left[\frac{CRI_i - CR_{min}}{CR_{max} - CR_{min}} \right]}{17} \quad \text{ÉQUATION 6.1}$$

$$InB = 1 - \frac{\sum_{n=1}^{7} \left[\frac{CRI_i - CR_{min}}{CR_{max} - CR_{min}} \right]}{7} \quad \text{ÉQUATION 6.2}$$

où :

CRI = valeur de la propriété de la pâte de cuvier de réserve pour le scénario i (i=1-16)

CRmin = valeur minimale de la propriété de la pâte de cuvier de réserve des 16 scénarios

CRmax = valeur maximale de la propriété de la pâte de cuvier de réserve des 16 scénarios

Ces indices procurent une référence pour la qualité initiale de la pâte de cuvier de réserve, donc de la matière première. Il s'agit ici d'éviter qu'un scénario soit

considéré comme excellent alors qu'en fait c'est la matière première qui était de meilleure qualité à ce moment.

6.2.2.2. Pâtes et eaux de cuvier de tête de machine et produit final (essai factoriel)

Les pâtes de cuvier de tête de machine, les eaux blanches écoulées et le produit final (caissettes humides et sèches) de chaque essai en usine furent évalués en laboratoire.

Pour évaluer les pâtes, des feuilles standards et épaisses furent formées avec recirculation des eaux. Pour former la première feuille, de l'eau blanche d'usine correspondant au scénario évalué fut utilisée. Malheureusement, les matières solides des eaux d'usine restaient retenues en bonne partie dans la première feuille, mais nous estimons que l'impact des solides dissous et colloïdaux sur le drainage a été quand même maintenu.

La pâte de tête de machine fut utilisée aussi pour former des caissettes en laboratoire. Les caissettes furent formées et évaluées selon la méthode décrite au chapitre 4. Comme la pâte était déjà à la consistance désirée, les caissettes furent formées sans recirculation d'eau. Cependant, les eaux recueillies furent utilisées pour déterminer les matières en suspension, les solides dissous, la consistance et les cendres des eaux blanches de laboratoire.

Les matières en suspension totales et les solides dissous totaux furent obtenus en suivant la méthode Tappi T 656, en utilisant un papier de filtre de fibres de verre. Toutes les autres propriétés des pâtes et des eaux furent évaluées par les méthodes décrites antérieurement (points 3.4.2 et 5.5.2). Les caissettes humides, prises dans le sens de la largeur de la machine (quatre au total), furent pesées et leur humidité fut déterminée. Les caissettes sèches (plaque à 30 œufs) furent testées suivant la méthode présentée au chapitre 4.

6.3. Résultats et discussion

6.3.1. Pâtes de cuvier de réserve

Le suivi de la qualité de la matière première entrant dans le système était fait en analysant les pâtes du cuvier de réserve.

La première partie des expériences utilisait un mélange de 50 % papier journal post consommation et 50 % papier de bottins téléphoniques. Les résultats sont présentés dans le tableau 6.2. La deuxième partie du travail utilisait 100 % de papier journal post consommation comme matière première, tableau 6.3.

En relation avec la pâte mélange, la pâte de 100 % journal post consommation a des valeurs plus hautes d'indice d'égouttage, de cendres des pâtes, de courbure et d'angle de cassure des fibres, de fraction R14, de résistances à l'éclatement, à la déchirure et à la traction, du TEA et de résistances à l'éclatement des feuilles de 3 g et à la compression en anneau.

Si nous utilisons le coefficient de variation comme indice de variabilité, une valeur supérieure à 5 % pour une propriété nous indique que certaines caractéristiques de la matière première ont varié selon les critères généralement acceptés en statistique.

Au long des huit premiers scénarios, la qualité de la matière première (mélange de journaux et de bottins) est restée assez homogène. Les seules propriétés qui ont montré une variabilité sont les cendres des pâtes (9,4 %), les fines pondérées en poids (8,0 %), la fraction R14 (6,5 %) et le TEA (8,9 %). Cependant, ces variations ne semblent pas avoir affecté considérablement les autres propriétés mesurées.

Par contre, des variations importantes ont été observées au long des huit scénarios de 100 % papier journal post consommation, pâtes CR51 à CR82. Dans les figures qui suivent, nous observons les variations des propriétés qui présentent un coefficient de variation supérieur à 5 %.

TABLEAU 6.2 Propriétés de la pâte de cuvier de réserve, mélange 50 % papier journal post consommation – 50 % bottins téléphoniques

	CR11	CR12	CR21	CR22	CR31	CR32	CR41	CR42	moy	écart	cv
Indice d'égouttage (mL)	137	146	143	135	141	134	141	138	139	4	2,9
Temps de drainage (min m ² /g)	0,38	0,33	0,42	0,38	0,42	0,43	0,38	0,39	0,39	0,03	8,15
Temps de drainage 3 g (min m ² /g)	0,58	0,60	0,64	0,62	0,63	0,67	0,65	0,72	0,64	0,04	6,68
Cendres pâtes (%)	5,86	6,66	6,54	5,43	7,10	6,67	7,33	6,63	6,53	0,62	9,4
Fines (% pondéré en poids)	8,70	9,51	9,06	9,40	10,56	11,05	9,95	9,40	9,70	0,78	8,0
Longueur de fibres pond. en poids (mm)	2,249	2,275	2,256	2,291	2,239	2,197	2,241	2,263	2,251	0,03	1,2
Courbure, longueur pondérée en poids	0,042	0,048	0,047	0,044	0,043	0,043	0,044	0,044	0,044	0,00	4,6
Angle de cassure, indice	0,57	0,59	0,61	0,59	0,565	0,58	0,565	0,525	0,574	0,03	4,4
R 14 (%)	6,6	6,5	5,9	6,4	5,5	5,8	6,5	6,1	6,2	0,40	6,5
R28 (%)	25,1	25	25,7	25,9	24,5	24,4	25,1	25,6	25,2	0,54	2,2
R48 (%)	16,6	16,6	16,7	16,8	16,3	16,6	16,7	16,9	16,7	0,18	1,1
R100 (%)	12,2	12,4	12,2	12,5	12,3	12,4	12,5	12	12,3	0,17	1,4
R200 (%)	7,2	7,7	7,3	7,5	7,7	7,7	7,5	7	7,5	0,26	3,5
P 200 (%)	32,3	31,8	32,2	30,9	33,7	33,1	31,7	32,4	32	0,86	2,7
Volume spécifique (cm ³ /g)	2,41	2,35	2,43	2,28	2,37	2,31	2,36	2,54	2,38	0,08	3,4
Indice d'éclatement (kPa * m ² /g)	1,49	1,49	1,41	1,46	1,51	1,42	1,41	1,41	1,45	0,04	3,0
Indice de déchirure (mN*m ² /g)	6,94	6,77	7,05	6,90	6,88	6,92	6,95	7,34	6,97	0,17	2,4
Indice de traction (Nm/g)	29,91	30,89	28,86	30,16	30,66	29,70	29,68	30,35	30,03	0,64	2,1
TEA (g/cm)	21,64	18,60	18,48	18,31	22,56	22,05	19,61	21,83	20,39	1,81	8,9
Volume spécifique feuilles 3 g (cm ³ /g)	2,27	2,30	2,36	2,31	2,24	2,28	2,33	2,34	2,30	0,04	1,7
Ind. d'éclatement feuilles 3 g(kPa * m ² /g)	1,48	1,64	1,51	1,53	1,58	1,51	1,48	1,52	1,53	0,06	3,6
Rigidité Taber (10 ³ mNm/(g/m ²))	17,81	17,31	18,18	17,99	17,01	17,44	16,91	17,71	17,54	0,46	2,6
R. à la compression en anneau (Nm/g)	13,18	13,24	13,05	12,92	12,63	13,32	13,32	13,63	13,16	0,30	2,3
R. à la compression STFI (Nm/g)	57,36	58,88	58,66	58,63	57,56	58,66	59,31	56,04	58,14	1,07	1,8
Coefficient de diffusion (m ² /kg)	52,07	51,58	53,76	50,11	50,22	57,11	51,36	50,51	52,09	2,35	4,5
Blancheur (%)	40,93	40,73	41,62	40,47	41,08	41,04	41,21	41,29	41,05	0,35	0,9
Indice de qualité haut	0,30	0,38	0,33	0,34	0,28	0,27	0,35	0,36	0,04	0,33	0,12
Indice de qualité bas	0,78	0,60	0,62	0,66	0,49	0,44	0,60	0,69	0,11	0,61	0,18

TABLEAU 6.3 Propriétés de la pâte de cuvier de réserve, 100 % papier journal post consommation

	CR51	CR52	CR61	CR62	CR71	CR72	CR81	CR82	moy 2	ecart	cv
Indice d'égouttage (mL)	141	137	145	150	139	141	158	157	146	8	5,6
Temps de drainage (min m ² /g)	0,40	0,37	0,37	0,45	0,42	0,42	0,50	0,62	0,44	0,08	18,91
Temps de drainage 3 g (min m ² /g)	0,68	0,63	0,63	0,70	0,75	0,72	0,69	0,80	0,70	0,06	8,25
Cendres pâtes (%)	5,02	4,12	5,46	6,40	7,76	8,38	8,52	8,75	6,80	1,79	26,4
Fines (% pondéré en poids)	9,20	8,33	8,34	8,56	8,25	8,55	9,18	10,04	8,80	0,62	7,0
Longueur de fibres pond. en poids (mm)	2,191	2,256	2,248	2,249	2,247	2,277	2,304	2,178	2,243	0,04	1,8
Courbure, longueur pondéré en poids	0,049	0,048	0,052	0,051	0,058	0,058	0,059	0,057	0,054	0,005	8,6
Angle de cassure, indice	0,635	0,615	0,655	0,665	0,745	0,76	0,775	0,845	0,712	0,08	11,4
R 14 (%)	7,3	7,8	8,3	7,8	7,6	7,7	8,4	8,1	7,9	0,37	4,7
R28 (%)	27,4	27,4	26,7	25,9	25	24,3	25	24,2	25,7	1,31	5,1
R48 (%)	17,4	17,3	17,2	16,9	16,5	16,3	16,7	16,3	16,8	0,44	2,6
R100 (%)	12,9	12,4	12,2	12	12,5	12	12,9	12,3	12,4	0,35	2,9
R200 (%)	7,1	7,6	7,4	7,5	7,1	7,2	7,4	7,2	7,3	0,19	2,6
P 200 (%)	27,9	27,5	28,2	29,9	31,3	32,5	29,6	31,9	29,9	1,91	6,4
Volume spécifique (cm ³ /g)	2,40	2,43	2,31	2,27	2,16	2,13	2,25	2,10	2,26	0,12	5,4
Indice d'éclatement (kPa * m ² /g)	1,61	1,66	1,66	1,72	1,70	1,86	1,72	1,73	1,71	0,07	4,4
Indice de déchirure (mN*m ² /g)	7,64	7,71	7,50	7,55	7,47	7,91	8,04	8,08	7,74	0,24	3,1
Indice de traction (Nm/g)	31,97	32,11	32,94	31,58	33,68	34,46	34,20	33,57	33,06	1,08	3,3
TEA (g/cm)	23,89	22,22	24,90	21,81	24,87	27,68	25,92	25,17	24,56	1,91	7,8
Volume spécifique feuilles 3 g (cm ³ /g)	2,43	2,45	2,30	2,32	2,19	2,12	2,16	2,06	2,25	0,14	6,4
Ind. d'éclatement feuilles 3 g(kPa * m ² /g)	1,76	1,64	1,70	1,73	1,79	1,84	1,87	1,81	1,77	0,08	4,4
Rigidité Taber (10 ³ mNm/(g/m ²))	22,42	19,03	18,65	17,70	17,40	15,95	16,26	16,44	17,98	2,11	11,7
R. à la compression en anneau (Nm/g)	13,17	12,94	12,93	13,59	14,35	15,26	15,08	14,92	14,03	0,99	7,0
R. à la compression STFI (Nm/g)	56,24	60,15	57,42	58,19	59,57	57,87	58,86	57,44	58,22	1,27	2,2
Coefficient de diffusion (m ² /kg)	48,24	50,26	52,69	56,86	49,29	44,23	49,07	46,90	49,69	3,80	7,6
Blancheur (%)	40,45	40,53	40,47	39,99	40,13	39,93	40,62	40,57	40,34	0,28	0,7
Indice de qualité haut	0,59	0,58	0,54	0,50	0,53	0,54	0,72	0,51	0,07	0,56	0,12
Indice de qualité bas	0,71	0,73	0,70	0,55	0,50	0,45	0,41	0,22	0,18	0,54	0,33

L'indice d'égouttage montre une tendance à la hausse, sauf pour les scénarios 71 et 72, où il descend (figure 6.1).

Par contre, les cendres des pâtes (figure 6.2), la courbure des fibres (figure 6.3) et l'angle de cassure des fibres (figure 6.4), augmentent depuis le début des scénarios 100 % papier journal. Il faut aussi remarquer que les valeurs de courbure et d'angle de cassure des fibres sont plus élevées que celles des huit premiers scénarios.

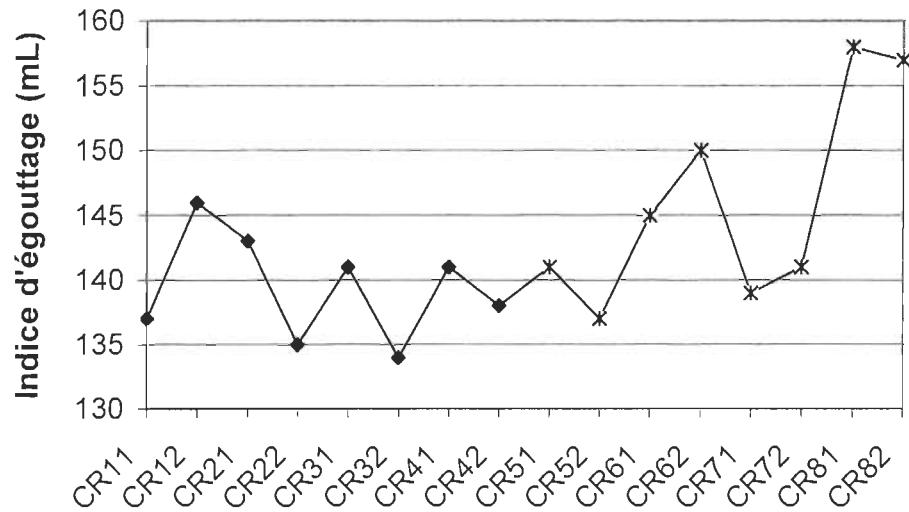


FIGURE 6.1 Variation de l'indice d'égouttage.

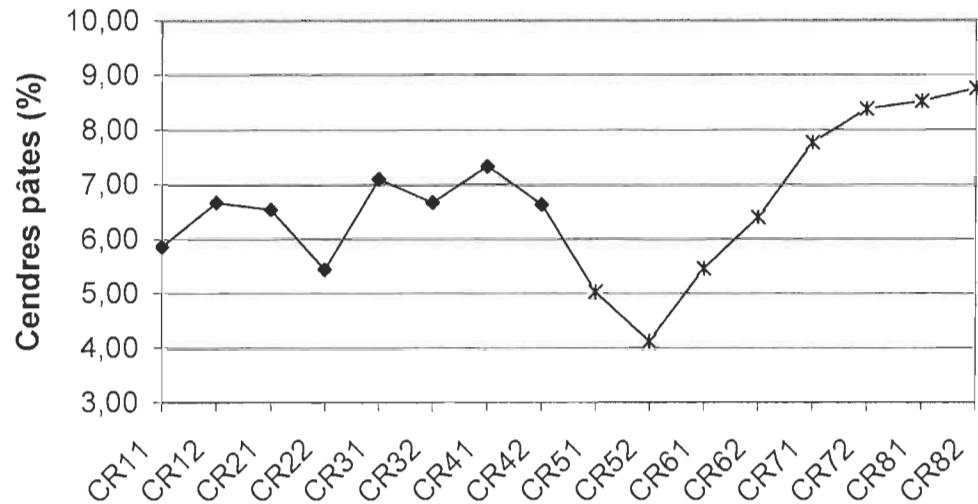


FIGURE 6.2 Variation des cendres des pâtes.

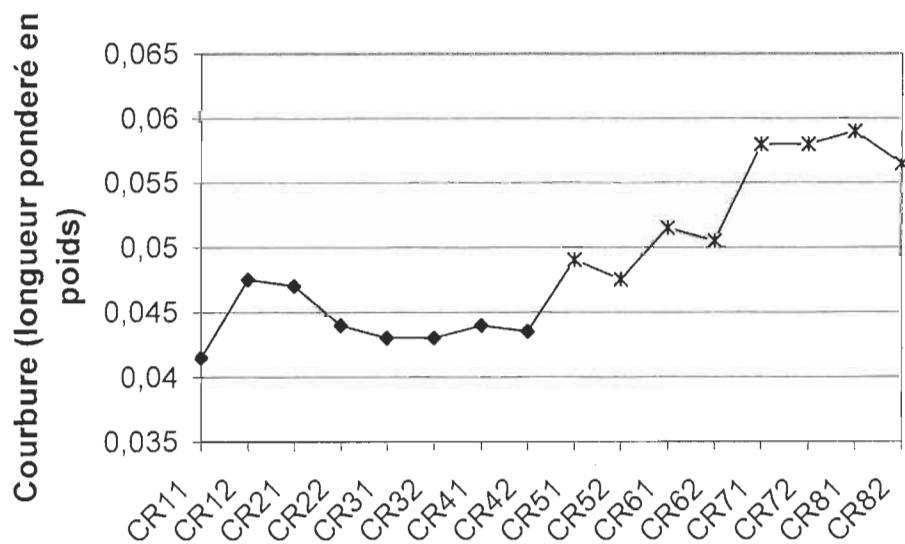


FIGURE 6.3 Variation de la courbure des fibres.

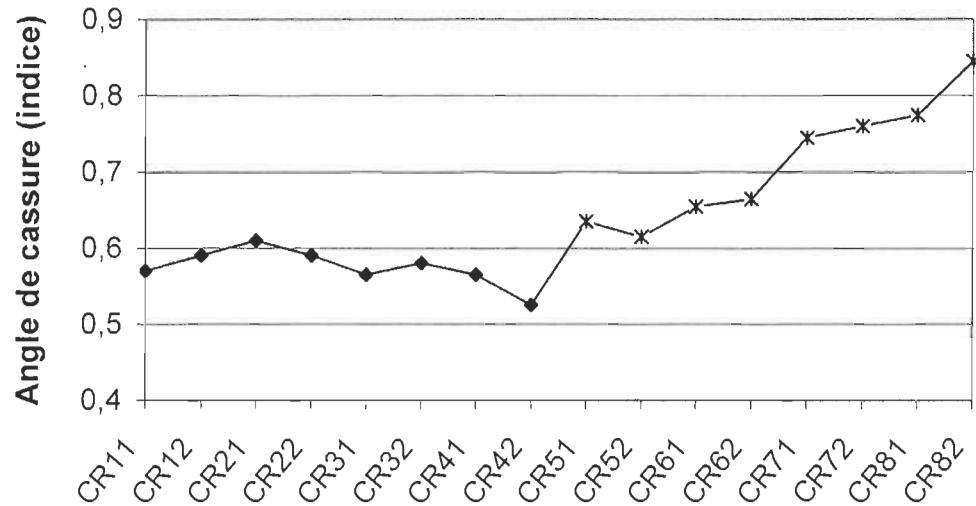


FIGURE 6.4 Variation de l'angle de cassure des fibres.

La fraction de fibres longues, fraction R14, ne varie pas beaucoup pendant les huit derniers scénarios, mais ces valeurs sont plus hautes dans ce cas (figure 6.5). Par ailleurs, c'est le contraire avec la fraction R28, qui montre une tendance descendante entre la pâte CR51 et la pâte CR82 (figure 6.6). Les fines pondérées en poids et la fraction P200 ont des valeurs basses pour les pâtes 100 % journal au début des scénarios correspondants. Mais leur pourcentage augmente graduellement et à la fin des expériences (CR82), la valeur atteinte est proche de celle des huit premières expériences (figures 6.7 et 6.8).

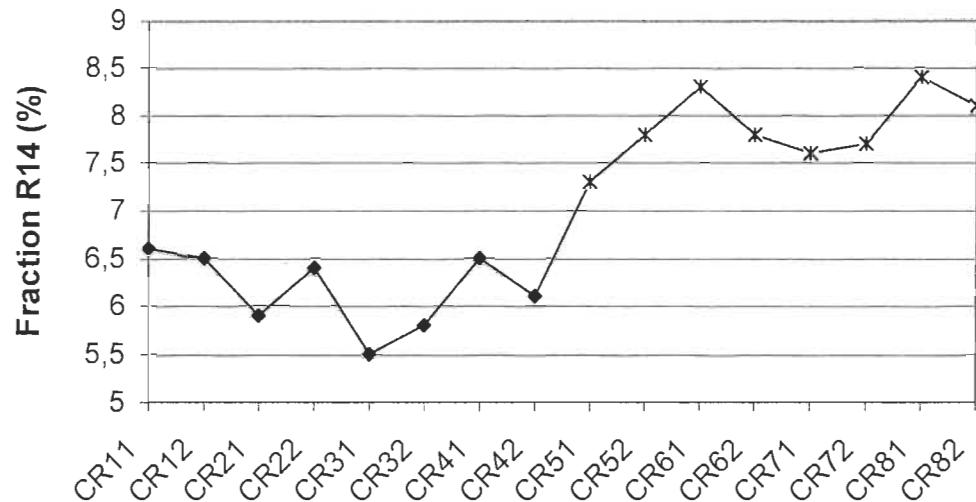


FIGURE 6.5 Variation de la fraction R14.

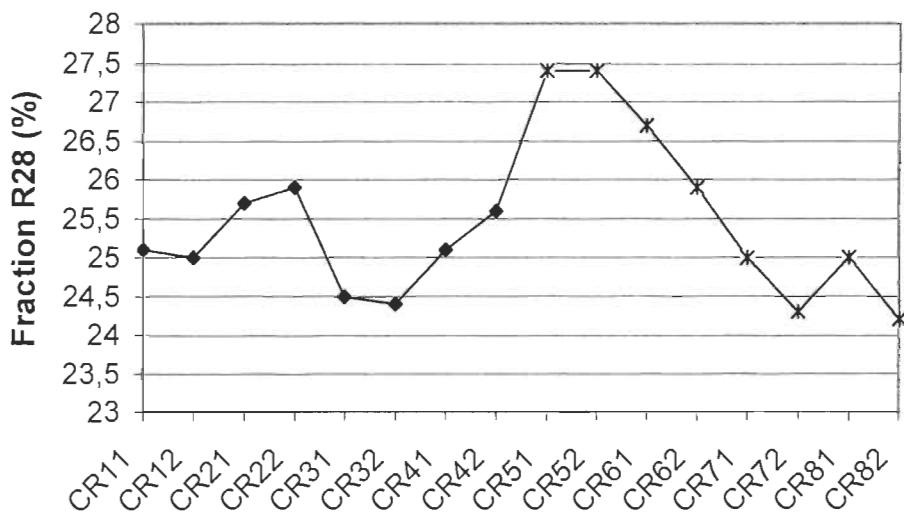


FIGURE 6.6 Variation de la fraction R28.

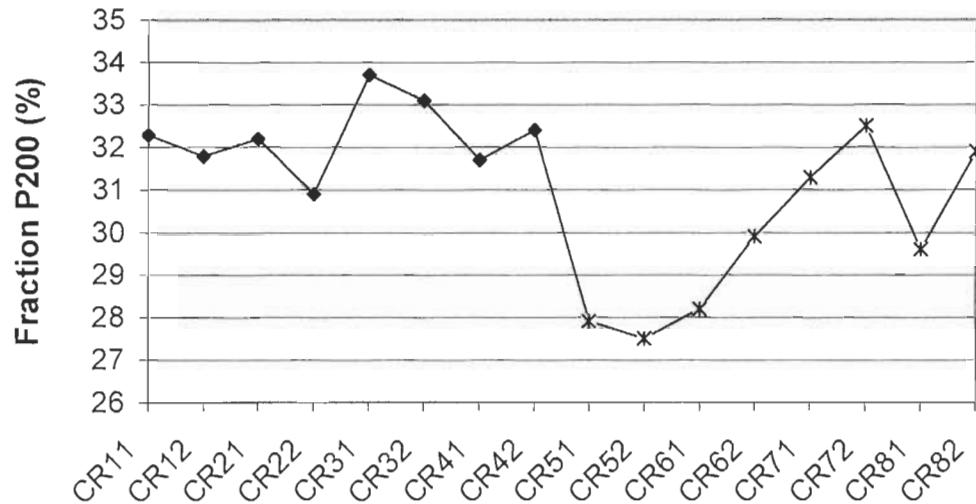


FIGURE 6.7 Variation de la fraction P200.

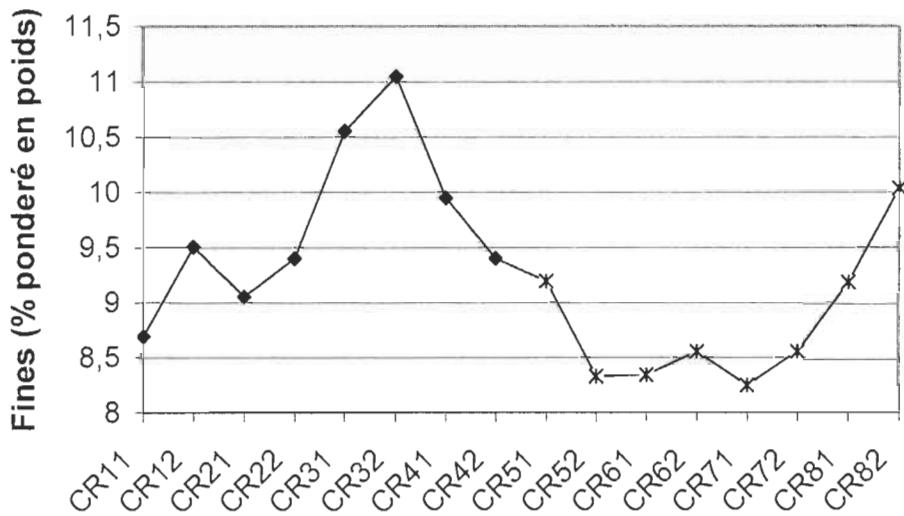


FIGURE 6.8 Variation des fines pondérées en poids.

Les variations observées dans les caractéristiques fibreuses des huit scénarios 100 % papier journal post consommation affectent certaines propriétés des feuilles. L'absorption d'énergie en tension (TEA) et la résistance à la compression en anneau augmentent, probablement dus à une meilleure consolidation de la feuille (figures 6.9 et 6.10).

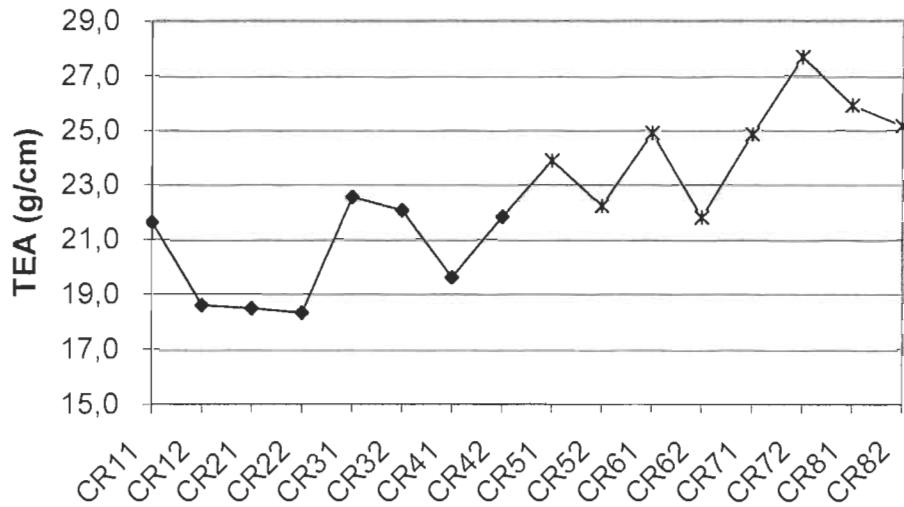


FIGURE 6.9 Variation du TEA.

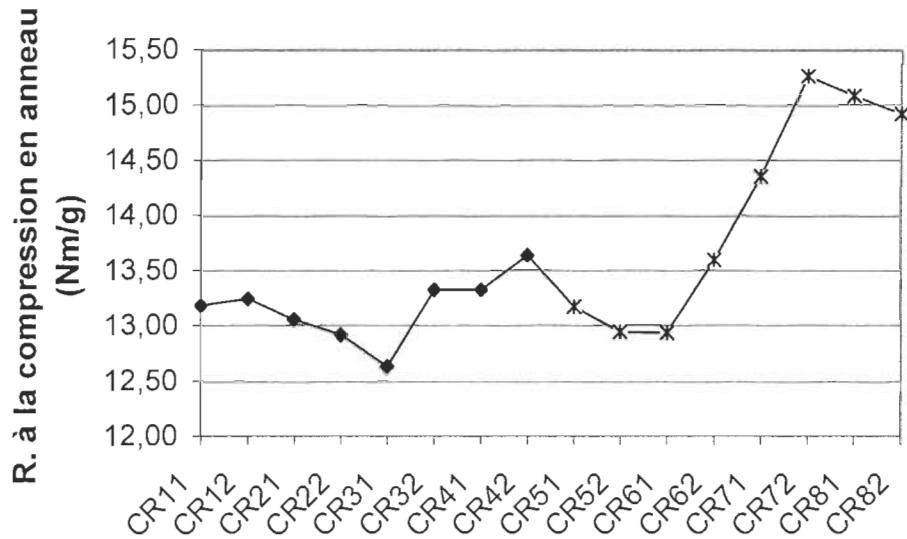


FIGURE 6.10 Variation de la résistance à la compression en anneau.

Par contre, le coefficient de diffusion de la lumière et le volume spécifique des feuilles standard et des feuilles de 3 grammes diminuent (figures 6.11 à 6.13). Cette diminution peut être reliée à l'augmentation dans le contenu en cendres, observée pendant les huit derniers scénarios. La diminution observée dans la rigidité, figure 6.14, est plutôt associée à la diminution de la fraction R28.

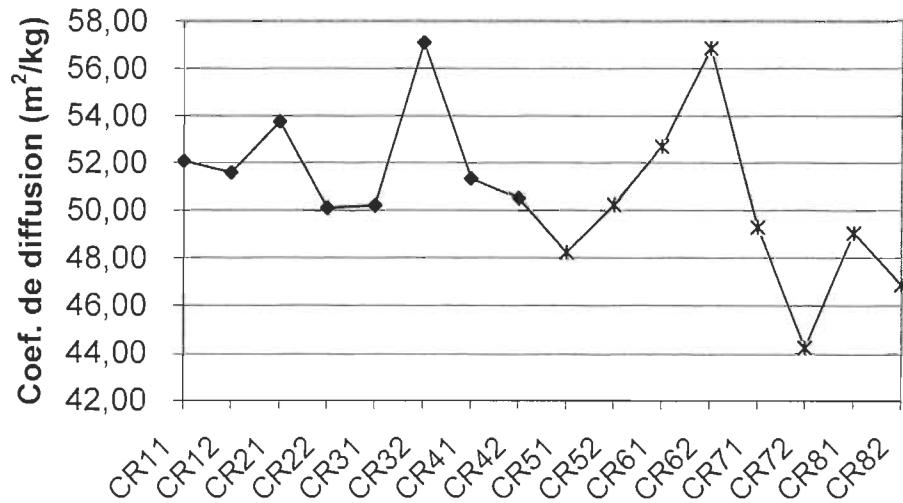


FIGURE 6.11 Variation du coefficient de diffusion de la lumière.

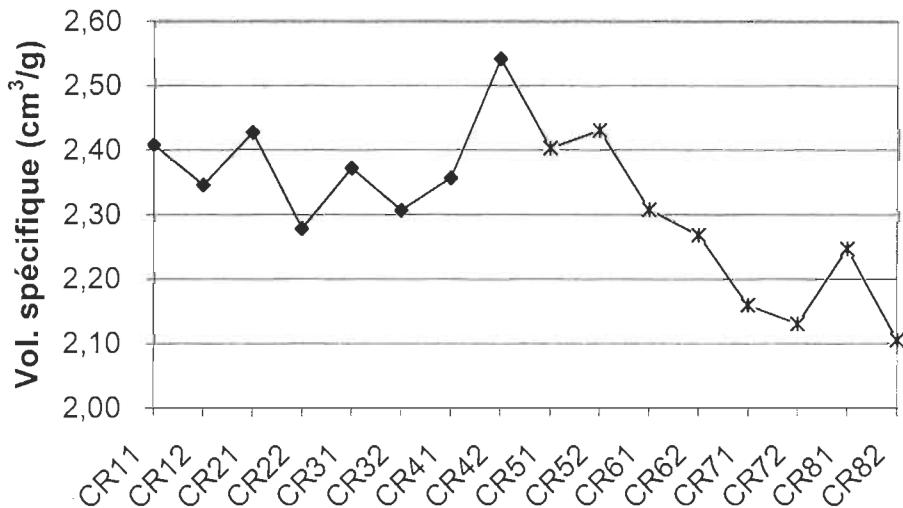


FIGURE 6.12 Variation du volume spécifique des feuilles standards.

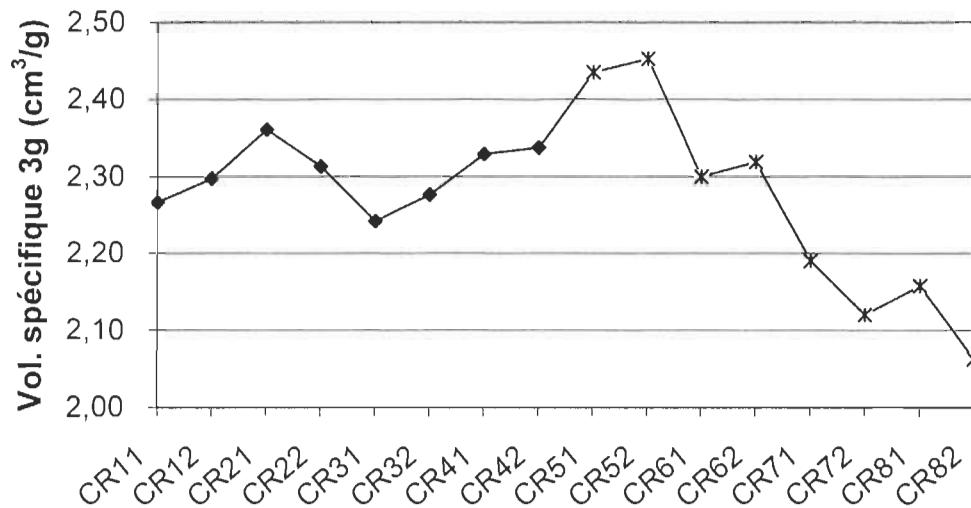


FIGURE 6.13 Variation du volume spécifique des feuilles épaisses.

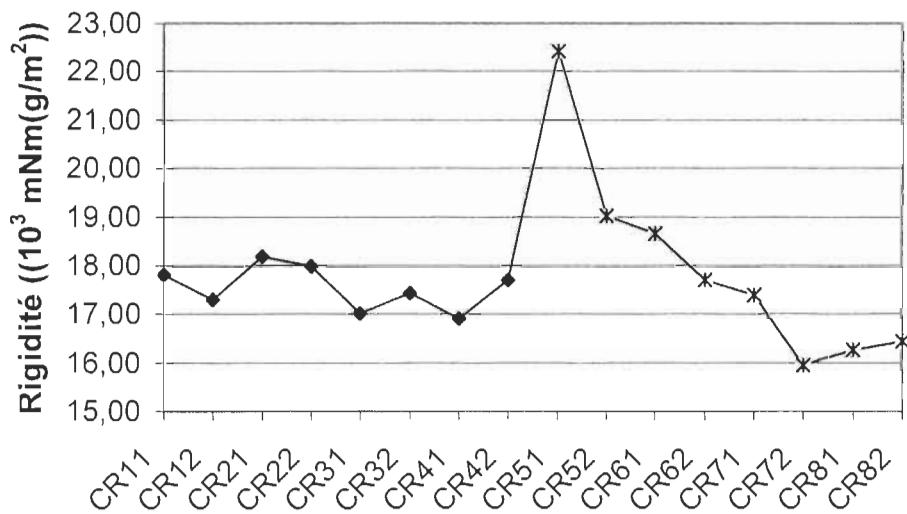


FIGURE 6.14 Variation de la rigidité.

En ce qui touche la composition fibreuse des pâtes entrant au procédé, elle a varié tout au long des 16 scénarios. Pendant les scénarios qui correspondent au mélange « papier journal post consommation/bottin », la quantité de fibres de pâte chimique de feuillus reste basse, et les quantités de pâte chimique de résineux et de pâte mécanique se balancent entre elles (figure 6.15 et tableau C1 annexe C). Cependant, au cours des scénarios 100 % papier journal, on observe que le contenu en pâte chimique de feuillus a tendance à

augmenter, en dépit du contenu en pâte mécanique qui descend tout au long des huit scénarios. Il semble que les variations de la pâte chimique de résineux et de la pâte mécanique pendant les huit premiers scénarios s'équilibreront présentant ainsi peu d'effets visibles sur les propriétés de la pâte. Pourtant, les tendances observées pendant les derniers scénarios, CR51 à CR82, et le fait que le contenu en pâte mécanique est plus bas et le contenu en pâte chimique de feuillus est plus haut qu'au début des opérations, semblent affecter les propriétés papetières.

Dans l'observation microscopique des pâtes, nous avons observé que les pâtes 100 % papier journal, et surtout les pâtes CR71, CR72, CR81 et CR82, présentaient des cellules de parenchyme (p) et des impuretés (i) en grand nombre (figure 6.16). Ces caractéristiques pourraient être les responsables du comportement différent et du contenu élevé en cendres de ces pâtes.

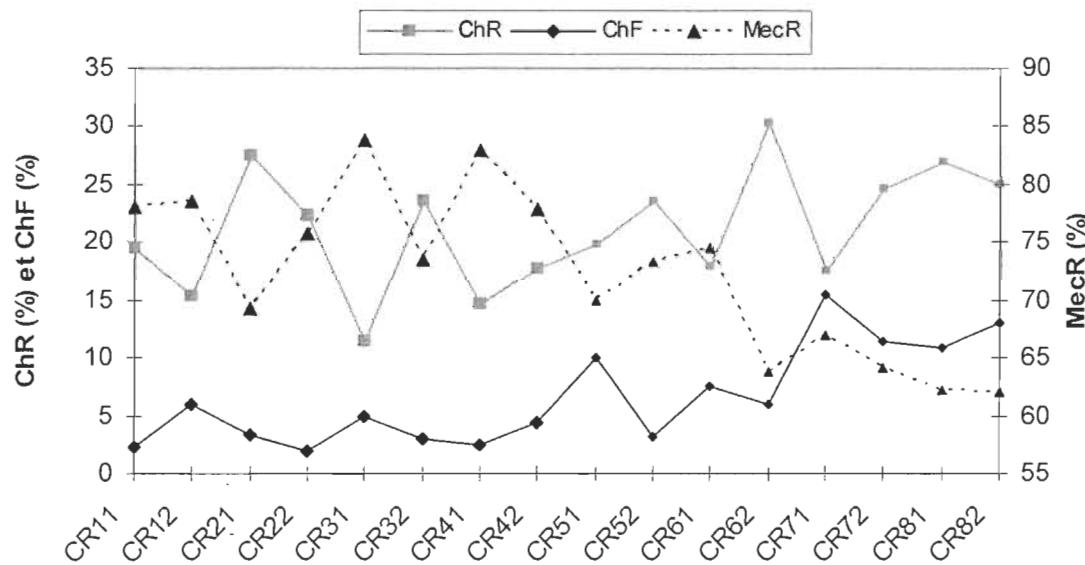


FIGURE 6.15 Variation de la composition fibreuse.

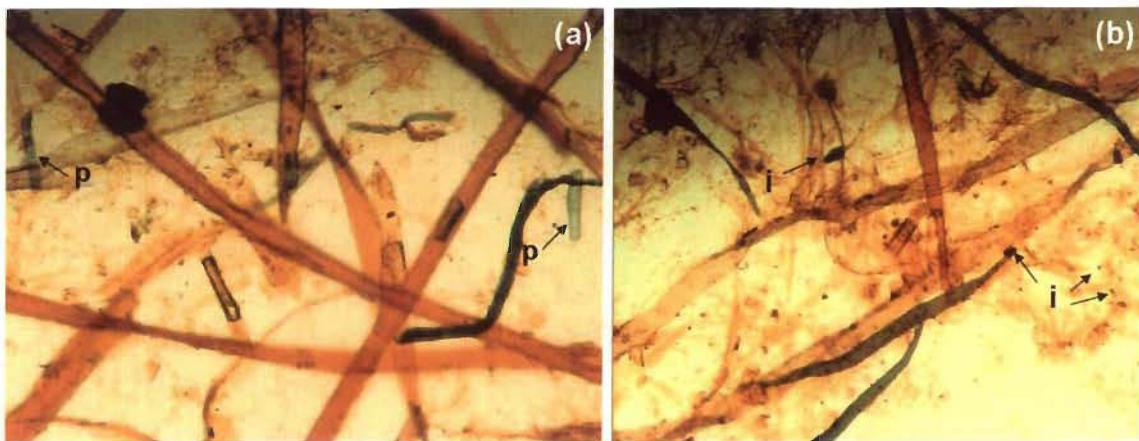


FIGURE 6.16 Microphotographies des pâtes (a) CR81 et (b) CR82.

Toutes ces variations dans la matière première se reflètent dans l'évolution des indices de qualité définis précédemment. À la figure 6.17, nous pouvons apercevoir que l'indice de qualité haute (InH) varie fondamentalement avec la proportion de papier journal (mélange 50/50 ou 100 %), mais que l'indice de qualité basse (InB) varie continuellement. Nous avons défini précédemment que plus les valeurs des indices haut et bas sont élevées, meilleure est la pâte. Ainsi, nous pouvons entrevoir que la pâte provenant de 100 % papier journal présente une qualité supérieure à la pâte mélange en ce qui touche aux propriétés associées à l'indice de qualité haut. Cependant, l'indice de qualité bas varie continuellement : d'une façon erratique pour la pâte mélangée, et en diminution progressive et importante pour la pâte 100 % journal. Ces variations s'accordent avec les variations observées pour les propriétés qui définissent l'indice de qualité bas

Si nous observons la composition des différentes pâtes (figure 6.15), la variation de l'indice de qualité haut coïncide avec la variation de la quantité de pâte chimique de feuillus. Il semble que l'augmentation de ce type de pâte est favorable à une augmentation de l'indice de qualité haut. De même, la diminution de l'indice de qualité bas observée pour la pâte 100 % journal pourrait être reliée à la diminution de leur contenu en pâte mécanique (figure 6.15). Mais dans ce cas, elle pourrait être reliée aussi au contenu en charges,

étant donné que les cendres des pâtes présentent une tendance en augmentation pour cette pâte (figure 6.2).

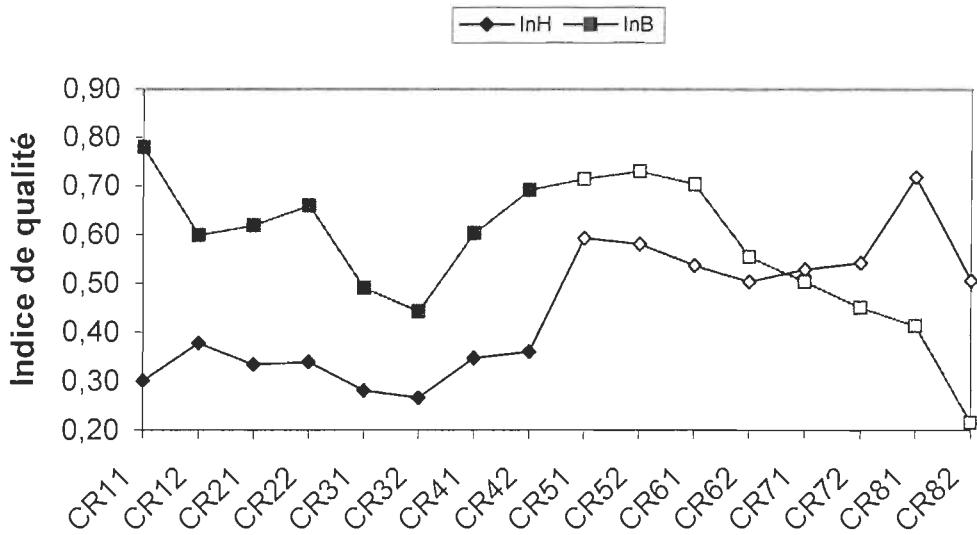


FIGURE 6.17 Variation de l'indice de qualité

6.3.2. Essai factoriel – Méthode PLS

Les variations observées dans la matière première nous empêchent de relier les propriétés en étude directement aux variables du plan expérimental. Par exemple, la diminution dans le pourcentage de la fraction P200 des scénarios 81 et 82 apparaîtrait comme due à la présence de floculant, résultat illogique en tenant en compte de la fonction d'un floculant. Cette variation provenait de la modification de la qualité entrant au système, comme on a pu observer à la figure 6.7.

Ainsi, la définition des indices de qualité de la pâte entrant au système tels que décrit au point 6.2.2.1 et la sélection de certaines caractéristiques fibreuses, de la pâte et des caissettes, nous a permis d'étudier 22 variables indépendantes et 27 variables dépendantes avec la méthode PLS. Dans le tableau 6.4 figure une liste des propriétés mesurées, ainsi que la nomenclature utilisée dans le modèle PLS. Les résultats figurent dans l'annexe C, tableaux C.2 à C.5.

Une première analyse PLS fut réalisée en utilisant la totalité des scénarios dans le modèle. Ce modèle fut rejeté car la distribution des scénarios dans le diagramme de pointage nous démontrait que les propriétés étaient définies par deux populations différentes, une pour chaque type de matière première, et conduisait à des résultats erronés ou tout au moins difficiles à interpréter lorsque les deux types de matières premières se comportent différemment. Dans l'annexe C, on peut observer le diagramme de pointage du modèle rejeté.

Ainsi, l'étude des variables fut réalisée séparément sur les scénarios qui correspondaient aux deux types de matières premières. Dans le tableau 6.5, figurent les valeurs des coefficients de corrélation et de prédiction obtenues pour les deux modèles, valeurs cumulées et pour chaque composante, ainsi que les équations de normalisation de la distribution de certaines variables. Toutes les variables étudiées ont été conservées dans le modèle, même si leur valeur de prédiction finale était basse ou négative, afin d'évaluer leur importance dans le système en étude. Les valeurs du poids des variables pour chaque composante sont montrées à l'annexe C, aux tableaux C.6 et C.7. Les tableaux ont été organisés en ordre décroissant, de façon que les poids des variables plus importantes soient aux bouts supérieurs et inférieurs de chaque colonne. Les variables indépendantes sont en caractères gras, et les variables les plus influentes pour chaque composante sont en gris.

TABLEAU 6.4 Variables mesurées et nomenclature utilisée

Variables X (symbole ▲)		Variables Y (symbole ●)	
Floculant (g/tonne)	FLOC	Volume spécifique : feuilles 1,2 g (cm ³ /g)	vs
Consistance (%)	CONSIST	Volume spécifique : feuilles 3 g (cm ³ /g)	vs3
Indice d'égouttage (mL)	égoutt	Indice d'éclatement (kPa m ² /g)	éclat
Fines pondérées en poids (%)	fines	Indice de déchirure (mN m ² /g)	déch
Longueur de fibres pondérée en poids (mm)	lf	Indice de traction (Nm/g)	trac
Courbure, longueur pondérée en poids (mm)	courb	Absorption d'énergie à la tension (g/cm)	TEA
Ind. de l'angle de cassure transformé	angle	Ind. d'éclatement feuilles 3 g (kPa m ² /g)	éclat3
Fraction R14 (%)	R14	Rigidité Taber (10 ³ mNm ³ /g)	rigid
Fraction R28 (%)	R28	Résist. à la compress. en anneau (Nm/g)	anneau
Fraction R48 (%)	R48	Résistance à la compress. STFI (Nm/g)	STFI
Fraction R100 (%)	R100	R. à la compress. caissettes usine (kg/g)	MU/g
Fraction R200 (%)	R200	R. à la compress. caisse usine (kg g/cm)	MU/vs
Fraction P200 (%)	P200	R. à la compress. caissettes lab. (kg/g)	ML/g
Temps de drainage : feuill. 1,2 g (min * m ² /g)	drain	R. à la compress. caissett. lab. (kg g/cm)	ML/vs
Temps de drainage : feuilles 3 g (min * m ² /g)	drain3	Solides dissous totales usine(mg/mL)	SD_U
Poids caissette usine (g)	pU	Matières en suspension totales usine(mg/mL)	MES_U
Poids caissette laboratoire (g)	pL	Solides dissous tot. laboratoire (mg/mL)	SD_L
Indice de haute qualité	InH	Matières en susp. tot. laboratoire (mg/mL)	MES_L
Indice de base qualité	InB	Consistance eaux blanches usine(%)	CoE_U
Pâte chimique de résineux (%)	ChR	Consistance eaux blanches laboratoire (%)	CoE_L
Pâte chimique de feuillus (%)	ChF	Cendres pâtes (%)	CeP
Total de pâte chimique (%)	ChR+ChF	Cendres caissettes usine (%)	CeM_U
		Cendres caissettes laboratoire (%)	CeM_L
		Cendres eaux blanches usine (%)	CeE_U
		Cendres eaux blanches laboratoire (%)	CeE_L
		Coefficient de diffusion (m ² /kg)	cd
		Blancheur (%)	bl

TABLEAU 6.5 Paramètres modèles PLS

Modèle : mélange 50/50

Variables normalisées :

$$SD_L = \log [(x - 1,65) / (1,98 - x)]$$

	R ² (%)	Q ² (%)	R ² _{cumulé} (%)	Q ² _{cumulé} (%)
Première composante	46,5	29,4		
Deuxième composante	17,0	8,2		
Troisième composante	11,4	8,8		
Quatrième composante	7,32	-0,3		
Cinquième composante	6,25	-0,2		
Sixième composante	7,22	27,6	95,7	57,0

Modèle : pâte 100 %

Variables normalisées :

$$R14 = \log [(x - 7,89) / (10,93 - x)]$$

$$InH = \log [(x - 0,49) / (0,80 - x)]$$

	R ² (%)	Q ² (%)	R ² _{cumulé} (%)	Q ² _{cumulé} (%)
Première composante	37,6	16,3		
Deuxième composante	15,0	1,74		
Troisième composante	8,0	-1,84		
Quatrième composante	10,8	-1,71		
Cinquième composante	10,7	12,3	82,0	25,3

6.3.2.1.**Modèle mélange 50/50**

Au total, 22 variables indépendantes, à l'appui de six composantes, expliquent 95,7 % de la variabilité du système. Ce modèle nous permet d'obtenir une bonne définition des variables dépendantes après la détermination de six dimensions principales. Les deux premières composantes du modèle expliquent 63,5 % de la variabilité du système et sont les composantes les plus importantes.

Les diagrammes de charges et de pointage des six composantes sont montrés aux figures 6.18 à 6.23. La presque totalité des réponses sont très bien définies après six composantes (figure 6.24). Une analyse des composantes peut être faite de façon individuelle.

Première composante

Associée à l'action de rétention du floculant et à l'influence des différentes fractions de fibres:

- Quand le floculant augmente, les cendres, les matières en suspension et la consistance des eaux blanches diminuent. Ce comportement s'observe autant pour les eaux blanches d'usine que pour les eaux blanches de laboratoire. Cette diminution est associée à la rétention de la fraction P200 dans la pâte. L'augmentation de la charge des eaux blanches est due principalement à la fraction de fines mesurée par l'appareil FQA. En tenant en compte que la fraction P200 peut être considérée composée par des particules de taille inférieure à 0,42 mm (78), et que les fines FQA comportent des particules comprises entre 0,05 et 0,20 mm, nous pouvons dire que le floculant agit de préférence sur les particules plus petites de la fraction P200 (inférieures à 0,05 mm), tandis que les particules qui contribuent à des eaux plus chargées sont celles mesurées par l'appareil FQA (figures 6.25 à 6.29).
- Les cendres des pâtes varient dans le même sens que les fractions R48, R100 et R200. Cette variation nous indique que ce sont dans ces fractions que les charges sont concentrées. Comme on peut observer dans la figure 6.30, le contenu en cendres des quatre premiers scénarios est plutôt relié au contenu initial en cendres et le floculant ne semble pas avoir un effet important.
- Le temps de drainage des feuilles de 3 g augmente quand le contenu en cendres et les fines des pâtes augmente. En sens inverse, l'égouttage et le volume spécifique des feuilles de 3 g diminuent.
- L'augmentation de la fraction P200 favorise les liens entre fibres, qui contribueront à une augmentation du TEA, de la rigidité et des

résistances à la traction et à l'éclatement, propriétés qui sont aussi favorisées par le contenu en fibres longues (R14).

Deuxième composante

Associée au processus de formation de caissettes et à l'influence des différents types de fibres.

- La résistance des caissettes, autant d'usine que de laboratoire, exprimée en fonction de leur poids ou du rapport entre l'épaisseur et le poids, est favorisée par l'augmentation de la consistance en cuvier de tête de machine. Ainsi, la résistance est directement reliée au poids des caissettes
- Les solides dissous des eaux d'usine et de laboratoire sont généralement reliés au contenu en pâte chimique, provenant du papier bottin. Les papiers journaux ont un haut contenu en pâte mécanique, tandis que le papier de bottin téléphonique généralement contient une quantité considérable de pâte chimique de renforcement. De plus, les bottins téléphoniques peuvent contenir entre 1,3 et 3,9 % en poids de papier couché de pâte chimique blanchie provenant des couvertures et feuilles de publicité (79). En outre, les solides dissous des papiers journaux proviennent principalement des fines colloïdales, tandis que les papiers couchés présentent un contenu plus élevé de solides dissous, dérivant des fines colloïdales et des polymères synthétiques, des adhésifs, de la sauce de couchage et des encres (80). Aussi, on observe que les solides dissous de laboratoire sont plus bas que ceux d'usine (figure 6.31). Cette variation pourrait s'expliquer par l'influence de la fermeture du circuit en usine, ou par les conditions de formation des caissettes en laboratoire (contenu d'eau des caissettes après formation plus élevé, donc plus de solides dissous retenus).

- Le contenu en pâte chimique et la quantité et qualité de la pâte retenue dans la fraction R28 contribuent à certains propriétés : la résistance à la déchirure, à la compression en anneau et à la compression STFI.

Troisième composante

Associée à la qualité de la matière première et à la variation de cette qualité.

- La pâte chimique de feuillus est responsable de la courbure et de l'angle de cassure des fibres, et son contenu s'oppose au développement des indices de qualité. Elle est favorable à la résistance à la déchirure et à la résistance à l'éclatement des feuilles de 3 g et augmente le volume spécifique des feuilles standard.
- Pour sa part, des indices de qualité haut et bas élevés favorisent les résistances des caissettes d'usine, tandis que le contenu en pâte chimique de feuillus les défavorise. Les résistances des caissettes de laboratoire sont définies dans la même composante, mais l'impact des indices et de la pâte chimique de feuillus est moindre.

Quatrième composante

La quatrième composante capture la variance de la fraction R28, de la longueur de fibres, et du temps de drainage (faible valeur prédictive), donc encore ici une variation de la qualité de la matière première.

- Une augmentation de la fraction R28 et de la longueur moyenne de fibres pondérée en poids est favorable à la résistance des caissettes d'usine et à la résistance à la traction.
- Le temps de drainage des feuilles standard augmente avec le contenu en cendres des pâtes, phénomène déjà observé dans la première composante pour le drainage des feuilles de 3 g.

Cinquième composante

La cinquième composante est reliée au effet de compaction du matelas fibreux. Elle prend l'effet résiduel de la pâte chimique de feuillus, de l'indice de qualité haut et de la fraction R100 sur le volume spécifique, la résistance à l'éclatement des feuilles de 3 g et la résistance à la compression STFI.

Sixième composante

La sixième composante est associée à la consolidation de la paroi des caissettes. Elle capture l'effet des fines (FQA et fraction P200) et les différences entre les caissettes d'usine et de laboratoire.

- La résistance des feuilles de 3 g (rigidité, résistance à la compression en anneau et à la compression STFI) sont favorisées par un haut contenu en fines. Ces propriétés sont normalement favorisées par une augmentation de l'épaisseur de la feuille. La relation directe entre la fraction P200 et le volume spécifique des feuilles de 3 g établie dans la première composante, explique ce phénomène.
- Les solides dissous d'usine et de laboratoire diminuent quand la rétention de fines et de la fraction P200 dans la feuille augmente.
- La résistance des caissettes d'usine (rapport charge/poids) augmente avec le contenu en fines, tandis que la résistance des caissettes de laboratoire (rapport charge*épaisseur/poids) se comportent en sens inverse. Ce résultat nous indique que les différences entre le comportement des caissettes d'usine et de laboratoire sont probablement dues à une différence dans la structure de la paroi. Pendant la formation des caissettes en usine, une première couche de fibres agit comme tamis et retient mieux les fines. Ces fines n'apportent pas au poids, mais contribuent à consolider la paroi. En laboratoire, la formation est plus lente et à un vide plus bas. La structure initiale de la paroi est plus

ouverte et retient moins les fines, de façon que, même si les fines augmentent, elles ne contribuent pas à la consolidation de la paroi. Dans les caissettes d'usine les fines améliorent les liens entre fibres et solidifient la paroi, tandis que dans les caissettes de laboratoire les fines accomplissent une fonction de remplissage et ne contribuent pas à la consolidation de la structure.

•

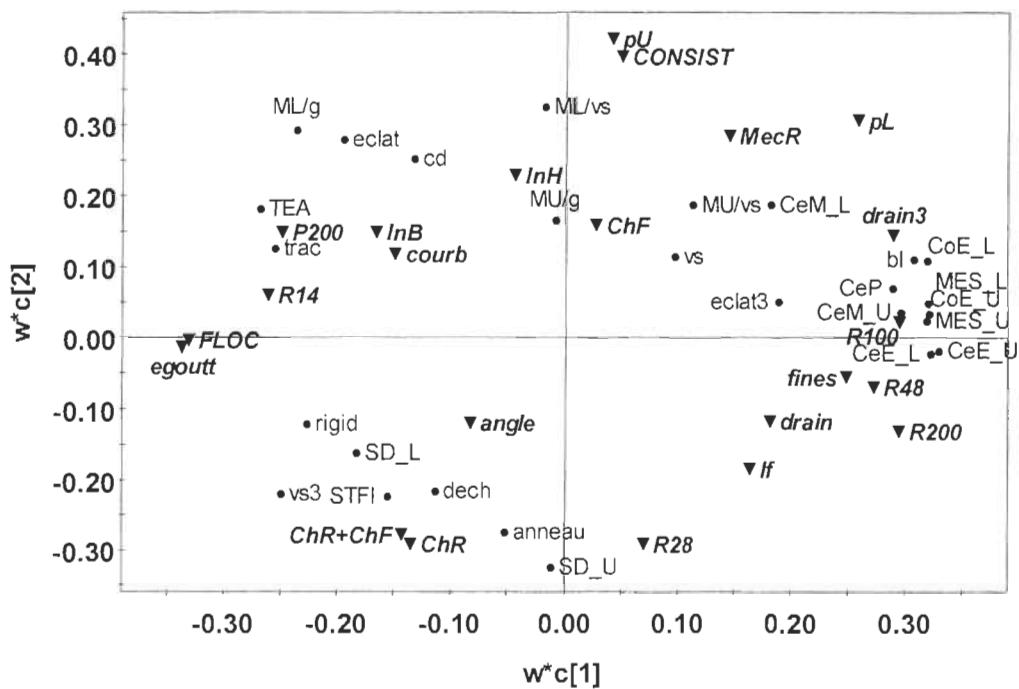


FIGURE 6.18 Modèle mélange 50/50 - Diagramme de charges des composantes 1 et 2.

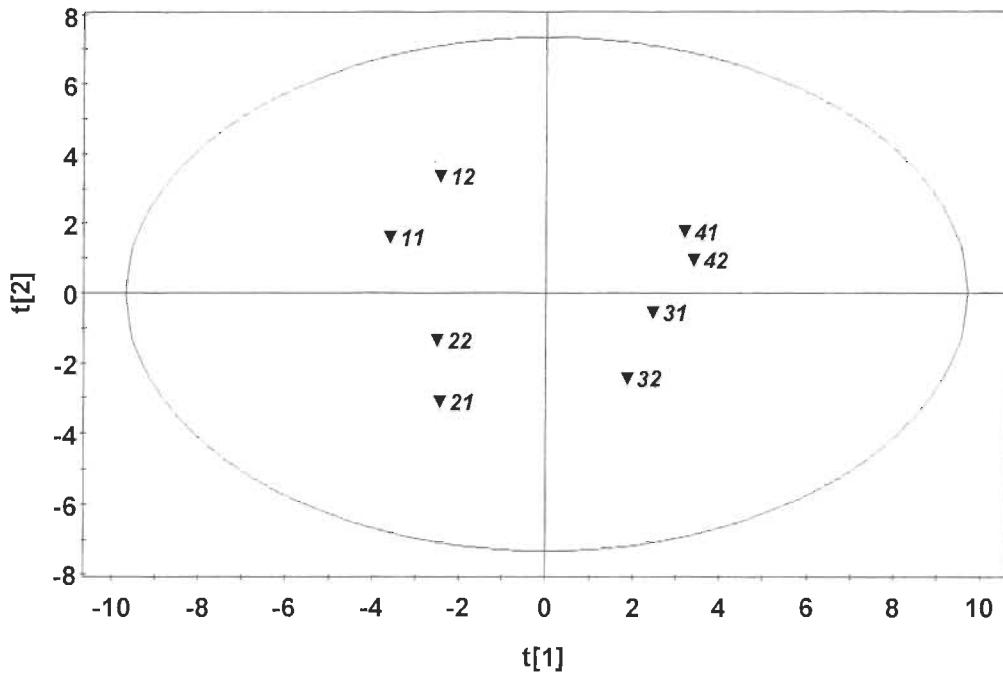


FIGURE 6.19 Modèle mélange 50/50 - Diagramme de pointage composantes 1 et 2.

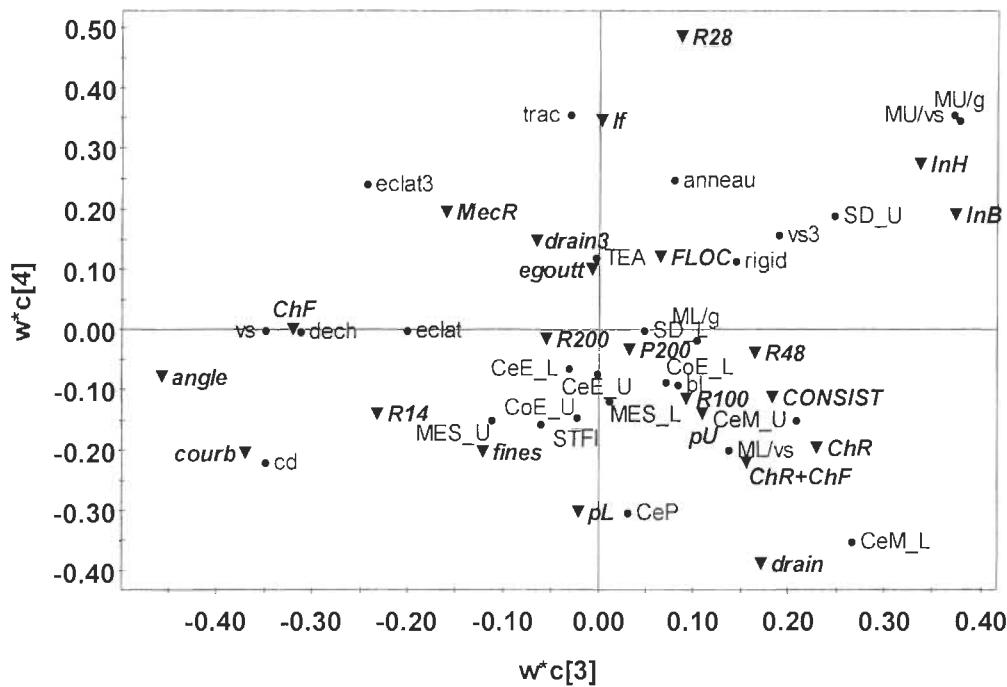


FIGURE 6.20 Modèle mélange 50/50 - Diagramme de charges composantes 3 et 4.

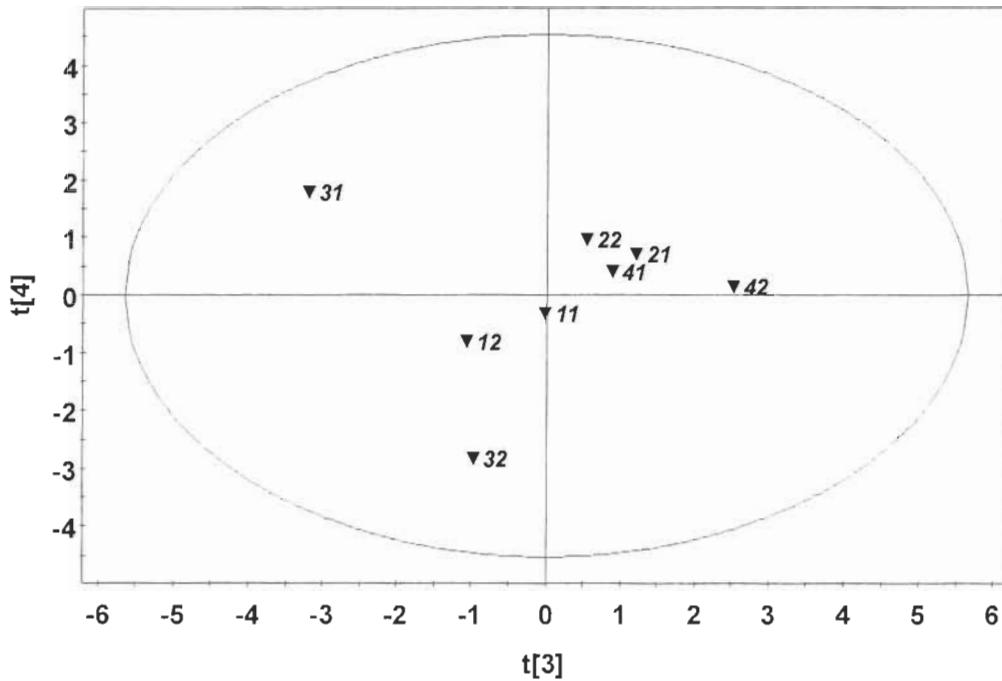


FIGURE 6.21 Modèle mélange 50/50 - Diagramme de pointage composantes 3 et 4.

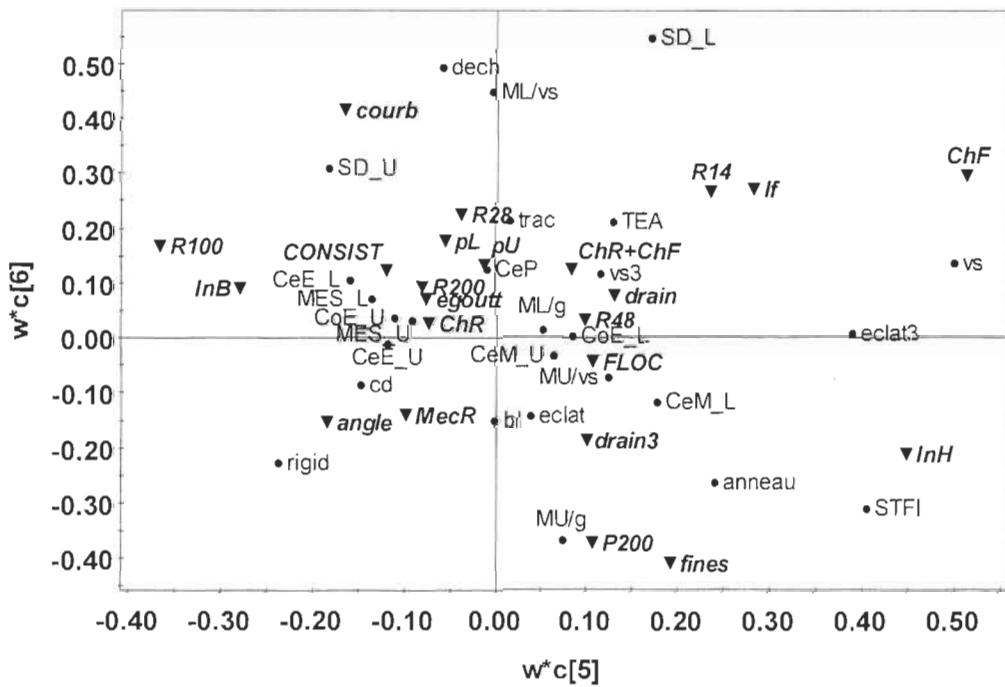


FIGURE 6.22 Modèle mélange 50/50 - Diagramme de charges composantes 5 et 6.

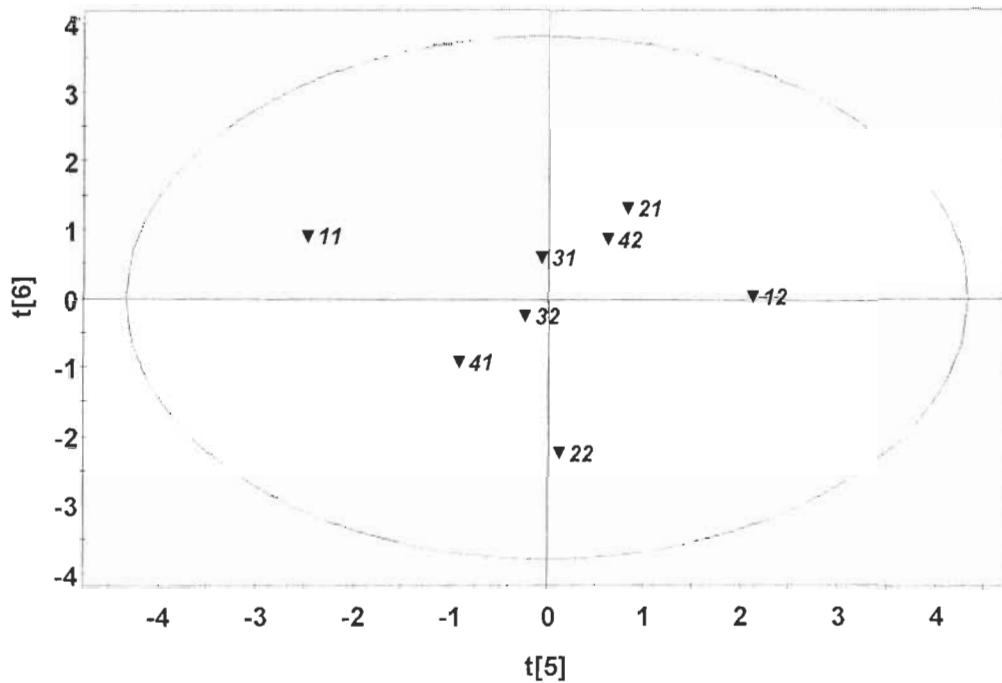


FIGURE 6.23 Modèle mélange 50/50 - Diagramme de pointage composantes 5 et 6.

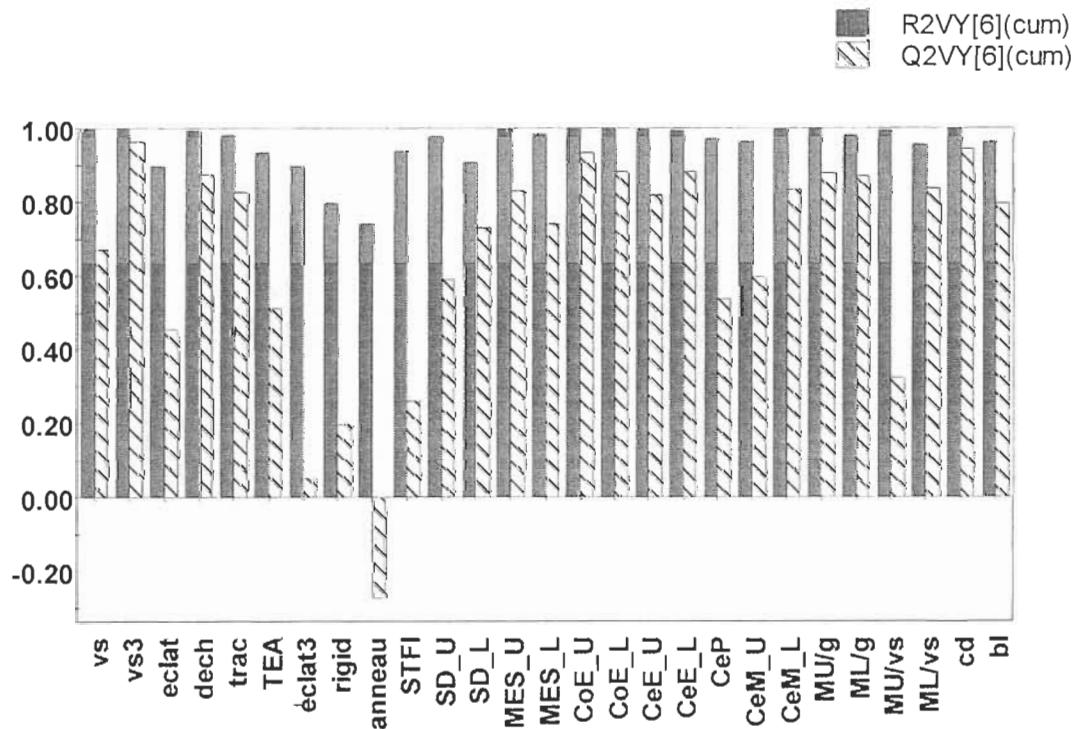


FIGURE 6.24 Modèle mélange 50/50 – Coefficients de corrélation et de prédiction après six composantes.

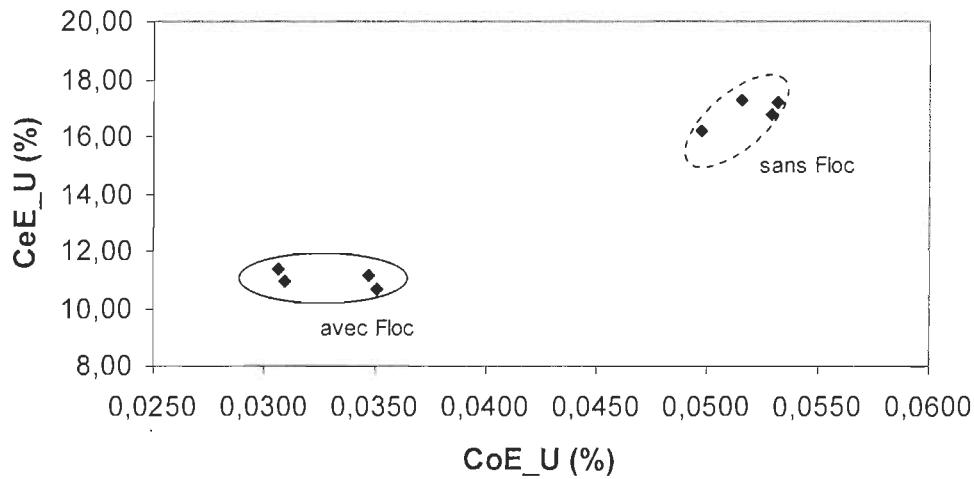


FIGURE 6.25 Modèle mélange 50/50 – Variation de la consistance et des cendres des eaux blanches avec le floculant.

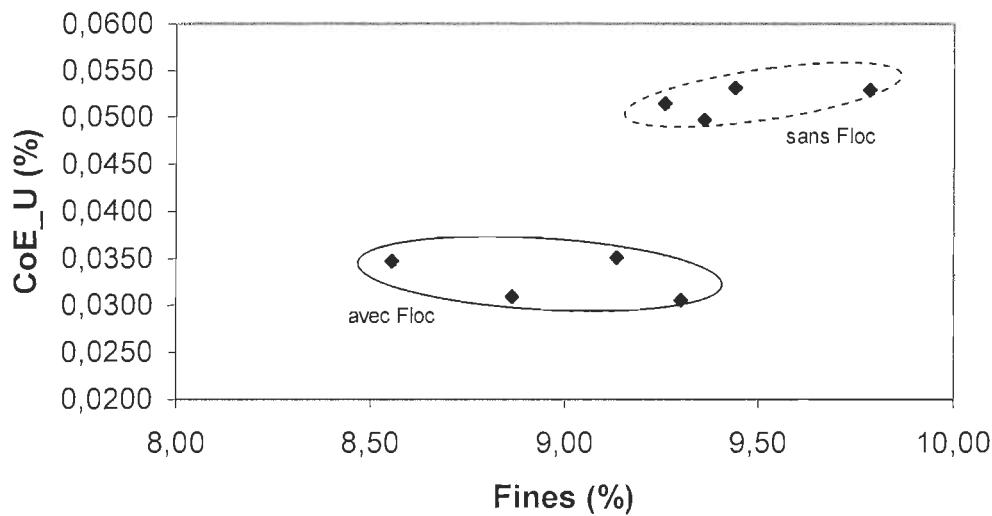


FIGURE 6.26 Modèle mélange 50/50 – Variation du contenu en fines de la pâte et de la consistance des eaux blanches avec le floculant.

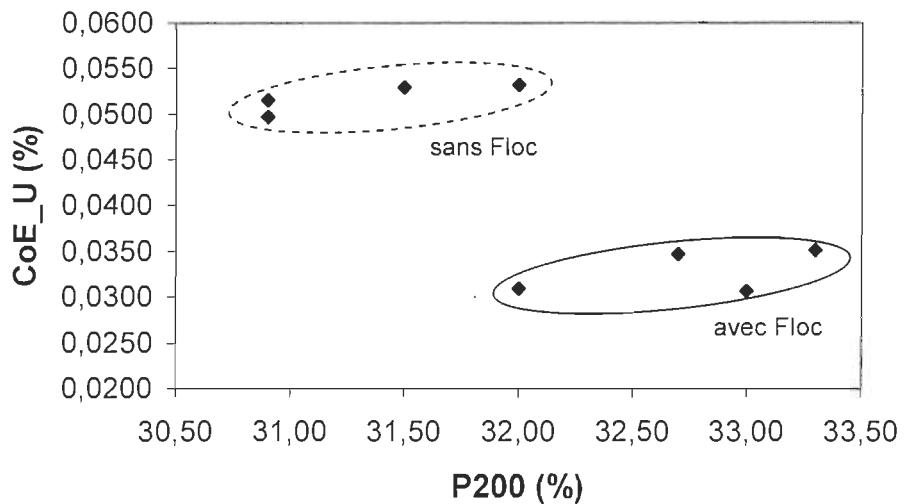


FIGURE 6.27 Modèle mélange 50/50 – Variation de la fraction P200 de la pâte et de la consistance des eaux blanches avec le floculant.

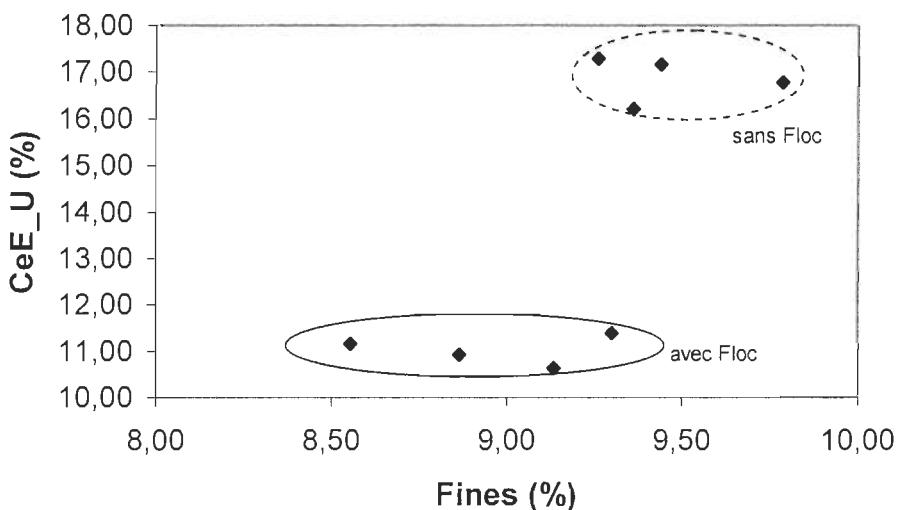


FIGURE 6.28 Modèle mélange 50/50 – Variation du contenu en fines de la pâte et des cendres des eaux blanches avec le floculant.

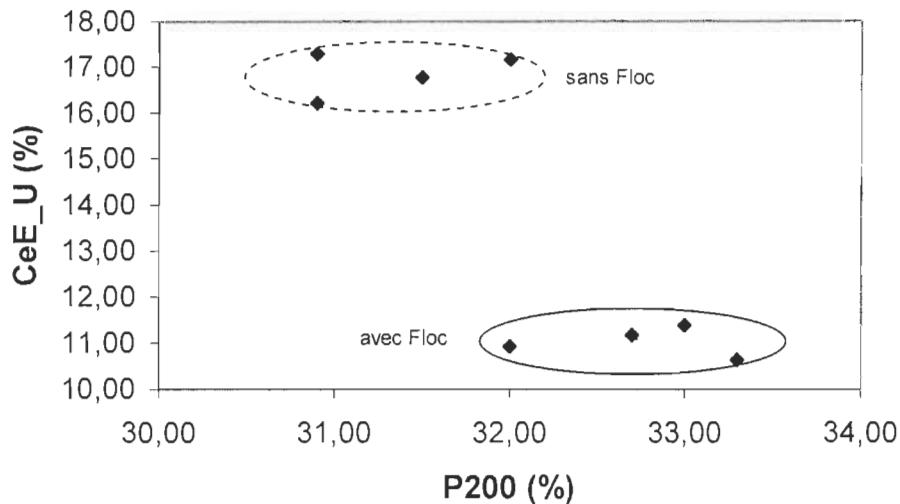


FIGURE 6.29 Modèle mélange 50/50 – Variation de la fraction P200 de la pâte et des cendres des eaux blanches avec le floculant.

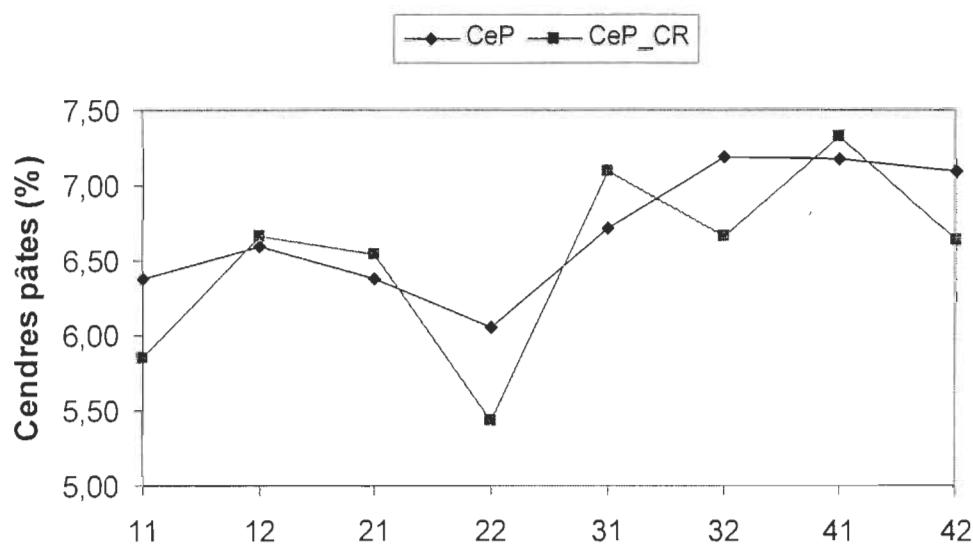


FIGURE 6.30 Modèle mélange 50/50 – Cendres des pâtes comparé avec les cendres des pâtes de cuvier de réserve (CeP_CR).

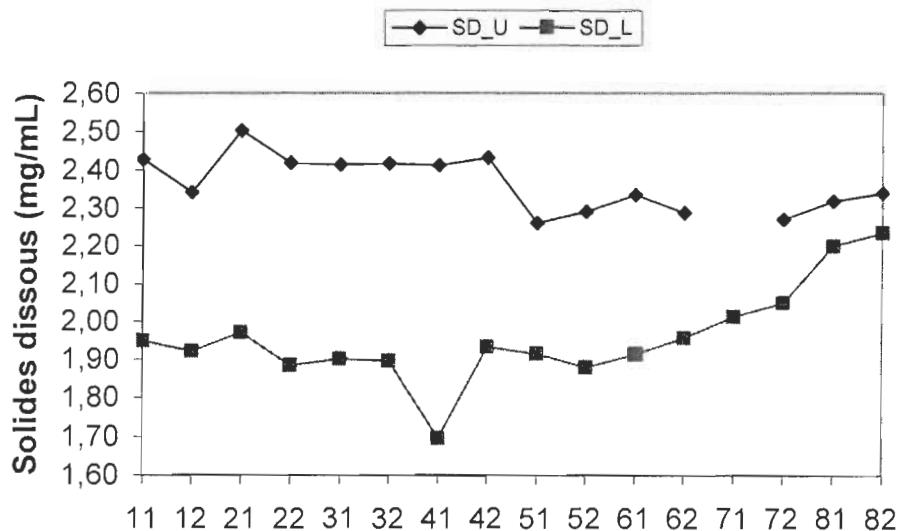


FIGURE 6.31 Solides dissous des eaux blanches d'usine et de laboratoire.

6.3.2.2. Modèle pâte 100 %

L'analyse PLS des scénarios de pâte 100 % papier journal comme matière première nous donne cinq composantes qui expliquent 82 % de la variabilité du système, tandis que le pouvoir prédictif de ce modèle est bas (25,3 %) comparé avec celui du modèle précédent (57,0 %).

Les diagrammes de charge et de pointage des cinq composantes sont montrés aux figures 6.32 à 6.37 et les valeurs de corrélation et de prédiction pour chaque variable sont indiquées à la figure 6.38.

Première composante

Associée à l'action du floculant et à l'influence de l'indice de qualité bas

- Par l'action du floculant, l'indice d'égouttage augmente et le temps de drainage des feuilles de 3 g diminue, comportement déjà observé pour la pâte mélangée.

- L'indice de qualité bas est fortement influencé par certaines caractéristiques qui le définissent. Il est favorisé (il augmente) à mesure que les fines, la fraction P200, l'angle de cassure et la courbure de fibre diminuent. En même temps, il augmente quand le pourcentage de pâte mécanique augmente, et diminue quand le contenu en pâte chimique augmente. Dans ce dernier cas, l'impact de la pâte chimique de feuillus est plus grand. La pâte chimique de feuillus, de fibres rigides, peut être responsable des fibres courbées et tournées comme on observait dans le modèle précédent (troisième composante). Aussi, les cellules de parenchyme observées au microscope en plus grande quantité (scénarios 81 et 82, figure 6.16) pourraient contribuer à l'augmentation de la fraction P200.
- La pâte mécanique est responsable d'un contenu haut des fractions R28, R48 et R100. Ce résultat corrobore l'évolution observée pour ces fractions, qui s'accorde avec la tendance remarquée dans le contenu en pâte mécanique (figures 6.6 et 6.15 et tableau C2 annexe C). Ces fractions sont responsables d'une augmentation du volume spécifique des feuilles, du coefficient de diffusion et du temps de drainage des feuilles de 3 g.
- La consistance et les matières en suspension des eaux blanches d'usine diminuent avec l'ajout du floculant, responsable d'une meilleure rétention de la fraction P200. Cependant, le floculant (ou la dose utilisée) est moins efficace que dans le cas de la pâte en mélange, comme le démontre l'écart entre les valeurs de ces propriétés avec et sans floculant (figures 6.39 et 6.40).
- Par contre, la consistance et les matières en suspension des eaux blanches de laboratoire sont plus élevées dans les scénarios avec floculant que dans les scénarios sans floculant (figures 6.39 et 6.40). Ici deux hypothèses sont possibles : le floculant perd son pouvoir avec ce

type de pâte et/ou les conditions d'agitation de la pâte en laboratoire ne permettent pas de maintenir les flocons. En tout temps, les valeurs de laboratoire sont plus basses que celles d'usine, ce qui nous indique l'impact de la fermeture des circuits.

- Même si les cendres des pâtes et des eaux varient dans le même sens que le floculant, il est difficile de discerner l'effet du floculant, car le contenu initial des cendres des pâtes (cendres des pâtes de cuvier de réserve) augmente pour les scénarios avec floculant. Si nous observons les cendres mesurées sur les feuilles (figure 6.41), le floculant a un effet de rétention de cendres dans la pâte dans les deux derniers scénarios. Mais cette rétention n'est pas suffisante pour diminuer assez les cendres et les solides dissous des eaux blanches (figures 6.31 et 6.42). Ainsi, nous pouvons dire que le floculant (ou sa dose) est adéquat pour retenir les matières organiques, mais inadéquat pour retenir les matières inorganiques et colloïdales qui composent ce type de pâte. Par conséquent, quand la qualité du papier compte plus de charges, celles-ci ne sont pas retenues adéquatement et augmentent les cendres des eaux blanches.
- De plus, les cendres des eaux de laboratoire sont plus élevées que les cendres des eaux d'usine (figure 6.42). C'est le résultat d'une rétention plus basse de cendres dans les caissettes de laboratoire comparée avec celles d'usine (figure 6.43).
- Le contenu supérieur de cendres des pâtes est accompagné d'une augmentation de pâte chimique. Cette tendance nous indique que la qualité de papier recyclé nommé « papier journal » a changé pendant les essais, elle est moins homogène et comporte d'autres types de papiers, par exemple, papiers magazines et cartons multicouche.

Deuxième composante

Relié au processus de formation de caissettes.

- Pour ce type de pâte, seulement la résistance des caissettes (usine et laboratoire) exprimée en rapport à leur épaisseur et leur poids est fortement influencée par la consistance de cuvier de tête de machine et le poids des caissettes. La résistance des caissettes de laboratoire en fonction de leur poids (ML/g) est aussi légèrement influencée par ces variables, mais la résistance correspondante en usine (MU/g) ne montre pas de relation (figures 6.44 et 6.45).
- Cette composante montre aussi l'influence positive d'une augmentation de la fraction R200 sur la résistance des caissettes. En outre, la résistance à l'éclatement des feuilles de 3 g s'oppose à cette variation. La relation inverse entre la résistance des caissettes et l'éclatement a déjà été observée pour la pâte en mélange (troisième composante).
- Les cendres des eaux blanches de laboratoire augmentent quand la consistance augmente. Les cendres des eaux blanches d'usine sont moins influencées et sont faiblement définies sur cette composante.

Troisième composante

La troisième composante capture l'effet de la fraction R14 sur la rigidité, la résistance à la traction et la résistance à l'éclatement. La fraction de fibres longues, qui favorise ces résistances, provient de l'addition de pâtes chimiques.

Quatrième et cinquième composantes

Ces composantes capturent l'effet de la qualité de la matière première. La quatrième composante a un coefficient de prédiction bas (Q^2 négative). Par contre, la cinquième composante est significative. Dans la figure 6.36, nous

observons que les propriétés qui n'ont pas d'influence sur ces composantes sont plus proches du centre du diagramme.

- La longueur de fibres moyenne pondérée ne varie pas beaucoup au long des scénarios, mais la faible augmentation semble favoriser les résistances à l'éclatement (feuilles standard et de 3 g), à la compression en anneau, à la déchirure et au TEA. Ces propriétés augmentent même si l'indice de qualité haut diminue. Cette relation inverse avec l'indice de qualité haut provient sûrement de l'inclusion des cendres des pâtes dans la définition de l'indice de qualité haut. L'IndH augmente dans les derniers scénarios, et cette augmentation est en partie due à l'augmentation des cendres dans la pâte. Cette augmentation est défavorable à la résistance à l'éclatement, au TEA et à la résistance à la compression en anneau, mais favorable à la rigidité et à la résistance des caissettes d'usine (MU/g). Cependant, l'augmentation ne favorise pas la résistance des caissettes de laboratoire (ML/g), probablement due à une perte de charges supérieure pendant leur formation.
- Quand l'indice de qualité haut augmente, la déchirure augmente mais le TEA et la résistance à la traction diminuent. Ce comportement nous indique que l'InH calculé est plutôt influencé par les propriétés qui dépendent de la longueur de fibres moyenne que par celles qui dépendent du degré de liaison entre fibres.
- En même temps, comme dans la définition de l'InH nous avions inclus les cendres des pâtes, une augmentation de l'InH est défavorable aux solides dissous et aux cendres des eaux de laboratoire.

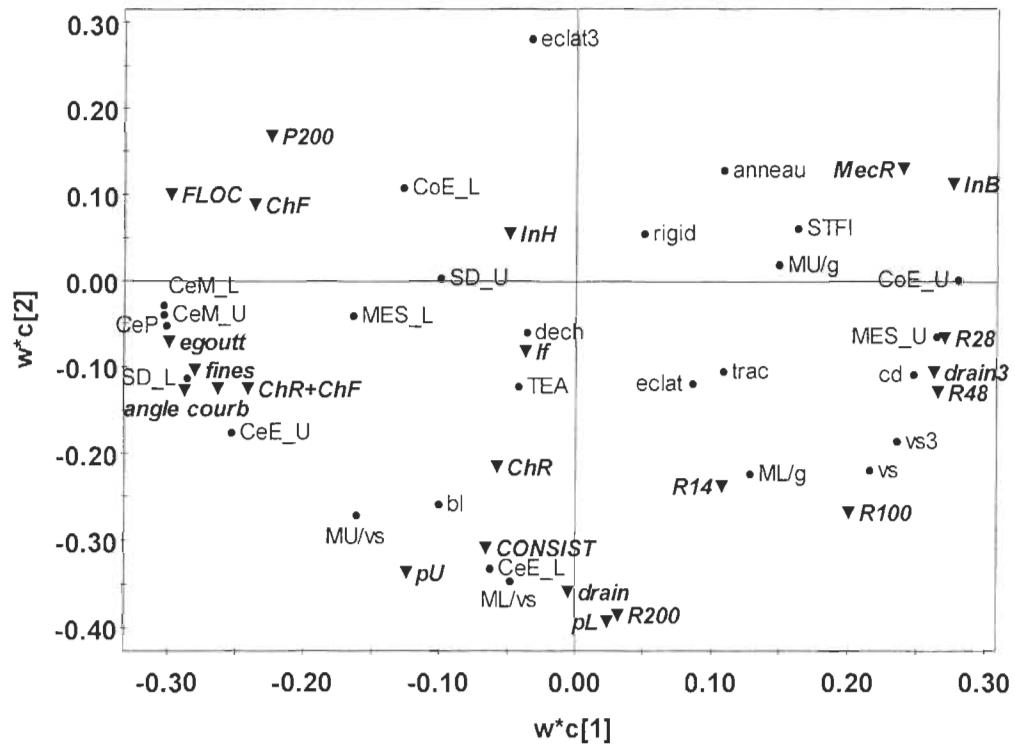


FIGURE 6.32 Modèle pâte 100 % - Diagramme de charges composantes 1 et 2.

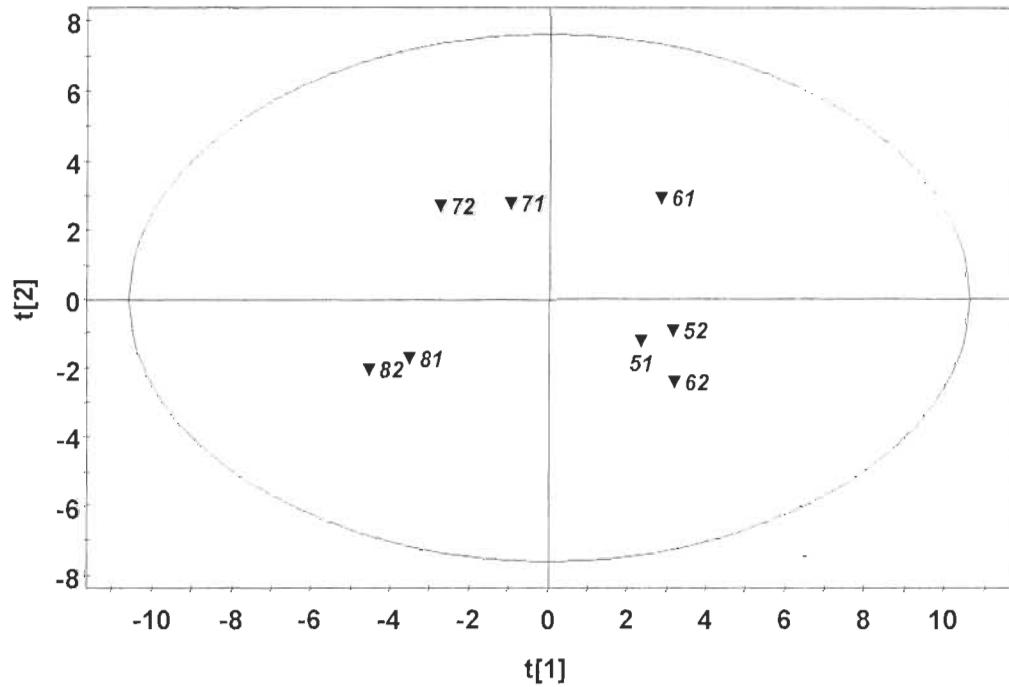


FIGURE 6.33 Modèle pâte 100 % - Diagramme de pointage composantes 1 et 2.

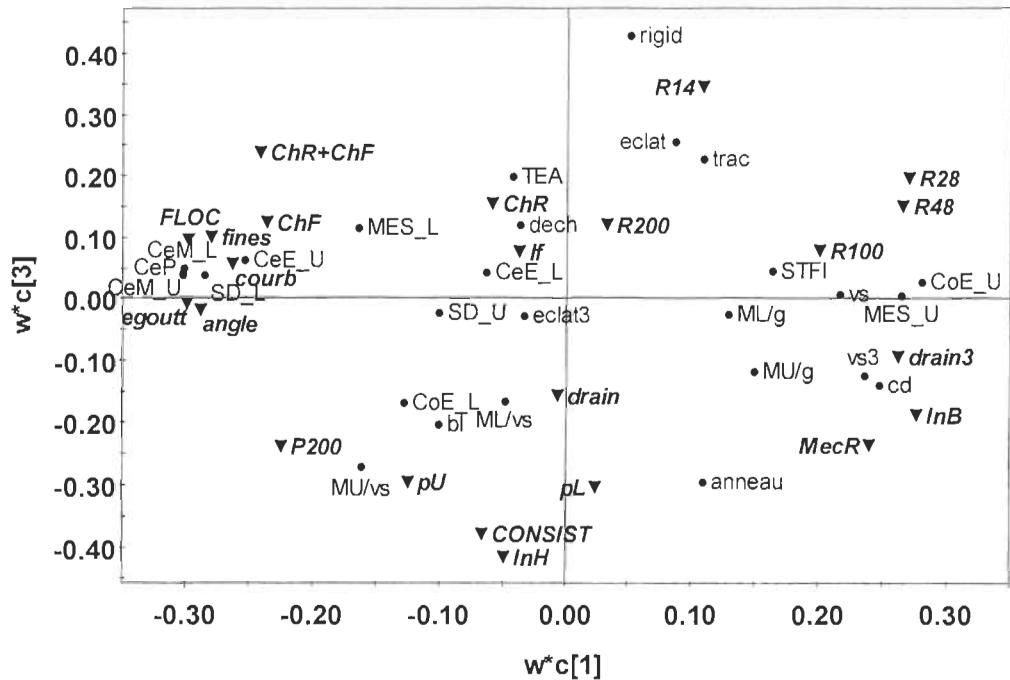


FIGURE 6.34 Modèle pâte 100 % - Diagramme de charges composantes 1 et 3.

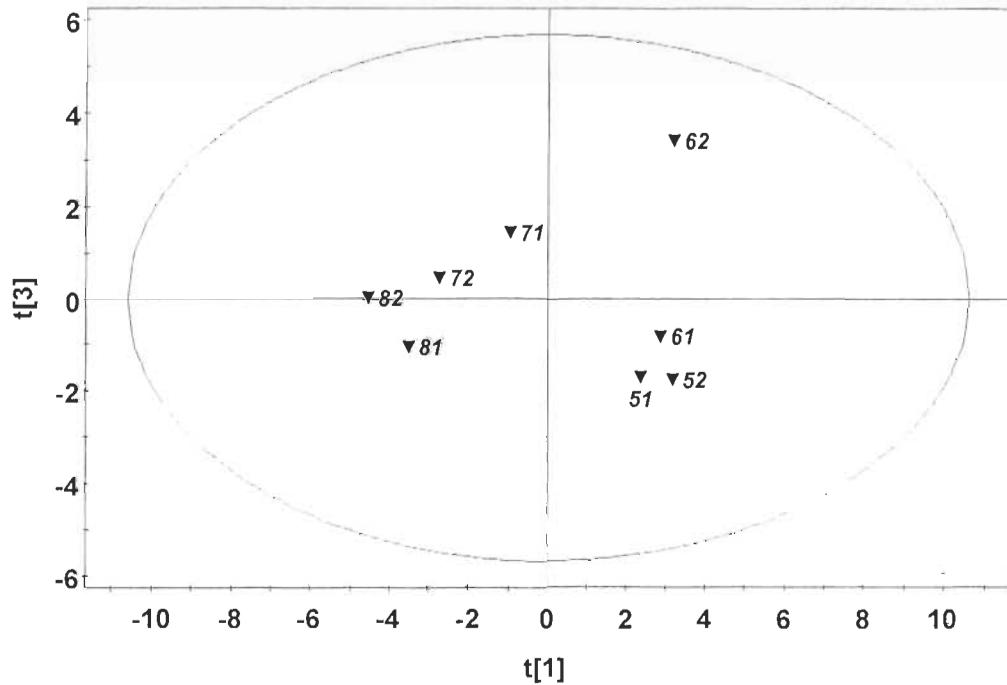


FIGURE 6.35 Modèle pâte 100 % - Diagramme de pointage composantes 1 et 3.

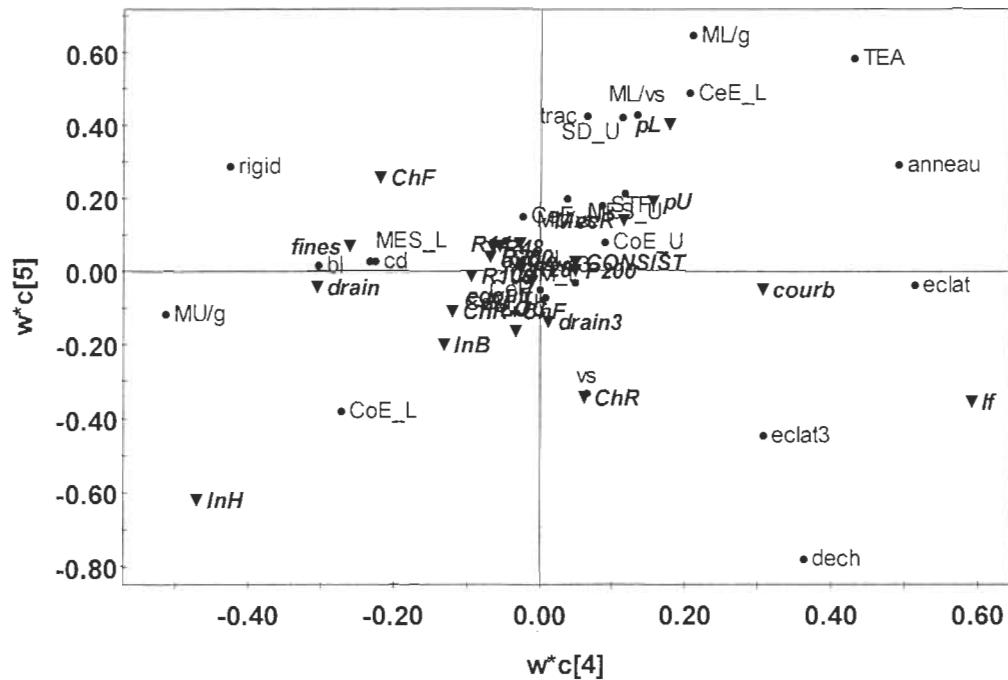


FIGURE 6.36 Modèle pâte 100 % - Diagramme de charges composantes 4 et 5.

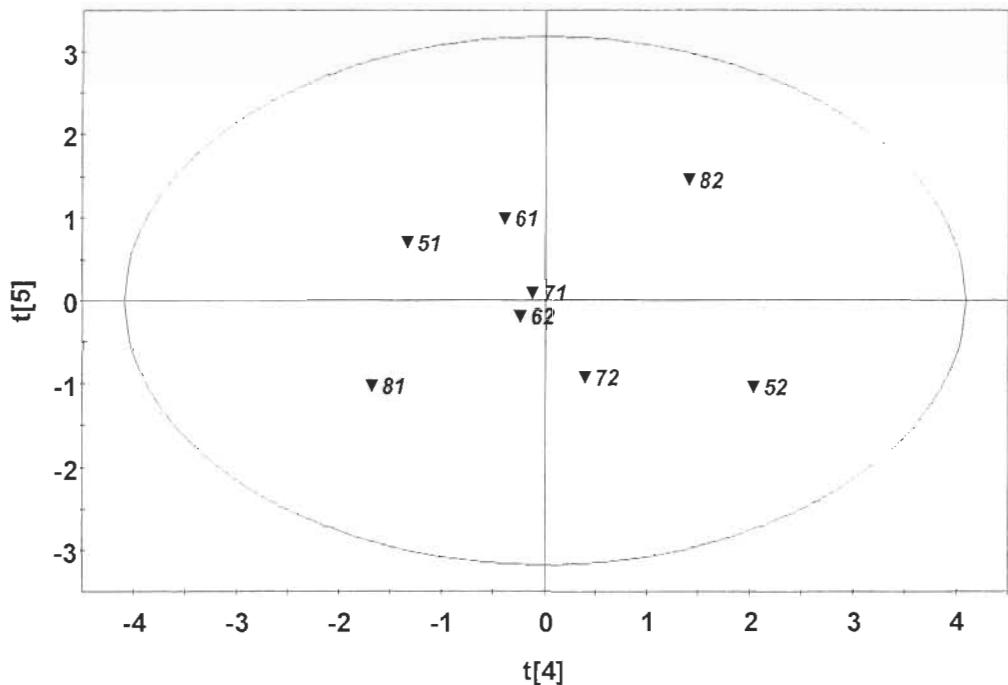


FIGURE 6.37 Modèle pâte 100 % - Diagramme de pointage composantes 4 et 5.

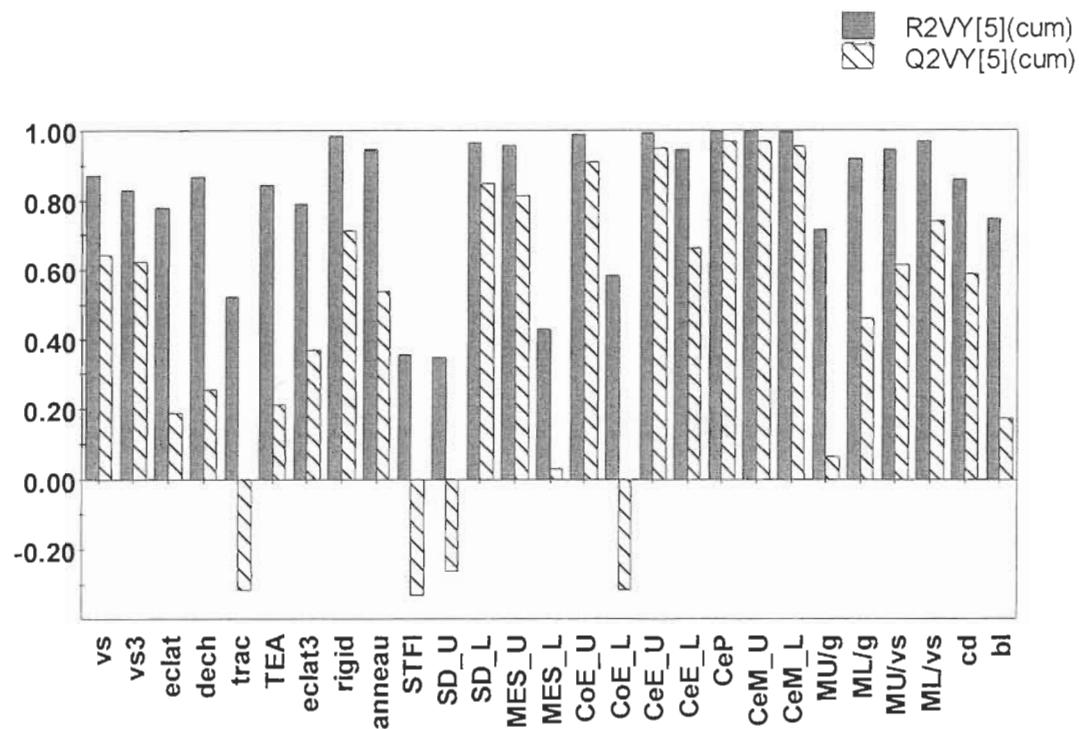


FIGURE 6.38 Modèle pâte 100 % - Coefficients de corrélation et de prédition après cinq composantes.

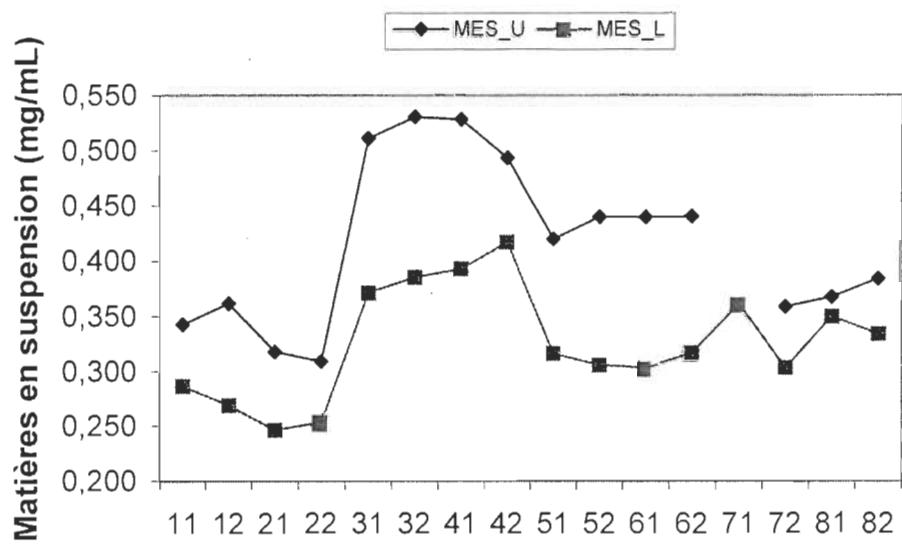


FIGURE 6.39 Matières en suspension des eaux blanches.

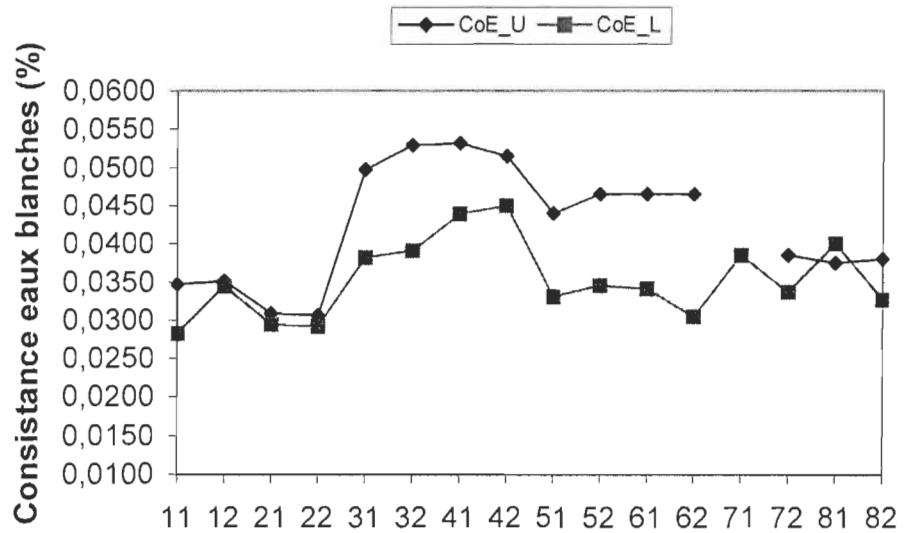


FIGURE 6.40 Consistance des eaux blanches.

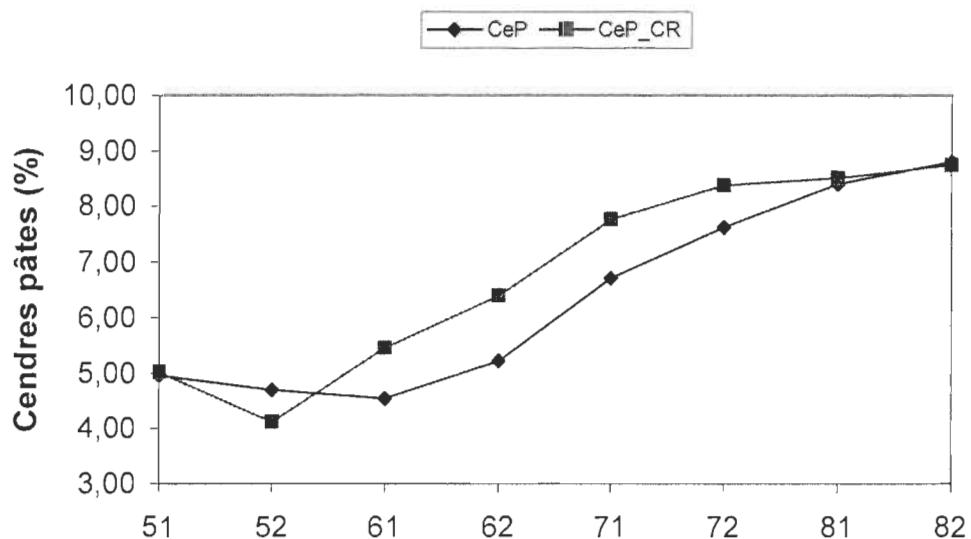


FIGURE 6.41 Cendres pâtes.

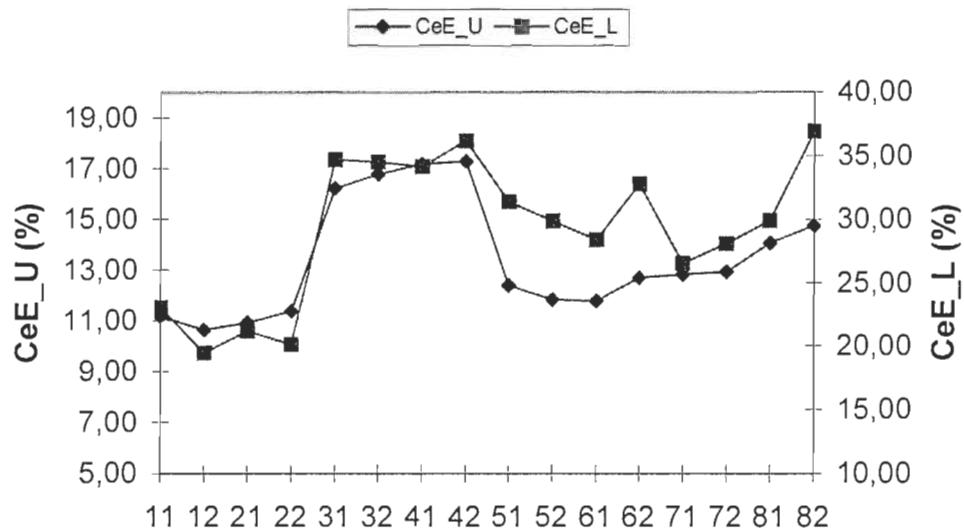


FIGURE 6.42 Cendres des eaux blanches.

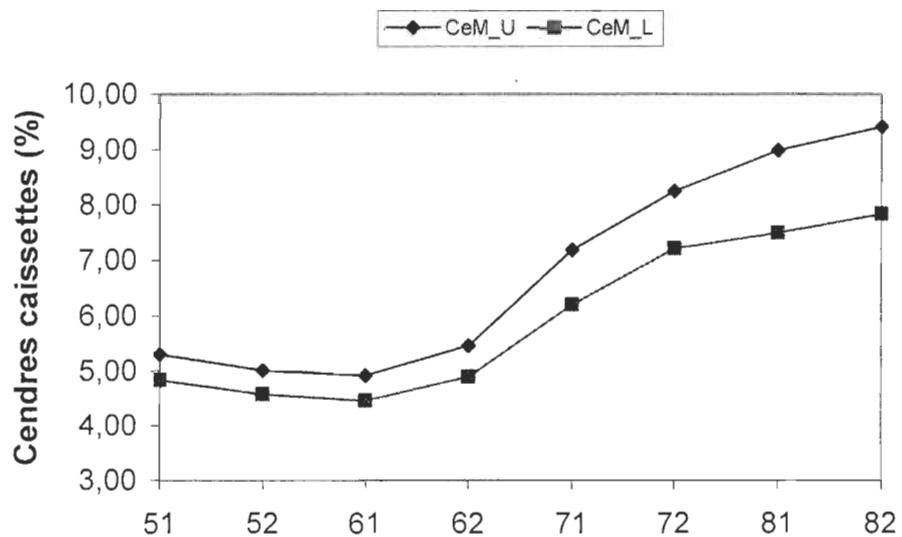


FIGURE 6.43 Cendres caissettes.

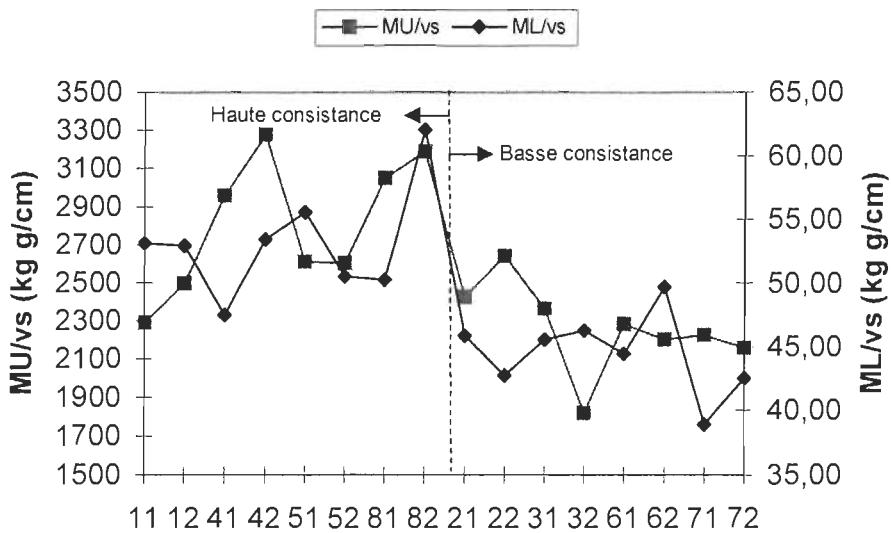


FIGURE 6.44 Résistance des caislettes en fonction de leur poids et de l'épaisseur de ces parois.

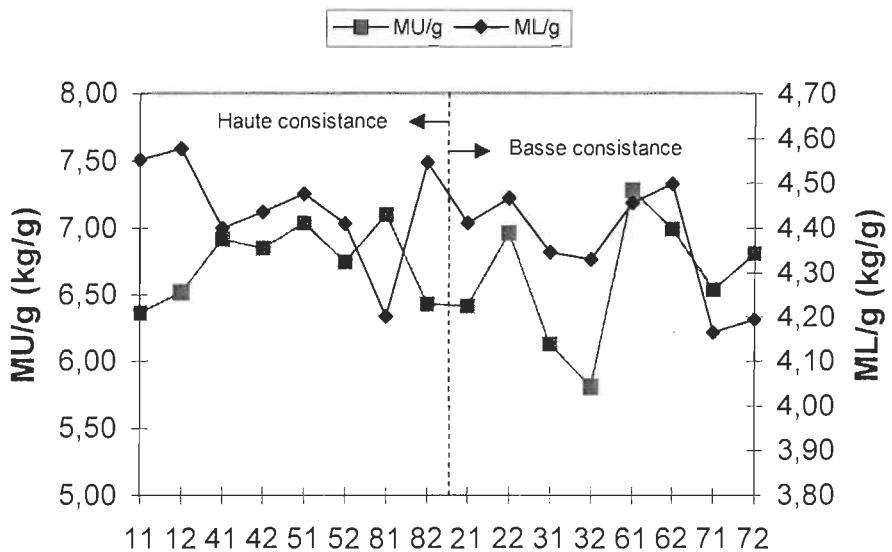


FIGURE 6.45 Résistance des caislettes en fonction de leur poids.

6.3.2.3. *Similitudes et différences entre le deux types de matières premières*

Eaux et drainage

Pour les deux types de matières premières, le floculant est le principal responsable de la qualité des eaux blanches et des caractéristiques de drainage de la pâte.

Dans les deux cas, l'indice d'égouttage augmente quand le floculant est présent. Cette augmentation est associée à une meilleure rétention de la fraction P200 dans la pâte. Normalement, si la fraction P200 est constituée de fines fibreuses, avec un bon pouvoir de former des liaisons, l'indice d'égouttage diminue quand elle augmente. Dans notre cas, autant les fines P200 comme les charges forment des agglomérats, qui aideront à un meilleur égouttage de la pâte. Quant aux fines mesurées par l'appareil FQA, elles sont retenues dans le cas de la pâte 100 % journal, mais ce n'est pas le cas pour la pâte 50/50, où elles contribuent à la charge des eaux blanches.

L'amélioration de l'égouttage se reflète aussi dans une diminution du temps de drainage par l'action du floculant. Il est connu qu'il existe une relation inverse entre l'indice d'égouttage et le temps de drainage des feuilles de 1,2 g à partir de pâtes vierges (81). Dans notre cas, la relation entre le temps de drainage et l'indice d'égouttage ne s'établit pas bien pour les feuilles standard, mais est démontré pour les feuilles de 3 g (relation polynomiale de deuxième ordre, $R^2 = 67,7\%$). Cette relation nous indique que l'utilisation d'une quantité supérieure de pâte (et une consistance plus haute) dans la détermination du temps de drainage est plus convenable pour les pâtes recyclées.

La dose de floculant est adéquate pour la rétention de matières en suspension (responsables de la consistance). Cependant, pour la pâte 100 % papier journal, la rétention est plus basse. Si nous définissons un indice d'efficacité de rétention du floculant égal à $[(1 - MES_{\text{avec Floc}} / MES_{\text{sans Floc}}) * 100]$, ou $MES_{\text{avec Floc}}$ et

MES_{sans Floc} sont les moyennes des valeurs des matières en suspension pour le scénarios avec et sans floculant, nous obtenons une valeur de 35 % d'efficacité pour la pâte en mélange et une valeur de 15 % pour la pâte 100 %. Ces valeurs pour les eaux obtenues en laboratoire sont 33 % et -9 %, ce qui nous indique que les flocons formés avec la pâte 100 % ne restent pas. Ce comportement peut être dû à un faible pouvoir floculant avec cette matière première, à une dose inadéquate (par exemple, due à la diminution de la densité de charge superficielle des fines, des charges ou des encres) ou due à une augmentation de la charge anionique des solides dissous et colloïdaux (consommation préférentielle du floculant par ces substances). Il faut tenir compte que la composition de la matière première varie en même temps que le floculant est ajouté : dans les quatre derniers scénarios, le contenu en pâte mécanique diminue tandis que celui de pâte chimique de feuillus et les charges augmentent appréciablement. Au niveau de rétention de cendres, nous avons une efficacité de rétention de 35 % pour la pâte en mélange, mais une efficacité de -14 % pour la pâte 100 %. Si nous regardons les graphiques de relation entre la consistance et les cendres des eaux blanches d'usine obtenues pour les deux matières premières, nous observons une relation directe pour la pâte en mélange et une relation inverse pour la pâte 100 % (figures 6.25 et 6.46). Ces tendances nous indiquent que, dans la consistance des eaux blanches de la pâte en mélange, les particules organiques et inorganiques sont équilibrées et que le floculant agit avec la même efficacité pour les deux types de matières. Dans ce cas, quand la consistance augmente les cendres augmentent et vice versa. Cependant, les cendres des eaux blanches de la pâte 100 % sont plus élevées et la consistance plus basse pour les scénarios avec floculant. Ce résultat nous indique que la composition des eaux blanches a changé : dans les quatre derniers scénarios (scénarios avec floculant) il y a moins de matières organiques (fines) qui contribuent à la consistance et plus de matières inorganiques (charges) qui contribuent aux cendres.

En ce qui touche aux solides dissous des eaux, ils sont normalement contrôlés en usine par l'ajout du coagulant. Ils ont des valeurs plus basses pour la pâte

100 % que pour la pâte mélange dans les eaux d'usine. Les valeurs de laboratoire sont plus basses que celles d'usine, et la relation entre les solides dissous provenant des deux types de pâtes s'inverse. Pour les deux types de pâtes, les solides dissous sont plus associés au contenu en pâte chimique de feuillus et de résineux. C'est-à-dire que les sortes de papiers contenant de la pâte chimique sont les principaux responsables du contenu en matières dissoutes et colloïdales des eaux. Les valeurs plus élevées des solides dissous pour la pâte en mélange peuvent être attribués aux protéines des adhésifs utilisés pour coller les bottins téléphoniques.

Caissettes

Quand la résistance des caissettes s'exprime comme charge en compression en rapport à l'épaisseur et au poids (MU/vs et ML/vs), elle est étroitement reliée au poids. Pour les caissettes d'usine, la relation entre pU et MU/vs est plus significative pour la pâte 100 % journal, et le floculant n'influe pas sur cette relation ($R^2_{100} = 92,7\%$, $R^2_{50/50} = 23,0\%$). Pour les caissettes de laboratoire la relation entre pL et ML/vs est plus significative aussi pour la pâte 100 % journal, et la relation est plus forte pour les scénarios avec floculant ($R^2_{100} = 85,8\%$, $R^2_{50/50} = 39,7\%$).

Le poids, à son tour, est déterminé par la consistance en tête de machine. La relation entre le poids des caissettes d'usine et la consistance en tête de machine est plus significative pour les scénarios avec floculant ($R^2_{\text{avec Floc}} = 97,6\%$, $R^2_{\text{sans Floc}} = 70,3\%$) et pour la pâte 100 % journal ($R^2_{100} = 84,1\%$, $R^2_{50/50} = 49,1\%$). Ces relations se confirment pour les caissettes de laboratoire, mais dans ce cas les différences dues au floculant et à la matière première sont moindres.

La résistance de la caissette exprimée en rapport à leur poids (MU/g et ML/g) ne montre aucune relation directe avec le poids de la caissette ou la consistance en tête de machine.

Ces résultats nous indiquent que la résistance de la caisse est bien représentée par le rapport entre la charge en compression, le poids de la caisse et l'épaisseur de ses parois, et que cette résistance peut être prédite par le poids de la caisse.

En outre, les caisses de laboratoire représentent bien le comportement des caisses d'usine et les différences attribuées à la consistance en tête de machine et à la matière première. Dans ce point, il faut souligner que les relations entre les valeurs d'usine et de laboratoire pour le poids, l'épaisseur et donc la résistance des caisses sont meilleures pour la pâte 100 % journal. Les valeurs du coefficient de corrélation sont :

- Poids caisses d'usine vs poids caisses de laboratoire :
 $R^2_{\text{total}} = 50,6 \%$, $R^2_{50/50} = 49,8 \%$, $R^2_{100} = 69,1 \%$.
- Épaisseur caisses d'usine vs épaisseur caisses de laboratoire :
 $R^2_{\text{total}} = 1,49 \%$, $R^2_{50/50} = 5,6 \%$, $R^2_{100} = 63,4 \%$.
- Résistance (kg g/cm) caisses d'usine vs résistance (kg g/cm) caisses de laboratoire : $R^2_{\text{total}} = 31,7 \%$, $R^2_{50/50} = 8,1 \%$, $R^2_{100} = 62,1 \%$.

Étant donné que les relations résistance vs poids, poids vs consistance de formation et caisses d'usine vs caisses de laboratoire sont meilleures pour la pâte 100 %, nous pouvons dire que la formation avec cette pâte est plus homogène.

Résistance des feuilles

La résistance et le volume spécifique des feuilles standard et de 3 g de la pâte 50/50 sont favorisées par une augmentation des fractions R14 et R28 et de la longueur de fibres moyenne. La fraction R14 présente des caractéristiques nécessaires pour les propriétés qui ont besoin d'une bonne longueur de fibres et d'un degré de liaison élevé. La fraction R28 est seulement liée aux propriétés

qui dépendent de la capacité de liaisons entre fibres. Dans ce cas, une augmentation du volume spécifique des feuilles favorise les résistances. La fraction R28 et la longueur de fibres moyenne sont, à leur tour, favorisées par la présence de pâte chimique.

La résistance des feuilles standard et de 3 g de la pâte 100 % journal est favorisée aussi par la présence de pâte chimique, qui, dans ce cas, contribue à la fraction de fibres R14. L'augmentation de la longueur moyenne des fibres contribue aussi à certaines propriétés, mais elle n'est pas reliée à un type de pâte en particulier. Dans ce cas, la fraction R14 est la fraction de la pâte qui contribue au développement des propriétés qui ont besoin d'une bonne liaison interfibres, et la longueur de fibres moyenne contribue aux propriétés qui sont influencées par la longueur de fibres. Le volume spécifique des feuilles standard et de 3 g n'est pas relié aux propriétés physiques et augmente quand le contenu en pâte mécanique augmente.

Une attention spéciale se centre sur la rigidité des pâtes. C'est une propriété qui apparaît dépendante des fibres longues et des fibres avec un bon pouvoir de liaisons, et aussi dépendante des fractions fines. Il semble que l'action de remplissage accomplie par les fines améliore cette propriété. La rigidité apparaît aussi étroitement liée à la résistance des caissettes d'usine quand elle s'exprime en rapport au poids (MU/g). Malheureusement, cette façon d'exprimer la résistance des caissettes ne s'avère pas adéquate.

Les indices de qualité

Les indices de qualité capturent la variabilité de la matière première. L'indice de qualité haut ne varie pas à l'intérieur de chaque série d'essais, mais il est beaucoup plus élevé pour la pâte 100 % journal. Cependant, il n'est pas relié aux mêmes propriétés dans les deux modèles. Ceci s'explique par la variation des propriétés qui définissent l'indice. Dans les scénarios de pâte en mélange 50/50, l'indice de qualité haut demeure constant à cause des propriétés qui sont incluses dans sa définition ne varient pas appréciablement (tableau 6.2).

Cependant, dans les scénarios 100 % journal, l'indice se maintient aussi constant, dû au fait que les variations des propriétés incluses dans sa définition s'équilibrivent.

Dans ce cas, l'indice d'égouttage, les cendres des pâtes, le TEA et la résistance à la compression en anneau augmentent en même temps que la fraction R28, le volume spécifique et la rigidité diminuent (tableau 6.3). Pour cette raison, le lien de l'indice de qualité haut avec les propriétés des feuilles standard et feuilles épaisses s'établit quelques fois de façon directe et quelques fois de façon inverse, selon que la composante du modèle soit plus dépendante de la longueur de fibres ou plus dépendante du degré de liaison. La résistance des caissettes, quand à elle, est associée à l'indice de qualité haut dans les deux modèles. Elle ne se montre pas directement reliée aux propriétés des pâtes, ce qui nous indique qu'elle dépend de l'ensemble de caractéristiques définies dans l'indice de qualité haut. Ainsi, la résistance des caissettes est favorisée par la longueur de fibres, le degré de liaison entre fibres et le contenu en charges des pâtes.

Quand à l'indice de qualité bas, il varie peu et en même temps que l'indice de qualité haut pour les scénarios de pâte en mélange 50/50, mais dans le cas de la pâte 100 % journal, il diminue à mesure que l'indice de qualité haut augmente. Cette diminution est due à l'augmentation de l'angle de cassure et la courbure de fibres, de la fraction P200 et des temps de drainage. Cette variation de l'indice de qualité bas s'oppose à l'action du floculant (première composante modèle 100 % journal) et nous indique que, quand il diminue appréciablement, la dose de floculant doit augmenter.

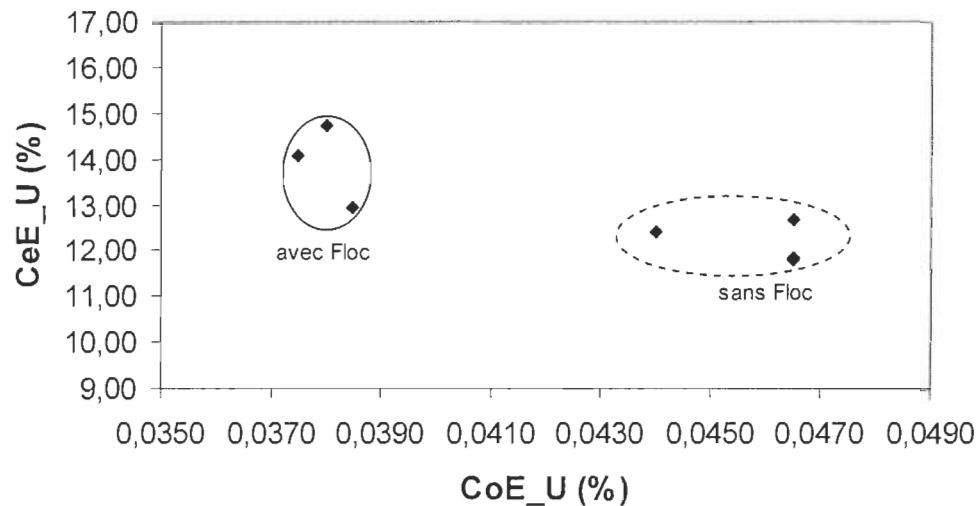


FIGURE 6.46 Modèle pâte 100 % journal – Variation de la consistance et des cendres des eaux blanches avec le floculant.

6.4. Conclusions

- Chaque type de matière première, pâte mélange 50 % bottin – 50 % journal ou 100 % journal, se comporte comme un système différent.
- Le floculant utilisé est adéquat pour la rétention de fines et charges, mais la dose semble insuffisante quand les charges entrantes au système augmentent. Ce comportement s'accompagne d'une diminution appréciable de l'indice de qualité bas.
- L'indice d'égouttage et le temps de drainage de feuilles de 3 g sont des mesures indirectes adéquates pour estimer l'efficacité du floculant sur la rétention des matières organiques. Comme mesures directes de l'efficacité, la détermination de la consistance ou des matières en suspension des eaux est appropriée. L'établissement de valeurs optimales pour chaque type de matière première et le suivi de ces propriétés pendant le procédé devraient permettre un bon contrôle de l'action du floculant sur les fibres.

- Les matières inorganiques ne peuvent être pas suivies au moyen de l'indice d'égouttage ou du temps de drainage. Les mesures de cendres des pâtes (comparaison des cendres de pâte de cuvier de réserve et cendres de pâte de cuvier de tête de machine) ou les mesures des cendres des eaux sont plus adéquates dans ce cas, autant en usine qu'en laboratoire.
- Les solides dissous des eaux blanches sont plus élevés pour la pâte en mélange. Cette augmentation peut être associée aux adhésifs utilisés pour relier les bottins téléphoniques. Étant donné que la teneur en solides dissous diminue pour la deuxième partie des essais, et qu'à ce moment de l'échantillonnage le système travaillait depuis au moins huit heures en circuit fermé, nous concluons que la dose de coagulant est adéquate pour les deux types de matière première.
- Les eaux blanches de laboratoire représentent bien le comportement des eaux blanches d'usine des scénarios de pâte mélange. Pour les scénarios 100 % journal, les eaux blanches de laboratoire ne montrent pas l'effet du floculant sur la consistance et les matières en suspension. En général, toutes les mesures sur les eaux blanches de laboratoire montrent des valeurs plus basses que celles d'usine. Cette différence pourrait être due à l'impact de la fermeture du circuit en usine.
- La résistance à la compression des caissettes se représente bien par le rapport entre la charge, l'épaisseur des parois et le poids des caissettes. Cette résistance augmente avec le poids des caissettes, déterminée par la consistance en cuvier de tête de machine. La relation entre la consistance de la pâte en tête de machine et le poids de la caissette, et la relation du poids et la résistance de la caissette sont plus significatives quand la matière première est constituée de 100 % papier journal. Ces tendances nous indiquent que la formation est plus homogène pour cette matière première.

- Les caissettes de laboratoire reproduisent bien les caissettes d'usine. Les relations entre les valeurs d'usine et de laboratoire de l'épaisseur de parois, poids et résistance des caissettes sont mieux établies pour les scénarios 100 % journal.
- La résistance des feuilles standard et des feuilles de 3 g augmente quand le contenu en pâte chimique augmente.
- Les conditions les moins favorables à une bonne qualité des eaux blanches sont données pour la pâte 100 % journal. Cependant, ce type de pâte permet un contrôle plus efficace de la formation : le poids des caissettes est directement relié à la consistance en tête de machine et à sa résistance. Ce type de pâte permet aussi de reproduire mieux les caissettes en laboratoire.

Dans le chapitre suivant, les variations de conditions réalisées en usine seront également reproduites en laboratoire. Les pâtes de cuvier de réserve des 16 scénarios et les eaux blanches correspondantes aux scénarios sans ajout de produits chimiques seront utilisées dans un plan factoriel.

Chapitre 7 - Validation des résultats au laboratoire

7.1. Objectifs

L'objectif visé par ce chapitre est de reproduire le comportement en laboratoire des variables observées en usine.

7.2. Méthodologie

Les essais en laboratoire furent réalisés en suivant le plan d'essais utilisé en usine, un plan factoriel à trois variables et deux niveaux, et en ajoutant trois points centraux. Le plan étant répété, un total de 22 scénarios ont été effectués.

Comme matière première, nous avons utilisé les pâtes du cuvier de réserve de l'usine, prises pendant la journée d'essais. Pour simuler la consistance du cuvier de tête de machine, la pâte de cuvier de réserve est diluée avec l'eau blanche d'usine obtenue durant la même journée d'essais. Les eaux blanches utilisées sont celles qui correspondent aux scénarios sans ajout de floculant. Cette pâte ainsi diluée servait comme pâte de base pour les essais de drainage et de détermination des caractéristiques fibreuses, pour la formation de feuilles et pour la formation de la première caissette de la série. Pour la formation de feuilles, l'eau blanche d'usine était utilisée pour former la première feuille. Les feuilles successives se forment avec recirculation d'eau. Dans le cas de formation de caissettes, pendant la formation de la première caissette, l'eau blanche écoulée est recueillie. Cette eau blanche sert à la dilution de la pâte pour la formation de la deuxième caissette, et ainsi de suite.

Dans les scénarios qui correspondaient aux points centraux, les mélanges furent effectués en prenant les pâtes de cuvier de réserve de chaque type de matière première et les eaux blanches reliées à cette matière première, dans les proportions adéquates.

Les produits chimiques (floculant, coagulant et conditionneur) furent ajoutés avant la formation de chaque caisse, dans les proportions adéquates en fonction de la quantité de fibres sèches ajoutée au cuvier de formation.

Dans le tableau suivant figurent les conditions du plan d'essais, ainsi que les pâtes et les eaux utilisées dans chaque scénario. La nomenclature des pâtes et des eaux correspond à celle utilisée pendant les scénarios en usine, que l'on retrouve au tableau 6.1 du chapitre précédent.

La méthode de formation des caisses est celle décrite au chapitre 4, et les essais d'évaluation des pâtes ont été décrits aux chapitres 3 et 5.

TABLEAU 7.1 Conditions expérimentales

Scénario	Design (J-C-F)	Journal (%)	Consistance (%)	Floculant (g/tonne)	Coagulant (kg/tonne)	Conditionner (ml/gr)	Pâte CR (# scénario usine)	Eau blanche (# scénario usine)
F1	---	50	1,06	0	0,0051	0,0056	31	41
F2	+--	100	1,03	0	0,0050	0,0055	61	52
F3	000	75	1,05	83,0	0,0047	0,0051	11 et 51	31 et 51
F4	++-	100	1,14	0	0,0043	0,0047	51	51
F5	-++	50	1,03	165,3	0,0046	0,0051	11	31
F6	000	75	1,05	83,0	0,0047	0,0051	12 et 52	31 et 51
F7	-+-	50	1,16	0,0	0,0045	0,0050	41	42
F8	+-+	100	0,93	173,4	0,0048	0,0053	71	61
F9	+--	100	1,01	0	0,0049	0,0054	62	52
F10	000	75	1,05	83,0	0,0047	0,0051	21 et 61	32 et 52
F11	-++	50	1,08	154,5	0,0043	0,0048	12	31
F12	000	75	1,05	83,0	0,0047	0,0051	32 et 72	41 et 61
F13	--+	50	0,88	186,1	0,0052	0,0057	21	32
F14	000	75	1,05	83,0	0,0047	0,0051	41 et 81	41 et 61
F15	000	75	1,05	83,0	0,0047	0,0051	42 et 82	42 et 62
F16	+++	100	1,14	146,1	0,0041	0,0045	81	62
F17	++-	100	0,95	177,9	0,0050	0,0055	72	61
F18	-+-	50	1,22	0	0,0044	0,0049	42	42
F19	---	50	1,04	0	0,0051	0,0056	32	41
F20	--+	50	0,89	182,8	0,0051	0,0056	22	32
F21	++-	100	1,13	0	0,0043	0,0047	52	51
F22	+++	100	1,16	142,6	0,0040	0,0044	82	62

L'analyse des résultats fut réalisée en construisant un modèle PLS qui utilisait comme variables indépendantes les mêmes caractéristiques des pâtes utilisées

pour analyser les essais d'usine (chapitre 6) plus les variables d'opération employées dans le plan d'essais. La nomenclature est celle présentée au tableau 6.4.

Dans le but de vérifier l'efficacité atteinte dans le processus de formation de caissettes en laboratoire, nous avons accomplie un test de comparaison de moyennes. À cette fin, nous avons utilisé les résultats de l'évaluation de caissettes et d'eau blanche d'usine et de laboratoire du chapitre précédent, et les résultats actuels de reproduction du plan factoriel en laboratoire. L'analyse a été effectuée sur les scénarios de conditions identiques, en excluant les scénarios correspondants au point central.

L'écart réduit est calculé comme :

$$t_e = \frac{X_a - X_b}{S_{X_a - X_b}} \quad \text{ÉQUATION 7.1}$$

où :

X_a, X_b = valeurs moyennes

$$S_{X_a - X_b} = S_m \sqrt{\frac{1}{n_a} + \frac{1}{n_b}} \quad \text{ÉQUATION 7.2}$$

$$S_m = \sqrt{\frac{S_a^2(n_a - 1) + S_b^2(n_b - 1)}{n_a + n_b - 2}} \quad \text{ÉQUATION 7.3}$$

où

S_a^2 : variance de la propriété a

S_b^2 : variance de la propriété b

na, nb = nombre de déterminations

La valeur critique de l'écart réduit, t_c , est obtenue dans un tableau de valeurs de distribution de t de Student, avec (na + nb - 2) degrés de liberté et pour un niveau de signification de 95 %. Si $t_e > t_c$, la différence entre moyennes est significative.

7.3. Résultats et discussion

7.3.1. Analyse PLS

Sachant la connaissance de l'influence que la variation de la matière première a sur les propriétés étudiées, l'analyse des résultats fut effectuée sur l'ensemble des résultats. Les trois facteurs variés (pourcentage de papier journal, consistance en cuvier de tête de machine et pourcentage de floculant) furent sélectionnées comme variables indépendantes ainsi que les caractéristiques des pâtes et de drainage suivantes : fines, If, courb, angle, R14, R28, R48, R100, R200, P200, InH, InB, égoutt, drain, drain3, et pL. Les variables dépendantes considérées ont été les propriétés des feuilles standards et feuilles épaisses, la résistance à la compression des caissettes et les caractéristiques des eaux blanches. La nomenclature utilisée est présentée dans le tableau 6.4 du chapitre précédent, et les résultats des différents essais dans les tableaux D1 à D4 de l'annexe D. Dans le tableau 7.2 figurent les valeurs des coefficients de corrélation et de prédiction obtenues pour le modèle PLS de quatre composantes ainsi que les équations de normalisation de la distribution de certaines variables. Comme les variables STFI et cd n'apportent pas beaucoup d'information au système, et qu'elles ont des valeurs de corrélation et de prédiction faibles, elles ont été enlevées du modèle.

TABLEAU 7.2 Paramètres modèle PLS

Variables normalisées :

$$If = \log [(x - 1,78) / (2,39 - x)]$$

$$R200 = \log [(x - 6,69) / (100 - x)]$$

$$MES_L = \log [(x - 0,28) / (0,51 - x)]$$

$$CoE_L = \log [(x - 0,01) / (100 - x)]$$

$$ML/vs = \log [(x - 40,39) / (68,52 - x)]$$

	R ² (%)	Q ² (%)	R ² cumulé (%)	Q ² cumulé (%)
Première composante	27,3	14,8		
Deuxième composante	17,8	15,2		
Troisième composante	9,1	2,42		
Quatrième composante	5,9	-2,25	60,1	27,9

Les poids relatifs des deux premières composantes sont montrés dans la figure 7.1. La première composante définit les propriétés physiques des feuilles standards et épaisses et les caractéristiques de drainage de la pâte. La résistance physique des pâtes est favorisée par une augmentation de l'indice de qualité haut, la longueur de fibres moyenne et le pourcentage de fraction R14. Ces variables sont, en même temps, étroitement reliées au contenu en papier journal de la pâte. Le volume spécifique des feuilles standards et épaisses varie en sens contraire, ce qui nous démontre que l'augmentation de la résistance physique et de la densité des feuilles est obtenue avec une augmentation du degré de liaison entre fibres. Tant les résistances physiques que le volume spécifique ne sont pas affectés par l'accroissement de la courbure et de l'angle de cassure dû au papier journal. L'augmentation de l'indice de qualité haut, de la fraction R14, de la courbure et de l'angle de cassure des fibres de la pâte 100 % papier journal par rapport à la pâte en mélange fut observée dans l'évaluation de la matière première (pâtes de cuvier de réserve), point 6.2.2.1 du chapitre précédent.

Le drainage des pâtes est aussi défini dans la première composante. L'égouttage augmente et le temps de drainage diminue quand le contenu en

papier journal augmente. Cette condition est favorisée par la présence du floculant, tel que constaté dans l'analyse des essais d'usine.

Dans cette composante, on peut observer aussi que la résistance des caissettes (ML/vs) augmente quand le floculant et le papier journal augmentent. L'influence positive du floculant et du papier journal dans la résistance des caissettes était déjà observée dans les essais d'usine.

Une attention particulière doit être portée sur le contenu en solides dissous des eaux blanches. Les eaux blanches d'usine ont un contenu moyen de solides dissous plus élevé pour la pâte en mélange que pour la pâte 100 % journal. Cependant, on avait observé que, même si tous les solides dissous de laboratoire étaient plus bas que ceux d'usine, le contenu était plus élevé pour la pâte 100 % (figure 6.31 chapitre 6). Dans ce cas, le résultat se répète : les solides dissous des eaux obtenus pendant la formation des caissettes de laboratoire ont une moyenne plus élevée pour les scénarios 100 % journal (2,11 mg/mL) que pour les scénarios de pâte en mélange (1,78 mg/mL). Il semble que la formation plus lente des caissettes de laboratoire aide à retenir les matières comprises dans les solides dissous, et que cette rétention est plus efficace dans le cas de pâte en mélange.

La deuxième composante est reliée à la rétention de cendres dans la pâte (feuilles et caissettes). Les cendres des pâtes augmentent quand les fines retenues dans la pâte augmentent. La relation entre les fines et les cendres était observée principalement pour la pâte 100 % journal dans les essais d'usine (première composante modèle 100 %). Dans le cas présent, on ne peut pas distinguer clairement l'effet du floculant, car cette propriété capte l'effet des valeurs élevées de cendres de la matière première : les scénarios correspondants à une élévation dans le contenu en cendres des pâtes (scénarios F8, F16, F17 et F22 dans le diagramme de pointage, figure 7.2) ont comme matière première, des pâtes à haute teneur en cendres (pâtes CR71, CR72, CR81 et CR82, voir figure 6.2 du chapitre 6). On observe aussi dans cette composante que l'augmentation dans le contenu en charges des pâtes

s'accompagne d'une diminution de l'indice de qualité bas. Cette relation était déjà observée dans les essais d'usine, et s'accorde avec la diminution de l'indice de qualité bas observé pour les scénarios mentionnés (voir figure 6.17 chapitre 6).

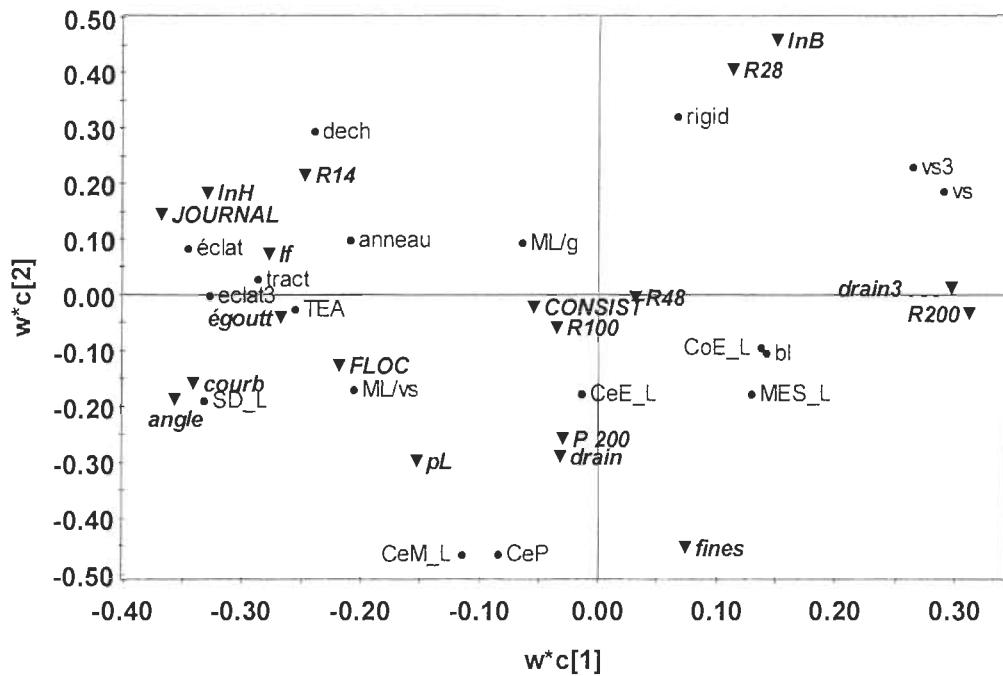
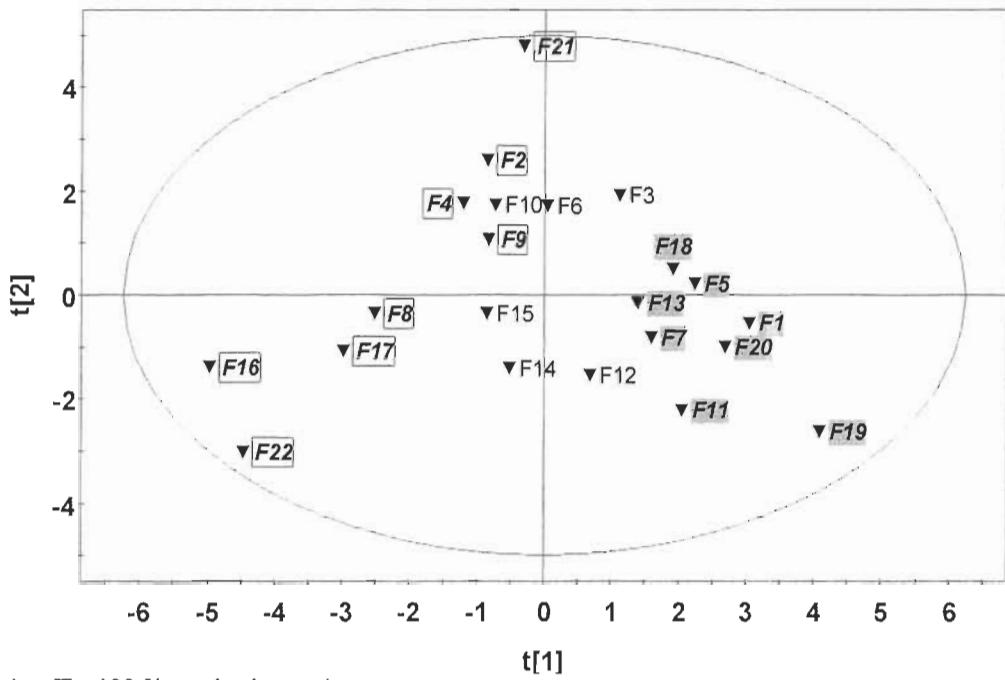


FIGURE 7.1 Diagramme de charges composantes 1 et 2.



Scénarios □ : 100 % papier journal

Scénarios ▼ : mélange 50/50

Sans marque : points centraux

FIGURE 7.2 Diagramme de pointage des composantes 1 et 2.

La troisième composante est associée à la formation des caissettes. La résistance des caissettes est directement liée à leur poids et à la consistance de la pâte en cuvier de formation (figures 7.3 et 7.4).

La quatrième composante est directement reliée à l'action du floculant. Quand le floculant augmente, la consistance, les matières en suspension et les cendres des eaux blanches diminuent et la rétention de la fraction R100 dans la pâte augmente (figures 7.3 et 7.4). Cependant, si nous effectuons l'analyse d'efficacité réalisée au chapitre 6 (point 6.3.2.3) pour les scénarios extrêmes (sans inclure les points centraux) nous avons que le floculant est effectif dans le cas de pâte en mélange (31 % d'efficacité dans la rétention de MES et 28 % de rétention des cendres) mais qu'il n'agit pas convenablement dans le cas de pâte 100 % journal (-1,9 % d'efficacité dans la rétention de MES et -2,07 % de rétention des cendres). Ces valeurs confirment les résultats obtenus dans le chapitre précédent : le floculant est moins effectif dans le cas de pâte 100 % et pour les conditions de formation de caissettes en laboratoire.

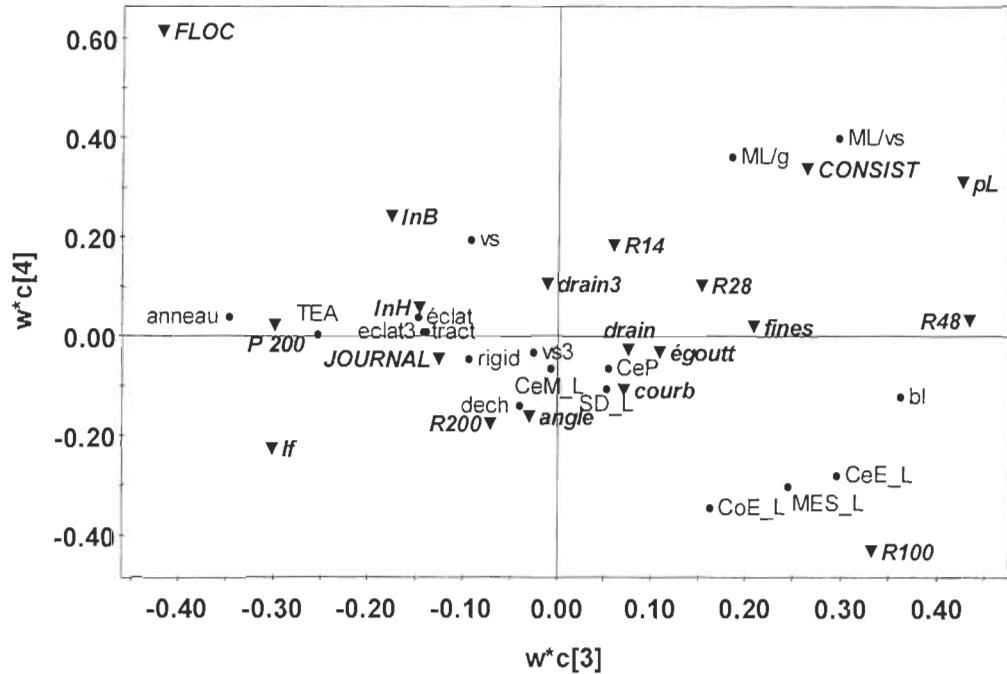


FIGURE 7.3 Diagramme de charges composantes 3 et 4.

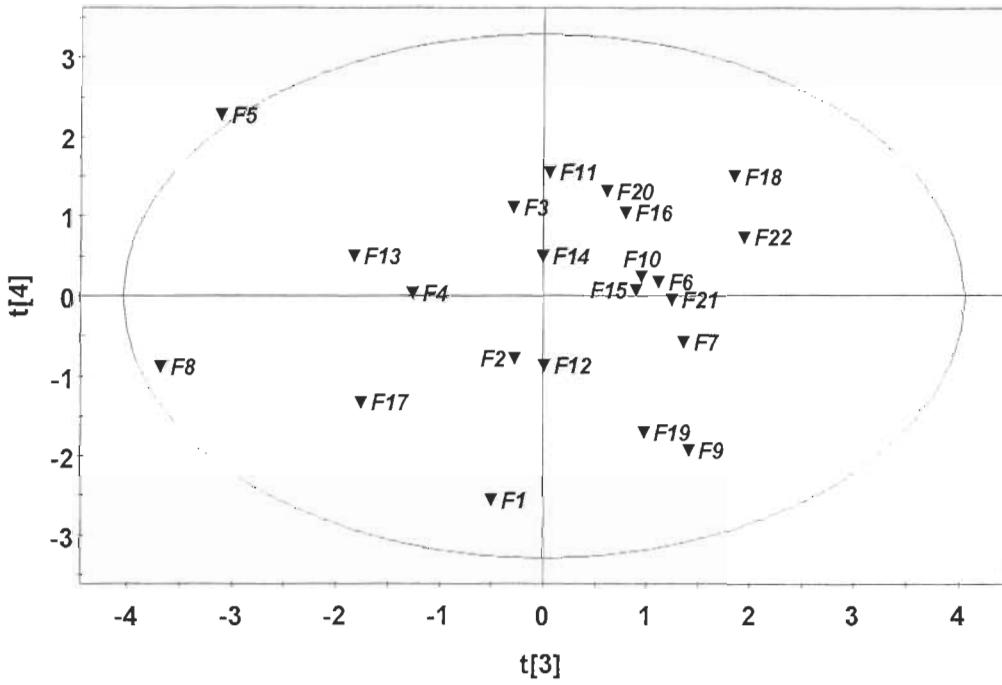


FIGURE 7.4 Diagramme de pointage composantes 3 et 4.

Les coefficients de corrélation et de prédiction des variables dépendantes après quatre composantes sont inférieurs à ceux observés dans l'analyse des résultats d'usine (figure 7.5). C'est la conséquence d'inclure le papier journal

comme variable, compte tenu des variations observées dans l'approvisionnement de la matière première. Cependant, son inclusion nous permet d'observer comment se comporte l'ensemble de variables étudiées

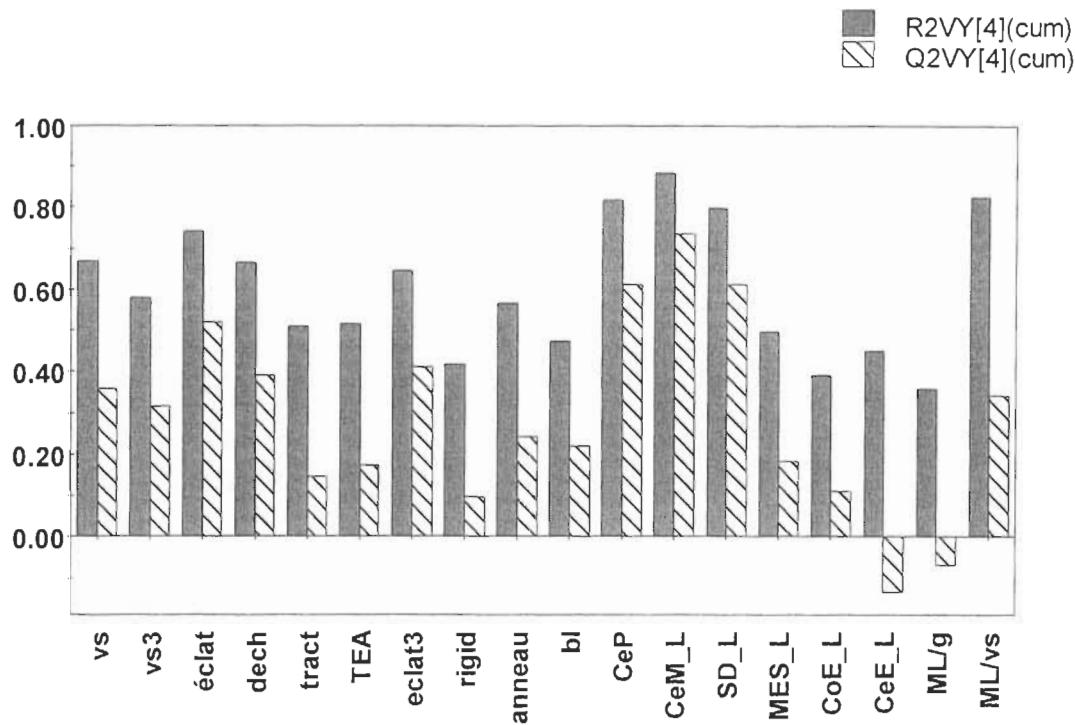


FIGURE 7.5 Coefficients de corrélation et de prédiction après quatre composantes.

7.3.2. Comparaison de moyennes

Les résultats de comparaison de moyennes des propriétés reliés à la formation de caissettes sont présentés sous la forme d'un tableau, où les propriétés avec l'indice « 1 » correspondent à la série de résultats du chapitre 6; et ceux du chapitre courant sont indiqués avec l'indice « 2 » (tableau 7.3). Pour chaque paire de variables les valeurs du rang centile t de Student (expérimental et critique) et le coefficient de corrélation r sont inclus. Une valeur de t expérimentale (t_e) supérieure au t critique (t_c) nous indique qu'il existe des différences significatives entre les moyennes.

Nous pouvons voir que la plupart des moyennes des propriétés des eaux blanches sont difficiles à reproduire en laboratoire. Cependant, si nous regardons les variations, les conclusions sont similaires à celles du chapitre précédent. Même si les valeurs diffèrent, les tendances dans la variation des solides dissous, matières en suspension, consistance et cendres des eaux blanches entre les valeurs de laboratoire et d'usine se maintiennent (figures 7.6 à 7.9). Même si le contenu en cendres des pâtes se reproduit bien (figure 7.10), les conséquences de la fermeture du circuit en usine sont sans doute difficiles à mesurer en laboratoire.

La formation des caissettes, quant à elle, se simule bien en laboratoire. On avait vu au chapitre précédent que les caissettes de laboratoire reproduisent bien les caissettes d'usine. Ici, nous comparons les caissettes obtenues avec les pâtes d'usine avec les caissettes obtenues avec les pâtes de laboratoire, et on observe qu'il n'y a pas de différence significative entre les moyennes. Même si les coefficients de corrélation sont bas, l'écart entre les valeurs des poids et entre les valeurs des résistances (exprimées en fonction du poids et de l'épaisseur des caissettes) est petit (figures 7.11 et 7.12). La résistance des caissettes exprimée en fonction du poids ne se reproduit pas bien, et la différence entre moyennes est significative (figure 7.13).

TABLEAU 7.3 Résultats des tests de comparaison de moyennes

Pair	t_e	t_c	Définitions significatives entre moyennes	r
SD_U ₁ – SD_L ₂	25,94	1,699	oui	-0,54
SD_L ₁ – SD_L ₂	1,214	1,697	non	0,77
MES_U ₁ – MES_L ₂	50,82	1,699	oui	0,75
MES_L ₁ – MES_L ₂	26,22	1,697	oui	0,71
CoE_U ₁ – CoE_L ₂	16,99	1,699	oui	0,64
CoE_L ₁ – CoE_L ₂	319,88	1,697	oui	0,49
CeE_U ₁ – CeE_L ₂	2,63	1,699	oui	0,78
CeE_L ₁ – CeE_L ₂	0,52	1,697	non	0,78
CeM_U ₁ – CeM_L ₂	0,12	1,697	non	0,93
CeM_L ₁ – CeM_L ₂	1,36	1,697	non	0,93
pL ₁ – pL ₂	1,26	1,697	non	0,56
ML/g ₁ – ML/g ₂	42,68	1,697	oui	0,43
ML/vs ₁ – ML/vs ₂	0,27	1,697	non	0,62

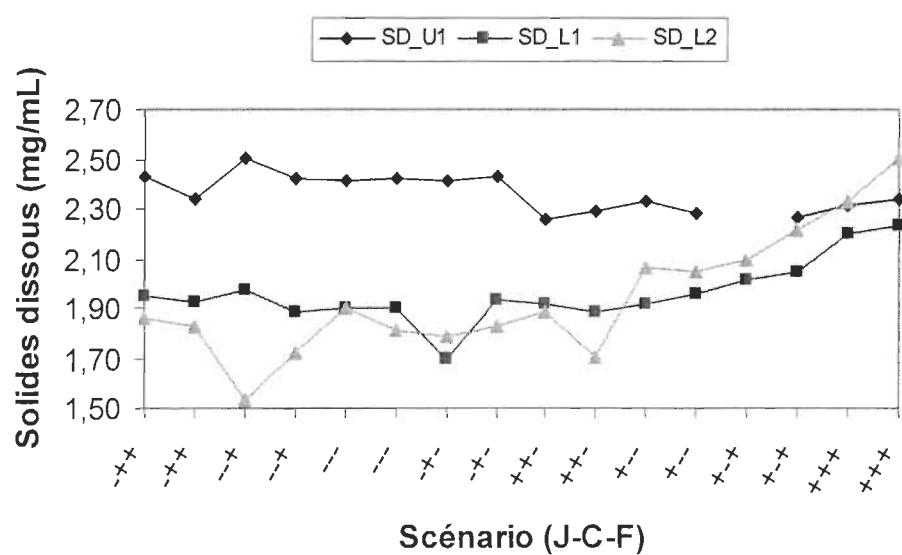


FIGURE 7.6 Variation des solides dissous des essais d'usine et de laboratoire.

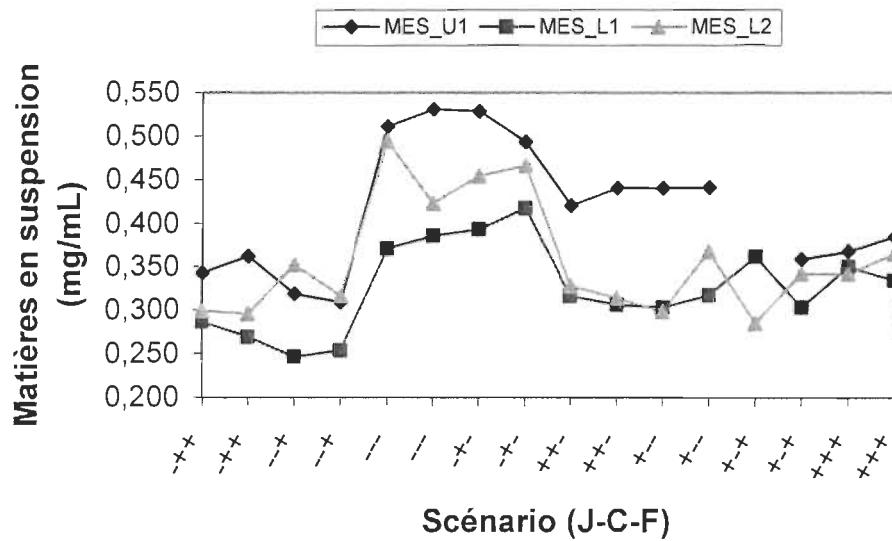


FIGURE 7.7 Variation des matières en suspension des essais d'usine et de laboratoire.

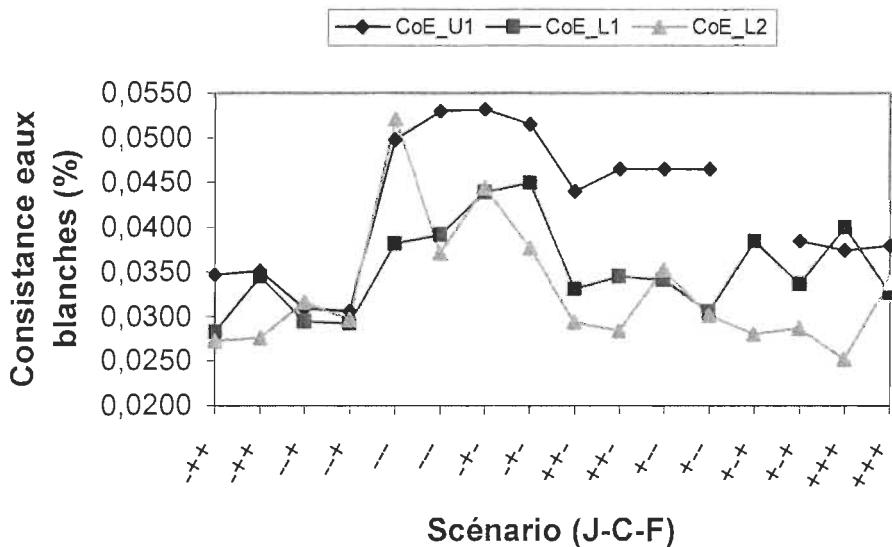


FIGURE 7.8 Variation de la consistance des eaux blanches des essais d'usine et de laboratoire.

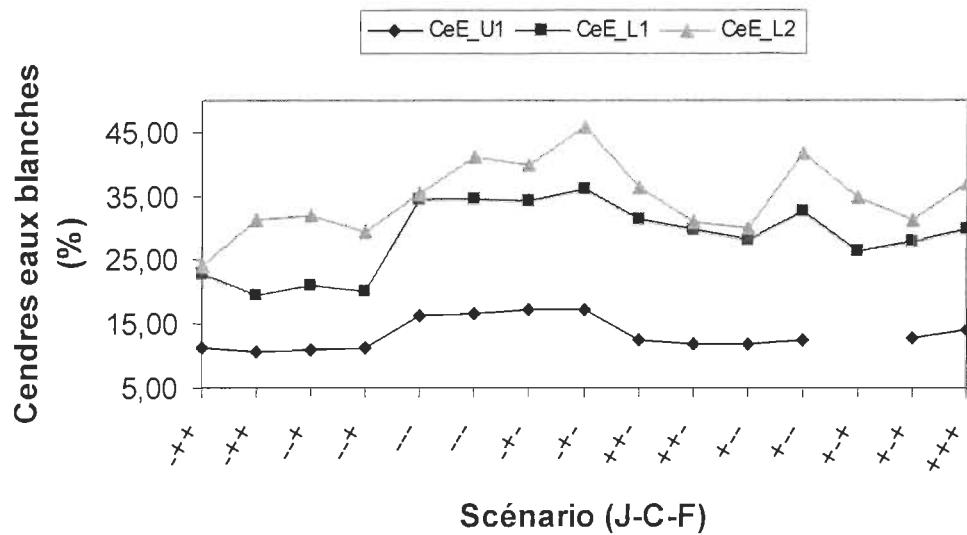


FIGURE 7.9 Variation des cendres des eaux blanches des essais d'usine et de laboratoire.

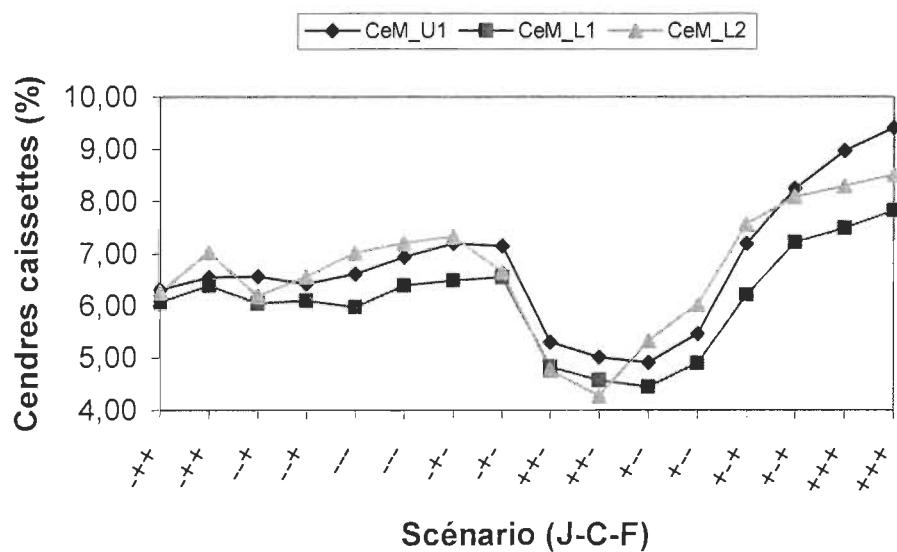


FIGURE 7.10 Variation des cendres des caissettes d'usine et de laboratoire.

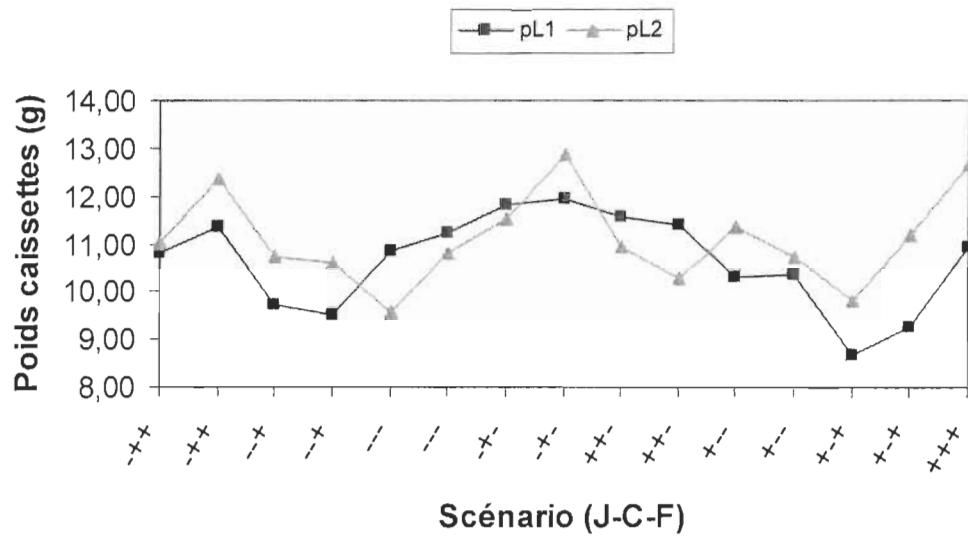


FIGURE 7.11 Variation du poids des caissettes de laboratoire.

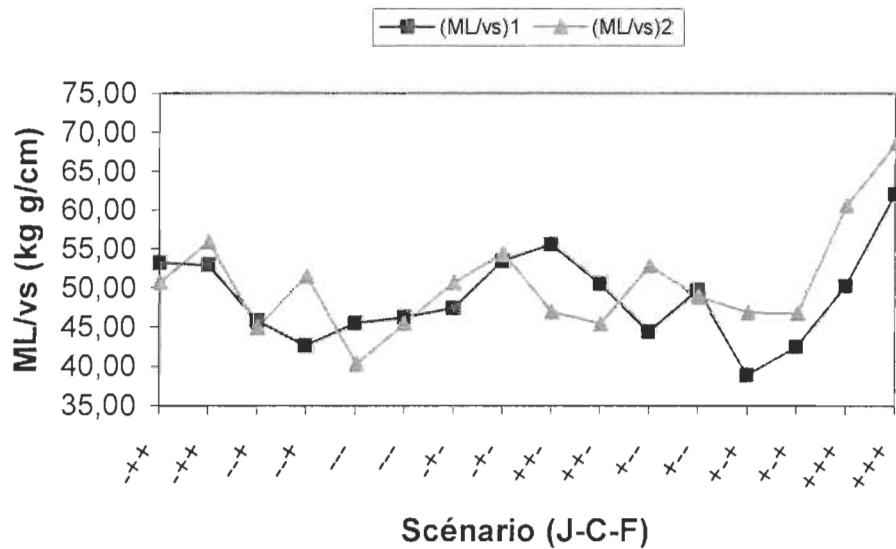


FIGURE 7.12 Variation de la résistance des caissettes en fonction de leur poids.

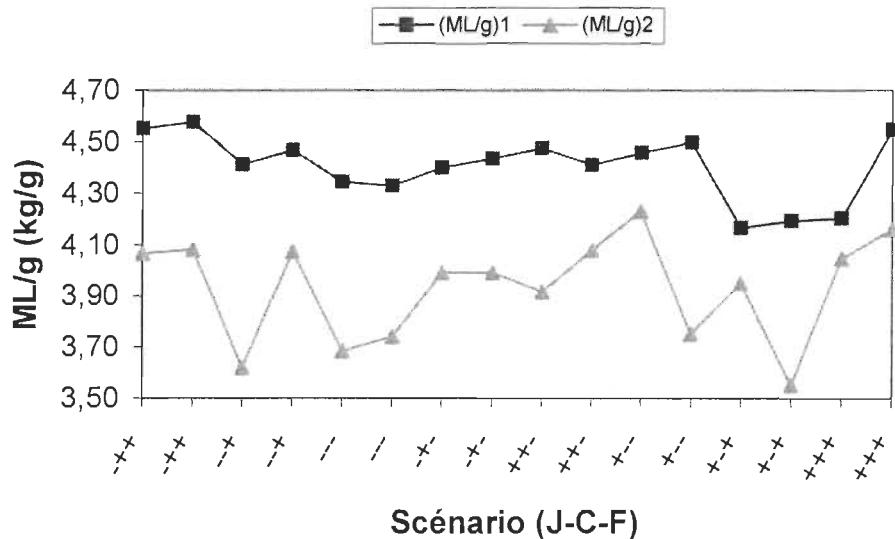


FIGURE 7.13 Variation de la résistance des caissettes en fonction de leur poids et de l'épaisseur de ces parois.

7.4. Conclusions

- L'influence que les variables quantité de papier journal, consistance au cuvier de tête de machine et pourcentage de floculant ont dans le procédé industriel sur les propriétés des pâtes, des eaux et des caissettes est reproductible en laboratoire.
- Les composantes principales qui expliquent l'influence de ces trois variables sont reliées aux propriétés physiques des feuilles, au contenu en cendres des pâtes, à la composition des eaux blanches et la résistance des caissettes. Ces composantes sont déterminées, à leur tour, par la qualité de la matière première alimentant le système, le floculant et le poids des caissettes, respectivement.

En terminant, le chapitre suivant présentera un bilan des travaux (chapitres 3 à 7) ainsi qu'une discussion des résultats et des conclusions les plus importants. Les conclusions finales et des recommandations pour des travaux futurs sont aussi données.

Chapitre 8 - Conclusion

8.1. Bilan de travaux

Même de nos jours, la fabrication et les propriétés d'un produit en trois dimensions à partir de fibres cellulosiques et qui sert autant à l'emballage qu'à la protection de produits divers, ont été très peu étudiées. C'est ainsi que, faute de références, nous avons abordé le sujet en réalisant simultanément et/ou concurremment différentes étapes en usine et en laboratoire. Chaque étape nous a permis de mieux comprendre et nous a aidé à concevoir l'étape suivante.

Essais préliminaires

La première étape consistait en une exploration des matières premières, des pâtes et du produit final d'une usine de référence. Les résultats obtenus nous ont permis :

- D'évaluer la qualité de la pâte provenant de différents types de papiers, leurs mélanges et l'influence de certains produits chimiques.
- De détecter des différences entre les pâtes de cuvier de réserve et les pâtes provenant du cuvier de tête de machine (ou de la désintégration des caissettes humides). Ces différences ont été attribuées aux additifs chimiques ajoutés.
- De détecter des différences entre les pâtes et les produits finaux de deux machines qui utilisaient la même matière première.
- De détecter des différences dans la composition de la matière première. Ces différences ont été observées pour des journées d'échantillonnage distinctes et à l'intérieur d'une même journée.

Prototype de moulage en laboratoire

Le besoin de tester à petite échelle, les variables du procédé de moulage, nous a encouragé à développer un prototype de formation de caissettes en laboratoire. Dans cette étape, nous avons réussi à adapter une section de moulage provenant d'un moule industriel à un réceptacle étanche lequel permet autant de faire le vide nécessaire à la formation que d'insuffler l'air nécessaire au décollage de la caissette.

Plan d'essais en laboratoire

Après la mise au point d'une technique de moulage en laboratoire, nous étions prêts pour tester un certain nombre de variables industrielles à petite échelle. Ainsi, l'application d'un design de tamisage en laboratoire en utilisant des papiers de l'usine et les produits chimiques utilisés nous a permis de sélectionner trois variables sur les sept analysées. Les résultats nous ont indiqué que le papier journal, le floculant et la consistance de désintégration étaient les principaux responsables de la qualité de la pâte, des caissettes et des eaux blanches.

Essais en usine

Dans l'étape suivante, nous avons réalisé des essais à échelle industrielle dans l'usine de référence. Les variables furent le papier journal, le floculant et la consistance de la pâte en cuvier de tête de machine. Les résultats nous ont indiqué que chaque type de matière première se comporte comme un système différent, ayant de l'influence sur les propriétés des pâtes, des eaux blanches et des caissettes. En même temps, les pâtes obtenues en usine furent formées en caissettes en laboratoire. Ces caissettes et les eaux blanches obtenues pendant leur formation représentaient bien les caissettes et les eaux d'usine.

Reproductibilité de conditions d'usine en laboratoire

La dernière étape consistait en la vérification de la reproductibilité en laboratoire de conditions d'usine variées. À cet effet, nous avons utilisé les pâtes de cuvier de réserve de l'étape antérieure comme matière première. Le temps écoulé entre la cueillette de la pâte et les essais (trois mois) est sûrement partiellement responsable de l'absence de reproductibilité observée dans certains scénarios. Même si la pâte était conservée au froid pendant cette période, elle commençait à montrer des signes de décomposition. Malgré tout, les variables de même que les résultats industriels obtenus ont été reproduits en laboratoire, à notre satisfaction.

Matières premières

Tout au long de ces étapes, le principal protagoniste est la qualité de la matière première. Les intervenants « secondaires » jouent un rôle qui dépend de la matière première, et ils sont : le floculant et les caissettes et leur procédé de formation.

Depuis le début du travail, nous avons utilisé deux types de matières premières : le papier journal et le papier de bottins téléphoniques. Cependant, des différences en qualité furent détectées non seulement entre les deux mais aussi à l'intérieur de chaque catégorie.

Comme références de la qualité d'une matière première, nous prenons les caractéristiques fibreuses : distribution de la longueur de fibres, longueur de fibres moyenne pondérée en poids, angle de cassure et courbure de fibres, l'indice d'égouttage; et les propriétés des feuilles standards et de 3 g : volume spécifique, les diverses résistances (à la traction, à la déchirure, à l'éclatement, à la compression en anneau, à la compression STFI), la rigidité, le TEA, le coefficient de diffusion de la lumière et la blancheur.

Au cours du premier échantillonnage (chapitre 3), les papiers recueillis et désintégrés en laboratoire qui ont donné des pâtes les plus résistantes sont le papier de bottin téléphonique (Bott) et le papier journal avant consommation (Ja) de même que leur mélange. Par contre, le papier journal post consommation (Jp) et son mélange avec le bottin téléphonique présentaient des pâtes moins résistantes. Il faut remarquer ici que le type de papier journal post consommation comprenait essentiellement des papiers de dépliants publicitaires. Dans ce cas, l'augmentation de la résistance des feuilles, s'accompagne d'une augmentation du volume spécifique et de l'indice d'égouttage. Elle est favorisée par les fractions R14 et R28 (associées à Bott et à Ja), et défavorisé par l'augmentation des fractions de fibres plus courtes, de l'angle de cassure et de la courbure de fibres (associées à Jp). Ces trois sortes de papiers sont les matières premières des pâtes d'usine (pâtes de cuvier de réserve et pâtes obtenues par désintégration des caissettes humides) de la première journée d'échantillonnage. Ces pâtes se comportent de façon similaire aux pâtes de laboratoire, sauf que, dans ce cas, l'indice d'égouttage varie en sens contraire aux propriétés physiques.

Durant la deuxième journée d'échantillonnage, les pâtes d'usine étaient composées par un mélange de Bott/Jp, tandis que la troisième journée d'échantillonnage, la matière première d'usine était 100 % Jp. Les pâtes de ces deux journées d'échantillonnage furent comparées ensemble. Les pâtes Bott/Jp sont plus résistantes, et les pâtes 100 % Jp sont responsables de l'augmentation de fibres courtes et fines, de l'égouttage, de l'angle de cassure et de la courbure de fibres.

Dans l'étape suivante du travail (chapitre 5), nous avons utilisé des papiers provenant d'un nouvel échantillonnage en usine pour étudier différentes variables reliées au procédé. À ce moment, la qualité « papier journal post consommation » était un mélange de différentes sortes de papiers : cartons alimentaires, dépliants publicitaires, vieux journaux, magazines et papiers d'emballage de cadeaux entre autres. La qualité « bottin » comprenait

exclusivement des annuaires téléphoniques. Ces derniers provenaient d'un autre pays (Mexique) et ne contenaient pas de feuilles couchées de publicité ni de feuilles jaunes. En général, autant le bottin que le papier journal ont des propriétés de résistance inférieures à celles observées pour ces types de papier au chapitre 3. La variable « matière première » fut analysée à deux niveaux : 100 % Jp et pâte mélangée Jp/Bott. Les résultats indiquent que la pâte provenant de 100 % Jp était la responsable principale des conditions moins favorables au développement des résistances physiques et du volume spécifique des feuilles et de même que des contenus élevés de fines (FQA et P200), de fibres courbées et retournées et des cendres des pâtes.

Dans la partie finale du travail (chapitre 6), nous avons échantillonné directement les pâtes de cuvier de réserve. Les essais comprenaient deux types de matières premières : les pâtes mélangées « 50 % Jp / 50 % Bott » et les pâtes « 100 % Jp ». Lors de l'analyse des pâtes une variation importante de qualité des propriétés de la matière première fut notée. Pour suivre les variations de cette qualité initiale et ainsi pouvoir la dissocier de l'effet de nos variables, nous avons dû définir deux indices de qualité. L'indice bas est constitué des propriétés pour lesquelles une valeur basse est souhaitable tandis que l'indice haut couvre les propriétés où l'on veut une valeur la plus élevée possible. Leur variation nous permet d'évaluer la variation simultanée de plusieurs caractéristiques de la pâte. De ces deux indices, l'indice de qualité haut (InH) est l'indice qui varie le moins à l'intérieur des essais de chaque type de matière première, et il est visiblement supérieur pour la pâte 100 % journal. L'indice de qualité bas (InB) varie de façon erratique pour la pâte en mélange, et pour la pâte 100 % journal. Il commence à une valeur haute et décroît continuellement, pour terminer avec une valeur plus basse que les valeurs observées pour la pâte en mélange. Quand ces deux pâtes sont évaluées ensemble (chapitre 7), nous réalisons que, même si la pâte 100 % journal possède les valeurs plus élevées de courbure et angle de cassure des fibres, elle se comporte comme celle la plus adéquate pour développer la résistance physique des feuilles, et comme celle qui a les valeurs de l'InH et de la fraction

R14 les plus élevées. Ici, les résistances physiques se développent avec une augmentation de l'indice d'égouttage, mais avec une diminution du volume spécifique.

En résumé, en ce qui touche aux propriétés de résistance physique, nous ne pouvons pas affirmer que le papier de bottins téléphoniques est toujours d'une qualité supérieure au papier journal post consommation. Si nous regardons les résultats de deux propriétés, celui de la résistance à la déchirure (qui dépend fortement du degré de liaison entre fibres) et celui de la résistance à la traction (qui dépend plus tôt de la longueur de fibres) la pâte mélangée 50/50 (chapitres 6 et 7) nous constatons la présence de valeurs très basses de ces propriétés, lesquelles se comparent à la pâte de journal post consommation du chapitre 3 en déchirure, et à celles de la pâte de journal post consommation du chapitre 5 en traction. La pâte 100 % journal (chapitre 6 et 7), quant à elle, présente des valeurs de traction et de déchirure qui se comparent à quelques pâtes mélangées (pâtes CR5 et CR6 du chapitre 3).

La longueur de fibres moyenne pondérée en poids est une propriété qui ne varie pas beaucoup entre les différentes pâtes étudiées. Cependant, la distribution de la longueur de fibres, mesurée par les différentes fractions Bauer Mc Nett et les fines FQA, varie d'une pâte à l'autre. Par exemple, pour les différents types de matières premières, nous avons observé des valeurs de R14 comprises entre 6 % et 14,7 %, de P200 entre 23,6 % et 41,8 %, et de 6,67 % et 15,5 % pour les fines FQA. La qualité de ces fractions est variable aussi, mais normalement, la capacité de former des liaisons était donnée par les fractions de fibres plus longues (fractions R14, R28 et R48) tandis que les fines nuisent (fraction P200 et fines FQA). Les fractions intermédiaires (R100 et R200) ont un comportement qui varie, et dans plusieurs cas, sans influence détectable.

Quant à la composition de différents types de fibres, nous avons détecté aussi des différences entre les pâtes étudiées. Par exemple, la quantité de pâte chimique de résineux variait entre 7 et 30 %, celle de pâte chimique de feuillus entre 2 et 17 %, et celle de pâte mécanique de résineux entre 62 et 88 %. Nous

ne sommes pas capables d'établir un lien direct entre les propriétés des feuilles et la composition fibreuse de la matière première. Cependant, comme on verra plus loin, la composition pourrait avoir un lien avec l'action du floculant.

Le floculant

Nous pouvons ici commencer à parler du deuxième protagoniste : le floculant.

Dans les essais préliminaires, l'effet de trois produits chimiques (floculant, coagulant et conditionneur) sur les propriétés d'une pâte mélangée bottin/journal avant consommation fut étudié. Les trois produits chimiques diminuent les résistances physiques de la pâte, en même temps que le contenu en fines et le volume spécifique. Le conditionneur et le floculant influent sur l'indice d'égouttage, en l'augmentant. Dans tous ces cas, c'est le floculant qui exerce le plus d'influence sur ces propriétés. L'effet des produits chimiques était aussi observé dans les pâtes d'usine : les pâtes obtenues après désintégration des caissettes humides (pâtes MH) ne sont pas définies dans la même composante du modèle PCA que les pâtes de cuvier de réserve (CR), ce qui indique qu'elles n'ont pas les mêmes caractéristiques. Ces pâtes étaient affectées dans leurs propriétés physiques et/ou dans leur égouttage. Le scénario #7 (troisième journée d'échantillonnage) se présentait comme un cas particulier. La proximité des pâtes CR7 et MH7 dans le modèle PCA nous indiquait que le floculant n'agissait pas. Il faut se souvenir ici que ces échantillons furent pris à un moment où la machine de moulage présentait des problèmes (les caissettes ne décollaient pas) et que la matière première était 100 % journal post consommation. Quand nous avons analysé la composition fibreuse de cette pâte, nous avons observé qu'elle contenait un pourcentage plus élevé de pâte chimique de feuillus que toutes les autres pâtes analysées.

L'identification en laboratoire des facteurs importants (chapitre 5), nous a conduits à identifier le floculant comme le produit chimique dominant. Sa présence favorisait la rétention de matières en suspension et de fines dans la pâte, en donnant des eaux blanches moins chargées. Il faut remarquer ici que la

quantité de cendres du papier journal utilisé était assez élevée (16,3 %), et que la dose maximale de floculant employé était aussi élevée (0,6 kg/tonne).

Lors de l'évaluation des essais en usine, nous avons détecté que le floculant agissait différemment selon la matière première. L'efficacité du floculant dans la rétention fut estimée en fonction des mesures des matières en suspension, de la consistance et des cendres des eaux blanches de même que des scénarios avec et sans floculant. En même temps, les valeurs de l'indice d'égouttage et du temps de drainage des feuilles de 3 grammes se montrent comme mesures indirectes adéquates pour indiquer l'efficacité du floculant.

Le floculant agit de façon effective en diminuant les matières en suspension et les charges quand la matière première est la pâte mélangée bottin/journal post consommation. Quand la matière première est 100 % journal post consommation, le floculant retient les matières en suspension, mais avec une efficacité moindre, et il est inefficace pour retenir les cendres. Pour ce dernier point il faut se souvenir que, en même temps que le floculant est ajouté (quatre derniers scénarios), le contenu en cendres de la pâte 100 % journal entrant dans le système augmente, et atteint une valeur approximative de 9 %. Mais cette valeur n'est pas considérablement plus élevée que les cendres de la pâte mélangée (autour de 6 %), donc nous ne pouvons pas attribuer seulement à la quantité de cendres, l'inefficacité dans la rétention. Si nous regardons la composition fibreuse des pâtes, dans les quatre derniers scénarios la quantité de pâte chimique de feuillus augmente considérablement. Probablement que le floculant est moins efficace pour retenir les matières en suspension avec ce type de fibres. En même temps, les matières inorganiques introduites avec ce type de papiers, sont aussi plus difficiles à retenir. Ce comportement peut être dû à une variation de la densité de charge superficielle des fines, des charges ou des encres ou à une variation de la charge des solides dissous et colloïdaux.

La détermination de la qualité des eaux blanches obtenues en laboratoire ne donne pas les mêmes valeurs des paramètres évalués. Ici nous pouvons

commencer à parler du troisième intervenant : les caissettes et leur procédé de formation, autant en usine qu'en laboratoire.

Les caissettes et leur procédé de formation

Dans l'évaluation des premiers échantillonnages en usine, nous avons trouvé que les caissettes les plus résistantes ne correspondaient pas aux pâtes plus résistantes, et que les conditions moins favorables à la résistance de feuilles n'étaient pas nécessairement défavorables à la résistance des caissettes.

Quand nous avons réalisé les essais de tamisage de variables en laboratoire, la résistance des caissettes était favorisée par les conditions qui privilégiaient une bonne rétention de matières en suspension et de cendres : la présence du floculant et un niveau bas de papier journal post consommation (c'est-à-dire : utilisation d'une pâte mélangée de journal post consommation et de bottin).

Dans les essais en usine et dans les essais de validation au laboratoire, nous avions ajouté une variable qui n'était pas encore étudiée: la consistance de la pâte en cuvier de tête de machine. À ce moment, nous avons conclu que la résistance des caissettes (d'usine et de laboratoire) était liée à son poids, et que ce dernier était déterminé par la consistance de formation. Ces relations sont plus significatives quand la matière première était 100 % papier journal post consommation et quand le floculant est présent. De même, l'épaisseur, le poids et la résistance des caissettes se reproduisaient mieux en laboratoire sous ces conditions.

En même temps, nous avons déterminé que la façon la plus convenable d'exprimer la résistance des caissettes est celle qui tient compte de l'épaisseur et du poids de la caissette.

Cependant, les eaux blanches obtenues pendant la formation des caissettes en laboratoire reproduisent moins bien les valeurs obtenues en usine. Les solides dissous, les matières en suspension et la consistance des eaux blanches de laboratoire sont plus basses que ceux d'usine, tandis que les cendres sont plus

élevées. Ce résultat est probablement dû à l'impact de la fermeture des circuits en usine : l'équilibre dans la composition des eaux blanches est plus difficile à atteindre en laboratoire. De toute façon, il importe de signaler quelques particularités des eaux blanches qui dépendent de la matière première. En analysant chaque propriété des eaux blanches de laboratoire en détail, nous nous apercevons que certains résultats dépendent de la matière première :

- Les solides dissous augmentent (quand ils devraient diminuer) pour la pâte 100 % journal dans les deux cas des eaux blanches obtenues en laboratoire, même si la dose de coagulant utilisée en usine est maintenue.
- Les valeurs des matières en suspension suivent les tendances des valeurs d'usine quand la pâte est mélangée. De plus, les valeurs sont plus proches de celles d'usine quand les caissettes se forment avec recirculation d'eau (chapitre 7). Quand la pâte est 100 % journal, la tendance des eaux d'usine se reproduit bien pour les scénarios sans floculant, mais il n'y a pas d'influence de la recirculation des eaux en laboratoire. Dans les scénarios avec floculant, il semble que le floculant n'agit pas, car les valeurs ressemblent à celles des scénarios sans floculant.
- Des résultats similaires sont trouvés pour les valeurs de la consistance des eaux blanches. Cependant, quand la formation en laboratoire est réalisée avec recirculation d'eau, les scénarios avec floculant se reproduisent un peu mieux.
- Les cendres des eaux blanches de laboratoire suivent bien les tendances d'usine, mais elles sont beaucoup plus élevées.

8.2. Conclusions

- La qualité des deux types de matières premières, le papier journal post consommation et le papier de bottin téléphonique, n'est pas constante. Des variations importantes dans la distribution de fibres, dans les propriétés de résistance physique, dans le contenu en cendres et dans la composition fibreuse ont été observées.
- Les pâtes 100 % journal post consommation présentent toujours les valeurs d'angle de cassure et de courbure la plus élevées.
- Les propriétés des feuilles de 3 g ne sont pas adéquates pour prédire la résistance des caissettes.
- Les indices de qualité s'avèrent adéquats pour suivre la qualité entrante d'une pâte. Cependant, nous considérons qu'il serait utile d'inclure dans leur détermination aussi les caractéristiques des eaux. Par exemple, on pourrait ajouter dans l'indice de qualité bas, les valeurs des matières en suspension et des cendres des eaux blanches.
- Le floculant et/ou une dose basse (0,17 kg/tonne) sont inadéquats pour la rétention de matières en suspension et de cendres quand la matière première présente certaines caractéristiques.
 - Les propriétés similaires entre la pâte de cuvier de réserve et la pâte provenant de la désintégration de caissettes humides obtenues dans une journée où la machine de moulage présentaient des problèmes, ce qui nous a montré que le floculant n'agissait pas. Ce jour, la matière première consistait en 100 % journal post consommation, et la composition fibreuse indiquait un contenu élevé de pâte chimique de feuillus.
 - Dans l'évaluation d'autres scénarios comprenant 100 % journal post consommation comme matière première nous avons observé

aussi que les fines et les contaminants sont plus difficiles à floculer : moins de rétention de matières en suspension, rétention nulle de cendres et rétention nulle en laboratoire. Ces pâtes contenaient aussi un pourcentage de pâte chimique élevé.

Dans ces deux cas, trois hypothèses sont possibles : (1) la dose de floculant est insuffisante pour ce type de matière première, (2) la demande cationique des eaux blanches augmente considérablement et consomme une partie du floculant destiné à la rétention, (3) le floculant est inadéquat pour ce type de matière première. Si le floculant est inadéquat, les raisons pourraient être une qualité différente de contaminants (par exemple, des matières inorganiques provenant autant des charges de remplissage comme des pigments des encres) et/ou la qualité différente de fines (cellules de parenchyme provenant de la pâte chimique de feuillus présentes en proportion supérieure).

- L'action du floculant sur les matières en suspension peut être suivie par la mesure des matières en suspension ou la consistance des eaux blanches, ou par l'indice d'égouttage ou le temps de drainage de la pâte de cuvier de tête de machine. Dans la mesure du temps de drainage, l'utilisation de 3 grammes de pâte et un formette standard de feuilles rondes est suggérée.
- La résistance à la compression des caissettes peut être mesurée en utilisant un appareil type Instron, muni d'une cellule de charge de 500 kg et relié à un ordinateur. Une vitesse d'essai de 20 mm/sec et une fréquence d'enregistrement de 10 points/sec sont proposées. Comme charge de rupture, le premier point où la pente de la courbe charge/déformation traverse le zéro est adéquat. La résistance à la compression représente bien par la charge de rupture multipliée par le poids des caissettes et divisée par l'épaisseur de ses parois. Sont

recommandées au moins dix lectures d'épaisseur par caissette, et au moins dix lectures de charge par type de pâte.

- La résistance des caissettes est directement reliée à son poids. Le poids, à son tour, est déterminé par la consistance de la pâte en tête de machine.
- Les caissettes de laboratoire représentent bien le comportement des caissettes d'usine. Dans le futur, la technique de moulage utilisée peut servir autant à évaluer différentes matières premières fibreuses et non fibreuses que l'influence de variables de formation.
- Les relations résistances caissette/poids/consistance de formation, et les relations « poids caissette laboratoire/poids caissette usine », « épaisseur parois caissette laboratoire/épaisseur parois caissette usine » et résistances « caissette laboratoire/caissette usine » sont meilleures pour un type de pâte, et nous indique que, dans ce cas, la formation est plus homogène. Cette pâte est la même pâte 100 % journal qui présentait des problèmes de rétention. Probablement, la proportion supérieure de fibres chimiques aide à la formation de liens et à la formation d'un réseau fibreux plus uniforme.
- Les cendres des caissettes d'usine sont bien représentées par les mesures des cendres des pâtes des feuilles standards fabriquées avec recirculation d'eau ou par les cendres des caissettes de laboratoire.
- Les propriétés des eaux blanches obtenues dans la formation des caissettes en laboratoire suivent bien les tendances observées en usine. Cependant, dans les cas où le floculant se montrait moins effectif en usine, la rétention était encore plus basse ou nulle en laboratoire. En même temps, et pour la même matière première, nous avons observé une augmentation des solides dissous des eaux de laboratoire (inefficacité du coagulant). Ces deux situations nous indiquent que

possiblement les conditions d'agitation ou le taux de recirculation d'eau blanche de laboratoire sont inadéquates. La mesure de la demande cationique est recommandée pour permettre de suivre l'effet de la fermeture du circuit d'eaux blanches.

- L'influence des variables de procédé sur la qualité des pâtes et des caissettes a été démontrée. Cependant, nous n'avons pas été capables d'établir le lien entre les propriétés des feuilles et les propriétés des caissettes. L'utilisation de matières premières plus différentes (par exemple, papier journal et carton ondulée) devrait donner les relations recherchées.
- Les méthodes statistiques PCA et PLS utilisées ont été des outils d'évaluation fortement appréciés dans ce travail. Elles nous ont permis d'étudier plusieurs variables simultanément. Elles nous ont permis aussi d'établir des liens entre variables qui auront été difficiles de relier avec la méthode d'évaluation de multivariables la plus utilisée : la régression multiple.

Suite à ces conclusions, quelques recommandations peuvent être faites :

- Des travaux futurs pour identifier le floculant et/ou la dose adéquate quand la matière première présente un contenu élevé de pâte chimique de feuillus (10 % et plus) sont nécessaires.
- Un changement dans la méthode d'agitation de la pâte dans le cuvier utilisé pour former les caissettes de laboratoire aiderait. Une possibilité est de localiser les agitateurs dans le fond du réceptacle. À notre avis, cette position devrait permettre une agitation uniforme tout en diminuant la vitesse de rotation.
- La technique de coloration différentielle de fibres est simple et rapide. Elle pourrait être utilisée pour une identification première de la qualité de la pâte entrant au système.

- L'établissement des seuils d'indices de qualité pour différents types de matières premières permettrait d'évaluer la variabilité de la pâte entrant. Étant donné que la production dans une fabrique a besoin d'un « feedback » rapide, les indices de qualité pourraient être définies seulement avec des propriétés de courte détermination, qui permettraient d'agir sur les variables du système avant que la pâte n'arrive à la tête de machine (temps durant lequel la pâte est stockée dans le cuvier de réserve). Par exemple, un indice de qualité haut pourrait inclure la longueur moyenne de fibres et le pourcentage de fines déterminé par un appareil type FQA, l'indice d'égouttage, et la quantité de pâte mécanique déterminée par coloration différentielle. L'indice de qualité bas pourrait inclure l'angle de courbure et la courbure de fibres (ces deux valeurs sont obtenues dans la même détermination que les fines et la longueur de fibres quand nous utilisons un appareil FQA), les cendres des pâtes (900 °C) et le pourcentage de pâte chimique de feuillus.

ANNEXE A Résultats chapitre 3

Reprise des tableaux 3.1, 3.2 et 3.4 où sont signalées la nomenclature de ce chapitre

	Nomenclature	Pâte	Additifs
Premier échantillonnage			
Bottins téléphoniques	Bott		
Journal post consommation	Jp		
Journal avant consommation	Ja		
Cuvier de réserve	CR1, CR2	Bott+Jp+Ja	
Cuvier de tête de machine A et caissettes humides	Ta1, Ta2, MHa1, MHa2	Bott+Jp+Ja	F, Cond.
Cuvier de tête de machine B et caissettes humides	Tb1, Tb2, MHb1, MHb2	Bott+Jp+Ja	F, Cond., C, antimousse
Deuxième échantillonnage			
Cuvier de réserve	CR3, CR4, CR5, CR6	Bott+Jp	
Cuvier de tête de machine A et caissettes humides	Ta3, Ta4, MHa3, MHa4	Bott+Jp	F, Cond., C, antimousse
Cuvier de tête de machine B et caissettes humides	Tb5, Tb6, MHb5, MHb6	Bott+Jp	F, Cond., C, antimousse
Cuvier de tête de machine C et caissettes humides	Tc3, Tc4, MHc3, MHc4, Tc6, MHc6	Bott+Jp	F, Cond., C, antimousse, colorant
Troisième échantillonnage			
Cuvier de réserve	CR7	Jp	
Cuvier de tête de machine A et caissettes humides	Ta7, MHa7	Jp	F, Cond., C, antimousse

a, b, c : échantillon de la machine A, B ou C

CR : pâte de cuvier de réserve

T : pâte cuvier de tête de machine

MH : caissettes humides

F : flocculant

C : coagulant

Cond. : conditionneur

Nomenclature des pâtes	Description de la source
Bottin	Bottins téléphoniques
Ja	Journaux avant consommation
Jp	Journaux post consommation
Bottin/Ja	Mélange 50 % Bottins téléphoniques et 50 % journaux avant consommation
Bottin/Jp	Mélange 50 % Bottins téléphoniques et 50 % Journaux post consommation
Bottin/Ja + C	Mélange Bottin/Ja + 10 % s.f.s. coagulant
Bottin/Ja + F	Mélange Bottin/Ja + 10 % s.f.s. floculant
Bottin/Ja + C/F	Mélange Bottin/Ja + 10 % s.f.s. coagulant + 10 % s.f.s. floculant
Bottin/Ja + Cond.	Mélange Bottin/Ja + 10 % s.f.s. conditionneur

Variables		Observations	
Indice d'égouttage (mL)	égoutt	Bottins téléphoniques	Bott
Fines pondérées en poids (%)	fines	Journaux avant consommation	Ja
Longueur de fibres pondérée en poids (mm)	If	Journaux post consommation	Jp
Courbure, longueur pondérée en poids (mm)	courb	Mélange bottins et journaux avant consommation	Bott/Ja
Indice d'angle de cassure	angle	Mélange bottins et journaux post consommation	Bott/Jp
Fraction R14 (%)	R14		
Fraction R28 (%)	R28		
Fraction R48 (%)	R48		
Fraction R100 (%)	R100		
Fraction R200 (%)	R200		
Fraction P200 (%)	P200		
Volume spécifique : feuilles 1,2 g (cm ³ /g)	vs		
Indice d'éclatement (kPa m ² /g)	éclat		
Indice de déchirure (mN m ² /g)	déch		
Indice de traction (N m/g)	trac		
Énergie absorbée en tension (g/cm)	TEA		
Rigidité Taber (10 ³ mN m (g/m ²))	rigid		
Résist. à la compress. en anneau (N m/g)	anneau		
Résistance à la compress. STFI (N m/g)	STFI		
Blancheur ISO (%)	bl		
Coef. de diffusion de la lumière (m ² /kg)	cd		

ÉVALUATION PAPIERS RECYCLÉS

TABLEAU A.1 Résultats de l'analyse de fibres (FQA)

	Bott	Ja	Jp	Bott/Jp	Bott/Ja	min	max	moy	écart type	MSE
Longueur de fibres pondérée en poids, mm	2,21	2,23	2,17	2,25	2,21	2,17	2,25	2,21	0,03	0,003
Fines, % pondéré en poids	7,36	15,5	13,74	10,54	10,86	7,36	15,5	11,6	3,14	9,529
Courbure, longueur pondérée en poids	0,0335	0,0475	0,047	0,04	0,0375	0,034	0,0475	0,041	0,0061	2E-05
Angle de cassure, index	0,48	0,545	0,51	0,51	0,52	0,48	0,545	0,513	0,0233	8E-04

TABLEAU A.2 Résultats de l'analyse de fibres (FQA). Pâtes avec produits chimiques

	Bott/Ja + C	Bott/Ja + F	Bott/Ja + C + F	Bott/Ja + Cond	min	max	moy	écart type	MSE
Longueur de fibres pondérée en poids, mm	2,25	2,32	2,34	2,31	2,25	2,34	2,31	0,04	0,003
Fines, % pondéré en poids	6,75	7,19	7,09	7,13	6,75	7,19	7,04	0,20	9,529
Courbure, longueur pondérée en poids	0,038	0,0365	0,039	0,036	0,036	0,039	0,037	0,001	2E-05
Angle de cassure, index	0,455	0,46	0,51	0,475	0,46	0,51	0,48	0,02	8E-04

TABLEAU A.3 Classification de fibres Bauer Mc Nett (%)

	Bott	Ja	Jp	Bott/Ja	Bott/Jp	min	max	moy	écart type	MSE
R14	14,7	11,0	3,3	12,2	8,0	3,3	14,7	9,8	4,4	15,34
14/28	24,9	26,9	19,6	25,9	23,0	19,6	26,9	24,1	2,9	6,63
28/48	16,3	11,8	14,4	17,3	16,0	11,8	17,3	15,2	2,1	3,69
48/100	11,8	17,4	12,7	12,1	13,3	11,8	17,4	13,5	2,3	4,15
100/200	6,2	6,0	8,2	6,1	7,5	6	8,2	6,8	1,0	0,79
P200	26,1	26,9	41,8	26,4	32,2	26,1	41,8	30,7	6,7	35,91

TABLEAU A.4 Propriétés des pâtes. Feuilles de 60 g/m²

	Bott	Ja	Jp	Bott/Ja	Bott/Jp	min	max	moy	écart type	MSE
Indice d'égouttage (mL)	118	122	95	119	102	95	122	111,2	12	322
Volume spécifique (cm³/g)	2,153	2,500	1,795	2,487	2,138	1,795	2,5	2,215	0,29	0,06
Indice d'éclatement (kPa * m²/g)	2,54	2,39	1,96	2,43	2,23	1,96	2,54	2,31	0,23	0,05
Indice de déchirure (mN * m²/g)	7,94	8,08	6,07	8,50	7,12	6,07	8,5	7,542	0,96	0,69
Indice de traction (Nm/g)	41,5	39,6	39,5	42,1	39,9	39,5	42,1	40,52	1,20	9,11
TEA (g/cm)	31,66	29,39	29,24	38,46	30,75	29,24	38,46	31,9	3,80	16,21

TABLEAU A.5 Propriétés des pâtes avec produits chimiques. Feuilles de 60 g/m²

	Bott/Ja + C	Bott/Ja + F	Bott/Ja + C/F	Bott/Ja + Cond	min	max	moy	écart type	MSE
Indice d'égouttage (mL)	115	158	114	141	114	158	129	19	322
Volume spécifique (cm³/g)	2,396	1,889	2,324	2,374	1,89	2,487	2,29	0,23	0,06
Indice d'éclatement (kPa * m²/g)	2,23	1,83	2,29	2,03	1,83	2,43	2,16	0,23	0,05
Indice de déchirure (mN * m²/g)	8,09	6,18	8,08	7,79	6,18	8,5	7,73	0,90	0,69
Indice de traction (Nm/g)	39,74	32,59	39,45	34,15	32,59	42,1	37,61	4,04	9,11
TEA (g/cm)	32,1	30,6	30,3	21,8	21,80	38,46	30,65	5,95	16,21

TABLEAU A.6 Propriétés optiques des pâtes sans produit chimique

	Bott	Ja	Jp	Bott/Ja	Bott/Jp	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>moy</i>	écart type	<i>MSE</i>
Blancheur (%)	42,35	46,14	50,97	44,43	47,13	42,35	50,97	46,204	3,22	15,04
Coeff. de diffusion de la lumière (m ² /kg)	59,28	54,71	70,99	49,08	67,67	49,08	70,99	60,346	9,04	142,05

TABLEAU A.7 Propriétés optiques des pâtes avec produits chimiques

	Bott/Ja + C	Bott/Ja + F	Bott/Ja + C/F	Bott/Ja + Cond	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>moy</i>	écart type	<i>MSE</i>
Blancheur (%)	42,7	41,9	42,7	43,1	41,9	43,1	42,6	0,5	15,04
Coeff. de diffusion de la lumière (m ² /kg)	54	46	60	65	46,0	65,0	56,3	8,2	142,05

TABLEAU A.8 Propriétés feuilles de 150 g/m²

	Bott	Ja	Jp	Bott/Ja	Bott/Jp	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>moy</i>	écart type	<i>MSE</i>
Résistance à la compression en anneau, (Nm/g)	11,14	12,04	12,04	12,24	12,04	11,14	12,24	11,90	0,43	0,15
Rigidité Taber, (10 ³ mNm/(g/m ²))	20,11	15,01	15,01	19,62	16,97	15,01	20,11	17,34	2,44	4,77
Résistance à la compression STFI, (Nm/g)	57,70	56,98	57,83	57,21	56,98	56,98	57,83	57,34	0,40	0,13

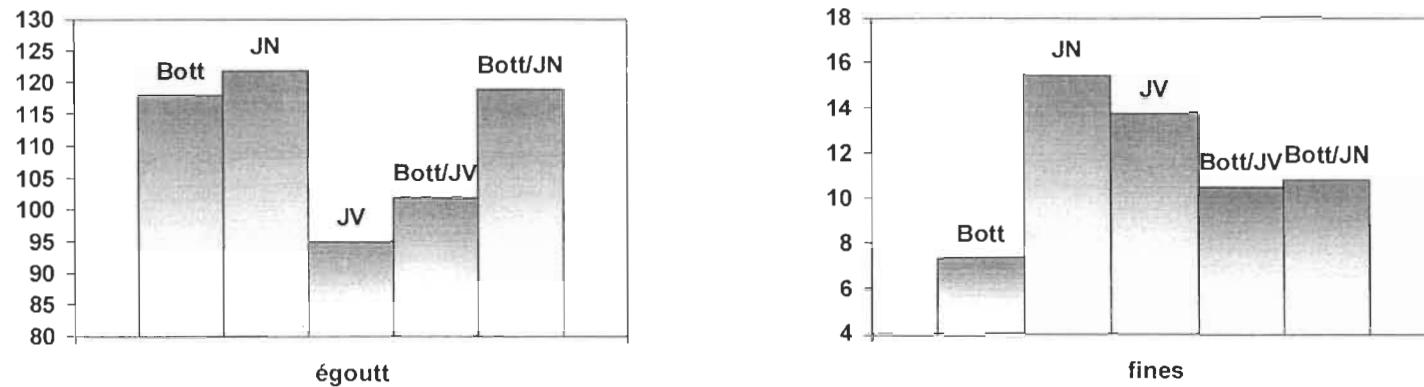


FIGURE A.1 Indice d'égouttage (mL) et fines FQA (%)

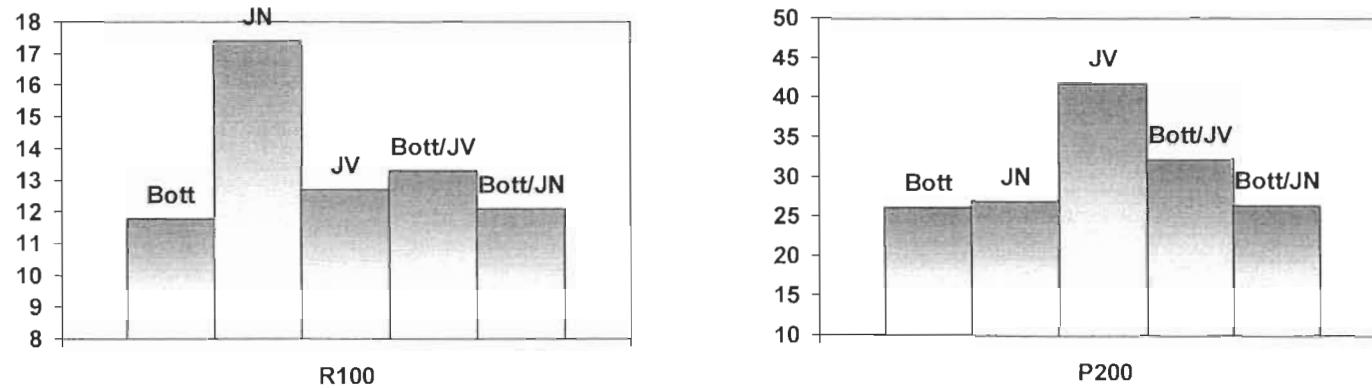


FIGURE A.2 Fractions R100 (%) et P200 (%)

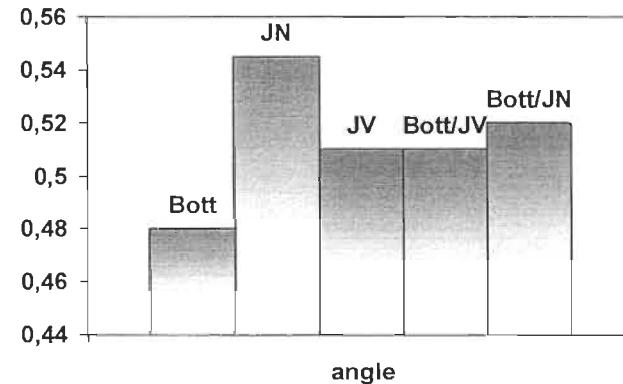
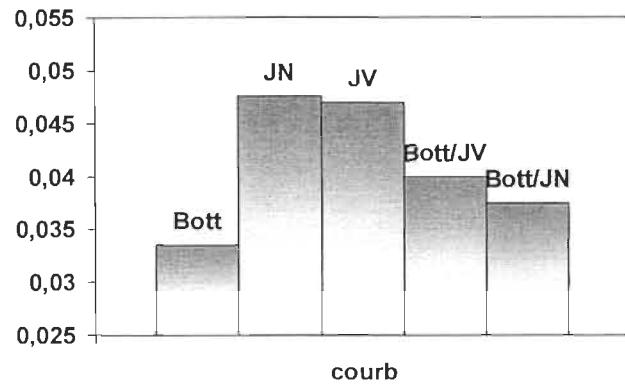


FIGURE A.3 Courbure de fibres (longueur pondérée en poids) et angle de cassure (indice)

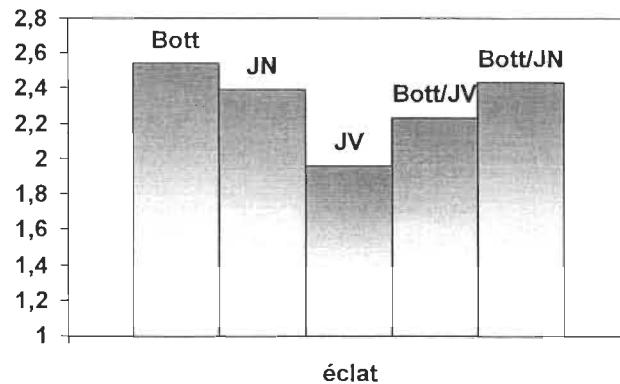
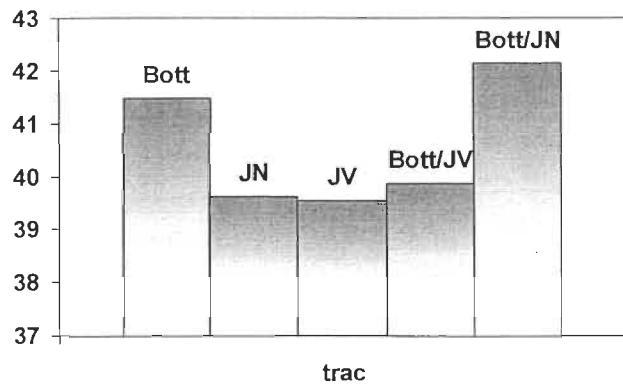


FIGURE A.4 Indice de traction (Nm/g) et indice d'éclatement (kPa*m²/g)

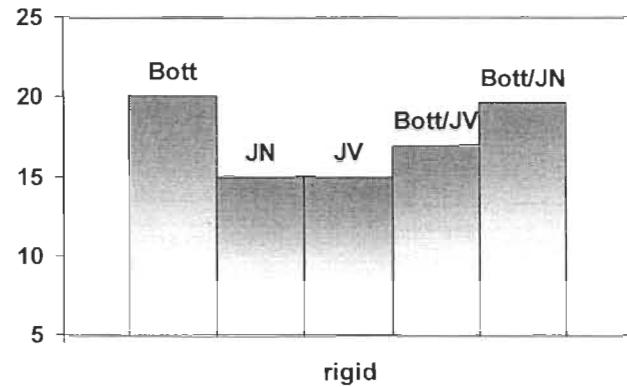
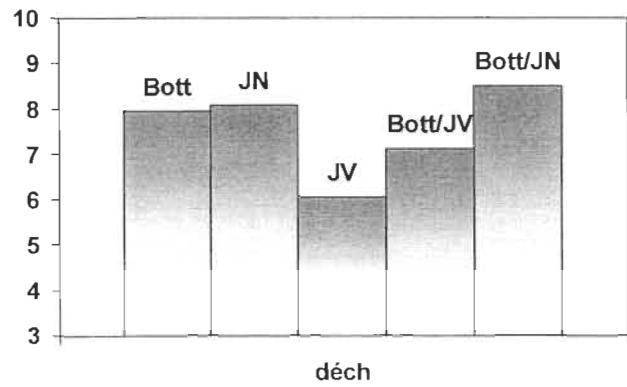


FIGURE A.5 Indice de déchirure ($\text{mN} \cdot \text{m}^2/\text{g}$) et rigidité Taber ($10^3 \text{ mNm}/(\text{g}/\text{m}^2)$)

PÂTES D'USINE

TABLEAU A.9 Siccité des caissettes humides, (%)

Première journée		a	b	c	d	Moyenne machine
	MHa1	26,81	26,74	27,41	27,74	27,18
MHa2	26,19	27,4	26,56	27,1	26,81	
MHb1	27,32	27,4	27,17	27,05	27,24	
MHb2	26,55	27,07	27,23	27,38	27,06	
Deuxième journée		a	b	c	d	Moyenne machine
	MHa3	26,8	25,76	26	25,77	26,08
	MHa4	26,19	26,1	25,85	26,1	26,06
	MHb5	25,52	25,96	25,7	25,5	25,67
	MHb6	26,37	26,2	26,29	26,12	26,24
	MHc3	25,18	24,74	-	-	24,96
	MHc4	24,45	24,86	-	-	24,66
	MHc6	25,19	25,74	-	-	25,47

TABLEAU A.10 Contenu en papier non désintégré. Première journée d'échantillonnage

	1					2				
	CR1	Ta1	Tb1	MHa1	MHb1	CR2	Ta2	Tb2	MHa2	MHb2
grammes	0,0589	0,0635	0,0625	0,0211	0,0232	0,1198	0,0772	0,0739	0,0209	0,0247
%	0,24	0,25	0,25	0,08	0,09	0,48	0,31	0,30	0,08	0,1

TABLEAU A.11 Résultats de l'analyse de fibres (FQA). Première journée d'échantillonnage

	1				2				CV		
	CR1	Ta1	Tb1	MHa1	MHb1	CR2	Ta2	Tb2	MHa2	MHb2	
Longueur de fibres pondérée en poids, mm	2,28	2,32	2,28	2,40	2,34	2,29	2,30	2,22	2,29	2,35	2,13
Fines, % pondéré en poids	10,95	10,11	10,20	9,92	10,27	11,15	10,78	11,43	10,71	10,17	4,76
Courbure, longueur pondérée en poids	0,051	0,048	0,049	0,0465	0,0415	0,049	0,047	0,045	0,047	0,042	6,45
Angle de cassure, index	0,660	0,655	0,670	0,585	0,555	0,675	0,675	0,660	0,575	0,575	7,82

TABLEAU A.12 Résultats de l'analyse de fibres (FQA). Deuxième journée d'échantillonnage

	3					4					5			6			CV
	CR3	Ta3	Tc3	MHa 3	MHc 3	CR4	Ta4	Tc4	MHa4	MHc4	CR5	MHb5	CR6	Tc6	MHc6	MHb6	
Longueur de fibres pondérée en poids, mm	2,57	2,30	2,31	2,23	2,29	2,23	2,30	2,24	2,31	2,23	2,23	2,30	2,26	2,26	2,24	2,23	3,61
Fines, % pondéré en poids	8,33	8,41	7,67	8,99	7,96	8,09	8,06	9,71	7,95	8,54	8,34	7,65	8,69	7,98	8,81	8,78	6,43
Courbure, longueur pondérée en poids	0,0440	0,0435	0,0455	0,0435	0,0430	0,0465	0,0420	0,0440	0,0460	0,0425	0,0470	0,0455	0,0475	0,0420	0,0470	0,0435	4,18
Angle de cassure, index	0,665	0,635	0,635	0,610	0,610	0,680	0,660	0,630	0,645	0,640	0,720	0,645	0,700	0,640	0,655	0,640	4,53

TABLEAU A.13 Résultats de l'analyse de fibres (FQA). Troisième journée d'échantillonnage

	CR7	Ta7	MHa7	CV
Longueur de fibres pondérée en poids, mm	2,32	2,32	2,31	0,11
Fines, % pondéré en poids	9,63	10,27	9,62	3,78
Courbure, longueur pondérée en poids	0,0620	0,0590	0,0540	6,93
Angle de cassure, index	0,885	0,880	0,850	2,17

TABLEAU A.14 Classification de fibres Bauer Mc Nett (%). Première journée d'échantillonnage

	1					2					CV
	CR1	Ta1	Tb1	MHa1	MHb1	CR2	Ta2	Tb2	MHa2	MHb2	
R14	8,5	8,4	9,6	11,5	8,8	8,6	7,3	7,6	8,5	7,5	14,14
14/28	24,3	23,5	24,3	22,9	23,1	23,3	22,0	22,4	22,4	23,7	3,40
28/48	15,8	15,5	16,4	14,9	14,8	16,4	14,7	15,0	15,2	14,5	4,47
48/100	12,1	11,7	12,1	11,3	11,6	12,4	11,5	11,4	11,6	11,7	2,98
100/200	8,5	7,6	7,8	7,3	7,2	8,4	7,6	7,5	7,4	7,5	5,72
P200	30,8	33,3	29,8	32,1	34,5	30,9	36,9	36,7	34,9	35,1	7,52

TABLEAU A.15 Classification de fibres Bauer Mc Nett (%). Deuxième journée d'échantillonnage

	3					4					5		6				
	CR3	Ta3	Tc3	MHa 3	MHc 3	CR4	Ta4	Tc4	MHa4	MHc4	CR5	MHb5	CR6	Tc6	MHc6	MHb6	CV
R14	6,7	7,9	4,9	5,4	3,8	6,8	8,3	3,90	3,6	9,7	6	8,6	6,3	8,5	6	6,1	28,72
14/28	24,5	24,2	21,4	22,6	22,4	23,3	23,5	21,50	20,8	22,9	21,4	22,6	23,4	21,6	22,7	23,9	4,86
28/48	22,1	21,0	22,2	23,9	24,6	22,0	21,2	23,20	24,4	21,8	23,6	23,6	22,4	22,3	23,4	22,7	4,74
48/100	14,4	13,7	14,0	14,7	16,5	14,0	13,6	14,70	14,7	14,0	14,3	14,4	14,3	14,6	14,7	14,7	4,55
100/200	7,4	6,9	7,6	8,4	8,7	7,9	7,5	7,60	8,0	7,6	8,2	7,9	8,1	8	8,2	7,8	5,49
P200	24,9	26,3	29,9	25,0	24,0	26,0	25,9	29,1	28,5	24,0	26,5	22,9	25,5	25,0	25,0	24,8	7,38

TABLEAU A.16 Classification de fibres Bauer Mc Nett (%). Troisième journée d'échantillonnage

	CR7	Ta7	MHa7	CV
R14	8,3	8,0	6,0	16,82
14/28	22,0	18,6	22,2	9,66
28/48	20,8	22,5	21,1	4,23
48/100	16,0	15,4	16,2	2,62
100/200	9,3	8,9	9,4	2,88
P200	23,6	26,6	25,1	5,98

TABLEAU A.17 Propriétés des pâtes. Feuilles de 60 g/m². Première journée d'échantillonnage

	1					2					CV
	CR1	Ta1	Tb1	MHa1	MHb1	CR2	Ta2	Tb2	MHa2	MHb2	
Indice d'égouttage (mL)	109	115	134	105	104	116	108	115	106	107	7,97
Volume spécifique (cm ³ /g)	2,148	2,213	2,203	2,149	2,192	2,345	2,103	2,208	2,208	2,249	2,97
Indice d'éclatement (kPa * m ² /g)	2,12	1,98	2,07	2,27	2,28	2,08	2,03	2,06	2,16	2,22	4,82
Indice de déchirure (mN * m ² /g)	7,61	7,47	7,63	7,96	8,02	7,82	7,32	7,94	7,65	8,06	3,223
Indice de traction (Nm/g)	37,2	35,4	36,8	40,6	38,6	35,6	35,3	37,2	37,2	34,6	4,84
TEA (g/cm)	30,47	27,53	32,61	35,3	31,6	29,4	23,58	31,57	27,47	21,66	14,3
Longueur de rupture (km)	3,80	3,61	3,75	4,14	3,93	3,63	3,60	3,79	3,79	3,53	4,816

TABLEAU A.18 Propriétés des pâtes. Feuilles de 60 g/m². Deuxième journée d'échantillonnage

	3					4					5		6				CV
	CR3	Ta3	Tc3	MHa 3	MHc 3	CR4	Ta4	Tc4	MHa4	MHc4	CR5	MHb5	CR6	Tc6	MHc6	MHb6	
Indice d'égouttage (mL)	128	129	144	133	137	123	126	135	135	126	124	141	124	140	135	139	5,14
Volume spécifique (cm ³ /g)	2,31	2,37	2,32	2,37	2,41	2,40	2,37	2,30	2,32	2,30	2,287	2,308	2,378	2,352	2,351	2,374	1,65
Indice d'éclatement (kPa * m ² /g)	2,19	2,12	2,09	2,23	2,05	2,14	2,21	2,15	2,34	2,06	2,22	2,22	2,17	2,20	2,18	2,21	3,33
Indice de déchirure (mN * m ² /g)	7,99	8,47	8,33	7,79	8,07	8,36	8,25	8,23	8,08	8,07	8,03	8,12	8,04	8,01	7,86	7,81	2,40
Indice de traction (Nm/g)	36,76	35,86	32,18	38,15	34,93	35,49	35,79	31,62	38,25	33,32	33,46	32,66	33,96	32,62	37,66	33,77	6,20
TEA (g/cm)	33,77	29,34	20,19	29,94	26,47	26,74	27,25	21,84	34,65	21,92	22	21	23	20	29	25,8	18,07
Longueur de rupture (km)	3,75	3,66	3,28	3,89	3,56	3,62	3,65	3,23	3,90	3,40	3,41	3,33	3,46	3,33	3,84	3,44	6,19

TABLEAU A.19 Propriétés des pâtes. Feuilles de 60 g/m². Troisième journée d'échantillonnage

	CR7	Ta7	MHa7	CV
Indice d'égouttage (mL)	146	137	143	
Volume spécifique (cm ³ /g)	2,301	2,276	4,391	4,35
Indice d'éclatement (kPa * m ² /g)	2,26	2,11	2,27	5,33
Indice de déchirure (mN * m ² /g)	8,35	7,79	8,21	4,73
Indice de traction (Nm/g)	36,25	32,66	32,54	8,14
TEA (g/cm)	25,8	22,7	21,2	13,02
Longueur de rupture (km)	3,70	3,33	3,32	8,20

TABLEAU A.20 Propriétés optiques. Première journée d'échantillonnage

	1					2					
	CR1	Ta1	Tb1	MHa1	MHb1	CR2	Ta2	Tb2	MHa2	MHb2	CV
Blancheur (%)	40,56	39,53	40,72	39,61	39,85	40,74	40,13	40,87	40,62	40,32	1,22
Coeff. de diffusion de la lumière (m ² /kg)	42,65	42,64	59,61	50,64	52,64	50,50	76,54	63,24	56,94	51,28	18,49

TABLEAU A.21 Propriétés optiques. Deuxième journée d'échantillonnage

	3					4					5			6			CV
	CR3	Ta3	Tc3	MHa ₃	MHc ₃	CR4	Ta4	Tc4	MHa ₄	MHc ₄	CR5	MHb ₅	CR6	Tc6	MHc ₆	MHb ₆	
Blancheur (%)	36,2	35,6	13,8	36,4	14,8	35,0	34,9	13,9	35,6	15,0	34,7	35,0	34,2	14,1	14,6	34,1	38,0 ₈
Coeff. de diffusion de la lumière (m ² /kg)	46	45	18	52	15	43	46	13	46	22	47	45	39	15	17	43	42,3 ₅

TABLEAU A.22 Propriétés optiques. Troisième journée d'échantillonnage

	CR7.	Ta7	MHa7	CV
Blancheur (%)	40,1	39,6	41,0	1,76
Coeff. de diffusion de la lumière (m ² /kg)	50	50	52	2,28

TABLEAU A.23 Propriétés des feuilles de 150 g/m². Première journée d'échantillonnage

	1					2					
	CR1	Ta1	Tb1	MHa1	MHb1	CR2	Ta2	Tb2	MHa2	MHb2	CV
Résistance à la compression en anneau, (Nm/g)	10,69	11,79	10,11	10,50	10,69	11,01	10,50	9,40	9,85	10,88	6,25
Rigidité Taber, (10 ³ mNm/(g/m ²)	18,84	17,49	14,62	17,46	16,87	26,88	16,38	14,81	17,66	15,79	19,74
Résistance à la compression STFI, (Nm/g)	55,20	59,02	59,76	57,31	57,40	48,29	48,30	50,00	55,87	56,13	7,85

TABLEAU A.24 Propriétés des feuilles de 150 g/m². Deuxième journée d'échantillonnage

	3					4					5			6			CV
	CR3	Ta3	Tc3	MHa3	MHc3	CR4	Ta4	Tc4	MHa4	MHc4	CR5	MHb5	CR6	Tc6	MHc6	MHb6	
Résistance à la compression en anneau, (Nm/g)	12,5	12,78	11,61	12,16	11,3	12,55	12,3	12,32	12,5	11,37	12,8	12,61	12,4	12,55	11,49	12,4	4,08
Rigidité Taber, (10 ³ mNm/(g/m ²)	18,27	20,14	18,48	18,66	19,13	18,73	20,32	17,21	18,78	18,82	17,73	16,82	16,04	16,91	19,02	16,64	6,784
Résistance à la compression STFI, (Nm/g)	55,91	55,41	56,65	54,50	57,67	58,70	59,23	60,00	58,44	59,73	54,87	58,54	59,19	58,52	58,32	59,28	3,07

TABLEAU A.25 Propriétés des feuilles de 150 g/m². Troisième journée d'échantillonnage

	CR7	Ta7	MHa7	CV
Résistance à la compression en anneau, (Nm/g)	12,1	11,99	12,69	3,06
Rigidité Taber, (10 ³ mNm/(g/m ²))	16,07	15,91	15,77	0,94
Résistance à la compression STFI, (Nm/g)	60,06	52,86	59,84	7,11

CAISSETTES

TABLEAU A.26 Propriétés des caissettes, moyennes des 4 plateaux par machine. Machines A et B

	Première journée				Deuxième journée				Troisième journée	CV
	MSa1	MSa2	MSb1	MSb2	MSa3	MSa4	MSb5	MSb6		
Épaisseur (mm)	1,189	1,148	1,107	1,157	1,097	1,176	1,155	1,11	1,197	3,20
Grammage (g/m ²)	327,87	307,52	327,17	331,38	278,15	288,5	317,59	315	300,8	5,94
Vol. spécifique (cm ³ /g)	3,63	3,73	3,38	3,49	3,94	4,07	3,64	3,52	3,98	6,51
Densité (g/cm ³)	0,276	0,268	0,296	0,286	0,254	0,245	0,275	0,28	0,251	6,42

TABLEAU A.27 Propriétés des caissettes, moyennes des 2 plateaux par machine. Machine C

	MSc3	MSc4	MSc6	CV
Épaisseur (mm)	1,959	1,913	2,176	6,97
Grammage (g/m ²)	177,95	178,23	189,74	3,70
Vol. spécifique (cm ³ /g)	11,01	10,73	11,47	3,37
Densité (g/cm ³)	0,091	0,093	0,087	3,35

TABLEAU A.28 Résistance à la compression des caissettes. Première journée d'échantillonnage

	Charge/poids (kg/g)	Charge/épaisseur (kg/mm)	Charge/grammage (kg m ² /g)	Charge/vol.spéc. (kg g/cm ³)
MSa1	4,5054	35,51	0,128786	11,64
MSa2	4,3399	35,45	0,132349	10,90
MSb1	5,2474	46,16	0,156188	15,11
MSb2	5,4903	46,39	0,161974	15,37
CV	11,42	15,25	11,53	17,46

TABLEAU A.29 Résistance à la compression des caissettes. Deuxième et troisième journée d'échantillonnage Machines A et B

	Charge/poids (kg/g)	Charge/épaisseur (kg/mm)	Charge/grammage (kg m ² /g)	Charge/vol.spéc. (kg g/cm ³)
MSa3	3,4004	17,7486	0,0700	4,9572
MSa4	3,4033	16,9900	0,0692	4,9050
MSb5	4,2941	22,1454	0,0807	6,8778
MSb6	4,6152	24,8850	0,0899	7,6129
MSa7	3,3634	16,6485	0,0655	5,0596
CV	15,59	18,55	13,34	21,63

TABLEAU A.30 Résistance à la compression des caissettes. Deuxième journée d'échantillonnage. Machine C

	Charge/poids (kg/g)	Charge/épaisseur (kg/mm)	Charge/grammage (kg m ² /g)	Charge/vol.spéc. (kg g/cm ³)
MSc3	1,5482	5,3701	0,0591	0,9557
MSc4	1,3858	4,9433	0,0530	0,8807
MSc6	0,9093	2,8415	0,0326	0,5391
CV	25,92	30,87	28,77	28,04

TABLEAU A.31 Résultats utilisés pour la construction du modèle PLS. Première journée d'échantillonnage (en gris les propriétés enlevées du modèle)

	CR1	MHa1	MHb1	CR2	MHa2	MHb2	min	max	moy	écart type	MSE
égoutt	109	105	104	116	106	107	104	116	108	4,36	17
vs	2,15	2,15	2,19	2,34	2,21	2,25	2,15	2,34	2,22	0,07	0,002
éclat	2,12	2,27	2,28	2,08	2,16	2,22	2,08	2,28	2,19	0,08	0,01
déch	7,61	7,96	8,02	7,82	7,65	8,06	7,61	8,06	7,85	0,19	0,07
trac	37,25	40,60	38,57	35,60	37,17	34,63	34,63	40,60	37,30	2,12	1,87
TEA	30,47	35,30	31,60	29,40	27,47	21,66	21,66	35,30	29,32	4,57	9,06
Lf	2,28	2,40	2,34	2,29	2,29	2,35	2,28	2,40	2,33	0,05	0,001
fines	10,95	9,92	10,27	11,16	10,71	10,18	9,92	11,16	10,53	0,48	0,05
courb	0,051	0,047	0,042	0,049	0,047	0,042	0,04	0,05	0,05	0,00	0,000
angle	0,7	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,56	0,68	0,60	0,05	0,001
R14	8,5	11,5	8,8	8,6	8,5	10,5	8,5	11,5	9,4	1,3	2,7
R28	24,3	22,9	23,1	23,3	22,4	21,9	21,9	24,3	23,0	0,8	1,3
R48	15,8	14,9	14,8	16,4	15,2	15,5	14,8	16,4	15,4	0,6	1,4
R100	12,1	11,3	11,6	12,4	11,6	11,6	11,3	12,4	11,8	0,4	0,2
R200	8,5	7,3	7,2	8,4	7,4	7,6	7,2	8,5	7,7	0,6	0,1
P200	30,8	32,1	34,5	30,9	34,9	32,9	30,8	34,9	32,7	1,8	1,6
bl	40,56	39,61	39,85	40,74	40,62	40,32	39,6	40,7	40,3	0,5	0,2
cd	42,65	50,64	52,64	50,50	56,94	51,28	42,7	56,9	50,8	4,6	14,6
anneau	10,69	10,5	10,69	11,01	9,85	10,88	9,9	11,0	10,6	0,4	0,2
rigid	18,84	17,46	16,87	26,88	17,66	15,79	15,8	26,9	18,9	4,0	0,5
STFI	55,2	57,31	57,4	48,29	55,87	56,13	48,29	57,40	55,03	3,41	6,64
kg cm ² /g		0,13	0,13		0,16	0,16	0,13	0,16	0,14	0,02	0,004
kg cm ³ /g		11,64	10,9		15,11	15,37	10,90	15,37	13,26	2,31	0,000

TABLEAU A.32 Résultats utilisés pour la construction du modèle PLS. Deuxième et troisième journées d'échantillonnage (en gris les propriétés enlevées du modèle)

	CR3	MHa3	CR4	MHa4	CR5	MHb5	CR6	MHb6	CR7	MHa7	min	max	moy	écart type	MSE
égoutt	128	133	123	135	124	141	124	139	146	143	123	146	134	9	17
vs	2,31	2,37	2,4	2,32	2,287	2,308	2,378	2,374	2,301	2,162	2,162	2,4	2,32	0,07	0,002
éclat	2,19	2,23	2,14	2,34	2,22	2,22	2,17	2,21	2,26	2,27	2,14	2,34	2,23	0,06	0,01
déch	7,99	7,79	8,36	8,08	8,03	8,12	8,04	7,81	8,35	8,21	7,79	8,36	8,08	0,19	0,07
trac	36,76	38,15	35,49	38,25	33,46	32,66	33,96	33,77	36,25	32,54	32,54	38,25	35,13	2,15	1,87
TEA	33,77	29,94	26,74	34,65	22	21	23	25,8	25,8	21,2	21	34,65	26,39	4,98	9,06
Lf	2,57	2,23	2,24	2,31	2,23	2,30	2,26	2,23	2,32	2,31	2,23	2,57	2,30	0,10	0,001
fines	8,34	9,00	8,09	7,96	8,35	7,65	8,69	8,78	9,63	9,62	7,65	9,63	8,61	0,67	0,05
courb	0,044	0,044	0,047	0,046	0,047	0,046	0,048	0,044	0,062	0,054	0,044	0,062	0,048	0,006	0,0000
angle	0,67	0,61	0,68	0,65	0,72	0,65	0,70	0,64	0,89	0,85	0,61	0,89	0,70	0,09	0,001
R14	6,7	5,4	6,8	3,6	6,0	8,6	6,3	6,1	8,3	6,0	3,6	8,6	6,4	1,4	2,7
R28	24,5	22,6	23,3	20,8	21,4	22,6	23,4	23,9	22,0	22,2	20,8	24,5	22,7	1,1	1,3
R48	22,1	23,9	22,0	24,4	23,6	23,6	22,4	22,7	20,8	21,1	20,8	24,4	22,7	1,2	1,4
R100	14,4	14,7	14,0	14,7	14,3	14,4	14,3	14,7	16,0	16,2	14,0	16,2	14,8	0,7	0,2
R200	7,4	8,4	7,9	8,0	8,2	7,9	8,1	7,8	9,3	9,4	7,4	9,4	8,2	0,6	0,1
P200	24,9	25,0	26,0	28,5	26,5	22,9	25,5	24,8	23,6	25,1	22,9	28,5	25,3	1,5	1,6
bl	36,20	36,40	35,00	35,60	34,70	35,00	34,20	34,10	40,10	41,00	34,10	41,00	36,23	2,41	0,17
cd	46,00	52,00	43,00	46,00	47,00	45,00	39,00	43,00	50,00	52,00	39,00	52,00	46,30	4,16	14,63
anneau	12,5	12,16	12,55	12,5	12,8	12,61	12,4	12,4	12,1	12,694	12,1	12,8	12,47	0,22	0,17
rigid	18,27	18,66	18,73	18,78	17,73	16,82	16,04	16,64	16,07	15,77	15,77	18,78	17,35	1,22	0,48
STFI	55,91	54,5	58,7	58,44	54,87	58,54	59,19	59,28	60,06	59,84	54,5	60,06	57,93	2,06	6,64
kg cm ² /g		0,07		0,069		0,081		0,09		0,066	0,066	0,09	0,08	0,01	0,004
kg cm ³ /g		4,96		4,91		6,88		7,61		5,06	4,91	7,61	5,88	1,27	0,000

ANNEXE B Résultats chapitre 5

TABLEAU B.1 Design de tamisage Plackett-Burman- Propriétés feuilles 1,2 g

Scénario		Jp (%)	Temp (°C)	Consist (%)	Durée (min)	Coag (kg/tn)	Floc (kg/tn)	Cond (%)	Volume spécifique (cm ³ /g)	Ind. d'éclatem. (kpa *m ² /g)	Ind. de déchirure (mN * m ² /g)	Indice de traction (Nm/g)	TEA (g/cm)	Blancheur (%)	Coefficient de diffusion (m ² /kg)
PB#1	----++	50	30	4	10	0,6	0,6	1,2	2,05	2,55	8,12	45,61	39,44	40,59	65,81
PB #2	++--++	100	80	4	10	0	0	1,2	1,95	2,09	7,33	37,34	27,90	48,88	74,84
PB#3	0	75	50	6	17	0,3	0,3	0,6	2,12	2,27	7,62	42,75	37,94	43,05	51,81
PB#4	++++++	100	80	8	25	0,6	0,6	1,2	2,20	2,02	7,04	36,02	30,10	41,99	55,78
PB#5	0	75	50	6	17	0,3	0,3	0,6	2,17	2,22	8,04	39,80	32,30	43,11	52,97
PB#6	++----+	100	80	4	10	0	0	1,2	2,10	2,06	7,02	37,07	31,40	45,66	75,30
PB#7	--++-+	50	30	8	25	0	0	1,2	2,32	2,17	7,72	40,01	29,12	42,76	57,17
PB#8	-+-++-	50	80	4	25	0	0,6	0	2,37	2,32	8,03	39,37	36,44	40,64	41,13
PB#9	-++-+-	50	80	8	10	0,6	0	0	2,58	2,10	7,42	37,26	35,30	42,51	46,34
PB#10	---+++	50	30	4	10	0,6	0,6	1,2	2,10	2,31	7,62	40,43	32,80	43,11	48,95
PB#11	0	75	50	6	17	0,3	0,3	0,6	2,30	2,22	8,18	39,76	30,60	39,65	45,32
PB#12	-++-+-	50	80	8	10	0,6	0	0	2,40	2,04	7,19	38,58	29,70	41,97	52,24
PB#13	0	75	50	6	17	0,3	0,3	0,6	2,08	2,33	7,35	35,91	35,60	42,67	53,10
PB#14	--++-+	50	30	8	25	0	0	1,2	2,30	2,09	7,63	35,65	26,92	43,79	61,47
PB#15	-++-+-	100	30	4	25	0,6	0	0	2,21	2,22	7,37	40,84	36,46	42,04	48,77
PB#16	++++++	100	80	8	25	0,6	0,6	1,2	1,93	2,34	7,40	36,26	42,99	45,43	62,03
PB#17	-++-+-	100	30	8	10	0	0,6	0	2,31	2,19	7,51	38,28	38,34	40,71	52,99
PB#18	0	75	50	6	17	0,3	0,3	0,6	2,30	2,42	7,19	42,77	38,70	41,92	54,06
PB#19	-+-++-	100	30	4	25	0,6	0	0	2,56	2,29	7,83	41,13	31,99	41,36	51,80
PB#20	0	75	50	6	17	0,3	0,3	0,6	2,35	2,32	7,59	39,58	31,45	41,20	49,67
PB#21	-+-+-+	50	80	4	25	0	0,6	0	2,37	2,25	7,60	41,44	35,40	39,97	50,32
PB#22	-+-++-	100	30	8	10	0	0,6	0	1,90	2,18	7,65	38,57	29,80	44,23	61,81
min									1,90	2,02	7,02	35,65	26,92	39,65	41,13
max									2,58	2,55	8,18	45,61	42,99	48,88	75,30
moy									2,23	2,23	7,57	39,29	33,67	42,60	55,17
écart type									0,19	0,13	0,33	2,55	4,24	2,11	8,71
MSE									0,07	0,03	0,21	12,39	34,39	8,52	144,76

TABLEAU B.2 Design de tamisage Plackett-Burman - Propriétés feuilles 3 g

Scénario		Jp (%)	Temp (°C)	Consist (%)	Durée (min)	Coag (kg/tn)	Floc (kg/tn)	Cond (%)	Vol. spécifique (cm ³ /g)	Ind. Éclatement (kPa m ² /kg)	Résist. à la compres. STFI (Nm/g)	Résist. à la compres. en anneau (Nm/g)	Rigidité Taber (10 ³ mNm/m ²)
PB#1	---+++	50	30	4	10	0,6	0,6	1,2	2,15	2,53	59,23	13,28	17,94
PB#2	++----+	100	80	4	10	0	0	1,2	2,01	2,11	58,32	11,36	14,40
PB#3	0	75	50	6	17	0,3	0,3	0,6	2,04	2,37	59,13	12,54	15,93
PB#4	++++++	100	80	8	25	0,6	0,6	1,2	2,07	1,96	58,15	11,19	14,45
PB#5	0	75	50	6	17	0,3	0,3	0,6	2,06	2,33	60,63	12,75	17,89
PB#6	++---+	100	80	4	10	0	0	1,2	1,95	2,09	59,34	10,83	12,83
PB#7	--++-+	50	30	8	25	0	0	1,2	2,22	2,21	57,72	12,44	20,38
PB#8	-++-+-	50	80	4	25	0	0,6	0	2,20	2,35	59,42	12,79	18,06
PB#9	-+++-	50	80	8	10	0,6	0	0	2,23	2,45	59,11	11,98	15,97
PB#10	-----+	50	30	4	10	0,6	0,6	1,2	2,04	2,09	57,86	12,78	18,33
PB#11	0	75	50	6	17	0,3	0,3	0,6	2,24	2,46	61,72	12,65	17,06
PB#12	-++-+-	50	80	8	10	0,6	0	0	2,26	2,22	58,90	12,08	18,38
PB#13	0	75	50	6	17	0,3	0,3	0,6	1,95	2,46	58,15	11,11	14,49
PB#14	-++-+	50	30	8	25	0	0	1,2	2,12	2,10	58,47	10,80	15,60
PB#15	-+++-	100	30	4	25	0,6	0	0	2,02	2,27	60,78	12,17	15,51
PB#16	++++++	100	80	8	25	0,6	0,6	1,2	1,83	2,25	58,63	10,36	11,64
PB#17	-+-+-+	100	30	8	10	0	0,6	0	2,04	2,09	59,74	12,79	16,31
PB#18	0	75	50	6	17	0,3	0,3	0,6	2,05	2,29	57,33	12,18	16,72
PB#19	+---+-	100	30	4	25	0,6	0	0	2,42	2,42	60,59	11,03	19,01
PB#20	0	75	50	6	17	0,3	0,3	0,6	2,08	2,31	59,69	12,70	16,27
PB#21	-+-+-+	50	80	4	25	0	0,6	0	2,34	2,27	59,69	12,23	18,89
PB#22	-+-+-	100	30	8	10	0	0,6	0	1,76	2,06	60,00	10,66	11,70
min									1,76	1,96	43,34	7,88	11,56
max									2,42	2,53	62,58	13,28	20,38
moy									2,08	2,26	58,70	11,70	16,08
écart type									0,17	0,16	3,66	1,18	2,54
MSE									0,05	0,05	25,52	2,65	12,34

TABLEAU B.3 Design de tamisage Plackett-Burman – Propriétés pâtes et eaux blanches

Scénario		Indice d'égouttage (ml)	Long. de fibres pondérée en poids (mm)	Fines, % pondéré en poids	Courbure longueur pondérée en poids	Angle de cassure, index	R 14	R28	R48	R100	R200	P 200	Temps drainage 1,2 g (sec/gramme)	Temps drainage 3,0 g (sec/gramme)	Cendres pâtes, %	Consistance eaux blanches %	Cendres eaux, % mat. Sol.	RPP (%)	% RPP (C)
PB#1	----++	138	2,107	7,10	0,043	0,65	12,40	30,10	21,90	16,60	8,60	10,40	0,318	0,580	3,43	0,009	8,21	99,11	97,99
PB#2	++----	112	2,296	9,33	0,046	0,67	5,90	22,20	8,90	15,40	7,00	40,60	N.D.	N.D.	15,02	0,037	52,69	96,28	87,14
PB#3	0	112	2,216	8,51	0,052	0,71	10,70	26,60	14,50	15,40	10,70	22,10	0,749	1,558	7,57	0,012	27,82	98,80	95,73
PB#4	++++++	134	2,268	10,87	0,063	0,83	7,10	24,30	16,00	13,10	7,80	31,70	0,382	0,568	9,29	0,014	32,26	98,68	95,57
PB#5	0	116	2,258	9,32	0,047	0,65	9,60	27,50	16,60	13,50	7,50	25,30	0,395	1,344	7,37	0,018	36,64	98,45	92,48
PB#6	++----	146	2,281	9,67	0,061	0,95	9,40	22,00	16,40	13,00	9,90	29,30	0,385	0,562	11,86	0,055	38,45	94,41	82,76
PB#7	-+---+	111	2,137	9,05	0,052	0,69	7,80	26,20	16,90	14,10	0,00	35,00	0,423	1,042	5,27	0,019	31,44	97,98	88,48
PB#8	-+---+	103	2,211	8,49	0,042	0,60	8,20	27,60	18,40	13,40	7,80	24,60	0,415	0,653	3,82	0,011	35,92	98,92	90,23
PB#9	-+---+	124	2,141	9,75	0,056	0,79	10,00	25,50	17,70	13,50	8,40	24,90	0,358	0,599	5,12	0,036	19,84	96,25	85,62
PB#10	----++	121	2,254	6,15	0,051	0,71	7,90	26,30	16,70	12,80	7,00	29,30	0,456	0,582	8,33	0,008	48,92	99,07	94,31
PB#11	0	106	2,163	7,66	0,044	0,62	12,50	26,90	6,80	24,80	8,60	20,40	0,438	0,629	3,53	0,021	16,54	97,63	89,65
PB#12	-+---+	140	2,156	8,62	0,052	0,75	8,30	26,30	18,50	13,90	7,60	25,40	0,322	0,516	3,95	0,024	12,19	97,89	94,36
PB#13	0	125	2,207	9,89	0,055	0,81	10,10	23,40	16,80	13,70	8,50	27,50	0,381	0,595	7,59	0,030	29,30	97,59	91,36
PB#14	-+---+	136	2,242	6,93	0,062	0,82	10,80	26,10	17,10	13,70	7,40	24,90	0,369	0,542	6,38	0,030	28,38	96,63	86,02
PB#15	-+---+	112	2,236	9,78	0,049	0,63	7,70	23,60	14,70	10,80	9,70	33,50	0,732	1,079	8,55	0,020	28,15	97,98	93,22
PB#16	++++++	116	2,304	10,27	0,059	0,87	5,90	21,60	14,70	13,10	8,90	35,80	0,560	0,780	13,78	0,031	38,39	97,43	93,00
PB#17	-+---+	107	2,175	8,60	0,058	0,75	7,80	24,95	15,28	13,70	7,20	31,10	0,445	0,688	7,14	0,015	17,00	98,54	96,70
PB#18	0	111	2,288	8,72	0,056	0,75	9,80	25,70	13,90	14,20	7,90	28,50	0,505	0,752	7,04	0,027	19,43	96,75	91,13
PB#19	-+---+	142	2,264	6,77	0,039	0,47	13,80	29,30	18,00	11,90	8,60	18,40	0,237	0,550	1,99	0,026	9,50	97,36	89,76
PB#20	0	110	2,197	8,37	0,056	0,73	10,10	27,20	19,70	13,80	8,30	20,90	0,431	0,690	4,80	0,029	13,82	96,65	92,14
PB#21	-+---+	127	2,201	8,24	0,046	0,63	10,30	27,90	13,90	17,40	7,40	23,10	0,349	0,539	4,62	0,026	17,82	96,91	88,58
PB#22	-+---+	130	2,394	12,22	0,065	0,90	6,90	22,90	14,00	12,60	9,20	34,40	0,631	0,880	15,19	0,046	40,55	95,20	87,05
min		103,00	2,11	6,15	0,04	0,47	5,90	7,40	6,80	10,80	7,00	10,40	0,24	0,40	1,99	0,008	8,21	94,41	82,76
max		146,00	2,39	12,22	0,07	0,95	13,80	30,10	32,80	24,80	10,70	40,60	0,78	1,60	15,19	0,055	52,69	99,11	97,99
moy		121,77	2,23	8,77	0,05	0,72	9,23	24,85	16,59	14,29	8,25	26,80	0,44	0,76	7,35	0,025	27,42	97,48	91,06
écart type		13,09	0,06	1,43	0,01	0,12	2,10	4,53	4,88	2,75	0,99	6,55	0,14	0,31	3,75	0,012	12,47	1,25	3,95
MSE		327,08	0,01	3,91	0,00	0,03	8,39	39,16	45,39	14,45	1,86	81,86	0,04	0,17	26,85	0,00	296,78	3,01	29,79

TABLEAU B.4 Design de tamisage Plackett-Burman – Résistance à la compression des caissettes.

Scénario		Jp (%)	Temp (°C)	Consist (%)	Durée (min)	Coag (kg/tn)	Floc (kg/tn)	kg/g	kg g/cm
PB#1	----+++	50	30	4	10	0,6	0,6		
PB#2	++----+	100	80	4	10	0	0	2,98	5023,7
PB#3	0	75	50	6	17	0,3	0,3	3,90	7662,5
PB#4	+++++++	100	80	8	25	0,6	0,6	4,18	6102,6
PB#5	0	75	50	6	17	0,3	0,3	3,06	5352,8
PB#6	++----+	100	80	4	10	0	0		
PB#7	--++--+	50	30	8	25	0	0	4,07	9140,4
PB#8	-++-+-	50	80	4	25	0	0,6	4,74	8302,7
PB#9	-++-+-	50	80	8	10	0,6	0	3,14	6690,0
PB#10	----+++	50	30	4	10	0,6	0,6	4,12	7859,5
PB#11	0	75	50	6	17	0,3	0,3	4,15	6732,7
PB#12	-++-+-	50	80	8	10	0,6	0	2,98	6111,8
PB#13	0	75	50	6	17	0,3	0,3	3,53	6001,3
PB#14	-++-+-	50	30	8	25	0	0	3,88	8621,5
PB#15	++-+--	100	30	4	25	0,6	0		
PB#16	+++++++	100	80	8	25	0,6	0,6	2,91	4969,2
PB#17	-+--+-	100	30	8	10	0	0,6	3,85	9273,7
PB#18	0	75	50	6	17	0,3	0,3	3,77	6424,0
PB#19	+--++-	100	30	4	25	0,6	0	2,87	7740,7
PB#20	0	75	50	6	17	0,3	0,3	3,24	5749,2
PB#21	-++-+-	50	80	4	25	0	0,6	3,05	4675,9
PB#22	-++-+-	100	30	8	10	0	0,6	4,00	6560,9
min								2,87	4675,9
max								4,74	9273,7
moy								3,60	6789,2
écart type								0,56	1413,3
MSE								4,02	4,28

ANNEXE C Résultats chapitre 6

TABLEAU C.1 Composition fibreuse des matières premières des essais d'usine

	CR11	CR12	CR21	CR22	CR31	CR32	CR41	CR42	min	max	moy	écart type	CV (%)	MSE
Chimique de résineux (%)	20	15	27	22	11	24	15	18	11	27	19	5	27,9	24,5
Chimique de feuillus (%)	2	6	3	2	5	3	2	4	2	6	4	1	40,7	1,98
Mécanique de résineux (%)	78	79	69	76	84	73	83	78	69	84	77	5	6,2	21,2

	CR51	CR52	CR61	CR62	CR71	CR72	CR81	CR82	min	max	moy	écart type	CV (%)	MSE
Chimique de résineux (%)	20	24	18	30	18	25	27	25	18	30	23	4	19,2	16,5
Chimique de feuillus (%)	10	3	8	6	15	11	11	13	3	15	10	4	41,1	12,98
Mécanique de résineux (%)	70	73	75	64	67	64	62	62	62	75	67	5	7,4	22,1

TABLEAU C.2 Caractéristiques fibreuses des pâtes des essais d'usine

scénario	journal	consistance	floculant	Fines, % pondérée en poids (fines fibres)	longueur pondérée en poids, mm	Angle de cassure, index (angle)	Fraction R14, % (R14)	Fraction R28, % (R28)	Fraction R48, % (R48)	Fraction R100, % (R100)	Fraction R200, % (R200)	Fraction P200, % (P200)	
11	-1	1	1	8,56	2,212	0,043	0,56	8,00	24,80	15,50	11,90	7,10	32,70
12	-1	1	1	9,14	2,246	0,042	0,55	8,50	24,40	15,60	11,20	7,00	33,30
21	-1	-1	1	8,87	2,343	0,040	0,54	7,90	25,40	15,70	11,60	7,40	32,00
22	-1	-1	1	9,30	2,233	0,038	0,57	7,70	25,00	15,70	11,30	7,30	33,00
31	-1	-1	-1	9,36	2,343	0,041	0,59	7,60	25,50	15,80	12,10	8,10	30,90
32	-1	-1	-1	9,79	2,267	0,040	0,57	7,60	24,80	15,90	12,20	8,00	31,50
41	-1	1	-1	9,44	2,308	0,039	0,54	6,80	25,00	15,80	12,60	7,80	32,00
42	-1	1	-1	9,26	2,308	0,037	0,50	7,40	25,20	16,10	12,40	8,00	30,90
51	1	1	-1	8,32	2,265	0,042	0,61	8,40	26,10	16,80	12,80	8,00	27,90
52	1	1	-1	7,71	2,325	0,045	0,56	8,70	26,40	16,50	12,70	7,80	27,90
61	1	-1	-1	7,92	2,254	0,041	0,57	8,10	26,30	16,30	12,30	7,20	29,80
62	1	-1	-1	8,25	2,288	0,044	0,60	10,90	28,60	17,60	13,20	8,30	21,40
71	1	-1	1	8,61	2,290	0,045	0,62	8,80	25,10	15,80	12,10	7,50	30,70
72	1	-1	1	8,43	2,290	0,047	0,68	7,90	24,00	15,30	11,90	7,20	33,70
81	1	1	1	9,03	2,276	0,048	0,73	8,60	24,10	15,40	12,40	7,90	31,60
82	1	1	1	8,93	2,300	0,051	0,75	8,40	23,60	15,30	12,20	7,90	32,60
<i>min</i>				7,71	2,212	0,037	0,50	6,80	23,6	15,3	11,2	7,0	21,4
<i>max</i>				9,79	2,343	0,051	0,75	10,9	28,6	17,6	13,2	8,3	33,7
moyenne				8,81	2,284	0,042	0,59	8,21	25,3	15,9	12,2	7,7	30,7
écart type				0,58	0,04	0,004	0,07	0,90	1,19	0,61	0,53	0,41	3,02
CV%				6,61	1,64	9,10	11,81	10,91	4,72	3,82	4,36	5,33	9,81
MSEp				0,08	0,002	0,000	0,001	0,59	0,48	0,13	0,10	0,09	5,22
variance				0,34	0,001	0,000	0,005	0,80	1,42	0,37	0,28	0,17	9,10

TABLEAU C.3 Propriétés physiques et optiques des pâtes des essais d'usine (Feuilles standards et feuilles 3 g)

scénario	journal	consistance	floculant	Vol. spécifique, cm ³ /g (vs)	Vol. spécifique, cm ³ /g (feuilles 3g) (vs3)	Ind. d'éclatem., kPa m ² /kg (éclat)	Ind. de déchirure, mN * m ² /g (dech)	Indice de traction, Nm/g (trac)	TEA, g/cm (TEA)	Ind. d'éclatem., kpa *m ² /g (feuilles 3g) (éclat3)	Rigidité Taber, 10 ³ mNm/(g/m ² (rigid))	Résist. à la compres. en anneau, Nm/g (anneau)	Résistance à la compres. STFI, Nm/g (STFI)	Coeff. de diffusion, m ² /kg (cd)	Blancheur, % (bl)
11	-1	1	1	2,33	2,25	1,84	7,24	35,63	25,76	1,68	17,68	14,81	60,36	55,04	37,27
12	-1	1	1	2,39	2,23	1,86	7,11	34,75	27,34	1,92	16,38	15,38	61,56	55,55	37,92
21	-1	-1	1	2,35	2,33	1,74	7,29	34,33	25,29	1,85	17,01	16,65	61,59	47,81	37,33
22	-1	-1	1	2,34	2,28	1,82	7,06	33,98	22,35	1,78	18,12	16,23	62,29	50,75	37,55
31	-1	-1	-1	2,39	2,21	1,79	7,31	33,57	21,24	2,00	16,38	15,56	60,65	52,05	38,31
32	-1	-1	-1	2,36	2,21	1,76	7,22	29,44	18,61	1,82	16,56	15,49	61,66	51,85	38,64
41	-1	1	-1	2,35	2,19	1,76	6,93	31,24	21,69	1,93	16,09	15,89	59,92	51,01	39,65
42	-1	1	-1	2,35	2,22	1,77	7,02	32,33	20,35	1,85	16,71	15,06	60,70	47,71	39,03
51	1	1	-1	2,25	2,32	1,98	7,75	36,92	25,89	2,01	17,08	16,31	59,44	56,60	38,41
52	1	1	-1	2,29	2,29	2,14	8,22	37,49	27,13	2,16	14,79	17,26	62,86	53,93	38,28
61	1	-1	-1	2,19	2,17	2,09	7,87	37,92	26,01	2,16	17,60	17,24	65,91	56,95	38,4
62	1	-1	-1	2,27	2,26	2,18	8,08	38,52	27,92	2,07	18,88	15,61	63,17	55,68	38,32
71	1	-1	1	2,22	2,14	2,02	8,03	38,25	28,57	2,14	17,66	15,87	61,41	44,19	37,97
72	1	-1	1	2,18	2,15	2,07	8,05	35,46	24,59	2,17	16,92	16,37	59,28	47,45	37,96
81	1	1	1	2,22	2,14	2,01	8,11	37,07	24,71	2,12	16,64	15,37	61,37	51,00	39,22
82	1	1	1	2,19	2,15	2,12	7,96	37,85	30,93	2,08	16,42	16,60	60,99	45,76	38,66
<i>min</i>				2,18	2,14	1,74	6,93	29,44	18,61	1,68	14,79	14,81	59,28	44	37
<i>max</i>				2,39	2,33	2,18	8,22	38,52	30,93	2,17	18,88	17,26	65,91	57	40
moyenne				2,29	2,22	1,93	7,58	35,3	24,9	1,98	16,9	16,0	61,4	51,5	38,3
écart type				0,07	0,06	0,16	0,46	2,69	3,30	0,16	0,94	0,73	1,62	4,00	0,65
CV%				3,23	2,84	8,13	6,13	7,63	13,26	7,86	5,54	4,55	2,63	7,78	1,71
MSE				0,001	0,001	0,00	0,02	1,76	4,97	0,01	0,67	0,41	1,71	4,16	0,08
variance				0,005	0,004	0,02	0,22	7,25	10,91	0,02	0,88	0,53	2,62	16,02	0,43

TABLEAU C.4 Caractéristiques des pâtes, des caissettes et des eaux des essais d'usine (échantillons d'usine et de laboratoire)

scénario	journal	consistance	floculant	Cendres pâtes, % (CeP)	Cendres caissettes usine, % (CeM_U)	Cendres caissettes laboratoire, % (CeM_L)	Ind. d'égouttage, ml (égout)	Temps de drainage, sec/grammage (drain)	Temps de drainage, sec/grammage (feuilles 3 g) (drain3)	Solides dissous totales usine, mg/mL (SD_U)	Solides dissous totales laboratoire, mg/mL (SD_L)	Matières en suspension totales usine, mg/mL (MES_U)	Matières en suspension totales labor., mg/mL (MES_L)	Consistance eaux blanches usine, % (CoE_U)	Consistance eaux blanches laborat., % (CoE_L)	Cendres eaux blanches usine, % (CeE_U)	Cendres eaux blanches laboratoire, % (CeE_L)
11	-1	1	1	6,37	6,30	6,07	140	0,38	0,55	2,43	1,95	0,343	0,29	0,0347	0,0283	11,16	23,06
12	-1	1	1	6,60	6,54	6,38	135	0,41	0,59	2,34	1,92	0,362	0,27	0,0351	0,0344	10,63	19,44
21	-1	-1	1	6,38	6,56	6,04	136	0,44	0,54	2,50	1,97	0,318	0,25	0,0310	0,0295	10,92	21,19
22	-1	-1	1	6,05	6,41	6,10	136	0,40	0,58	2,42	1,89	0,309	0,25	0,0306	0,0292	11,38	20,13
31	-1	-1	-1	6,72	6,61	5,97	128	0,38	0,66	2,41	1,90	0,511	0,37	0,0497	0,0382	16,20	34,71
32	-1	-1	-1	7,18	6,94	6,38	126	0,48	0,60	2,42	1,90	0,531	0,39	0,0530	0,0391	16,76	34,51
41	-1	1	-1	7,18	7,20	6,48	125	0,42	0,66	2,41	1,70	0,528	0,39	0,0532	0,0439	17,16	34,15
42	-1	1	-1	7,10	7,15	6,55	125	0,46	0,64	2,43	1,93	0,494	0,42	0,0515	0,0450	17,28	36,17
51	1	1	-1	4,95	5,30	4,83	129	0,45	0,65	2,26	1,92	0,420	0,32	0,0440	0,0331	12,40	31,36
52	1	1	-1	4,70	5,01	4,58	127	0,43	0,65	2,29	1,88	0,440	0,31	0,0465	0,0345	11,84	29,82
61	1	-1	-1	4,54	4,91	4,45	126	0,42	0,59	2,33	1,91	0,440	0,30	0,0465	0,0341	11,79	28,38
62	1	-1	-1	5,22	5,46	4,89	129	0,44	0,62	2,29	1,96	0,441	0,32	0,0465	0,0305	12,69	32,78
71	1	-1	1	6,72	7,19	6,20	137	0,41	0,58	2,12	2,01	0,160	0,36	0,0180	0,0385	12,81	26,50
72	1	-1	1	7,63	8,25	7,22	147	0,42	0,55	2,27	2,05	0,359	0,30	0,0385	0,0337	12,92	28,08
81	1	1	1	8,41	8,98	7,49	154	0,45	0,56	2,32	2,20	0,368	0,35	0,0375	0,0400	14,06	29,88
82	1	1	1	8,81	9,41	7,83	156	0,44	0,54	2,34	2,24	0,384	0,33	0,0380	0,0327	14,74	36,94
<i>min</i>				4,54	4,91	4,45	125	0,38	0,54	2,12	1,70	0,160	0,247	0,0180	0,0283	10,63	19,44
<i>max</i>				8,81	9,41	7,83	156	0,48	0,66	2,50	2,24	0,531	0,42	0,0532	0,0450	17,28	36,94
<i>moyenne</i>				6,5	6,8	6,1	135	0,4	0,6	2,3	2,01	0,440	0,30	0,0409	0,0353	13,4	29,2
<i>écart type</i>				1,24	1,30	0,99	10,8	0,03	0,04	0,09	0,13	0,10	0,05	0,01	0,01	2,32	5,76
<i>CV%</i>				18,90	19,27	16,33	7,48	6,39	7,33	3,95	6,46	24,15	15,47	23,77	14,30	17,27	19,74
<i>MSEp</i>				0,12	0,12	0,10	9,13	0,001	0,001	0,003	0,004	0,003	0,000	0,000	0,000	0,15	5,77
<i>variance</i>				1,53	1,70	0,99	101	0,001	0,002	0,009	0,016	0,009	0,003	0,000	0,000	5,37	33,22

TABLEAU C.5 Propriétés des caissettes des essais d'usine (échantillons d'usine et de laboratoire)

scénario	journal	consistance	flocculant	Poids caissette usine, g (pU)	Poids caissette laboratoire, g (pL)	Résistance caissette usine, kg/g (MU/g)	Résistance caissette laboratoire, kg/g (ML/g)	Résistance caissette usine, kg g/cm (MU/vs)	Résistance caissette laboratoire, kg g/cm (ML/vs)
11	-1	1	1	56,49	10,79	6,36	4,55	2289	53,15
12	-1	1	1	59,05	11,37	6,52	4,58	2495	52,94
21	-1	-1	1	48,65	9,72	6,42	4,41	2430	45,86
22	-1	-1	1	48,82	9,49	6,97	4,47	2643	42,68
31	-1	-1	-1	49,55	10,85	6,13	4,35	2366	45,54
32	-1	-1	-1	49,27	11,22	5,81	4,33	1818	46,25
41	-1	1	-1	56,27	11,82	6,92	4,40	2960	47,45
42	-1	1	-1	57,06	11,95	6,85	4,44	3277	53,44
51	1	1	-1	58,39	11,56	7,04	4,48	2613	55,58
52	1	1	-1	59,27	11,40	6,75	4,41	2606	50,50
61	1	-1	-1	50,20	10,32	7,28	4,46	2284	44,41
62	1	-1	-1	50,40	10,35	7,00	4,50	2202	49,67
71	1	-1	1	50,08	8,66	6,54	4,17	2227	38,90
72	1	-1	1	50,36	9,26	6,81	4,19	2160	42,53
81	1	1	1	61,07	10,92	7,10	4,20	3051	50,26
82	1	1	1	64,78	11,98	6,43	4,55	3188	62,08
<i>min</i>				48,65	8,66	5,81	4,17	1818	38,90
<i>max</i>				64,78	11,98	7,28	4,58	3277	62,08
<i>moyenne</i>				54,4	10,73	6,68	4,40	2538,0	48,8
<i>écart type</i>				5,23	1,01	0,39	0,13	405,89	5,82
<i>CV%</i>				9,63	9,45	5,85	2,90	15,99	11,91
<i>MSEpure</i>				1,37	0,13	0,07	0,01	32370	15,80
<i>variance</i>				27,39	1,03	0,15	0,02	164746	33,83

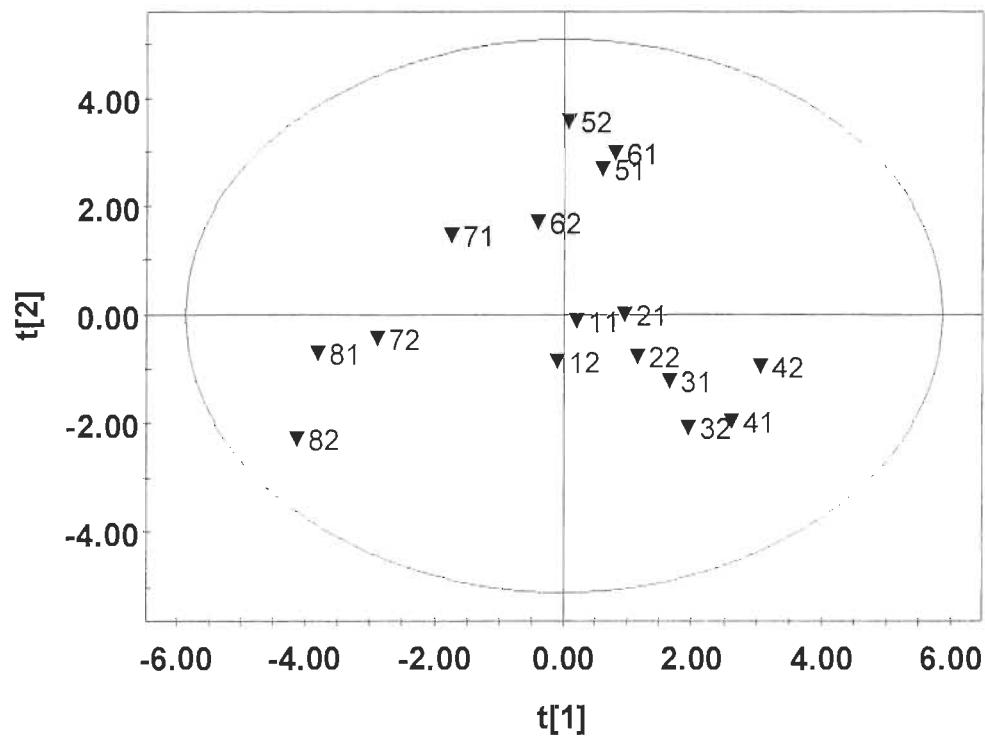


FIGURE C.1 Diagramme de pointage du modèle rejeté.

TABLEAU C.6 Modèle 50/50 – Valeur des charges des composantes

	w*c[1]	w*c[2]	w*c[3]	w*c[4]	w*c[5]	w*c[6]					
CeE_U	0,33	pU	0,42	MU/g	0,38	R28	0,48	ChF	0,52	SD_L	0,55
CeE_L	0,32	consistanc	0,40	InB	0,37	MU/vs	0,36	vs	0,50	dech	0,50
CoE_U	0,32	ML/vs	0,33	MU/vs	0,37	trac	0,36	InH	0,45	ML/vs	0,45
MES_L	0,32	pL	0,31	InH	0,34	MU/g	0,35	STFI	0,41	courb	0,41
CoE_L	0,32	ML/g	0,29	CeM_L	0,26	If	0,35	eclat3	0,39	SD_U	0,31
MES_U	0,32	MecR	0,29	SD_U	0,25	InH	0,27	If	0,28	ChF	0,30
bl	0,31	eclat	0,28	ChR	0,23	anneau	0,25	anneau	0,24	If	0,27
CeM_U	0,29	cd	0,25	CeM_U	0,21	eclat3	0,24	R14	0,24	R14	0,27
R200	0,29	InH	0,23	vs3	0,19	MecR	0,19	fines	0,19	R28	0,22
R100	0,29	CeM_L	0,19	consistanc	0,18	InB	0,19	CeM_L	0,18	trac	0,22
drain3	0,29	MU/vs	0,19	drain	0,17	SD_U	0,19	SD_L	0,17	TEA	0,21
CeP	0,29	TEA	0,18	R48	0,16	vs3	0,16	drain	0,13	pL	0,18
R48	0,27	MU/g	0,17	ChR+ChF	0,16	drain3	0,15	TEA	0,13	R100	0,17
pL	0,26	ChF	0,16	rigid	0,14	floculant	0,12	MU/vs	0,12	vs	0,14
fines	0,25	InB	0,15	ML/vs	0,14	TEA	0,12	vs3	0,12	pU	0,13
eclat3	0,19	P200	0,15	pU	0,11	rigid	0,12	floculant	0,11	CeP	0,13
drain	0,18	drain3	0,14	ML/g	0,10	egoutt	0,10	P200	0,11	ChR+ChF	0,12
CeM_L	0,18	trac	0,13	R100	0,09	vs	0,00	drain3	0,10	consistanc	0,12
If	0,16	courb	0,12	R28	0,09	ChF	0,00	R48	0,10	vs3	0,12
MecR	0,14	vs	0,11	bl	0,08	eclat	0,00	CoE_L	0,09	CeE_L	0,11
MU/vs	0,11	bl	0,11	anneau	0,08	SD_L	0,00	ChR+ChF	0,08	R200	0,09
vs	0,10	CoE_L	0,11	CoE_L	0,07	dech	0,00	MU/g	0,07	InB	0,09
R28	0,07	CeP	0,07	floculant	0,07	ML/g	-0,02	CeM_U	0,06	drain	0,08
consistanc	0,05	R14	0,06	SD_L	0,05	R200	-0,02	ML/g	0,05	MES_L	0,07
pU	0,04	eclat3	0,05	P200	0,03	P200	-0,03	eclat	0,04	egoutt	0,07
ChF	0,03	MES_L	0,05	CeP	0,03	R48	-0,04	trac	0,02	CoE_U	0,04
MU/g	-0,01	CeM_U	0,04	MES_L	0,01	CeE_L	-0,06	bl	0,00	MES_U	0,03
SD_U	-0,01	CoE_U	0,03	If	0,00	CeE_U	-0,07	ML/vs	0,00	R48	0,03
ML/vs	-0,02	MES_U	0,02	CeE_U	0,00	angle	-0,08	CeP	-0,01	ChR	0,03
InH	-0,04	R100	0,02	TEA	0,00	CoE_L	-0,09	pU	-0,01	ML/g	0,02
anneau	-0,05	floculant	0,00	egoutt	-0,01	bl	-0,09	R28	-0,04	eclat3	0,01
angle	-0,08	egoutt	-0,01	pL	-0,02	consistanc	-0,11	pL	-0,05	CoE_L	0,01
dech	-0,11	CeE_U	-0,02	STFI	-0,02	R100	-0,12	dech	-0,06	CeE_U	-0,01
cd	-0,13	CeE_L	-0,02	trac	-0,03	MES_L	-0,12	ChR	-0,07	CeM_U	-0,03
ChR	-0,13	fines	-0,06	CeE_L	-0,03	pU	-0,14	egoutt	-0,07	floculant	-0,05
ChR+ChF	-0,14	R48	-0,07	R200	-0,05	R14	-0,14	R200	-0,08	MU/vs	-0,07
courb	-0,15	drain	-0,12	CoE_U	-0,06	STFI	-0,14	MES_U	-0,09	cd	-0,08
STFI	-0,16	rigid	-0,12	drain3	-0,06	CeM_U	-0,15	MecR	-0,10	CeM_L	-0,11
InB	-0,17	angle	-0,12	MES_U	-0,11	MES_U	-0,15	CoE_U	-0,11	eclat	-0,14
SD_L	-0,18	R200	-0,13	fines	-0,12	CoE_U	-0,16	CeE_U	-0,12	MecR	-0,14
eclat	-0,20	SD_L	-0,16	MecR	-0,16	ChR	-0,20	consistanc	-0,12	bl	-0,15
rigid	-0,23	If	-0,19	eclat	-0,20	ML/vs	-0,20	MES_L	-0,13	angle	-0,15
ML/g	-0,24	dech	-0,22	R14	-0,23	fines	-0,20	cd	-0,15	drain3	-0,19
P200	-0,25	vs3	-0,22	eclat3	-0,24	courb	-0,21	CeE_L	-0,16	InH	-0,21
vs3	-0,25	STFI	-0,22	dech	-0,31	cd	-0,22	courb	-0,16	rigid	-0,23
trac	-0,26	anneau	-0,27	ChF	-0,32	ChR+ChF	-0,22	SD_U	-0,18	anneau	-0,26
R14	-0,26	ChR+ChF	-0,28	cd	-0,35	pL	-0,30	angle	-0,18	STFI	-0,31
TEA	-0,27	R28	-0,29	vs	-0,35	CeP	-0,30	rigid	-0,24	MU/g	-0,36
floculant	-0,33	ChR	-0,29	courb	-0,37	CeM_L	-0,35	InB	-0,28	P200	-0,37
egoutt	-0,34	SD_U	-0,32	angle	-0,46	drain	-0,39	R100	-0,37	fines	-0,41

TABLEAU C.7 Modèle pâte 100 % - Valeur des charges des composantes

	w*c[1]	w*c[2]	w*c[3]	w*c[4]	w*c[5]
CoE_U	0,28	eclat3	0,28	rigid	0,43
InB	0,28	P200	0,17	R14	0,34
R28	0,27	MecR	0,13	eclat	0,26
R48	0,27	anneau	0,13	ChR+ChF	0,24
MES_U	0,26	InB	0,11	trac	0,23
drain3	0,26	CoE_L	0,11	TEA	0,20
cd	0,25	floculant	0,10	R28	0,20
MecR	0,24	ChF	0,09	ChR	0,15
vs3	0,23	STFI	0,06	R48	0,15
vs	0,22	rigid	0,06	ChF	0,12
R100	0,20	InH	0,05	dech	0,12
STFI	0,16	MU/g	0,02	R200	0,12
MU/g	0,15	SD_U	0,00	MES_L	0,12
ML/g	0,13	CoE_U	0,00	fines	0,10
R14	0,11	CeM_L	-0,03	floculant	0,09
anneau	0,11	CeM_U	-0,04	R100	0,08
trac	0,11	MES_L	-0,04	If	0,07
eclat	0,09	CeP	-0,05	CeE_U	0,06
rigid	0,05	dech	-0,06	courb	0,05
R200	0,03	MES_U	-0,06	CeP	0,05
pL	0,02	R28	-0,07	STFI	0,05
drain	-0,01	egoutt	-0,07	SD_U	0,05
eclat3	-0,03	If	-0,08	CeM_L	0,04
dech	-0,04	trac	-0,10	CeM_U	0,04
If	-0,04	fines	-0,10	SD_L	0,04
TEA	-0,04	drain3	-0,11	CoE_U	0,03
ML/vs	-0,05	cd	-0,11	CeM_L	0,00
InH	-0,05	SD_L	-0,11	vs	0,01
ChR	-0,06	eclat	-0,12	MES_U	0,01
CeE_L	-0,06	TEA	-0,12	angle	-0,02
consistanc	-0,07	ChR+ChF	-0,13	CoE_U	-0,02
SD_U	-0,10	courb	-0,13	SD_U	-0,02
bl	-0,10	angle	-0,13	eclat3	-0,03
pU	-0,12	R48	-0,13	drain3	-0,09
CoE_L	-0,13	CeE_U	-0,17	MU/g	-0,12
MU/vs	-0,16	vs3	-0,19	vs3	-0,12
MES_L	-0,16	ChR	-0,22	vs	-0,14
P200	-0,22	vs	-0,22	drain	-0,16
ChF	-0,24	ML/g	-0,22	ML/vs	-0,16
ChR+ChF	-0,24	R14	-0,24	CoE_L	-0,17
CeE_U	-0,25	bl	-0,26	InB	-0,19
courb	-0,26	R100	-0,27	ChF	-0,22
fines	-0,28	MU/vs	-0,27	drain3	-0,22
SD_L	-0,29	consistanc	-0,31	bl	-0,20
angle	-0,29	CeE_L	-0,33	rigid	-0,24
floculant	-0,30	pU	-0,34	eclat3	-0,27
egoutt	-0,30	ML/vs	-0,34	CoE_L	-0,31
CeP	-0,30	drain	-0,36	InH	-0,38
CeM_L	-0,30	R200	-0,39	consistanc	-0,38
CeM_U	-0,30	pL	-0,39	InH	-0,42

ANNEXE D

Résultats chapitre 7

TABLEAU D.1 Caractéristiques fibreuses des pâtes des essais de laboratoire

scénario	Design J-C-F	Fines, % pondéré en poids (fines)	Longueur de fibres pondérée en poids, mm (lf)	Courbure, longueur pondérée en poids (courb)	Angle de cassure, index (angle)	Fraction R14, % (R14)	Fraction R28, % (R28)	Fraction R48, % (R48)	Fraction R100, % (R100)	Fraction R200, % (R200)	Fraction P200, % (P200)
F1	---	9,930	2,252	0,046	0,60	6,70	24,50	15,10	12,50	8,80	32,40
F2	+--	8,505	2,262	0,048	0,67	7,80	25,80	15,60	12,20	7,40	31,20
F3	000	9,205	2,219	0,042	0,54	7,90	25,50	15,90	11,90	7,20	31,60
F4	++-	8,915	2,233	0,050	0,70	7,20	24,60	15,00	11,80	7,50	33,90
F5	-++	9,385	2,289	0,041	0,55	6,30	23,70	14,50	11,20	7,80	36,50
F6	000	9,115	2,314	0,051	0,63	8,00	26,80	16,40	12,30	7,60	28,90
F7	-+-	10,440	2,250	0,046	0,58	6,50	24,90	15,60	19,50	8,60	24,90
F8	++-	8,855	2,380	0,049	0,74	7,10	23,10	15,00	11,90	7,40	35,50
F9	+--	9,335	2,147	0,049	0,74	8,10	25,60	16,10	13,10	7,20	29,90
F10	000	-	-	-	-	8,40	26,20	15,80	12,50	7,30	29,80
F11	-++	-	-	-	-	6,10	23,80	15,50	12,00	8,10	34,50
F12	000	10,210	2,229	0,050	0,70	6,50	24,70	15,10	12,50	7,90	33,30
F13	--+	9,315	2,248	0,046	0,58	6,20	24,40	15,50	11,80	7,50	34,60
F14	000	9,985	2,293	0,049	0,71	7,10	24,00	15,90	11,80	7,40	33,80
F15	000	8,945	2,284	0,049	0,64	7,60	24,20	16,50	12,10	7,30	32,30
F16	+++	9,855	2,294	0,054	0,78	8,00	24,20	16,10	12,10	7,00	32,60
F17	-+-	9,300	2,370	0,053	0,71	6,90	23,40	15,40	12,40	7,70	34,20
F18	-+-	9,415	1,907	0,046	0,570	6,80	25,10	16,30	11,70	7,50	32,60
F19	---	10,500	1,835	0,042	0,575	5,50	23,40	15,80	12,40	8,50	34,40
F20	-+-	10,255	1,819	0,045	0,550	7,40	24,60	16,50	11,90	7,80	31,80
F21	++-	8,160	2,254	0,045	0,54	8,40	27,40	16,40	12,50	7,50	27,80
F22	+++	10,040	2,262	0,055	0,75	8,10	23,40	16,10	12,40	7,10	32,90
min		8,16	1,82	0,04	0,54	5,50	23,10	14,50	11,20	7,00	24,90
max		10,50	2,38	0,06	0,78	8,40	27,40	16,50	19,50	8,80	36,50
moyenne		9,48	2,21	0,05	0,64	7,21	24,70	15,73	12,48	7,64	32,25
écart type		0,65	0,16	0,00	0,08	0,82	1,14	0,56	1,62	0,48	2,70
CV%		6,84	7,30	8,25	12,47	11,42	4,62	3,54	12,97	6,33	8,37
MSE		7,41	0,42	0,00	0,03	1,08	2,82	0,69	2,60	0,19	11,67
variance		0,42	0,03	0,00	0,01	0,68	1,30	0,31	2,62	0,23	7,28

TABLEAU D.2 Propriétés physiques et optiques des essais de laboratoire
(Feuilles standards et feuilles 3 g)

scénario	Design J-C-F	Vol. spécifique, cm ³ /g (vs)	Vol. spécifique, cm ³ /g (feuilles 3g) (vs ₃)	Ind. d'éclatem., kPa m ² /kg (éclat)	Ind. de déchirure, mN * m ² /g (dech)	Indice de traction, Nm/g (trac)	TEA, g/cm (TEA)	Ind. d'éclatem., kpa *m ² /g (feuilles 3g) (éclat3)	Rigidité Taber, 10 ³ mNm/ (g/m ²) (rigid)	Résist. à la compres. en anneau, Nm/g (anneau)	Résistance à la compres. STFI, Nm/g (STFI)	Coeff. de diffusion, m ² /kg (cd)	Blancheur, % (bl)
F1	---	2,48	2,19	1,52	7,83	30,56	21,2	1,68	16,66	14,76	59,24	51,32	40,40
F2	+-	2,43	2,22	1,70	7,94	31,78	20,8	1,76	20,52	15,12	58,92	50,84	39,60
F3	000	2,41	2,21	1,72	8,46	30,93	19,6	1,78	18,12	15,46	59,03	51,64	39,96
F4	++-	2,53	2,36	1,91	8,43	33,74	24,5	1,76	18,78	14,94	61,30	51,04	39,52
F5	---	2,54	2,23	1,67	7,21	30,83	21,0	1,83	16,99	15,13	60,17	57,20	39,75
F6	000	2,31	2,24	1,70	8,41	31,89	19,9	1,70	18,90	14,98	59,70	46,90	39,50
F7	-+-	2,25	2,34	1,51	7,24	28,65	17,1	1,53	18,86	13,62	58,35	54,76	40,25
F8	++-	2,20	2,20	1,81	8,30	34,74	24,3	1,85	19,06	15,35	56,25	52,46	39,27
F9	---	2,34	2,24	1,72	8,18	28,34	14,71	1,84	17,84	14,46	57,28	47,18	39,71
F10	000	2,34	2,30	1,60	7,93	31,17	19,0	1,66	17,46	14,42	58,26	49,85	39,74
F11	++-	2,45	2,24	1,52	7,07	27,74	13,840	1,61	19,65	14,25	57,24	43,49	39,80
F12	000	2,29	2,14	1,60	7,63	30,77	17,570	1,75	17,27	14,31	57,79	51,319	40,09
F13	---	2,50	2,36	1,56	7,59	27,48	20,520	1,55	19,76	14,01	57,19	50,537	39,12
F14	000	2,37	2,18	1,65	7,99	31,01	23,75	1,68	16,83	14,56	59,56	49,75	40,25
F15	000	2,30	2,25	1,69	8,01	29,20	19,88	1,66	17,57	14,42	58,29	47,66	40,44
F16	+++	2,21	2,06	1,80	7,99	32,94	24,3	1,94	17,18	15,56	59,97	56,12	39,75
F17	++-	2,26	2,13	1,79	8,06	31,29	21,13	1,88	17,43	15,16	60,49	52,00	39,44
F18	-+-	2,49	2,26	1,51	7,22	28,17	15,62	1,57	18,12	13,79	56,94	50,47	40,27
F19	---	2,42	2,33	1,50	6,99	28,81	18,24	1,53	17,87	13,23	59,16	52,21	40,53
F20	---	2,70	2,29	1,62	7,79	30,75	17,87	1,66	16,72	13,71	58,56	60,53	39,61
F21	++-	2,53	2,31	1,70	8,48	31,30	19,67	1,73	20,92	13,69	58,06	52,18	40,18
F22	+++	2,08	1,99	1,88	7,92	35,30	24,81	1,97	15,02	14,08	59,25	51,83	40,04
min		2,08	1,99	1,50	6,99	27,48	13,84	1,53	15,02	13,23	56,25	43,49	39,12
max		2,70	2,36	1,91	8,48	35,30	24,81	1,97	20,92	15,56	61,30	60,53	40,53
moyenne		2,38	2,23	1,67	7,85	30,79	19,97	1,72	18,07	14,50	58,68	51,42	39,87
écart type		0,14	0,09	0,12	0,46	2,14	3,15	0,13	1,39	0,66	1,27	3,62	0,39
CV%		5,97	4,19	7,33	5,91	6,96	15,76	7,34	7,70	4,56	2,16	7,04	0,99
MSE		0,01	0,01	0,01	0,23	3,78	13,52	0,01	2,45	0,67	2,85	20,08	0,26
variance		0,02	0,01	0,01	0,21	4,59	9,90	0,02	1,94	0,44	1,60	13,11	0,15

TABLEAU D.3 Caractéristiques des pâtes et des eaux des essais de laboratoire

scénario	Design J-C-F	lnH	lnB	Cendres pâtes, % (CeP)	Cendres caissettes laboratoire, % (CEM_L)	Ind. d'égouttage, ml (égout)	Temps de drain., sec/grammage (drain)	Temps de drain., sec/grammage (feuilles 3 g) (drain)	Solides dissous totales laboratoire, mg/mL (SD_L)	Matières en suspension totales laborat., mg/ml (MES_L)	Consistance eaux blanches laborat., % (CoE_L)	Cendres eaux blanches laboratoire, % CeE_L
F1	---	0,28	0,39	7,55	7,01	110	0,54	0,75	1,8967	0,49	0,052	35,64
F2	---	0,54	0,66	5,32	5,32	134	0,46	0,69	2,0617	0,30	0,035	30,04
F3	000	0,45	0,60	5,90	5,40	113	0,50	0,71	1,8500	0,30	0,023	30,58
F4	---	0,61	0,74	4,88	4,76	128	0,46	0,64	1,8810	0,33	0,029	36,40
F5	---	0,31	0,73	6,23	6,25	123	0,47	0,73	1,8600	0,30	0,027	24,30
F6	000	0,48	0,57	5,74	5,28	114	0,56	0,73	1,8367	0,29	0,029	29,59
F7	---	0,35	0,55	7,42	7,32	125	0,54	0,64	1,7867	0,45	0,044	39,83
F8	---	0,55	0,52	7,74	7,56	128	0,65	0,62	2,0983	0,29	0,028	35,02
F9	---	0,49	0,57	6,52	6,02	118	0,62	0,72	2,0510	0,37	0,030	41,95
F10	000	0,44	0,55	6,15	5,82	124	0,48	0,65	1,9010	0,29	0,031	28,20
F11	---	0,37	0,46	7,41	7,01	113	0,54	0,79	1,8270	0,30	0,028	31,30
F12	000	0,40	0,43	7,96	7,55	111	0,56	0,76	1,9830	0,39	0,026	39,19
F13	---	0,33	0,59	6,70	6,18	123	0,52	0,68	1,5300	0,35	0,032	32,01
F14	000	0,53	0,52	8,17	7,72	124	0,67	0,80	1,9870	0,37	0,037	33,89
F15	000	0,43	0,44	8,22		135	0,61	0,72	-	-	-	-
F16	---	0,70	0,39	8,76	8,30	144	-	0,55	2,3320	0,34	0,025	37,13
F17	---	0,56	0,42	8,29	8,09	138	0,54	0,57	2,2220	0,34	0,029	31,31
F18	---	0,37	0,74	7,74	6,64	125	0,53	0,67	1,8240	0,47	0,038	45,83
F19	---	0,28	0,37	7,92	7,20	116	0,63	0,80	1,8070	0,42	0,037	41,26
F20	---	0,36	0,60	6,77	6,56	120	0,77	0,78	1,7180	0,32	0,030	29,54
F21	---	0,61	0,70	4,32	4,27	136	0,47	0,64	1,7017	0,31	0,028	31,11
F22	---	0,48	0,30	8,59	8,52	142	0,61	0,55	2,5060	0,36	0,034	38,93
<i>min</i>		0,28	0,30	4,32	4,27	110	0,46	0,55	1,53	0,29	0,02	24,30
<i>max</i>		0,70	0,74	8,76	8,52	144	0,77	0,80	2,51	0,49	0,05	45,83
<i>moyenne</i>		0,45	0,54	7,01	6,61	125	0,56	0,69	1,94	0,35	0,03	34,43
<i>écart type</i>		0,12	0,13	1,25	1,18	10	0,08	0,08	0,22	0,06	0,01	5,37
<i>CV%</i>		25,49	23,45	17,77	17,90	8,08	14,29	11,15	11,45	17,65	21,19	15,61
<i>MSE</i>				2,95	17,79	184	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	41,59
<i>variance</i>				1,55	1,40	101	0,01	0,01	0,05	0,00	0,00	28,88

TABLEAU D.4 Propriétés des caissettes des essais de laboratoire

scénario	Design J-C-F	Poids caissette laboratoire, g (pL)	Résistance caissette laboratoire, kg/g (ML/g)	Résistance caissette laboratoire, kg/g/cm (ML/vs)
F1	---	9,54	3,69	40,40
F2	+--	11,36	4,23	52,79
F3	000	10,96	3,81	49,49
F4	++-	10,95	3,92	46,95
F5	-++	11,00	4,07	50,64
F6	000	11,56	4,11	52,71
F7	-+-	11,54	3,99	50,58
F8	++-	9,80	3,95	46,83
F9	-+-	10,73	3,75	48,83
F10	000	11,81	3,98	55,82
F11	-++	12,37	4,08	55,86
F12	000	11,63	4,00	53,21
F13	--+	10,71	3,62	45,01
F14	000	12,23	3,75	50,65
F15	000	-	-	-
F16	+++	12,68	4,05	60,46
F17	++-	11,19	3,55	46,71
F18	-+-	12,86	3,99	54,30
F19	---	10,79	3,74	45,52
F20	--+	10,61	4,07	51,51
F21	++-	10,27	4,08	45,42
F22	+++	13,94	4,16	68,51
<i>min</i>		9,54	3,55	40,40
<i>max</i>		13,94	4,23	68,51
<i>moyenne</i>		11,36	3,93	51,06
<i>écart type</i>		1,05	0,19	6,06
<i>CV%</i>		9,21	4,76	11,86
<i>MSE</i>		0,69	0,06	16,62
<i>variance</i>		1,09	0,04	36,69

**ANEXE E Travail présenté au “CONGRESO
IBEROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN EN CELULOSA Y
PAPEL 2000”, 18 au 20 Octobre 2000, Iguazú, Misiones,
Argentina.**

Disponible sur le site du congrès:

www.unam.edu.ar/ciadicyp2000/trabajos/trabajos/papel/Gavazzo-34-CRPP-Can.pdf

FABRICACIÓN DE PRODUCTOS EN PULPA MOLDEADA: UN CASO DE ESTUDIO

Gavazzo, Graciela B.¹; Lanouette, Robert²; Valade Jacques L.³

¹ Argentina. Programa de Investigación de Celulosa y Papel. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales, UNaM. Tel: 1-(819) 376-5011 int. 3264 Fax: 1-(819) 376-5148. gavazzo@uqtr.quebec.ca

² Canada. Centre de Recherche en Pâtes et Papiers. Université du Québec à Trois-Rivières. Tel: 1-(819) 376-5011 int. 3258 Fax: 1-(819) 376-5148. Robert_Lanouette@uqtr.quebec.ca

³ Canada. Département de Génie Chimique. Université du Québec à Trois-Rivières. Tel: 1-(514) 251-2985 Fax: 1-(514) 899-1083. Jacques_L_Valade@uqtr.quebec.ca

Resumen

La pulpa moldeada, generalmente fabricada a partir de fibras recicladas, se produce en formas diversas y para aplicaciones muy variadas. Entre los productos encontramos cajas y bandejas para huevos, bandejas para frutas, platos y contenedores y/o distribuidores de alimentos, macetas germinadoras, recipientes hospitalarios descartables, relleno de embalajes y embalajes contenedores y protectores de lámparas, tubos fluorescentes, piezas y aparatos electrónicos y otros. Como materia prima se puede utilizar 100% de fibras recicladas. Sin embargo, el tipo de fibra varía en función de la calidad del producto final, y cubre el rango de fibras sustitutas de la pulpa hasta fibras de papeles mezcla.

El remplazo de materiales no degradables por la pulpa moldeada produjo un crecimiento del sector, pero, a pesar de ello, es uno de los rubros menos documentado y menos estudiado en el área de pulpas y papeles. En América del Norte, unas 26 fábricas generan alrededor de 500.000 tn/año, con capacidades unitarias que varían entre 3 y 100 tn/día.

La fábrica estudiada cuenta con cinco máquinas para la producción de pulpas moldeadas y trabaja en circuito de aguas cerrado. Como materia prima utiliza papeles de diarios y guías telefónicas, que se desintegran a baja consistencia para alimentar a la caja de entrada de las máquinas moldeadoras. En el presente trabajo, se estudiaron las materias primas y los moldes de dos máquinas moldeadoras, las que producen bandejas para 30 huevos.

Se obtuvieron muestras de los papeles utilizados, los que se desintegran y ensayaron individualmente y como mezclas de diferentes papeles y aditivos químicos. Las pulpas, denominadas "pulpas de laboratorio", se ensayaron según las técnicas convencionales y en hojas de 150 g/m² (rigidez y resistencia a la compresión).

Por otra parte, se tomaron muestras de las pulpas en diferentes etapas del proceso, "pulpas de fábrica", en dos momentos diferentes, durante la mañana y durante la tarde. Las mismas consistieron en pulpa del tanque de reserva, pulpa de la cabeza de la máquina A, y moldes húmedos luego de la formación y antes del secado, de ambas máquinas, los que se desintegraron durante 2 minutos al 2% de consistencia. Estas pulpas se ensayaron de manera convencional y en hojas de 150 g/m² (rigidez y resistencia a la compresión).

Sobre el producto final, bandejas para huevos, se ensayó la resistencia a la compresión.

Los resultados preliminares muestran una posible influencia de la materia prima o del proceso sobre la calidad de los moldeados.

Palabras claves: *pulpa moldeada – fibras recicladas – proceso – productos - propiedades*

Introducción

GENERAL

Los productos en pulpa moldeada, generalmente fabricados a partir de fibras recicladas, se producen de formas diversas y para aplicaciones diferentes. En razón de su diseño en tres dimensiones, solamente la imaginación fija el límite del posible uso de los productos moldeados. Podemos observar algunos ejemplos en la Figura 1 (1).

Basándonos en una clasificación propuesta por la bibliografía (2), podemos agrupar los productos en pulpa moldeada según su utilización final, Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de productos moldeados según su utilización final

Productos de consumo	Vajilla Platos Fuentes
Embalaje de restauración	Platos Bandejas Porta vasos
Distribución y Embalaje de alimentos	Estuches para huevos Bandejas para huevos Bandejas para frutas (peras, manzanas) Bandejas para supermercados (carnes) Cajas para pizza
Especialidades	Macetas para germinación Jarrones para flores Recipientes hospitalarios descartables Rellenos de calzados
Embalaje y Acondicionamiento	Bandejas para lámparas y tubos fluorescentes Calado para teléfonos portátiles, afeitadoras, herramientas, aparatos electrodomésticos, piezas y accesorios de computadora, impresoras, frascos de medicina, etc. Material de relleno



Figura 1. Productos en pulpa moldeada (1)

En lo que respecta a datos económicos, el mercado de las pulpas moldeadas es el menos documentado de la industria de la pulpa y el papel.

En América del Norte, luego de una disminución de las ventas entre 1973 y 1983 debido al crecimiento de productos en plástico y poliestireno, la industria de la pulpa moldeada recupera el mercado, en gran medida debido a la preferencia por los productos amigos del medio ambiente. Para 1997, la estimación de las ventas alcanza U\$S 400 millones (2). Actualmente, se contabilizan 26 fábricas, con capacidades que pueden variar entre 3 y 100 tn/día y que totalizan una producción de 500.000 tn/año.

En América del Sur, a pesar del conocimiento de instalaciones industriales en Argentina, Brasil, Colombia, Venezuela y Perú, solo se dispone de datos estadísticos de Brasil. En este país, los últimos datos muestran un crecimiento acelerado del sector. Entre 1996 y 1997, la producción muestra un aumento de aproximadamente 18%, y entre 1997 y 1998 el aumento estimado es del 34%, alcanzando 33.018 toneladas anuales (3).

Básicamente, se pueden distinguir dos procesos de obtención de productos moldeados (4). En el proceso par "inyección presurizada", los moldeados se producen en máquinas semiautomáticas. Cierta cantidad de pulpa ingresa al molde y el producto se forma por soplado de aire presurizado y caliente. El producto obtenido contiene 45-50% de humedad, que se elimina en una operación posterior.

El proceso de "moldeado por succión" es el más conocido y empleado. En este proceso, la pulpa está en contacto con un lado del molde y el producto se forma

por la aplicación de vacío en el lado opuesto del mismo. El producto formado contiene aun una cantidad importante de agua, alrededor del 85% de humedad, la que se elimina en un procedimiento posterior de secado. En ciertos casos, el producto formado se prensa con la ayuda de matrices calientes, lo que proporciona moldeados más rígidos y mas lisos, que pueden ser impresos en una cara (4).

En la Figura 2 se puede observar un diagrama típico de las instalaciones de moldeado por succión (1). El sistema, desarrollado por Emery International Developments Ltd., se compone de una sección de preparación de la pasta, seguido por la formación de los moldeados, los que se transfieren con la ayuda de matrices al sector de secado.

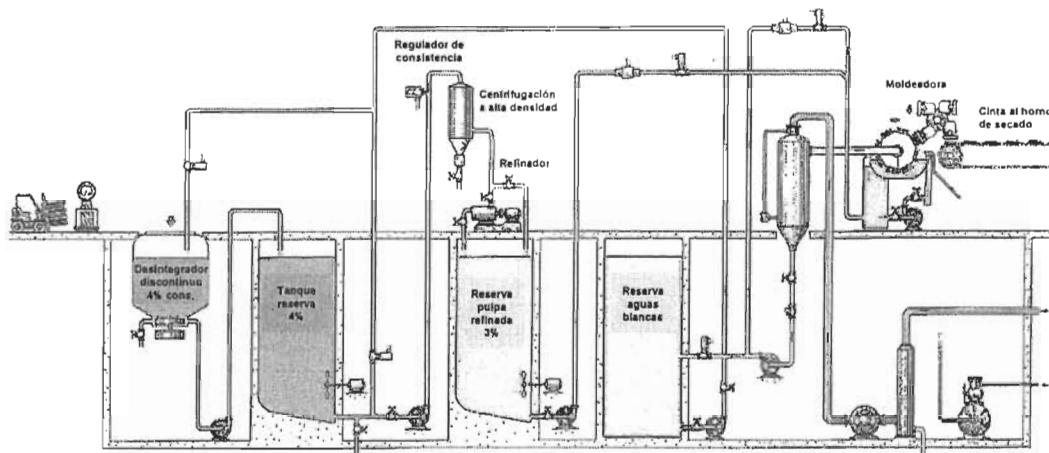


Figura 2. Proceso de moldeado por succión (1)

A pesar de la utilización creciente de la pulpa moldeada como material de protección en el embalaje de productos frágiles, los antecedentes de investigación de su comportamiento son prácticamente nulos.

Cuando se comparan la resistencia a la caída de productos moldeados en pulpa y de productos en poliestireno expandido, las propiedades amortizantes de la pulpa moldeada depende de la carga, de la altura de la caída y del número de impactos (5).

En un trabajo posterior se indican la ventajas de informar la resistencia a la caída en relación al perímetro del molde (6). Lamentablemente, en ninguna de las dos referencias se indica la influencia del espesor, densidad o composición del molde.

Si nos basamos en los conocimientos básicos sobre embalajes protectores y sobre propiedades de pulpas y papeles, podemos recopilar cierta cantidad de factores que podrían influenciar la resistencia de los productos moldeados por succión utilizados como material amortizante, Figura 3.

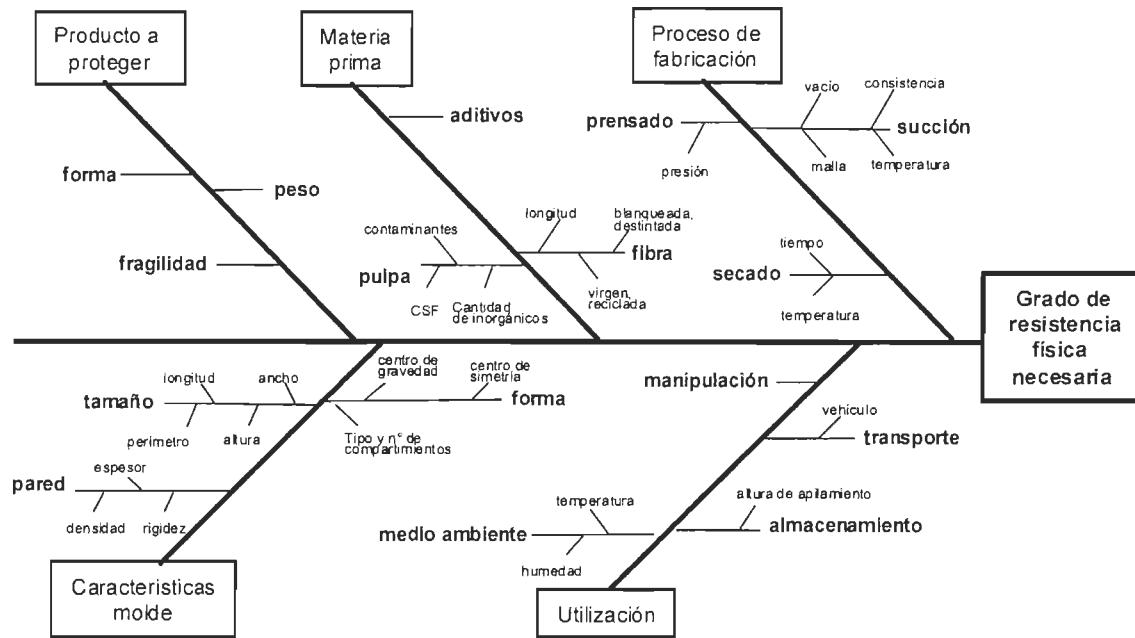


Figura 3. Diagrama causa-efecto de posibles factores de influencia sobre la resistencia de productos moldeados por succión

PROCESO ESTUDIADO

La fábrica estudiada cuenta con dos desintegradores y cinco máquinas moldeadoras por succión, con sus correspondientes túneles de secado, apiladoras automáticas y embaladoras.

En este trabajo se estudiaron la materia prima, los productos y las condiciones de proceso de dos máquinas moldeadoras, que producen bandejas para 30 huevos.

La materia prima utilizada es una combinación en partes iguales de guías telefónicas y papeles de periódicos, antes y después de consumo.

Los papeles se desintegran a una consistencia de 5-8% durante 20 minutos. Previa dilución, la pulpa pasa a un tanque de reserva a 3% de consistencia. En este punto la pulpa se separa en dos circuitos, que alimentan, luego de su dilución, las dos cabezas de máquina, A y B. En el circuito de la máquina A se agrega un floculante y un acondicionador en duchas de máquina. En el circuito de la máquina B se agregan un coagulante y un floculante, el acondicionador y un antiespumante.

Los moldes de la máquina A, una vez formados, son succionados por un contramolde, que los libera sobre la cinta de secado. En la máquina B los moldes se transfieren en dos pasos (succión – liberación) a la cinta de secado.

La fábrica trabaja en circuito de aguas cerrado. Parte del agua es clarificada y alimenta a las duchas y al desintegrador. Las aguas blancas restantes sirven de dilución de la pulpa que alimenta los moldes.

Metodología

PULPAS DE LABORATORIO

Se obtuvieron muestras de los papeles reciclados utilizados como materias primas en fábrica, los que se desintegraron a 80 °C y 2% de consistencia. Las pulpas obtenidas se ensayaron individualmente y en las mezclas 50% guías telefónicas + 50% diarios antes del consumo y 50% guías telefónicas + 50% diarios post-consumo.

También se estudió el efecto de los productos químicos sobre la calidad de la pulpa mezcla 50% guías telefónicas + 50% diarios antes del consumo. Los productos químicos se agregaron en cantidades mayores a las dosadas en fábrica, a los efectos de interpretar la posible influencia sobre la pulpa, en una proporción de 10% sobre fibra seca.

PULPAS DE FÁBRICA

Las muestras de pulpas de fábrica se extrajeron de ambas máquinas, A y B, a la mañana (muestra 1) y a la tarde (muestra 2). Las mismas consistieron en pulpa del tanque de reserva, pulpa de la cabeza de la máquina A, y moldes húmedos luego de la formación y antes del secado, de ambas máquinas, los que se desintegraron durante 2 minutos al 2% de consistencia.

Para los ensayos convencionales de resistencias físico-mecánicas y propiedades ópticas de las pulpas se utilizaron hojas de 60 g/m² formadas con recirculación de agua blanca. Para los ensayos de compresión y de rigidez se utilizaron hojas de 150 g/m², también formadas con recirculación de agua blanca.

MOLDES

El producto final fue muestreado a lo ancho de la máquina : cuatro bandejas en ambas máquinas. De cada bandeja se cortaron cuatro muestras, las que se utilizaron para medir la resistencia a la compresión de los productos moldeados. El material restante se utilizó para determinar el espesor y el gramaje promedio de la bandeja.

El ensayo de compresión consistió en la aplicación continua de una fuerza, a una velocidad de avance de 20 mm/min, hasta la falla del molde. El instrumento utilizado informa la carga aplicada y la deformación obtenida en el momento de la falla.

Resultados y Discusión

PULPAS DE LABORATORIO

Los resultados de la clasificación de fibras de las pulpas obtenidas de los papeles se muestran en la Tabla 2. Como puede observarse, el papel de guías telefónicas aporta las fibras largas mientras que papel de diario post-consumo es el principal responsable del contenido de finos de las mezclas.

En la Tabla 3 figuran los resultados de los demás ensayos realizados sobre las pulpas. Como puede observarse, la pulpa de guías telefónicas presenta en general los mejores valores de resistencias físico-mecánicas.

En lo que respecta a las mezclas, la combinación « guías telefónicas + diarios antes del consumo » exhibe los mejores valores. En vista de estos resultados, se seleccionó esta mezcla de papeles para estudiar el efecto del agregado de los distintos productos químicos utilizados en fábrica.

En comparación con la pulpa sin aditivos, todas las pulpas con productos químicos mostraron una disminución de las propiedades, destacándose el coagulante como el menos perjudicial y el floculante como el más nocivo. En revancha, la combinación de coagulante y floculante no produce cambios severos en las propiedades de la pulpa.

Tabla 2. Clasificación de fibras Bauer Mc Nett de papeles desintegrados y mezclas

Fracción (%)	GT	Diarios AC	Diarios PC	GT + Diarios AC	GT + Diarios PC
R14	14,7	11,0	3,3	12,2	8,0
14/28	24,9	26,9	19,6	25,9	23,0
28/48	16,3	11,8	14,4	17,3	16,0
48/100	11,8	17,4	12,7	12,1	13,3
100/200	6,2	6,0	8,2	6,1	7,5
P200	26,1	26,9	41,8	26,4	32,2

GT: Guías Telefónicas

Diarios AC: Diarios antes del consumo

Diarios PC: Diarios post-consumo

GT+Diarios AC: 50% Guías Telefónicas + 50% Diarios antes del consumo

GT+Diarios PC: 50% Guías Telefónicas + 50% Diarios post-consumo

Tabla 3. Propiedades papeles desintegrados y mezclas

	GT	Diario AC	Diario PC	GT + Diarios AC	GT + Diarios PC	Con Coagul.	Con Acondic.	Con Flocul.	Con Coag. + Flocul.
Indice de drenado (ml CSF)	118	122	95	119	102	115	141	140	114
Volumen específico (cm ³ /g)	2,153	2,500	1,795	2,487	2,138	2,396	2,374	1,889	2,324
Ind. de explosión (kPa*m ² /g)	2,54	2,39	1,96	2,43	2,23	2,23	2,03	1,83	2,29
Ind. de rasgado (mN*m ² /g)	7,94	8,08	6,07	8,50	7,12	8,09	7,79	6,18	8,08
Ind. de Tracción (Nm/g)	42,89	39,6	39,5	42,1	39,9	39,74	34,15	32,59	39,45
TEA (g/cm)	36,17	29,39	29,24	31,33	30,75	32,1	21,8	30,6	30,3
Long. de rotura (km)	4,37	4,04	4,03	4,30	4,07	4,05	3,48	3,32	4,02
Long. de fibra ponderada en peso (mm)	2,21	2,23	2,17	2,21	2,25	2,31	2,34	2,29	2,32
Finos (% ponderado en peso)	7,36	15,50	13,74	10,86	10,54	6,75	7,13	7,19	7,09
Curl (ponderado en peso)	0,0335	0,0475	0,047	0,0375	0,04	0,0375	0,0355	0,0365	0,0395
Blancura (% ISO)	42,35	46,14	50,97	44,43	47,13	42,71	43,09	41,89	42,68
Opacidad (%)	99,83	99,5	99,78	99,33	99,81	99,6	99,9	99,8	99,8
Coeficiente de difusión (m ² /kg)	59,28	54,71	70,99	49,08	67,67	54,68	65,61	56,09	59,81

GT: Guias Telefónicas

Diarios AC: Diarios antes del consumo

Diarios PC: Diarios post-consumo

GT+Diarios AC: 50% Guias Telefónicas + 50% Diarios antes del consumo

GT+Diarios PC: 50% Guias Telefónicas + 50% Diarios post-consumo

Con Coagul.: 50% Guias Telefónicas + 50% Diarios antes del consumo + 10% s.f.s. Coagulante

Con Acondic.: 50% Guias Telefónicas + 50% Diarios antes del consumo + 10% s.f.s. Acondicionador

Con Coag. + Flocul.: 50% Guias Telefónicas + 50% Diarios antes del consumo + 10% s.f.s. Coagulante + 10% s.f.s. Floculante

Con Floculante: 50% Guias Telefónicas + 50% Diarios antes del consumo + 10% s.f.s. Floculante

En lo que respecta a las propiedades de las hojas de mayor gramaje, Tabla 4, no se observan diferencias marcadas entre las pulpas de los distintos papeles, salvo en el bajo valor de la rigidez de la pulpa de diarios post-consumo, que se refleja también en la rigidez de la mezcla "GT+Diario PC".

En los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión y de rigidez de las pulpas obtenidas en laboratorio no se observan tendencias debido al tipo de pulpa. Debe aclararse que debido al elevado gramaje, el drenado durante la formación de las hojas es muy lento; las hojas no son uniformes en espesor y en formación, y por lo tanto, la repetibilidad de los resultados es baja.

Tabla 4. Resistencia a la compresión y rigidez de los papeles desintegrados y mezclas (hojas 150 g/m²)

	GT	Diario AC	Diario PC	GT + Diarios AC	GT + Diarios PC
Indice de Compresión Ring crush, Nm/g	11,14	13,52	12,04	12,24	12,04
Rigidez Taber, 10³ mNm³/g	20,11	19,72	15,01	19,62	16,97
Indice de Compresión Short span, Nm/g	57,71	56,98	57,83	57,21	56,98

GT: Guías Telefónicas

Diarios AC: Diarios antes del consumo

Diarios PC: Diarios post-consumo

GT+Diarios AC: 50% Guías Telefónicas + 50% Diarios antes del consumo

GT+Diarios PC: 50% Guías Telefónicas + 50% Diarios post-consumo

PULPAS DE FÁBRICA

La determinación de la humedad de los moldes formados antes de su ingreso a la sección de secado arrojó un valor promedio para los cuatro moldes en sentido transversal de alrededor 73%. La humedad de los moldes es la misma en ambas máquinas, e indican el ajuste de la presión de vacío al valor de la consistencia de la pasta (consistencia en máquina A menor que en máquina B).

La clasificación de fibras de las pulpas de fábrica, Tabla 5, muestra un aumento de la cantidad de finos de las pulpas con aditivos químicos (cabeza de máquina y moldes) con respecto a pulpa sin aditivos (tanque de reserva), indicando la influencia de la recirculación de aguas blancas.

Tabla 5. Clasificación de fibras (%)

	Reserva 1	Cabeza máquina A1	Moldes A1	Moldes B1	Reserva 2	Cabeza máquina A2	Moldes A2	Moldes B2
R14	8,5	8,4	9,0	8,8	8,6	7,3	8,5	7,5
14/28	24,3	23,5	22,9	23,1	23,3	22,0	22,4	23,7
28/48	15,8	15,5	14,9	14,8	16,4	14,7	15,2	14,5
48/100	12,1	11,7	11,3	11,6	12,4	11,5	11,6	11,7
100/200	8,5	7,6	7,3	7,2	8,4	7,6	7,4	7,5
P200	30,8	33,3	34,6	34,5	30,9	36,9	34,9	35,1

Las propiedades de las pastas de cabeza de máquina y de moldes muestran algunas diferencias con respecto a la pulpa de reserva, tanto a la mañana como a la tarde, Tabla 6. Como los aditivos no son los mismos en cada máquina, resulta difícil predecir si las diferencias se deben a los productos químicos, al proceso (consistencia en cabeza de máquina, vacío) o al contenido de finos.

En cuanto a las propiedades de las hojas de 150 g/m², Tabla 7, las pequeñas diferencias observadas no permiten predecir un comportamiento diferente entre las máquinas o en el tiempo.

Tabla 6. Propiedades hojas de 60 g/m²

	Reserva 1	Cabeza máq. A1	Moldes A1	Moldes B1	Reserva 2	Cabeza máq. A2	Moldes A2	Moldes B2
Indice de drenado (ml CSF)	109	115	105	104	116	108	106	107
Ind. de retención de agua (%)	171,73	168,13	174,16	167,3	170,63	170,62	163,67	163,67
Volumen específico (cm ³ /g)	2,148	2,213	2,149	2,192	2,345	2,103	2,208	2,249
Indice de explosión (kPa * m ² /g)	2,12	1,98	2,27	2,28	2,08	2,03	2,16	2,22
Indice de rasgado (mN * m ² /g)	7,61	7,47	7,96	8,02	7,82	7,32	7,65	8,06
Indice de tracción (Nm/g)	37,2	35,4	40,6	38,6	35,6	35,3	37,2	34,6
TEA (g/cm)	30,47	27,53	35,3	31,6	29,4	23,58	27,47	21,66
Longitud de rotura (km)	3,80	3,61	4,14	3,93	3,63	3,60	3,79	3,53
Long. de fibra (ponderada en peso, mm)	2,280	2,316	2,397	2,343	2,292	2,296	2,293	2,3535
Finos (% ponderado en peso)	10,950	10,105	9,92	10,27	11,155	10,780	10,71	10,175
Curl (ponderado en peso)	0,051	0,048	0,0465	0,0415	0,049	0,047	0,047	0,042
Blancura (% ISO)	40,56	39,53	39,61	39,85	40,74	40,13	40,62	40,32
Opacidad (%)	99,45	99,47	99,73	99,7	99,74	99,99	99,85	99,78
Coeficiente de difusión (m ² /kg)	42,65	42,64	50,64	52,64	50,50	76,54	56,94	51,28

Tabla 7. Propiedades hojas de 150 g/m²

	Reserva 1	Cabeza máquina A1	Moldes A1	Moldes B1	Reserva 2	Cabeza máquina A2	Moldes A2	Moldes B2
Ind. de Compresión Ring crush, Nm/g	10,69	11,79	10,50	10,69	11,01	10,50	9,85	10,88
Rigidez Taber, 10 ³ mNm ³ /g	18,84	17,49	17,46	16,87	26,88	16,38	17,66	15,79
Ind. de Compresión Short span, Nm/g	55,20	59,02	57,31	57,40	48,29	48,30	55,87	56,13

MOLDES

En general, los moldes de ambas máquinas difieren tanto en gramaje como en densidad, Tabla 8. Estas diferencias podrían deberse a las condiciones de moldeado (consistencia, vacío).

Tabla 8. Propiedades de los moldes, medias de 4 bandejas por máquina. Consistencia en cabeza de máquina

	Espesor (mm)	Gramaje (g/m ²)	Volumen específico (cm ³ /g)	Densidad (g/cm ³)	Consistencia en cabeza de máquina (%)
A1	1,189	327,87	3,63	0,276	1,17
A2	1,148	307,52	3,73	0,268	1,21
B1	1,107	327,17	3,38	0,296	2,41
B2	1,157	331,38	3,49	0,286	2,25

En la Tabla 9 se presentan los resultados de los ensayos de compresión de moldes. Se puede observar que la relación de la carga hasta el momento de la falla con el peso, el gramaje, el volumen específico o el espesor de los moldes es menor para los moldes de la máquina A que para los moldes de la máquina B.

También debe señalarse que, minutos después de tomar la muestra de la tarde de la máquina A, se comenzaron a observar defectos de formación en los moldes (puntas dobladas). Estos defectos podrían reflejarse en la disminución de la resistencia a la compresión que presentaron los moldes A2.

Tabla 9. Resistencia a la compresión de moldes

	Carga/peso (kg/g)	Deformac. moldes (mm)	Deformac. moldes (%)	Carga/gramaje (kg m ² /g)	Carga/vol espec. (kg g/cm ³)	Carga/espesor (kg/mm)
A1	4,50	4,20	9,33	0,129	11,64	35,51
A2	4,34	4,05	9,00	0,132	10,90	35,45
B1	5,25	4,42	9,82	0,156	15,11	46,16
B2	5,49	4,48	9,96	0,162	15,37	46,39

RELACIONES

A pesar de las pequeñas diferencias encontradas al comparar los resultados en el tiempo o entre máquinas, si representamos los resultados de compresión de moldes en función de algunas propiedades de las hojas obtenidas con las pulpas desintegradas de los moldes húmedos, obtenemos gráficos como los ilustrados en las figuras 4 a 6.

Como se observa en las figuras, podrían establecerse correlaciones que dependen de las condiciones de operación de la máquina (A1-A2 y B1-B2) o que dependen de la calidad de la pulpa (A1-B1 y A2-B2).

Experiencias posteriores permitirán confirmar estas hipótesis, lo que permitiría predecir la calidad de los moldeados en función de las propiedades de las pulpas.

Figura 4. Longitud de rotura pulpa vs. Resistencia a la compresión moldes

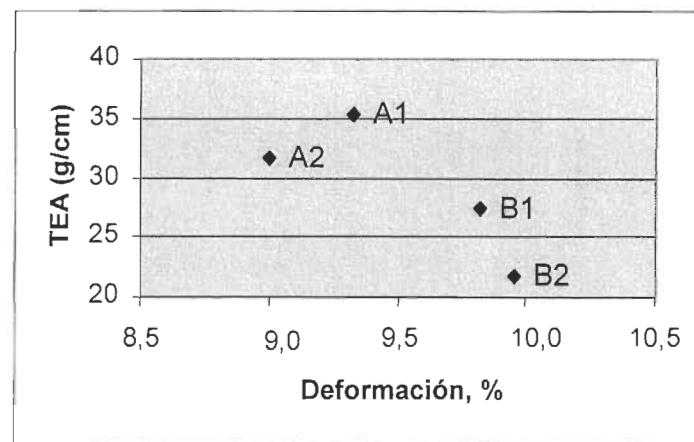


Figura 5. Absorción de energía pulpa vs. Deformación moldes

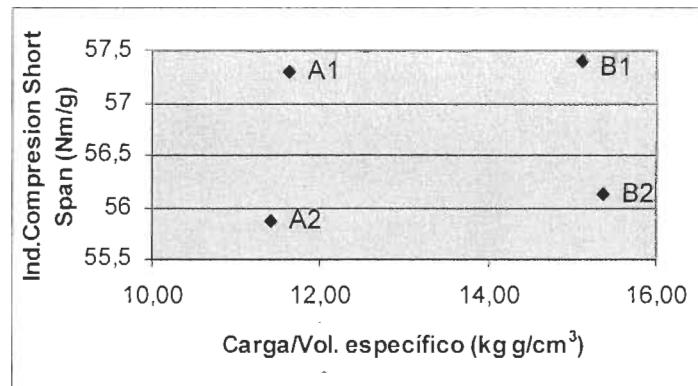


Figura 6. Resistencia a la compresión pulpa vs. Resistencia a la compresión moldes

Conclusiones y Propuesta de Trabajo Futuro

La composición diferente en aditivos químicos de ambas máquinas (A: floculante + acondicionador; B: floculante + acondicionador + coagulante + antiespumante) y la diferencia de operación entre ambas máquinas (B: doble transferencia de moldes) no permiten concluir a priori si las diferencias encontradas en la resistencia a la compresión de los moldes se debe a la composición de la pulpa o al funcionamiento de las máquinas.

Como líneas de trabajo futuro se proponen:

- Evaluar una mayor cantidad de muestras de cada máquina, de manera de predecir su comportamiento en el tiempo.
- Establecer cuales son las propiedades de las pulpas que influencian las propiedades de los moldes.
- Estudiar a nivel laboratorio, y con la ayuda de un diseño experimental, la influencia del tipo de papel y su proporción en la mezcla, del agregado de distintos aditivos químicos, y de las condiciones de desintegración (tiempo, consistencia y temperatura) en las propiedades de la pulpa.
- Ensayo a nivel industrial de las condiciones seleccionadas a partir del diseño experimental y evaluación de las propiedades de los moldes producidos.

A partir de los resultados obtenidos, se prevé extender el estudio a productos de distintas formas elaborados con materias primas diferentes.

Agradecimientos

Por la colaboración prestada:

- en la provisión de las muestras que sirvieron al trabajo, al sector industrial de Canada;
- en la obtención de resultados, al personal del Centre de Recherche en Pâtes et Papiers, de la Université du Québec à Trois-Rivières (Québec, Canada);
- en la provisión de datos estadísticos del sector de pulpas moldeadas de Brasil, a la Associaçao Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP) y a la Associação Brasileira de Celulose e Papel (BRACELPA).

Referencias

1. <http://www.interlog.com/~eid/description/index.html>
2. Pulp & Paper 1999 North American Factbook – Converted Paper & Board Products, pp. 471-474, (1999).
3. BRACELPA, Associação Brasileira de Celulose e Papel, Relatório Estatístico 1997 e Relatório Estatístico 1998, (1997, 1998).
4. Paine, F.A, The Packaging Media, N.Y. Wiley, pp. 1116-1119, (1977).
5. Eagleton, D.G.; Marcondes, J.A., « Cushioning properties of moulded pulp », Packaging Tech. and Sc., Vol.7, pp. 65-72, (1994).
6. Marcondes, J., « Molded pulp cushioning : the need for design standards », Packaging Technology & Engineering, Vol.1, pp. 38-40, 42-43, 82-85, (1998).

BIBLIOGRAPHIE

- 1 Kang, Y., Hua, K., Xu, L., « *Cushioning Properties of Pulp Moulded Packaging Product* », 10th IAPRI World Conference on Packaging: *Packaging Beyond 2000* (Victoria University of Technology). Engl., Conference Proceedings, pp. 277-284 (1997).
- 2 Hoffmann, J., « *Compression and Cushioning Characteristics of Moulded Pulp Packaging* », *Packaging Technology and Science*, 13(5): 211-220 (2000).
- 3 Eagleton, D.G., Marcondes, J.A., « *Cushioning Properties of Moulded Pulp* », *Packaging Technology and Science*, 7 (2) : 65-72 (1994).
- 4 Marcondes, J., « *Molded Pulp Cushioning : The Need for Design Standards* », *Packaging Technology & Engineering*, 7 (1) : 38-40, 42-43, 82-85 (1998).
- 5 <http://www.emeryinternational.com/processes/products.html>
- 6 Flanquart, C., « *De la boîte des œufs au produit industriel* », *Revue du Papier Carton*, N°6, pp. 23-24 (1997).
- 7 Pulp & Paper 2000 North American Factbook - Converted Paper & Board Products, pp. 355-357, (2000).
- 8 American Society for Testing and Materials (ASTM), « *Standard Terminology of Packaging and Distribution Environments* », D996-85A, 12 pages, (1996).
- 9 Anonyme, « *Le retour du naturel* », *Emballage Digest*, pp. 24-26, Avril (1996).
- 10 Scharpf, S., « *A New! Wrinkle : Market Niches for New Paper Products* », *PIMA'S Papermaker*, pp. 21-28, August (1998).
- 11 Singh, S., Chonenchob, V., Burgess, G., « *Comparison of Various Loose Fill Cushioning Material Based on Protective and Environmental Performance* », *Pack. Tech. And Sc.*, Vol 7, pp. 229-241 (1994).

-
- 12** Hunt, J.F., Scott, C.T., « Combined Board Properties of FLP Spaceboard Formed By a New Method », *Tappi Journal* 71 (11) : 137-141 (1988).
- 13** Setterholm, V.C., « FPL Spaceboard – A New Structural Sandwich Concept », *Tappi Journal* 78(6) : 40-42 (1985).
- 14** Hunt, J.F., Gunderson, D.E., « FPL Spaceboard Development », 1988 Corrugated Containers Conference, Orlando, pp. 11-17 (1988).
- 15** Powell, J., « Molded Pulp : A Paper Recycling Market on The Rebound », *Resource Recycling* 9 (11) : 42-43,70 (1990).
- 16** Friberg, T., « Nonpaper Uses for Recovered Paper », *Secondary Fiber Recycling*, 1st Ed., TAPPI PRESS, pp. 69-74 (1993).
- 17** Statistiques Canada, "Produits livrés par les fabricants canadiens. 1996. Étude Spéciale », p.112 (1996).
- 18** Goddard, R., « Pulp Faction », *Packaging Week*, October 31/November 7, pp. 21-23 (1996).
- 19** Birkner 2003, Partie 3 "Liste des produits (Producteurs et transformateurs)", p.224 (2003).
- 20** BRACELPA, Associação Brasileira de Celulose e Papel, *Relatório Estatístico 1997 e Relatório Estatístico 1998* (1997, 1998).
- 21** Vallejos, M.E., « Evaluación de la calidad de pulpas moldeadas », Informe Final para la obtención del Título de Ingeniero Químico, FCEQyN – UnAM (1998).
- 22** Albasini, F., « La fibre moulée s'émancipe », *Cartonnages et emballages modernes*, Vol.5, p.48 (1994).

-
- 23** Goddard, R., « Moulded Pulp Packaging : A New Lease On Life? », Paper & Packaging Analyst, N°14, august, 22-30 (1993).
- 24** International Molded Pulp Environmental Packaging Association, « IMPEPA », <http://www.impepa.org/4%20types%20page.htm> (2003).
- 25** Paine, F.A, The Packaging Media, N.Y. Wiley, pp. 1116-1119 (1977).
- 26** Emery International Developments Ltd,
<http://www.emeryinternational.com/processes/mouldingdescr.html>, (2003).
- 27** Emery, R.W., « Moulding Machine », Canadian Patent 1.307.969, (1992).
- 28** Emery, R.W., Emery, J.R., « Egg Carton », Canadian Patent 1.237.396, (1988).
- 29** Nishikawa, K., Makiguchi, N., Oyaizu, Y., « Mold for Drying a Wet Preformed Pulp Product », Application for Canadian Patent 2.170.181, (1996).
- 30** Cook, J.E., Shepheard, P., Williams, C., « Pulp Mouldings », UK Patent Application GB 2.283.966, (1995).
- 31** Nishikawa, K., « Mold for Forming Pulp Moldings », Application for Canadian Patent 2.165.867, (1996).
- 32** Miyamoto, Y., Ishihara, T., Uda, M., « Method of Moulding Shaped Pulp Articles from Fiber Pulp », United States Patent 5.547.544, (1996).
- 33** Fornadel, J.S., Long, H.F., « Formable Pulp Compositions », United States Patent 4.562.218, (1985).
- 34** Dall, P.E., « Degradation Resistant Molded Pulp Horticultural Container », Application for Canadian Patent 2.059.872, (1992).

-
- 35** Brault, B., Marchal, P.H., « Procédé et dispositif pour le séchage d'objets en matériaux fibreux », Demande de brevet d'invention, République française, N°81 03099, (1982).
- 36** Hanlon, J.F., « Handbook of Package Engineering », 2nd Ed. McGraw-Hill Book Company, pp. 16.1-16.6 (1984).
- 37** Paine, F., « Packaging Design and Performance », 1st Ed., Pira, Chapter 1, 2 et 3 (1990).
- 38** Fellers, C., de Ruvo, A., Htun, M., Carlsoon, L., Engman, C., Lundberg, R., « Mechanical Properties of Carton Board », Carton Board. Profitable Use of Pulps and Processes, 1st Ed., Swedish Forest Products Research Laboratory (Editor : Börje Wahlström), p.33-90 (1983).
- 39** Mark, R.E., Gillis, P.P, « Mechanical Properties of Fibers », Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard, Vol.1, 2nd Ed., Marcel Dekker, Inc. (Editor : Richard E. Mark) (1983).
- 40** Kajanto, I., « Structural Mechanics of Paper and Board », Paper Physics, 1st Ed., Fapet Oy (Editor : Kaarlo Niskanen, Finnish Pulp and Paper Research Institute), p.193-221, (1998).
- 41** Mc Donald, M., « Utilisation de pâtes mécaniques de peuplier faux-tremble et leurs effets sur la résistance en compression de cartons couvertures », M. Sc. Pâtes et Papiers, Université du Québec à Trois-Rivières, Canada (1990).
- 42** Ibrahim, A. A., « Compression Resistance, Strength : What They Mean to the Paper Mill », Pulp and Paper 60 (4) : 122-125 (1986).
- 43** Uesaka, T., Perkins, R. W., « Edgewise Compressive Strength of Paperboard as an Instability Phenomenon », Svensk Papperstidning 86 (18) : R191-R197 (1983).

-
- 44** Seth, R. S., « Edgewise Compressive Strength of Paperboard and the Ring Crush Test », *Tappi Journal* 67 (2) : 114-115 (1984).
- 45** Renni, G.S., « Quantifying the Relationship Between the Short Span Compression and Ring Crush Tests », *Tappi Journal* 78 (7) : 183-184 (1995).
- 46** Seth, R. S., Soszynski, R. M., Page, D. H., « Intrinsic Edgewise Compressive Strength of Paper – The Effect of Some Papermaking Variables », *Tappi* 62 (12) : 97-99 (1979).
- 47** Fellers, C., de Ruvo, A., Elfstrom, J., Htun, M., « Edgewise Compression Properties – A Comparison of Handsheets Made from Pulps of Various Yields », *Tappi* 63 (6) : 109-112 (1980).
- 48** Setterholm, V. C., Gertjejansen, R. O., « Method for Measuring the Edgewise Compressive Properties of Paper », *Tappi* 48 (5) : 308-313 (1965).
- 49** Eriksson, L., Johansson, E., Kettaneh-Wold, N., Wold, S., « Multi- and Megavariate Data Analysis. Principles and Applications », 1st Ed., UMETRICS AB, Sweden, pp. 43-69 (2001).
- 50** Bendwell, N., « Monitoring of a Wastewater-treatment Plant with a Multivariate Model », *Pulp & Paper Canada* 103(7): T195-T198 (2002).
- 51** Broderick, G., Paris, J., Valade, J. L., "Monitoring Composite Pulp Quality", 80th Annual Meeting CPPA, Montréal, pp. B35-B40 (1994).
- 52** Shakespeare, J., Shakespeare, T., Kaunonen, A., "Analysis of Functional Data and Identification of Functional Responses in Paper Machines", *Pulp & Paper Canada* 102(8): T241-T245 (2001).
- 53** http://www.optest.ca/brochures/LDA02_brochure.pdf

-
- 54** Robertson, G., Olson, J., Allen, P., Chan, B., Seth, R. « Measurement of Fiber Length, Coarseness, and Shape with the Fiber Quality Analyzer » Process Control News Pulp Paper Indus 20(1), 1p (2000).
- 55** Jordan, B.D., Nguyen, N.G., « Curvature, Kink and Curl », Paperi ja Puu 4:313-318 (1986).
- 56** Strelis, I., « Improved Methos for the Fibre Analysis of Newsprint », Pulp and Paper Magazine of Canada 70(13) :63-66 (1969).
- 57** Graff, J.H., « Color Atlas for Fiber Identification », The Institute of Paper Chemistry, Appleton, WI (1940).
- 58** Schmidt, S. R., Launsby, R. G., « Understanding Industrial Designed Experiments », 3rd ed., Air Academy Press, pp.3.17-3.19, (1992).
- 59** Geladi, P., Kowalski, B.R., "Partial Least-Squares Regression: A Tutorial", Analytica Chimica Acta 185, 1-17, (1986).
- 60** Broderick, G., Paris, J., Valade, J.L., Wood, J., "Applying Latent Vector Analysis to Pulp Characterization", Paperi Ja Puu 77(6-7), 410-418, (1995).
- 61** Broderick, G., Paris, J., Valade, J.L., Wood, J., "Linking the Fiber Characteristics and Handsheet Properties of a High-yield Pulp", Tappi Journal 79(1), 161-169, (1996).
- 62** Broderick, G., Paris, J., Valade, J.L., "Fiber Development in Chemimechanical Pulp Refining", Tappi Journal 79(4), 193-201, (1996).
- 63** Guan, J., Cluett, W.R., Duever, T.A., "Analysis of TMP Wood Chip Refining Process Using the PLS Algorithm", », Control Systems 1996, 137-140, April 30-May 2, (1996).

-
- 64** Kresta, J.V., MacGregor, J.F., Marlin, T.E., "Multivariate Statistical Monitoring of Process Operating Performance", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 69(2), 35-47, (1991).
- 65** Ivanov, I., "Multivariate Techniques for Process Monitoring and Optimisation at Tembec", *Pulp and Paper Canada*, 102 (7), 23-25, (2001).
- 66** Lupien, B., Lauzon, E., Desrochers, C., « PLS Modeling of Strength and Optical Properties of Newsprint at Papier Masson Lée. », *Control Systems 2000 "Quantifying the Benefits of Process Control"*, 275-278, May 1-4, (2000). *Pulp and Paper Canada* 102(5), 19-21 (2001).
- 67** Heikka, R., Minkkinen, P., "A Process Analytical Study on the D1 Stage of Pulp Bleaching. Part 2: Role of Chlorite Concentration in Predicting Brightness", *Paperi Ja Puu* 76(3), 154-161, (1994).
- 68** Mongrain, A., Elkadiri, M., Berrada, M., Perrier, M., "Multivariate Identification of a Dynamic Model for Colour in Manufacturing of a Three-Ply Paperboard", *Control Systems 2000 "Quantifying the Benefits of Process Control"*, 355-358, May 1-4, (2000).
- 69** Tessier, P., Broderick, G., Desrochers, C., "Chip Size Distribution for an Ultra-high-yield Sulfite Process", *Tappi Journal* 82(12), 1-8, (2000).
- 70** Cleveland, F.C., « Pulping of Secondary Fibres », *Secondary Fiber Recycling*, Tappi Press (Editor : R.J. Spangenberg), pp.94-99 (1993).
- 71** Kleinau, J.H., « Processes and their Equipment », *Pulp and Paper Manufacture*, Vol. 3, Secondary Fibers and Non-wood Pulping , 3rd ed., CPPA/TAPPI (Editor : M.J.Kokurek), pp.159-161, (1987).
- 72** Levesque, M., « Remise en pâte », *Le Recyclage et le désenrage des papiers et des cartons*, 1ère éd.CCDMD, Montréal, Canada, p.71-88, (1999).

-
- 73** Götsching, L., Pakarinen, H., « Recycled Fiber and Deinking », 1st. Ed., Technical Association of the Pulp and Paper Industry, Chapter 5, pp.91-209, (2000).
- 74** Bennington, C.P.J., Sui, O.S., Smith, J.D., « The Effect of Mechanical Action on Waste Paper Defibering and Ink Removal in Repulping Operation », Journal of Pulp and Paper Science, 24(11) : 341-348 (1998).
- 75** Bunker, L.B., Smith, W., « Papermachine Clothing : Cleaning and Conditioning », Chemical Processing Aids in Papermaking : a Practical Guide, Tappi Press, pp.42-51 (1992).
- 76** Chabot, B., Daneault, C., Morneau, D, « New Microparticule System to Improve Retention and Drainage Performances », 87th Annual Meeting, PAPTAC, Montréal, pp. B159-B163 (2001).
- 77** Honig, D.S., « Predictive Laboratory Retention Testing », 1989 Retention and Drainage TAPPI Short Course, pp.29-35 (1989).
- 78** Clark, J. d'A., "Pulp Technology and Treatment for Paper", 2nd Ed., Miller Freeman Publications Inc, USA, pp.469-470 (1985).
- 79** Cao, B., Tschirner, U., Heise, O., Ramaswamy, S., "Recyling Old Telephone Directories", Tappi Journal 84(1): 98-11 (2001).
- 80** Brouillette, F., Daneault, C., Dorris, G., « Effect of Initial pH on the Release of Dissolved Colloidal and Suspended Solids During Repulping of ONP and OMG», Journal of Pulp an Paper Science 28(2):31-38 (2002).
- 81** Clark, J. d'A., "Pulp Technology and Treatment for Paper", 2nd Ed., Miller Freeman Publications Inc, USA, pp.594-598 (1985).