

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR ADIL ZERHOUNI

CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES  
BOUES ISSUES DES PRINCIPAUX PROCÉDÉS PAPETIERS

SEPTEMBRE 2010



# BIBLIOTHÈQUE

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

## Mise en garde

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

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

CE MÉMOIRE A ÉTÉ RÉALISÉ  
À L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE  
DANS LE CADRE DU PROGRAMME  
DE MAÎTRISE EN INGÉNIERIE  
DE L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI  
OFFERT PAR EXTENSION À L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC  
EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

## RÉSUMÉ

Les boues papetières sont les principaux résidus produits par les papetières et sont le résultat du traitement des effluents papetiers. On distingue deux types de boues, les boues primaires (BP) issues d'un traitement physico-chimique, et les boues secondaires (BS) issues d'un traitement biologique. L'industrie des pâtes et papiers génère d'énormes quantités de ces résidus. En contrepartie, les lois environnementales concernant la disposition des boues sont devenues de plus en plus rigoureuses, ce qui rend cette opération très coûteuse. Étant donné la crise actuelle et les difficultés du secteur papetier, les papetières n'ont pas d'autre choix que de diminuer leurs dépenses en définissant d'autres voies de disposition ou de valorisation de boues qui respectent à la fois leurs intérêts économiques et ceux de l'environnement. Compte tenu que les boues sont riches en fibres, nous avons entrepris une étude pour évaluer leur potentiel pour des produits à base de fibres de bois dont les pâtes et papiers et les panneaux de fibres. Ainsi, cette étude a comme objectif de caractériser les propriétés morphologiques, chimiques et le pouvoir adhésifs des fibres de boues primaires et secondaires issues de trois procédés papetiers, soient le procédé thermomécanique (TMP), chimico- thermomécanique (CTMP) et Kraft. La morphologie des fibres a été mesurée à l'aide d'un analyseur de la qualité de la fibre (AQF). Les teneurs en cellulose, hémicellulose et lignine ont été quantifiés selon les normes TAPPI. Après formation des formettes à partir de différentes proportions BP/BS (100% BP / 0%BS, 80% BP / 20%BS et 60 % BP / 40%) et températures de séchage (23°C, 60°C, 100°C, 140°C et 180°C), le pouvoir adhésif des fibres a été évalué en termes de résistance des liaisons fibre-à-fibre.

Les résultats obtenus montrent que les caractéristiques morphologiques et chimiques de la fibre des boues varient en fonction du procédé de mise en pâte (TMP, CTMP et Kraft) et de la nature du traitement (primaire ou secondaire). Les fibres de BP sont plus longues et contiennent plus de polysaccharides que celles issues du traitement biologique (boues secondaires). Par contre, les BS ont des teneurs en fines fibres et en lignine plus grandes que celles des boues primaires. Les teneurs en cellulose dans les BS issues des trois procédés sont très faibles. L'augmentation de la teneur en BS dans les formettes de papier a entraîné une importante amélioration de la résistance des liaisons. Cette importante amélioration a été notable particulièrement à des températures de séchage 180°C. Ce résultat a été expliqué par la formation des liaisons hydrogène et d'autres types de liaisons. Ce résultat a été interprété comme important pour l'industrie des panneaux de fibres puisque les boues secondaires améliorent l'adhésion dans le réseau fibreux et pourrait se traduire par une importante diminution des besoins en adhésifs.

Finalement, l'étude financière a révélé que l'utilisation des boues papetières dans la fabrication des granules énergétiques et la production de panneaux à base de fibre sont les voies de valorisations les plus rentables. Or, dans le cas de la fabrication des granules, les coûts entraînés par la gestion des cendres n'étaient pas pris en considération. Ce qui nous a permis de déduire que l'utilisation des boues dans la fabrication de panneaux à base de fibre est la voie la plus recommandée économiquement.

## REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord mon directeur M. Ahmed Koubaa<sup>1</sup> de m'avoir fait confiance pour mener à bien ce projet de recherche, pour son soutien, les conseils qu'il m'a donné au cours de ce travail et pour sa patience.

Je remercie également mon co-directeur M. Talat Mahmood<sup>2</sup> de m'avoir accueilli dans son laboratoire à l'institut canadien de recherches sur les pâtes et papiers, pour son soutien et les conseils judicieux qu'il m'a donné au cours de ce travail.

Mes vifs remerciements vont à tous les membres de la Chaire de recherche du Canada sur la valorisation, la caractérisation et la transformation du bois, qui ont contribué de près ou de loin à ce projet.

Un autre grand remerciement pour tout le corps professoral de l'UQAT, en particulier celui du département des sciences appliquées.

Finalement, je voudrais dédier ce travail à mes chers parents, ma sœur et mes deux frères.

---

<sup>1</sup> Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)

<sup>2</sup> FPInnovations- L'Institut canadien de recherches sur les pâtes et papiers

## TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ .....	i
REMERCIEMENTS.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES ACRONYMES .....	xi
CHAPITRE I: INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE II: REVUE DE LITTÉRATURE.....	4
2.1 Morphologie de la fibre du bois.....	4
2.2 Chimie du bois et de la fibre .....	7
1.2.1 La cellulose .....	7
1.2.2 La lignine.....	9
1.2.3 Les hémicelluloses .....	10
2.3 Procédés de mise en pâtes .....	11
2.3.1 Procédé de mise en pâte mécanique du meule .....	11
2.3.2 Procédé de mise en pâte thermomécanique (TMP).....	11
2.3.3 Procédé de mise en pâte chimico-thermomécanique (CTMP).....	13
2.3.4 Procédé de mise en pâte chimique kraft.....	14
2.3.5 Propriétés des papiers issus des différents procédés papetiers .....	14
2.4 Résidus papetiers.....	15
2.4.1 Nature des effluents papetiers .....	15
2.5 Traitement des effluents papetiers .....	16
2.5.1 Traitement primaire.....	17
2.5.2 Traitement secondaire .....	18

2.6	Caractéristiques physico-chimiques des boues .....	18
2.6.1	Analyse élémentaire des boues papetières .....	19
2.6.2	Propriétés chimiques des boues papetières.....	20
2.6.3	Métaux lourds.....	21
2.7	Valorisation et disposition des boues papetières.....	22
2.7.1	Enfouissement.....	23
2.7.2	Valorisation énergétique.....	24
2.7.3	Valorisation agricole .....	27
2.7.4	Utilisation pour la fabrication de panneaux à base de fibres de bois ..	30
2.7.5	Autres voies de valorisation .....	31
2.8	Pouvoir adhésif des fibres et des boues papetières .....	32
2.8.1	Définition.....	32
2.8.2	Nature de liaisons fibre-à-fibre dans la feuille de papier .....	34
2.8.3	Variables influents sur les liaisons fibre-à-fibre .....	36
2.8.4	Mesure de la résistance des liaisons fibre-à-fibre .....	39
2.9	Hypothèses et objectifs de la recherche .....	43
CHAPITRE III: Matériel et méthodes .....		45
3.1	Matériel .....	45
3.2	Méthodes.....	46
3.2.1	Mesure des propriétés morphologiques des fibres des boues. ....	46
3.2.1	Mesure des propriétés chimiques des fibres des boues.....	47
3.2.3	Caractérisation des propriétés papetières des boues .....	48
3.3	Étude financière comparative de différentes alternatives de valorisation des boues papetières .....	52
CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSION .....		54
4.1	Propriétés physico-chimiques .....	54
4.2	Propriétés morphologiques .....	55
4.3	Propriétés chimiques .....	57

4.3.1	Teneur en lignine .....	59
4.3.2	Teneur en polysaccharides .....	59
4.4	Propriétés papetières .....	64
4.4.1	Densité apparente .....	64
4.4.2	Coefficient de diffusion de la lumière.....	64
4.4.3	Résistance des liaisons .....	65
4.4.4	Indice de déchirure .....	67
4.4.5	Longueur de rupture .....	69
4.5	Effets de la température de pressage et de séchage simultanés sur la résistance des liaisons .....	71
4.6	Analyse économique de différentes options de valorisation des boues.....	75
4.7	Implications pratiques des résultats .....	76
4.7.1	Besoins en adhésifs.....	76
4.7.2	Pouvoir adhésif des BS.....	76
4.7.3	Potentiel des boues primaires pour la fabrication de panneaux .....	77
4.7.4	Rentabilité de l'utilisation des boues pour les panneaux de fibres.....	77
CHAPITRE V: CONCLUSIONS .....		79
RÉFÉRENCES.....		81
ANNEXE I: The Use of Paper Mill Biotreatment Residue as Furnish or as a Bonding agent in the Manufacture of Fibre-Based Boards .....		93
ANNEXE II : Propriétés papetières des boues Issues des 3 procédés .....		100
ANNEXE III: Étude financière comparative des différentes alternatives de valorisation des boues papetière.....		103

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Composition chimique du bois résineux et du feuillu en pourcentage (%) du poids anhydre (Panshin et de Zeeuw 1980) .....	7
Tableau 2.2 : Mise en pâtes : Procédés, rendements et produits (Zhang et Koubaa 2009).....	13
Tableau 2.3 : Propriétés des pâtes issues de différents procédés et essences de bois (Koubaa, 1996).....	14
Tableau 2.4 : Résidus générés par l'industrie papetière québécoise (B.A.C.E., 2005) .....	15
Tableau 2.5 : Analyses chimiques des boues primaires et des boues de désencrage issues de différentes sources (Rashid et al., 2006).....	20
Tableau 2.6: Composition chimiques des boues issues de différentes sources (Migneault et al., 2010).....	21
Tableau 2.7 : Concentration des métaux lourds en ppm dans des boues papetières de différentes papetières (Rashid et al., 2006). .....	22
Tableau 2.8 : Les méthodes les plus utilisés pour la disposition des boues (Scott et Smith, 1995).....	23
Tableau 3.1 : Description et caractéristiques des pâtes témoins .....	46
Tableau 3.2 : Normes Tappi et PAPTAC utilisées pour la caractérisation des propriétés chimiques des boues .....	47
Tableau 3.3 : Temps de séchage en fonction de la température du pressage et séchage simultanés des feuilles.....	50
Tableau 3.4 : Méthodes de mesure des propriétés des formettes issues de boues papetières.....	51
Tableau 4.1 : Caractéristiques physico-chimiques des boues primaires (BP) et	

secondaires (BS) issues des procédés TMP, CTMP et Kraft .....	54
Tableau 4.2 : Caractéristiques morphologiques des fibres des boues primaires et secondaires issues de trois procédés papetières .....	56
Tableau 4.3 : Propriétés chimiques des BP et des BS issues de trois procédés papetiers .....	58
Tableau 4.4 : Récapitulatif des valeurs actuelles nettes (VAN) des 4 options étudiées sur des périodes d'amortissement (PA) de 10, 20 et 25 ans.....	75
Tableau A3.1 : Calcul du flux monétaire pour l'option « Valorisation agricole» ....	104
Tableau A3.2 : Calcul de la VAN pour l'option « Valorisation agricole» .....	104
Tableau A3.3 : Calcul du flux monétaire pour l'option « Génération énergétiques»	105
Tableau A3.4 : Calcul de la VAN pour l'option « Génération énergétiques» .....	106
Tableau A3.5 : Calcul du flux monétaire pour l'option « granules énergétiques» ...	107
Tableau A3.6 : Calcul de la VAN pour l'option « granules énergétiques» .....	107
Tableau A3.7 : Calcul du flux monétaire pour l'option « Panneaux de fibres ».....	108
Tableau A3.8 : Calcul de la VAN pour l'option « Panneaux de fibres ».....	108
Tableau A3.9 : Récapitulatif des VANs.....	109

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Les principaux modes utilisés par les papeteries du Québec pour gérer les boues (B.A.C.E , 2005). .....	3
Figure 2.1 : Structure de la fibre (Niskanen , 1998) .....	5
Figure 2.2 : Structure de la cellulose (Pandey, 1999) .....	7
Figure 2.3 Unités constituant la lignine (Montplaisir, 2004).....	9
Figure 2.4 : Exemple d' hémicelluloses (Montplaisir, 2004).....	10
Figure 2.5 : Schéma de principales étapes de la fabrication des pâtes TMP, CTMP et chimiques (Thiebaud, 1995).....	12
Figure 2.6: Schéma de principales étapes du traitement des effluents papetiers (B.A.C.E, 2005).....	17
Figure 2.7 : Liaisons hydrogène (Koubaa 1996).....	35
Figure 2.10 : Principe de mesure de la résistance des liaisons fibres à fibre en mode de traction simple (Koubaa et Koran 1995) : a) Test de traction dans la direction Z; b) test d'arrachage .....	40
Figure 2.9 : Principe de mesure de la résistance des liaisons selon le mode cisaillement (Koubaa et Koran 1995): a) Test de fibre unique b) Test de cisaillement entre feuille double.....	41
Figure 2.10 : Principe de détermination de l'énergie de rupture selon le test d'impact de Scott (Koubaa et Koran 1995).....	42
Figure 3.1 : Étapes de préparation des formettes .....	49
Figure 4.1 : Variation de a) la longueur des fibres et; b) la teneur en fines des pâtes et des bous primaires et secondaires issues des procédés TMP, CTMP et kraft. ....	57
Figure 4.2 : Proportion de la lignine a) totale b) insoluble dans l'acide, et c) soluble dans l'acide des pâtes et des boues primaires et secondaires issues des procédés TMP CTMP et Kraft .....	61

Figure 4.3 : Teneur en a) polysaccharides b) cellulose et c) hémicelluloses des pâtes et des boues primaires et secondaires issues des procédés TMP CTMP et Kraft.....	62
Figure 4.4 : Teneur en a) arabiane b) xylane c) mannane d) galactane et e) glucane des pâtes, des boues primaires et secondaires issues des procédés TMP CTMP et Kraft.....	63
Figure 4.5 : Variation de a) la densité apparente et b) le coefficient de diffusion de la lumière en fonction du proportion BP/BS et selon le type du procédés TMP CTMP et Kraft.....	65
Figure 4.6 : Variation de a) la densité apparente et du b) coefficient de diffusion de la lumière en fonction de la proportion BP/BS et du procédé TMP CTMP et Kraft.....	67
Figure 4.7 : Variation de l'indice de déchirure en fonction du proportion BP/BS et selon le type du procédés TMP CTMP et Kraft.....	69
Figure 4.8 : Variation de l'indice de déchirure en fonction de la résistance des liaisons (Z) pour les trois types du procédés TMP CTMP et Kraft.....	69
Figure 4.9 : Variation de la longueur de rupture en fonction du proportion BP/BS et selon le type du procédés TMP CTMP et Kraft.....	70
Figure 4.10 : Variation de la longueur de rupture en fonction de la résistance des liaisons (Z) pour les trois types du procédés TMP, CTMP et Kraft....	71
Figure 4.11 : Variation de la résistance des liaisons en fonction de la température du pressage pour les boues a) TMP, b) CTMP et c) Kraft.....	73
Figure 4.12 : Variation de la résistance spécifiques des liaisons en fonction de la température du pressage pour les boues issues des trois types du procédés: a) TMP, b) CTMP et c) Kraft.....	74

## LISTE DES ACRONYMES

AQF	:	Analyseur de la qualité de la fibre
BP	:	Boue primaire
BS	:	Boue secondaire
CO	:	Monoxyde de carbone
CTMP	:	Pâtes Chimico-thermomécanique
DBO	:	Demande Biochimique en Oxygène
DCO	:	Demande Chimique en Oxygène
$D_L$	:	Coefficient de diffusion de la lumière
DP	:	Degré de polymérisation
$I_D$	:	Indice de déchirure
LN	:	Moyenne arithmétique
$L_R$	:	Longueur de rupture
LW	:	Moyenne pondérée selon la longueur
LWW	:	Moyenne pondérée selon le poids
MDF	:	Fibres à moyennes densité
MES	:	Matières en suspension
NO <sub>x</sub>	:	Oxydes d'azote
PAPTAC	:	Association technique des pâtes et papiers du Canada
PEM	:	Polysaccharides extracellulaires microbiens
RSL	:	Résistance spécifique des liaisons
RTDZ	:	Résistance à la traction dans la direction Z
RTDZ	:	Résistance des liaisons
SO <sub>x</sub>	:	Oxydes de soufre
TAPPI	:	Association technique des industries des pâtes et papiers
TMP	:	Pâtes thermomécaniques

VAN : Valeur actuelle nette  
ZS : Résistance intrinsèque des fibres

# CHAPITRE I

## INTRODUCTION

Au cours des dernières années, l'ensemble de l'industrie du bois dont l'industrie des panneaux a du faire face à plusieurs défis dont la réduction des possibilités forestières et l'augmentation des coûts d'approvisionnement (Xing et al. 2006). Ainsi, l'industrie doit chercher de nouvelles sources d'approvisionnement non conventionnelles. Ces sources devraient substituer en partie les fibres traditionnelles soient les résidus des bois résineux et feuillus. Outre la pénurie de fibres, les préoccupations environnementales, dont la valorisation des résidus industriels, représentent des motifs pour explorer le potentiel d'utilisation de nouvelles matières premières pour les panneaux agglomérés. Toutefois, le changement des sources de fibres a des effets non seulement sur la qualité des panneaux mais aussi sur les divers paramètres de transformation (Kellison et al. 1984; Maloney 1986). Par conséquent, pour explorer le potentiel des fibres non conventionnelles, il est primordial d'examiner les effets de leurs caractéristiques sur le procédé de transformation, les propriétés et le potentiel d'application des produits finis. Les travaux de recherche et développement devraient aussi développer des technologies de fabrication adaptées à ces nouvelles fibres.

Plusieurs études ont examiné le potentiel de plusieurs fibres non conventionnelles pour la fabrication de panneaux agglomérés à base de bois dont les panneaux de fibres à moyennes densité (MDF) et les panneaux de particules. Parmi les fibres non conventionnelles étudiées nous pouvons énumérer celles du bois feuillu (Shi et al. 2005b), des résidus forestiers, du bois juvénile et d'éclaircie commerciale (Shi et al. 2005a,b) et d'écorce (Ngueho Yemele et al. 2008a,b,c).

Plus récemment, une étude exploratoire a examiné le potentiel des boues (résidus solides provenant du traitement des eaux usées des papeteries) pour la production de panneaux de fibres (Geng et al. 2006). L'utilisation des boues est d'intérêt particulier compte tenu que la production des pâtes et papiers génère de grandes quantités d'eaux usées devant subir plusieurs traitements avant d'être déversées dans l'environnement. On dispose généralement les boues par enfouissement ou par incinération, qui constituent deux pratiques polluantes (Figure 1). La valorisation des boues pour des applications à plus haute valeur ajoutée est d'intérêt particulier compte tenu des volumes disponibles. En 2004, la quantité de boues disponibles au Québec a atteint plus de 3 000 000 de tonnes (B.A.C.E. 2005).

Les législations environnementales progressent en éliminant peu à peu l'incinération et en imposant des règles d'enfouissement très strictes. Malgré les nombreuses tentatives pour valoriser les boues (Rock 1991) très peu de travaux ont abouti à des applications concrètes. Les préoccupations environnementales représentent des motifs pour explorer le potentiel d'utilisation de nouvelles matières premières dont les boues par l'industrie des panneaux agglomérés et les composites « bois-plastiques ». Toutefois, les propriétés des fibres ont des effets non seulement sur la qualité des panneaux et des composites, mais aussi sur les conditions d'opération et les procédés de fabrication. Par conséquent, pour explorer le potentiel de valorisation des boues pour des produits à haute valeur ajoutée, il est primordial de développer des connaissances sur les caractéristiques de leurs fibres et examiner leurs impacts sur les propriétés et le potentiel d'application des produits finis

C'est dans ce cadre que se situe notre travail dont l'objectif principal consiste à étudier et évaluer les propriétés morphologiques et chimiques des boues primaires et secondaires issues des principaux procédés papetiers, soient : le procédé thermomécanique (TMP); le procédé chimico-thermomécanique (CTMP), et le procédé chimique au sulfate (Kraft).

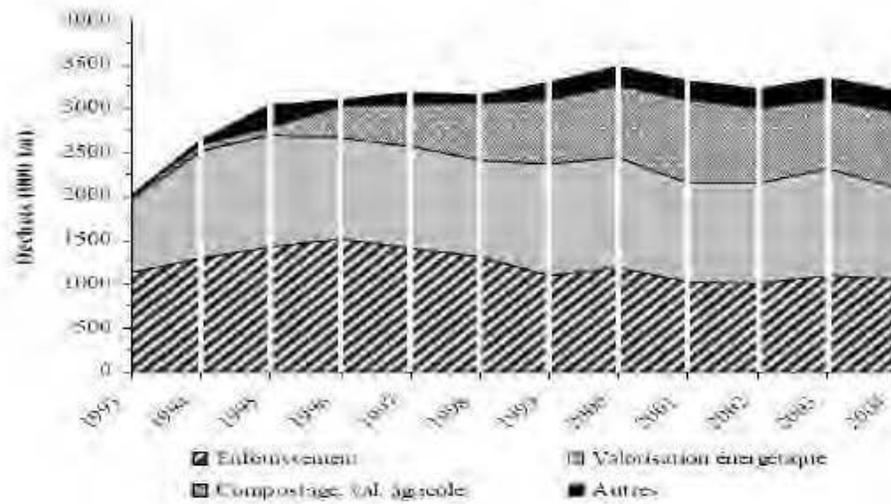


Figure 1.1: Les principaux modes utilisés par les papeteries du Québec pour gérer les boues (B.A.C.E., 2005).

## CHAPITRE II

### REVUE DE LITTÉRATURE

#### 2.1 Morphologie de la fibre du bois

La morphologie des fibres dépend de la classe de l'arbre (résineux ou feuillu). Les résineux ont une structure anatomique relativement simple et leur tissu ligneux est constitué principalement de trachéides longitudinales (connues sous le nom fibres). Par contre, les feuillus ont une structure complexe. Leur tissu ligneux est composé de fibres, de vaisseaux, de cellules de rayons de parenchymes et de trachéides (Panshin et de Zeeuw, 1980).

Pour les résineux comme pour les feuillus, les fibres du bois sont généralement de forme tubulaire, avec des extrémités étroites. Elles sont constituées de deux parois (Figure 2.1). La paroi primaire qui est généralement mince, forme une gaine de protection. La paroi secondaire est constituée par trois couches : S1, S2 et S3. Elle est composée en grande partie de cellulose agencée en micro fibrilles (Panshin et de Zeeuw, 1980). Au centre de la fibre, on trouve le lumen. C'est un canal creux qui contient essentiellement de l'eau et des extractibles. La liaison inter-fibre est assurée par la lamelle mitoyenne. Elle est composée principalement de lignine (Panshin et de Zeeuw, 1980).

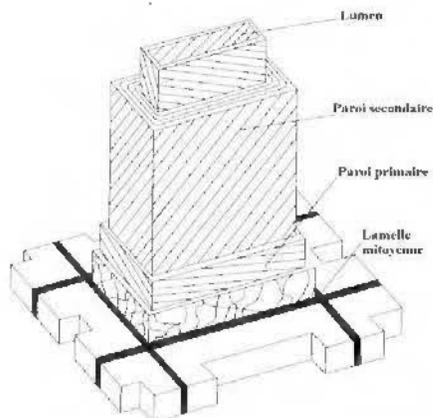


Figure 2.1 : Structure de la fibre (Niskanen , 1998)

La caractérisation de la morphologie de la fibre est importante étant donné son influence sur plusieurs procédés de transformation du bois et sur la qualité de plusieurs produits tels que les pâtes et le papier (Koubaa 1996), les panneaux de fibres (Maloney 1993); et les composites bois polymères (Migneault et al. 2008; 2009).

Toutes les fibres ont une structure commune, mais leur morphologie peut varier d'une manière importante, non uniquement d'une espèce à l'autre, mais aussi dans le même arbre en fonction de plusieurs facteurs :

- Les fibres des branches sont plus courtes que celles du tronc (Vincent, 2006);
- Les fibres formées pendant les premières années sont plus courtes que celles formées lorsque l'arbre est adulte (Panshin et de Zeeuw 1980);
- La paroi des fibres du bois d'été est plus épaisse que celle du bois de printemps (Panshin et de Zeeuw 1980).

La morphologie des fibres traitées ne dépend pas uniquement de l'espèce mais peut varier d'une manière importante selon le type, le procédé et les conditions de mise en pâte et le procédé de traitement des effluents (primaire ou secondaire) pour

les fibres des boues (Rashid et al., 2006; Jesús, 2008). Les principales caractéristiques morphologiques de la fibre sont (Nougier et Lecourt, 2005):

- La longueur : varie entre 0,20 mm et 4,00 mm;
- La largeur : varie entre 10  $\mu\text{m}$  et 75  $\mu\text{m}$ ;
- La masse linéique, qui exprime la masse de la fibre rapportée à la longueur, : varie entre 0,1 et 0,5 mg/m;
- La rectitude des fibres : caractérisée par la courbure, les angles et le nombre des coudes par fibre;

Les fines appelées aussi éléments fins : sont l'ensemble des éléments cellulosiques qui traversent un tamis de 200 mesh (Kang et Paulapuro, 2006). Généralement, on peut les classer en deux catégories (Vincent, 2006) :

- Les fines provenant du bois : elles sont obligatoirement présentes dans la pâte et leur quantité peut varier de 3 à 15 % en masse selon les essences de bois;
- Les fines générées par le procédé papetier et plus précisément par le raffinage. Leur quantité est fonction du temps du raffinage.

La caractérisation de la morphologie des fibres peut être effectuée par des méthodes manuelles ou automatiques. Les méthodes manuelles sont des méthodes longues et se basent sur la mesure directe des dimensions des fibres par microscopie. Elles nous permettent de mesurer les trois principales dimensions : la longueur, la largeur et l'épaisseur de la paroi (Vincent, 2006).

Les méthodes automatiques sont basées sur le traitement d'images. Elles utilisent différents types de capteurs optiques et caméras. Ce sont des méthodes rapides et nous permettent de mesurer toutes les caractéristiques de la fibre : la longueur, la largeur, la rectitude des fibres et la teneur en fines fibres (Vincent, 2006).

## 2.2 Chimie du bois et de la fibre

Au point de vue chimique, le bois est plutôt une substance très complexe. Il comprend diverses composantes organiques. Il est principalement composé de carbone (49%), hydrogène (6%), et oxygène (44%). Il contient également des traces d'azote et de cendres (Calcium, Potassium, Magnésium). Les principales composantes chimiques du bois sont incorporées en trois composantes organiques soient la cellulose, les hémicelluloses et la lignine (Panshin et de Zeeuw 1980). Leurs proportions moyennes varient entre les feuillus et les résineux (Tableau 2.1).

Tableau 2.1: Composition chimique du bois résineux et du feuillu en pourcentage (%) du poids anhydre (Panshin et de Zeeuw 1980)

Essence	Cellulose	Hémicelluloses	Lignine	Autres
Résineux	40-50	20	20 -35	1-5
Feuillus	40-50	5-35	7-35	1-5

### 1.2.1 La cellulose

La cellulose est la molécule organique la plus abondante sur Terre. C'est un élément essentiel et structural de très nombreuses espèces vivantes, spécialement les végétaux. Ce polysaccharide est un homopolymère constitué de type  $\beta$ -(1,4)-glucosidiques (Figure 2.2) (Lapointe, 1995)

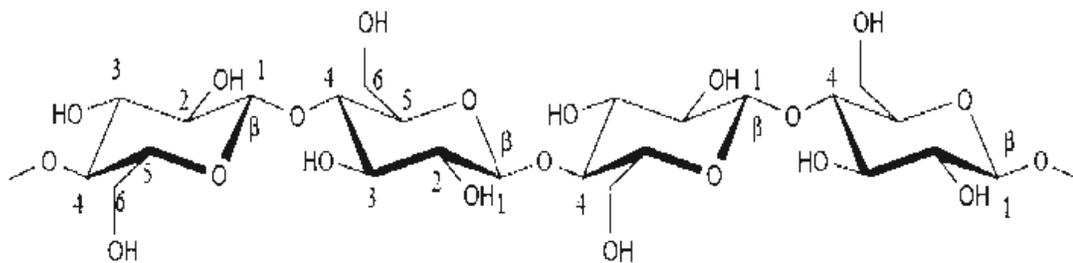


Figure 2.2 : Structure de la cellulose (Pandey, 1999)

Le nombre moyen d'unités d'anhydroglucose dans une molécule de cellulose, désigné sous le nom du degré de polymérisation (DP), est au moins de 9 000-10 000 et probablement aussi haut que 15 000 dans le bois. Dans l'industrie papetière, l'augmentation du DP améliore la résistance du papier (Clark, 1985; Casey, 1980).

Les microfibrilles cellulosiques sont constituées de régions possédant des caractères physiques différents. Certaines régions où les molécules cellulosiques jouissent d'un parallélisme quasi parfait possèdent un caractère cristallin. D'autres régions ont une structure plus confuse, on les appelle amorphes (Lapointe, 1995). Les parties amorphes étant plus accessibles, elles sont plus facilement gonflées et déformées par l'introduction de molécules de solvants ou de réactifs. Par contre, les zones cristallines sont plus stables et résistent mieux à la pénétration des solvants ou des réactifs (Lapointe, 1995).

On désigne généralement par cellulose I, le polymère naturel, par contre l'appellation cellulose II est donnée à toute cellulose dont la structure physique est modifiée.

Pour la quantification de la cellulose, la méthode la plus utilisée est celle décrite par la norme TAPPI T-203 om-83. C'est une méthode qui repose sur l'oxydation de la cellulose solubilisée, à l'aide d'un excès de bichromate de potassium en milieu acide, selon l'équation chimique suivante :



Peu d'études ont abordé l'effet de la cellulose sur les liaisons entre fibres, mais il est connu que l'augmentation de la teneur en cellulose jusqu'à 80% a un effet bénéfique sur la résistance intrinsèque de la fibre (Koubaa, 1996).

### 1.2.2 La lignine

La lignine constitue la matière qui cimente les polysaccharides du bois où elle représente une proportion d'environ 20 à 40% de la matière sèche. Sa nature varie beaucoup non seulement avec l'essence, mais aussi avec l'âge de l'arbre. Cependant, pour le papetier, la présence de la lignine dans le bois est nuisible, car elle est responsable de la plupart des problèmes de mise en pâte et de blanchiment (Smook, 1989). Les lignines sont des polymères constitués par trois types de monomères différents : le coniféryle, le p-coumaryle et les alcools sinapiques (Figure 2.3).

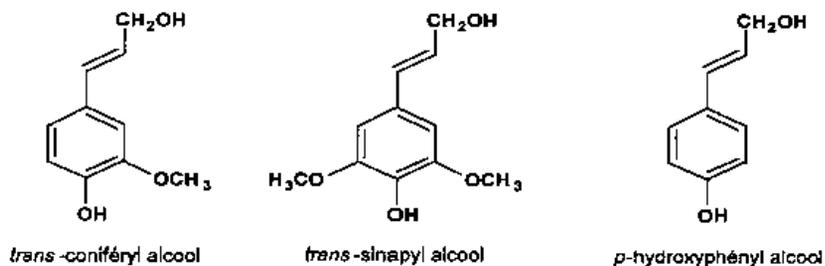


Figure 2.3 Unités constituant la lignine (Montplaisir, 2004)

La norme TAPPI T 222 om -88 décrit un procédé qui peut être appliqué à la détermination de la lignine, non soluble dans l'acide, en bois et dans toutes les catégories des pâtes non blanchies. La méthode n'est pas applicable aux pâtes blanchies contenant peu de lignine. Dans cette méthode, une partie de la lignine se dissout dans la solution acide et n'est pas incluse dans le résultat d'essai. Pour les pâtes chimiques kraft issues de bois tendres (bois conifères), la quantité de lignine soluble est petite, environ de 0,2 à 0,5%. Pour les pâtes chimiques au bisulfite issues de bois durs (bois à feuilles caduques), la teneur de la lignine soluble est environ de 3 à 5%. En ce qui concerne les pâtes semi blanchies, la lignine soluble peut atteindre environ la moitié ou plus de tout le contenu de lignine (Lapointe, 1995).

La lignine soluble dans l'acide peut être déterminée dans une solution, après avoir séparé par filtration la lignine insoluble, par une méthode spectrophotométrique basée sur l'absorption du rayonnement ultraviolet. La longueur d'onde la plus employée souvent est 205 nm (Lapointe, 1995).

### 1.2.3 Les hémicelluloses

Contrairement à la cellulose, qui est un homopolysaccharide, les hémicelluloses sont des hétéropolysaccharides. Cela signifie qu'elles sont constituées d'unités structurales de nature différente (Figure 2.4), soit des hexoses (glucose, galactose, mannose), soit des pentoses (xylozes, arabinose) (Lapointe, 1995). Les hémicelluloses sont présents dans le bois à hauteur de 25 % (El Hadji, 2008). Avec leur possibilité de création de liaisons hydrogènes, ils jouent un rôle fondamental dans le maintien d'une architecture pariétale organisée en liant les fibrilles de cellulose entre elles (El Hadji, 2008).

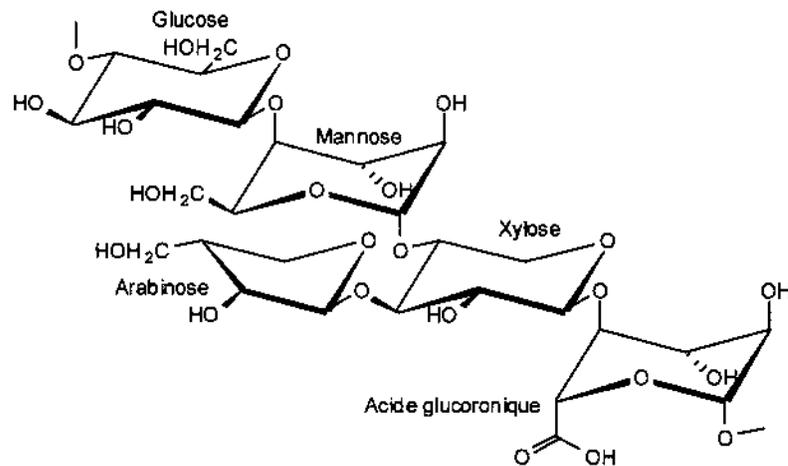


Figure 2.4 : Exemple d' hémicelluloses (Montplaisir, 2004)

Le degré de polymérisation des hémicelluloses ne dépasse pas 200 (Lapointe, 1995), ce poids moléculaire peu élevé se traduit par une grande solubilité. Pour cela

les hémicellulose sont définis comme la fraction cellulosique soluble dans une lessive de 17,5 % NaOH à 20°C (TAPPI T-203 om-83).

## **2.3 Procédés de mise en pâtes**

Dans l'industrie des pâtes et papiers, plusieurs procédés de défibrage ont été développés pour la mise en pâte. Le diagramme de la figure 2.5 illustre les principes des trois des principaux procédés de mise en pâtes. Les procédés de mise en pâte les plus importants incluent les procédés de mise en pâte suivants : mécanique de meule, thermomécanique (TMP), chimique kraft et chimico-thermomécanique (CTMP) (Garceau et al., 1989). Le tableau 2.2 présente les différents procédés de mise en pâte, leur rendement et les produits issus de ces pâtes.

### **2.3.1 Procédé de mise en pâte mécanique du meule**

La pâte mécanique de meule est obtenue à partir des procédés de défibrage classiques. C'est-à-dire, les billes sont placées selon un axe parallèle à la rotation d'une meule abrasive. Généralement, le défibrage s'effectue à pression atmosphérique, mais le procédé peut aussi s'effectuer sous pression. Le rendement de ce procédé purement mécanique se situe aux alentours de 95 % (Garceau et al., 1989).

### **2.3.2 Procédé de mise en pâte thermomécanique (TMP)**

Le procédé de mise en pâte thermomécanique (TMP) utilise des copeaux de bois soumis à une température supérieure à 100°C dans de la vapeur afin de ramollir les fibres. Un défibrage sous pression s'en suit dans un raffineur muni de deux disques rotatifs tournant à grande vitesse. C'est l'effet de cycles successifs de compression et de décompression qui produit la pâte à un taux de rendement d'environ 90%. Parfois, on utilise deux raffineurs en série ce qui améliore davantage les caractéristiques des pâtes préparées car on augmente la proportion de fibres longues (Garceau et al., 1989).

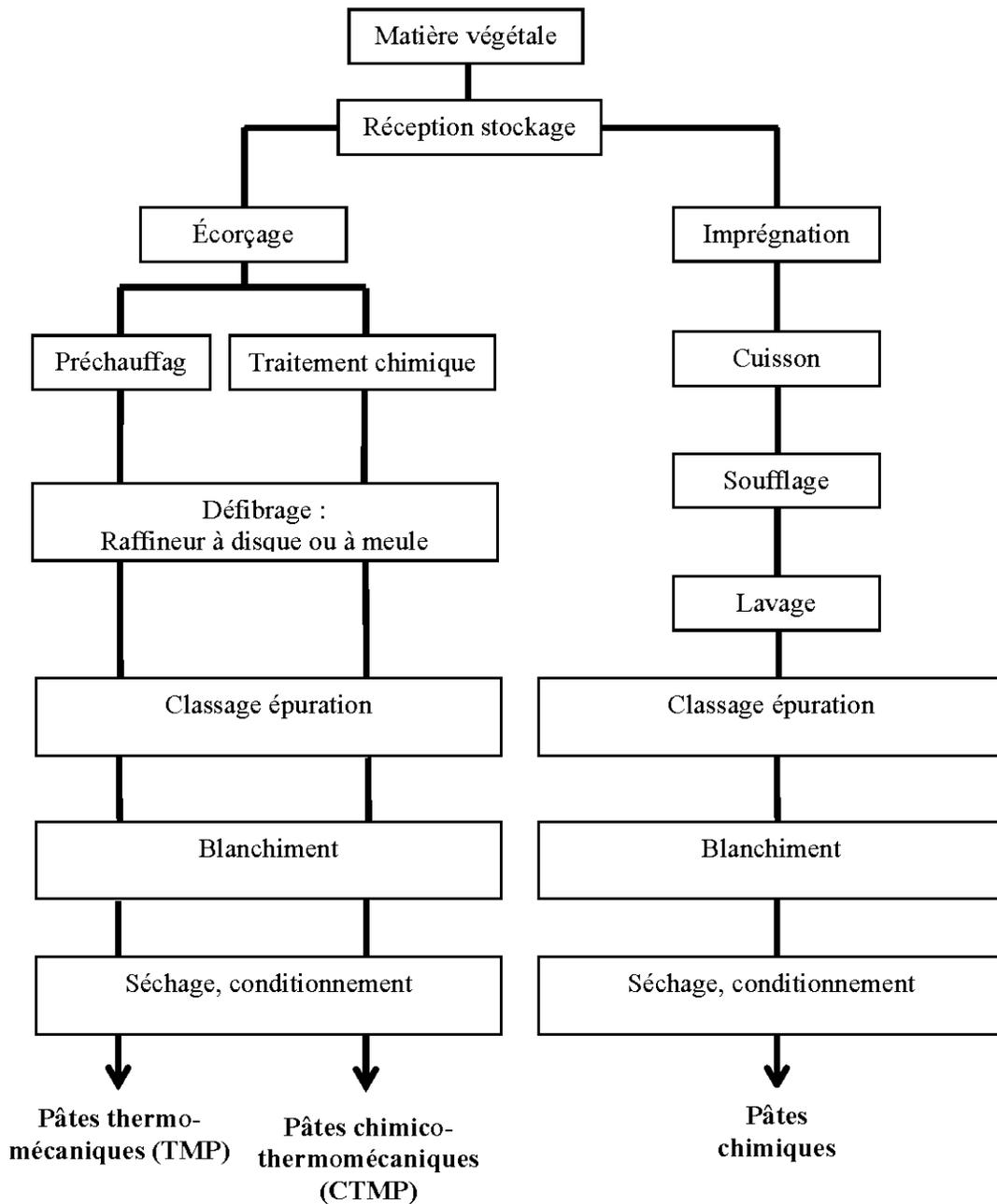


Figure 2.5 : Schéma de principales étapes de la fabrication des pâtes TMP, CTMP et chimiques (Thiebaud, 1995)

Tableau 2.2 : Mise en pâtes : Procédés, rendements et produits (Zhang et Koubaa 2009)

Procédé de mise en pâte	Rendement (%)	Produits
Mécanique de meule	93-96	Papier journal, Papier sanitaire, papier couché
Thermomécanique	90-93	Papier journal, Papier calendré, papier couché
Chimico-thermomécanique	82-89	Papier journal, papier d'impression
Chimico-mécanique	78-88	
Au bisulfite acide	65-80	Carton, carton ondulé et carton ondulé double
Au bisulfite	65-74	Carton, carton ondulé
Au sulfate (Kraft)	46-55	Carton, papier couché, papier fin, papier cristal

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

Le procédé chimico-thermomécanique (CTMP) est un procédé de mise en pâte à haut rendement par sulfonation. Ce procédé de mise en pâte alcalin se compose de deux grandes étapes, tout d'abord, la sulfonation des copeaux s'effectue à l'aide d'un mélange de sulfite de sodium concentré de 4 à 12 % à une température variant de 120 à 160 °C pendant 15 à 110 minutes selon l'essence. Par la suite, le raffinage de la pâte se fait généralement à la pression atmosphérique en un ou deux stades. Puisque ce procédé sépare les fibres avec moins d'énergie, la qualité sera supérieure en termes de longueur, flexibilité et d'indice d'égouttage comparativement aux procédés mécaniques. Le rendement de ce procédé se situe aux alentours de 80% (Garceau et al., 1989).

### 2.3.4 Procédé de mise en pâte chimique kraft

Le procédé de mise en pâte chimique kraft est un procédé de fabrication de pâte en milieu alcalin dont le rendement est d'environ 50%. Les copeaux de bois sont cuits pendant environ deux heures à 170 °C dans la soude caustique avec des carbonates de calcium et des sulfures de sodium pour permettre la dissolution de la lignine libérant ainsi les fibres. Le mécanisme réactionnel comporte trois étapes : 1) adsorption des hydroxydes et hydrosulfures sur la lignine, 2) réaction de dégradation en surface de la lignine et 3) désorption du produit dégradé (Yang et Liu, 2005). La pâte obtenue possède d'excellentes propriétés mécaniques. Par contre, son blanchiment est plutôt difficile (Garceau et al., 1989).

### 2.3.5 Propriétés des papiers issus des différents procédés papetiers

La différence dans les procédés de mise en pâtes conduit à des produits de caractéristiques différentes. Les données du tableau 2.3 présente des exemples des propriétés des pâtes et des papiers issus de différents procédés (Koubaa, 1996).

Tableau 2.3 : Propriétés des pâtes issues de différents procédés et essences de bois (Koubaa, 1996).

Pâtes	Indice d'égouttage (ml)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Résistance Z (kPa)	Énergie d'arrachage (J/m <sup>2</sup> )	Résistance spécifique des liaisons (kPa)
TMP résineux	130-475	231-275	124-339	42-84	827-1900
CTMP Bouleau	200-420	500-609	579-761	66-112	1730-1920
Kraft résineux blanchi	270-675	578-683	339-710	91-414	903-1600
Kraft résineux non blanchi	260-625	543-720	381-720	38-51	1080-1540
Kraft bouleau non blanchi	430-625	605-688	484-743	39-67	1230-1650

## 2.4 Résidus papetiers

L'industrie des pâtes et papiers génère plusieurs résidus sous forme d'écorce, de copeaux de bois, de fibres de bois, de cendres, de biosolides, de résidus calciques et d'autres types de résidus (Morin, 2007). Les biosolides incluent les résidus de traitement primaire, les résidus de traitement secondaire, les résidus de désencrage ou leur mélange couramment appelés boues papetières. Les résidus calciques incluent les résidus de chaux, les rejets d'éteignoir et les lies de liqueur verte (Morin, 2007). Le tableau 2.4 dresse un portrait général des résidus générés par l'industrie papetière québécoise ainsi que leur mode de gestion (Morin, 2007).

Tableau 2.4 : Résidus générés par l'industrie papetière québécoise (B.A.C.E., 2005)

Type de résidus	Poids (tonnes)	Gestion des résidus (%)				
		Enfouissement	Énergie	Compost	Agriculture	Autres
<b>Écorces et copeaux</b>	834 687	14,8	78,1	-	-	6,1
<b>Cendres</b>	239 963	82,4	-	2,2	15,4	-
<b>Biosolides</b>	1 887 968	24,9	23,7	10,6	33,1	7,7
<b>Résidus calciques</b>	130 282	69,3	-	17,9	12,8	-
<b>Autres</b>	180 678	80,0	4,0	1,7	-	14,3
<b>Total</b>	<b>3 273 558</b>	<b>31,3</b>	<b>34,0</b>	<b>7,1</b>	<b>20,7</b>	<b>6,8</b>

### 2.4.1 Nature des effluents papetiers

La fabrication de la pâte et du papier produit un rejet composé de fibres de bois trop courtes pour être utilisées. Ces petites fibres passent généralement par un double système de traitement des eaux usées à la sortie de l'usine. Un premier décanteur concentre les matières solides formées de pâte de bois, de morceaux de bois ou autres résidus. Ces matières sont récupérées sous forme de boues appelées boues primaires. Les eaux qui contiennent encore des matières en suspension passent ensuite dans des

bassins d'aération. À l'intérieur de ces bassins, des micro-organismes se nourrissent des matières organiques dissoutes (Morin, 2007).

À la sortie des bassins d'aération, l'effluent est dirigé vers un ou deux décanteurs secondaires qui captent et retiennent les micro-organismes. La boue ainsi formée s'appelle boue secondaire. Les boues primaires et les boues secondaires sont ensuite mélangées et déshydratées à l'aide d'une presse en continue. Le mélange qui en résulte est communément appelé biosolides (Morin, 2007). On peut trouver dans les effluents papetiers les matières suivantes (B.A.C.E , 2005) :

- Matières en suspension, telles que des fibres, des copeaux de bois, des écorces, des cendres et d'additifs (argile, carbonate de calcium, etc.);
- Matières organiques qui, proviennent du bois et des additifs, généralement dissoutes ;
- Composés inorganiques tel que les métaux et les sels. Ils proviennent du bois ou des additifs;
- Hydrocarbures qui proviennent surtout des pertes de lubrifiants;
- Composés phénoliques provenant de la lignine du bois ;
- Acides gras et résiniques provenant du bois;
- Composés organochlorés, tels que les dioxines et les furanes chlorés, qui proviennent des produits chlorés utilisés pour le blanchiment des pâtes;
- Composés organiques volatiles ou semi-volatiles, telles que le formaldéhyde, les hydrocarbures aromatiques polycycliques et l'acétaldéhyde.

## **2.5 Traitement des effluents papetiers**

Généralement, le traitement des effluents papetiers s'effectue sur deux étapes (Bassompierre, 2007) (Figure 2.6):

- Le traitement primaire est effectué par sédimentation ou flottation. Il permet la suppression de plus de 80% des matières en suspension MES mais n'a que peu d'action sur la matière organique (Demande Chimique en Oxygène (DCO) et Demande Biochimique en Oxygène DBO);
- Le traitement secondaire biologique : le traitement par boues activées est le plus utilisé. Il permet d'éliminer la majorité des composés organiques biodégradables (jusqu'à 90% de la DCO et 99% de la DBO) mais ne permet pas de traiter les composés métalliques. Ces derniers, sont éliminés avec les boues secondaires.

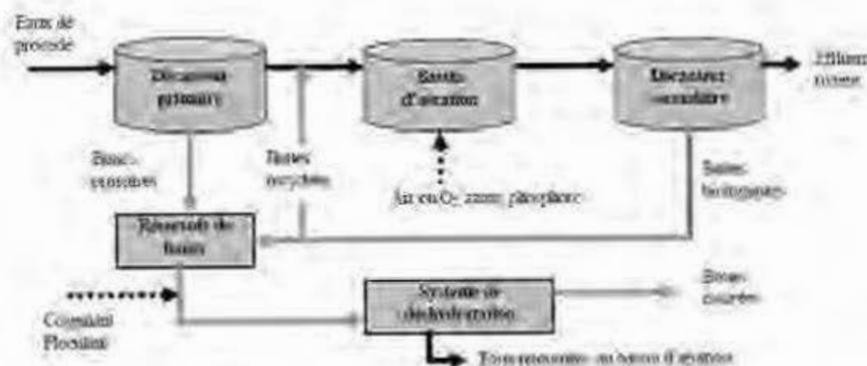


Figure 2.6: Schéma de principales étapes du traitement des effluents papetiers  
(B.A.C.E, 2005)

### 2.5.1 Traitement primaire

C'est un traitement physico-chimique qui a pour but d'extraire des matières en suspension et des matières organiques facilement décantables. Les matières solides extraites de ce traitement constituent ce qu'on appelle les boues primaires. Généralement, le traitement primaire s'effectue selon l'un des deux processus (Bassompierre, 2007) :

- La décantation : s'effectue soit selon un processus physique, où les matières en suspension ou les colloïdes se séparent du liquide par sédimentation sous l'effet de la gravité, soit selon un processus physico-chimique, en ajoutant un coagulant-floculant qui augmente la sédimentation grâce à l'obtention de floes plus gros;
- La flottation : c'est un procédé de séparation qui s'applique aux particules dont la masse volumique réelle ou apparente est inférieure à celle du liquide qui les contient.

### **2.5.2 Traitement secondaire**

C'est un traitement biologique qui a pour objectif l'élimination des composés solubles d'origine organique. Le traitement secondaire est basé sur des processus biologiques de digestion des matières organiques dissoutes par des micro-organismes. Le principe de ce traitement est de mettre en contact la matière organique contenue dans les effluents papetiers issus du traitement primaire avec une population bactérienne. Celle-ci dégrade et transforme la matière organique en l'assimilant pour son propre développement (Bassompierre, 2007).

Le traitement biologique le plus courant utilisé pour le traitement des effluents papetiers est le traitement par boues activées. Il se déroule sur deux phases :

- La première phase consiste à mettre en contact la biomasse et les effluents dans un réacteur;
- La deuxième phase consiste en la séparation des solides de la phase liquide épurée par décantation.

## **2.6 Caractéristiques physico-chimiques des boues**

Les boues papetières sont des mélanges complexes, constituées des dizaines voire des centaines de composés. Il est difficile de déterminer leurs composition

d'une manière générale en raison de sa dépendance de la matière première, du processus, du type et la qualité des produits de papier fabriqués, du type et l'efficacité de l'équipement utilisé tant dans le processus principal que dans les processus de traitement des effluents (Rashid et al., 2006). La caractérisation des boues dans la littérature s'est concentrée sur les facteurs qui décrivent le mieux leurs teneurs en éléments nutritifs et le potentiel toxique des effluents après traitement, ou sur l'accumulation des éléments toxiques dans les boues elle-même (Warren, 2001).

### **2.6.1 Analyse élémentaire des boues papetières**

Le tableau 2.5 résume la composition élémentaire des boues papetières. Généralement les boues papetières se caractérisent par un pH proche de la neutralité (entre 5 et 8) une teneur en matières sèches qui se situe entre 28 et 41 %, ainsi qu'une teneur en carbone organique se situe entre 347 à 530 g kg<sup>-1</sup> sec.

Les boues papetières contiennent beaucoup d'éléments (Tableau 2.5), tel que l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), le calcium (Ca) et le magnésium (Mg). Cependant, leurs concentrations et le ratio C/N varient selon le type du procédé de mise en pâte, le type de matières premières utilisées et le niveau de la décomposition microbienne qui s'est produite pendant le traitement secondaire (Vance, 2000).

Les boues primaires sont constituées principalement de matières organiques sous la forme de la matière cellulosique (Jackson et Line, 1997) ou de fibres de bois. Elles contiennent généralement de 0,3% ou moins d'azote en poids sec, avec un ratio C: N > 100:1 (Bellamy et al., 1995).

Lors du traitement secondaire des boues, l'azote, le phosphore et le potassium sont ajoutés pour assurer le fonctionnement des activités microbiennes. Ce qui explique que les boues secondaires sont riches en azote (3,0-4,0%) et ont une teneur en phosphore qui varie de 0,1 à 0,3% (Bellamy et al., 1995; Zibliske, 1987).

Tableau 2.5 : Analyses chimiques des boues primaires et des boues de désencrage issues de différentes sources (Rashid et al., 2006)

	Goss et al., 2003 (n=3)	Atiken et al., 1998 (n=1)	Simard et al., 1998 (n =3 )
<b>Conductivité (mS cm-1)</b>	0,39 - 0,87	-	0,09 - 0,20
<b>pH</b>	7,7 - 8,2	7,7	7,8 - 9,1
<b>Teneur en matières sèches (% anhydre)</b>	39,7 - 49,0	31,5	-
<b>Carbone organique (% anhydre)</b>	29,7 - 33,4	31,8	42,3-44,2
<b>N Totale (% anhydre)</b>	0,27 - 0,73	0,37	0,15
<b>C:N</b>	42 - 124	86	284 - 292
<b>P Totale (%)</b>	0,072 - 0,093	0,08	0,0096 - 0, 0097
<b>K Totale (%)</b>	0 - 0,09	0,2	0,0029 - 0,0034
<b>Ca Totale (%)</b>	2,86 - 5,85	-	0,46 - 0,56
<b>Mg Totale (%)</b>	0 - 0,06	0,235	0,026 - 0,031
<b>Na Totale (%)</b>	0,05 - 0,06	-	0,073 - 0,084

Les boues mixtes sont préparées en mélangeant les boues primaires et secondaires en différentes proportions (50:50; 40:60 ou 67:33). La composition chimique de ces boues varient selon les procédés utilisés et les ratios boues primaires/boues secondaires (Vance, 2000). Les boues mixtes contiennent généralement de 1,0 à 2,5% d'azote en poids sec. Les rapports de C:N et de N:P varient de 100:1 à 20:1 et 4:1 à 8:1, respectivement (Curnoe, 1998).

### 2.6.2 Propriétés chimiques des boues papetières

Les teneurs en cellulose, en hémicelluloses et en lignine représentent une des principales propriétés chimiques des boues papetières. Comparativement aux fibres du bois (résineux), les boues papetières contiennent des teneurs légèrement inférieurs en cellulose, pentosanes (composante d'hémicellulose) et lignine (Tableau 2.6). Par contre, Cette teneur varie peu selon l'origine des boues (TMP, CTMP et Kraft).

Le contenu en extractibles des boues papetières (Tableau 2.6) obtenus par le procédé CTMP et Kraft est inférieure à celui du bois résineux. Par contre les boues obtenues par le procédé TMP contiennent une forte teneur en extractibles.

Tableau 2.6: Composition chimiques des boues issues de différentes sources (Migneault et al., 2010)

Composition chimique	Fibre bu bois (résineux)	Boues TMP	Boues CTMP	Boues Kraft
Cellulose (%)	44,4	34,8	42,8	39,2
Pentosanes (%)	12,3	5,0	6,3	7,6
Lignine (%)	28,5	26,3	25,3	21,9
Extractible (%)	6,3	16,1	2,78	1,15

### 2.6.3 Métaux lourds

Les métaux lourds sont connus comme présentant des risques potentiels pour la santé des plantes et des animaux s'ils sont présents en concentrations très élevées. Ils sont présents dans les boues des usines de pâte et papier, soit en raison des produits chimiques ajoutés au cours du procédé de fabrication de pâte ou de leur origine dans le bois lui-même, ayant été adsorbé à partir du sol par les arbres (Warren, 2001).

Le contenu de métaux lourds dans les boues des usines de papier sont généralement faibles (Tableau 2.7). L'origine de ces métaux est principalement en relation avec les différentes étapes du procédé de mise en pâte, de fabrication du papier et d'impression. À titre d'exemple, une étude menée par Genthe et al. (1993) rapporte des traces de plomb et de titanium (Ti) dans les boues primaires provenant d'une opération de mise en pâte. La présence de Ti peut être attribuée à l'utilisation de l'oxyde de titanium ( $TiO_2$ ) dans le procédé de fabrication du papier. Au niveau des matériaux de remplissage, il a été démontré que les matériaux utilisés dans la

production de papier peuvent contenir des traces de plomb (Pb) de chrome (Cr), de Nickel (Ni) et de cuivre (Cu) (Raitio 1992). De la même façon, les encres sont fabriquées à partir de plusieurs métaux lourds (Raitio 1992). Les encres d'impression modernes contiennent du zinc, du plomb, du cuivre et du chrome (Raitio 1992). Par contre, les chromates sont éliminés de la production, car elles sont jugées cancérogènes.

Tableau 2.7 : Concentration des métaux lourds en ppm dans des boues papetières de différentes papetières (Rashid et al., 2006).

Métaux	Calger, (Boue) <sup>3</sup>	Powell River (BP)	Powell River (BS)	Paprican (BP)	Paprican (BS)
Arsenic	0,14 à 0,18	0,09 à 1,7	0,2 à 0,98	0,5 à 1,1	0,9
Chrome	15 à 19	17 à 29	31 à 46	8 à 73	20 à 40
Cobalt	<1 - 2	<1 - <5	<1	<1 à 4	<1
Cuivre	24 à 26	15 à 26	12 à 30	11 à 46	14 à 65
Plomb	4 à 5	<1 - <10	<4 - <10	3 à 92	5 à 37
Mercure	0,46 à 0,59	0,02 à 0,19	0,14	à 0,1	0,1 à 1
Molybdène	<4	<4 - <20	<4 <4	<2	<10
Nickel	24 à 30	7 - <10	<2 à 9	8 à 56	9 à 38
Sélénium	<0,5	<0,5 - <2	<0,5 - <2	0,05 à 2,7	N / A
Zinc	140 à 172	26 à 83	30 à 79	30 à 94	88 à 475

## 2.7 Valorisation et disposition des boues papetières

La mise en décharge a été le moyen le plus simple et le moins coûteux pour éliminer les boues papetières (Boisselle, 1999). Toutefois, l'obligation de respecter les normes et la législation en matière d'environnement, emmènent les industriels et

<sup>3</sup> What we know about paper mill biosolids ?. 1997. <http://www.rfu.org/cacw/pollutionSludge1.htm>

les pouvoirs publics à rechercher des solutions de valorisation durables. En fait, les législations gouvernementales se basent maintenant sur le principe des 3 R (Réduire, ré-utiliser et recycler) (Krigstin 2008).

Il n'existe pas une méthode idéale pour la disposition ou la valorisation des boues, car chaque usine est particulière par la nature, le volume de sa production, le type des traitements de ses effluents et sa localisation géographique. Par contre, enfouissement et l'incinération sont les méthodes de disposition les plus utilisées (Tableau 2.8).

Tableau 2.8 : Les méthodes les plus utilisés pour la disposition des boues  
(Scott et Smith, 1995)

<b>Méthode de disposition</b>	<b>Utilisation (%)</b>
Enfouissement	69
Incinération	21
compostage	8
Autres méthodes	8

### **2.7.1 Enfouissement**

C'est la technique la plus utilisée actuellement pour disposer les boues (Scott et Smith 1995). Bien que très répandue, cette technique perd de son attrait à cause de plusieurs contraintes économiques et environnementales. Du point de vue économique, l'enfouissement présente de plus en plus de problèmes à cause de la diminution du nombre des sites ainsi que l'opposition sociale et gouvernementale à en ouvrir de nouveaux sites et l'augmentation de la sévérité des normes environnementales. En effet, les sites d'enfouissements aux États-Unis ont diminués de 15 000 à 6 000 en seulement quelques années (Simons, 1994). Cela a entraîné une augmentation des coûts d'enfouissement et les coûts de transport, car la plupart des

sites se trouvent loin des usines. Aux États-Unis, les coûts de disposition de boues s'élèvent à plus que 239 \$/tonne sèche (Corbun et Dolan, 1995).

De point de vue environnemental, les sites d'enfouissement sont considérés comme sources importantes d'émissions de gaz à effet de serre, tel que le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et le méthane (CH<sub>4</sub>) (Krigstin, 2008). Ces derniers en résultent essentiellement de la dégradation aérobie et anaérobie des matières organiques par les micro-organismes. En plus, l'enfouissement est considéré comme une menace pour les eaux souterraines. Raison pour laquelle, il y a une tendance vers de nouveaux règlements contre la contamination des eaux souterraines sur les sites d'enfouissement (Makansi, 1984).

### **2.7.2 Valorisation énergétique**

#### **a) Incinération**

L'incinération est la méthode la plus populaire pour la disposition des boues. En effet, cette méthode permet la réduction du volume à disposer jusqu'à 95% et aussi la récupération de l'énergie si le bilan énergétique des boues est positif (Simons, 1994). Il existe deux principales méthodes d'incinération, fournaise ou le lit fluidisé. La fournaise est un appareil qui permet de mettre en contact les particules à incinérer avec l'air de combustion. Le contact est assuré par une grille qui déplace les résidus de l'entrée vers la sortie. Le lit fluidisé est un lit de particules qui repose sur l'injection de l'air pour générer l'expansion des particules et également servir à la combustion, ce qui améliore le transfert de chaleur d'une façon très efficace (Simons, 1994).

En général, pour avoir une valeur calorifique suffisante pour brûler les boues adéquatement, la boue primaire doit avoir une siccité minimum de 30 % à 40 % et de 45 à 55 % pour les boues secondaires et de désencrage (Simons, 1994). En effet, la combustion des boues à une teneur en solides variant de 40 à 50 % permet de

récupérer jusqu'à 7000kJ/kg (Caroll et Gajda, 1990). Par ailleurs, l'incinération est limitée d'une part par le débit, la nature de la fumée (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> et CO), la température de combustion, et d'autre part par les cendres qui en résulte. Ces cendres sont concentrées en métaux lourds, ce qui nécessite une élimination dans des lieux d'enfouissement sécuritaires et dont les coûts sont plus élevés. Afin de remédier à ces problèmes, il faut utiliser des incinérateurs spécifiques ce qui nécessite un investissement élevé pour l'ensemble « séchage – incinérateur - traitement de fumées » (El Ouazzani, 2005).

Bien que l'industrie penche de plus en plus vers les techniques de valorisation agricole, l'incinération reste une technique intéressante car la plupart des usines possèdent des générateurs de vapeurs.

#### b) L'oxydation humide

C'est une technique qui consiste à chauffer les boues en solution au dessus des conditions critiques de l'eau (374°C et 22x10<sup>3</sup> kPa), tout en injectant de l'air (Boisselle, 1999). Il en résulte l'oxydation des boues, d'où la réduction de leurs volumes. L'oxydation humide peut être utilisée sur toutes sortes de boues dont les boues à faibles pourcentage massique en solide (de l'ordre de 5 à 10%). Elle permet aussi la récupération des inorganiques des boues pour les réutiliser dans la production du papier. Comparativement autres méthodes d'oxydation, il n'en résulte pas des émissions atmosphériques nocives (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> et CO) (Boisselle, 1999). Or, cette technique reste moins populaire auprès des industriels à cause des coûts d'investissement élevés, les problèmes de mise à l'échelle dus à la corrosion de la tuyauterie par le milieu fortement acide et à la faible expertise existante.

#### c) La gazéification

La gazéification est une méthode très efficace pour l'extraction d'énergie à partir des différents types de matières organiques. En effet, c'est un procédé qui permet de

convertir les boues en gaz et en huile qui peuvent être utilisés comme combustible à cause de leur pouvoir calorifique élevé (Boisselle, 1999). Le gaz produit peut être utilisé directement dans les turbines à gaz pour produire de l'électricité et aussi comme gaz de base pour la production des composés chimiques. Cette technique peut être utilisée dans des installations existantes en modifiant seulement le mode opératoire et les émissions produites sont réduites de 3 à 5 fois comparée aux ceux de l'incinération (Boisselle, 1999). Or, cette méthode est rentable uniquement si le gaz produit revient moins cher que le gaz naturel. Les cendres qui en résultent, nécessitent une élimination dans des lieux d'enfouissements sécuritaires dont les coûts sont élevés. En plus, il y a une grande possibilité de génération du goudron, ce qui provoque des problèmes d'opération.

Actuellement, la technique gazéification est rarement utilisée pour le traitement des résidus papetières. Cependant, c'est une technique très prometteuse et pourra devenir dans le proche futur une source importante de combustible non-renouvelable.

#### d) Biocarburant

La fabrication des biocarburants à partir des boues constitue une autre alternative de valorisation énergétique des boues. La biométhanisation des boues qui consiste à générer le biométhane au moyen de la digestion anaérobie, est actuellement moins populaire auprès des papetières à cause du coût d'investissement élevé et du temps long de séjour dans les bioréacteurs (entre 30 et 40 jours). Mahmood et Champoux (2009) ont montré qu'il est techniquement possible d'accélérer le processus de conversion (3 jours), tout en diminuant le coût d'investissement. Cela rend la biométhanisation une alternative très prometteuse.

Les boues sont considérées aussi comme biomasse attrayante pour la fabrication du bioéthanol. Les bioprocédés de transformation les plus utilisées sont :

l'hydrolyse acide et fermentation; l'hydrolyse enzymatique, la fermentation et conversion microbienne de la cellulose. En plus, la constitution non typique des boues (Fan et Lee, 2007) (la teneur en polysaccharides varie entre 20 à 70%), les charges minérales présentes dans les boues causent des pertes au niveau du rendement lors d'hydrolyse (Brouillette, 1996).

La transformation des boues en bioéthanol, une alternative très écologique, fait l'objet actuellement de plusieurs études dont le déficit est d'augmenter le rendement, tout en diminuant les coûts.

### **2.7.3 Valorisation agricole**

#### **a) Épandage agricole**

Grâce à leur nature non toxique (Philips et al, 1997) et aux propriétés agronomiques qu'elles contiennent (Beauchamp et al, 2002 ; Gea et al, 2005), les boues papetières peuvent être utilisées pour l'épandage agricole. C'est une pratique très ancienne permettant de profiter des capacités biologiques naturelles des sols à digérer les boues et en réintroduire leurs éléments dans les cycles naturels. Cette pratique permet également de valoriser les propriétés fertilisantes des boues pour les cultures agricoles. En effet, les fortes teneurs en charges minérales (talc, kaolin, carbonate de calcium) et matières organiques (fibres) des boues primaires en font des amendements minéraux intéressants. Lorsque ces boues sont mélangées aux boues biologiques, elles apportent un amendement organique important grâce à la présence d'éléments fertilisants (rapport Carbone/azote variant de 5 à 50). Dans ce contexte, des tests de germination sur des sols amendés avec des boues papetières ont démontré que le taux de germination a été égal ou supérieur à des plantes témoins, le développement du réseau de racines a été plus important ainsi qu'il y avait une meilleure rétention de l'eau dans le sol (Diehn et Zuercher, 1990). Le contact des

boues papetières avec le sol permet aussi d'augmenter sa capacité à retenir les métaux lourds.

Aux États-Unis (1992) 8% et au Canada (1995) 7% des boues papetières ont été utilisées pour amender les sols (Leclere et al., 1999). Toutefois, les inconvénients majeurs de cette voie de valorisation, résident dans:

- Les coûts : Il s'agit des coûts de transport, car la plus part des usines sont loin des sites. En Colombie-Britannique (1990) le coût de transport a été estimé à environ \$56 à 60\$ /tonne sèche (Pickelle et Wunderlich, 1995);
- Ces pratiques ne peuvent pas être utilisées tout le long de l'année, et pour chaque site, il faut des vérifications et l'autorisation des autorités. La quantité de métaux lourds et de produits chlorés doit être en dessous des normes environnementales, l'élimination des pathogènes doit être assurée et certains rapport d'éléments chimiques doivent être respectés (C/N) (Krigstin, 2008);
- La quantité à disposer par hectare est limitée (12 à 40 tonnes par année) (Krigstin, 2008);
- L'immobilisation de l'azote dans les boues (Battaglia et al., 2003), d'où la nécessité d'en ajouter des grandes quantités pour fertiliser le sol;
- Grand risque d'affecter la chaîne alimentaire (Priesnitz, 1999) à cause de la teneur variable des boues en matières inorganiques (métaux lourds), organiques et pathogènes.

#### b) Compostage

Le compostage est un procédé biologique qui consiste à contrôler la conversion et la valorisation des substrats organiques en un produit stabilisé, hygiénique et riche en composés humiques (Mustin, 1987). La dégradation aérobique des boues papetières génère un produit final stable sous forme d'humus. Ce dernier

possède des qualités fertilisantes importantes. Les composts commerciaux doivent remplir une série des critères tels que le degré de maturité ou d'aptitude à la croissance des plantes. Les composts à base de boues papetières répondent aux exigences mentionnées.

La méthode de compostage la plus utilisée consiste à mettre les boues en tas et laisser la nature faire son œuvre. Il est possible aussi de faire du compostage de surface en incorporant dans les cinq premiers centimètres du sol la matière à décomposer, ou de compostage en réacteur biologique. Cette technique permet de réduire le volume du matériau composté et ainsi diminuer les coûts liés à son transport, de sécuriser l'hygiène du substrat composté, de réduire le rapport C/N du matériau et ainsi éviter les problèmes d'immobilisation de l'azote. Par ce procédé, il est aussi possible de conserver les nutriments inorganiques sous forme organiques dans le compost (Crawford, 1983). Ces avantages rendent l'utilisation des composts intéressante en agriculture et en horticulture.

Bien que le compostage des boues soit une technique de valorisation très intéressante, elle est peu utilisée par l'industrie à cause des désavantages suivants :

- Le marché n'est pas suffisant pour absorber toute la quantité possiblement produite;
- C'est une technique qui demande une main d'œuvre spécialisée et nombreuse;
- C'est une technique qui nécessite un grand espace et qui ne peut pas être utilisée tout le long de l'année ;
- L'ajout de nutriments d'amendement est nécessaire pour l'obtention d'un bon compost;

#### c) La réhabilitation des terrains

Le pouvoir fertilisant des boues est aussi profitable pour réhabiliter les terrains des mines abandonnées, des carrières inutilisées et aussi des sols sableux. Le principe de

cette méthode est identique à celui de l'épandage agricole, sauf que le but est différent. Le contenu organique des boues permet une fertilisation du sol, tandis que le contenu inorganique favorise la rétention d'eau. Plusieurs études ont montré le potentiel de cette technique. Parmi lesquelles, on cite l'étude comparative, qui a été menée par Freagley (Srinivasan et Unwin, 1995), entre l'effet de l'utilisation des fertilisants et l'utilisation des boues papetières mélangées à des fertilisants sur la réhabilitation du sol d'une mine. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation des boues a amélioré le rendement de la réhabilitation du sol. Il existe cependant des inconvénients pour cette technique, tels que la variabilité de la demande en boue d'une région à l'autre, les coûts du transport et le fait que cette pratique ne peut pas être utilisée tout le long de l'année.

#### **2.7.4 Utilisation pour la fabrication de panneaux à base de fibres de bois**

Les boues peuvent être aussi utilisées dans la production de panneaux de fibres à moyenne densité (MDF). En effet, des études menées par Geng et al. (2006, 2007a, b) ont montré que les boues constituent une matière première riche en fibre et à faible coût et qu'ils adhèrent bien aux fibres de bois ce qui peut réduire les besoins en adhésifs (Geng et al., 2006).

Migneault et al. (2010) ont évalué le potentiel des boues mélangées issues de différents procédés de mise en pâtes pour la fabrication de panneaux de fibres à moyenne densité (MDF). Ils ont conclu que l'augmentation de la teneur en boues dans la composition du panneau entraîne une dégradation proportionnelle pour la plus part des propriétés des panneaux. Par contre, il est possible d'obtenir des panneaux qui respectent les normes ANSI des panneaux MDF quand la teneur en boues dans le panneau ne dépasse pas 25%.

Par ailleurs, les BS sont riches en culture bactérienne et en polysaccharides extracellulaires microbiens (PEM) (Cetin et Erdinçler 2004). Des études récentes

(Haag et al. 2006) ont constaté que les PEM et les résidus contenant les cellules bactériennes pourraient servir d'adhésif à la fabrication de panneaux.

D'autre part, les boues papetières sont riches en lignine, protéines et polysaccharides, tous utilisés pour la fabrication d'adhésifs pour le bois. En fait, leur potentiel comme adhésif ou agent de remplissage fut exploré pour les panneaux composites à base de bois (Geng et al., 2007a,b; Sutherland 1977; Haag et al., 2004, 2006; Robertson and Robertson, 1977). À titre d'exemple, Geng et al. (2007b) ont évalué le potentiel des boues primaires, secondaires et désancrées comme agent de remplissage pour la résine phénol-formaldéhyde. Cette étude a confirmé le potentiel des boues primaires et secondaires comme agent de remplissage pour la résine formaldéhyde. La forte réaction entre la résine phénol formaldéhyde et les boues secondaires démontre le potentiel de cette dernière comme co-adhésif. Le pouvoir adhésif des fibres et des boues papetières sera discuté en détail à la section 2.8.

### **2.7.5 Autres voies de valorisation**

Les boues papetières peuvent être à la base de la fabrication de plusieurs produits et matériaux qui ont un potentiel économique intéressant tel que la réinjection des boues primaires directement dans le procédé de la fabrication du carton comme matériau de remplissage (Miner et al. 1991). Cela permet d'améliorer la stabilité et la résistance du produit résultant. L'inconvénient majeur, de l'intégration des boues primaires dans la fabrication du carton, est l'augmentation de la teneur en cendres dans le carton, ce qui en résulte en feuilles de plus haute densité et pourra aussi influencer sur la recyclabilité du produit à l'avenir.

La réinjection des boues dans le procédé de fabrication du papier, comme matière première a été exploré (Jesùs, 2008). Jusqu'à un ratio de 1:4 de boues par rapport aux pâtes vierge est techniquement faisable.

Les boues ont été utilisées dans la fabrication du ciment (Ahmadi et Al-khaja, 2001; Amrouz, 1996). Les inorganiques présents dans les boues sont des produits de

base nécessaires pour la fabrication du ciment. Ainsi, les boues papetières et leurs cendres furent utilisés dans l'élaboration du béton (Ahmadi et Al-khaja, 2001), la fabrication des pouzzolanes utilisable dans l'industrie de cimenterie (Amrouz, 1996), la fabrication des panneaux de construction et des pierres décoratives. De la même façon. les boues qui ont une teneur de 20% à 30 % en cendres, peuvent être utilisées dans la fabrication des briques de construction (Weigand et Unwin, 1994).

Les boues peuvent être à la base de la fabrication des produits de rembourrage (Colburn, R.et Dolan, 1995) et la construction des barrières hydrauliques sur les sites d'enfouissement. Elles peuvent être aussi utilisées comme un substitut de l'amiante dans la fabrication des produits résistants au feu à usage interne et externe.

Les boues furent aussi utilisées pour la fabrication de nourriture et de litières d'animaux domestiques (chats, chiens) et de bovins (Weigand et Unwin, 1994). La valorisation des boues pour la nourriture d'animaux, en les mélangeant directement avec la nourriture des animaux ou par récupération de leurs protéines, est confrontée à l'opposition des producteurs de nourriture pour animaux et la population.

## **2.8 Pouvoir adhésif des fibres et des boues papetières**

L'adhésion est parmi les propriétés fondamentales les plus importantes des fibres cellulosiques. Elle est influencée par plusieurs paramètres tels que la proportion des fines, la flexibilité, l'état et la composition chimique de la surface. Cette importante propriété de fibre a des effets non seulement sur la qualité des produits de bois mais aussi sur les conditions d'opération et les procédés de fabrication (Koubaa 1996).

### **2.8.1 Définition**

L'adhésion c'est l'ensemble de phénomènes et des aspects physiques (thermodynamiques et/ou mécaniques) et/ou chimiques qui prennent naissance

lorsque deux surfaces mises en contactes (Lamure, 2007). L'adhésion est liée essentiellement à :

- L'adhésivité : aptitude à créer des forces d'interaction entre 2 surfaces;
- L'état de surface des 2 constituants : surface spécifique, porosité, sites actifs;
- La mouillabilité : aptitude à créer un contact entre 2 surfaces

#### *a) Aspects thermodynamiques*

C'est l'ensemble de forces interfaciales à l'équilibre et/ou énergies associées aux processus réversibles telle l'énergie d'adhésion et la chaleur de mouillage. Lors de la mise en solution des fibres de bois, il y a des forces de répulsions électrostatiques et des forces d'attraction qui s'opposent (Montplaisir, 2004). Les forces de répulsions sont dues essentiellement au caractère anionique des fibres et à la barrière entropie causée par la présence de l'eau liée à la surface de la fibre. Ces forces deviennent importantes seulement pour des distances de 5nm et moins (Montplaisir, 2004). Les forces d'attractions sont principalement dues aux forces de Van der Waals, plus spécialement à des forces de London de type dipôle induit/dipôle induit et des liaisons de hydrogène. Ces forces ont une plus longue portée que les forces de répulsions.

#### *b) Aspects chimiques*

C'est l'ensemble des liaisons chimiques qui peuvent prendre place lorsque deux groupements fonctionnels réagissent à l'interface. Ces liaisons peuvent être des liaisons covalentes, ioniques ou métalliques. Ils ont des énergies d'attraction supérieures à celles des forces de van der Waals. Dans le cas des liaisons entre fibres cellulosique, il est possible d'avoir des liaisons covalentes et ioniques, en utilisant des polymères médiateurs (Casey, 1980). Par contre, dans le cas des feuilles de papier c'est peu probable d'avoir la formation des liaisons covalentes. D'une part, parce que ces dernières ont une résistance très grande que celle du papier et résistent à l'eau.

D'autre part, car ils possèdent des énergies d'activation supérieures à ceux des liaisons hydrogène et les autres forces de van der Waals (Koubaa, 1996).

*c) Aspects mécaniques*

C'est l'ensemble de chevauchements microscopiques qui peuvent exister sur des portions substantielles d'interface. Ces chevauchements n'ont pas d'importance significative sur les liaisons entre les fibres cellulosiques à cause de leur nature hautement élastique (Koubaa, 1996).

### **2.8.2 Nature de liaisons fibre-à-fibre dans la feuille de papier**

Il existe quatre types de liaison que l'on peut observer lors de la formation d'une feuille de papier (Gullichsen et Paulapuro, 1998) :

- Liens chimiques à l'intérieur de la molécule de cellulose et des interactions entre les groupements acides et bases;
- Liaison de Van der Waals intermoléculaires;
- Enchevêtrement polymérique;
- Liaisons inter fibres : la zone où deux fibres sont suffisamment rapprochées pour que des liaisons chimiques, de Van der Waals et d'enchevêtrement polymérique peuvent avoir lieu.

C'est uniquement les liaisons hydrogène et les forces de van der Waals qui ont une énergie mesurable. L'enchevêtrement polymérique dépend d'un assemblage géométrique très complexe et de plusieurs autres facteurs.

Les liaisons entre fibres sont dues essentiellement aux liaisons hydrogène avec une contribution des forces de Van der Waals (Gullichsen et Paulapuro, 1998). D'après Nissan et Higin (1959), la substitution des groupements hydroxyles par des groupements acétyles se traduit par la perte de tout pouvoir de cohésion du papier.

Ceci montre que seules les liaisons hydrogènes contribuent d'une façon significative dans les liaisons entre fibres.

Les liaisons hydrogènes (Figure 2.7) sont des liaisons moléculaires composées de liens hydrogènes entre les groupements hydroxyles de la cellulose. Les groupements acides carboxyliques des hémicelluloses et de la lignine peuvent contribuer aussi à la formation des liens hydrogènes. Ces liens ont une énergie de 8-32 kJ/mole (150-500 kJ/mole pour les liens covalente) et une distance moyeune d'environ 0,17nm. La formation de ces liens est influencée par l'orientation des groupements chimiques impliqués et la flexibilité des fibres. En effet, à l'état humide, les fibres ont tendance à se former vue leur grande flexibilité et la présence d'un grand nombre de liens hydrogènes (Gullichsen et Paulapuro, 1998).

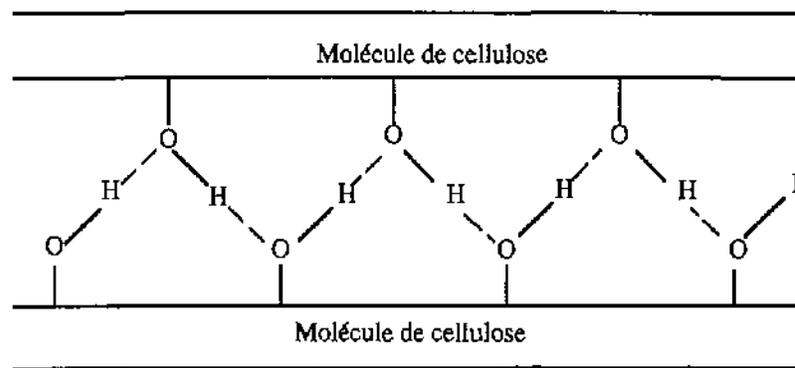


Figure 2.7 : Liaisons hydrogène (Koubaa 1996)

Les forces de van der Waals Contribuent aussi dans la formation des liaisons entre fibres. Elles opèrent à une distance plus grande, de 0,3 à 0,5 nm, mais leurs énergies, de l'ordre de 2-8 kJ/mole, est plus faibles que celles des liaisons hydrogènes.

### 2.8.3 Variables influents sur les liaisons fibre-à-fibre

Le degré des liaisons entre fibres dépend essentiellement de la composition physico-chimique de la surface des fibres, de la composition chimique et morphologique des fibres et les conditions de leurs formations (Casey, 1980; Clark, 1985).

#### *a) La composition chimique des fibres*

Les liaisons entre fibres sont dues essentiellement aux liaisons hydrogènes. Ces derniers dépendent fortement de la nature de la surface des fibres. Elles sont composés de liens hydrogènes entre les groupements hydroxyles de la cellulose, avec une contribution des groupements acides carboxyliques des hémicelluloses et de la lignine. Or, le caractère hydrophile des hémicelluloses favorise la formation des liaisons hydrogènes. Par contre, le caractère hydrophobe de la lignine affecte négativement cette formation (Casey, 1980; Clark, 1985).

#### La cellulose

Il est difficile d'évaluer l'effet de la cellulose sur les liaisons fibre-fibre. Raison pour laquelle, on trouve que peu d'études ont abordé cet effet. Selon Koubaa (1996), l'augmentation de la teneur en cellulose jusqu'à 80% a un effet bénéfique sur la résistance intrinsèque de la fibre. Le degré de polymérisation de la cellulose affecte positivement la résistance des liaisons. En effet, Jayme (1942) a constaté que la résistance des liaisons dans la pâte ont augmenté d'une façon considérable avec l'augmentation du degré de polymérisation de la cellulose de 400 à 1400.

#### La lignine

Les procédés de mise en pâte mécaniques endommagent les fibres et n'extraient pas la lignine de la pâte. Par contre, les procédés chimiques consistent à dissoudre la lignine et à libérer les longues fibres du bois sans les briser. Ce qui explique la forte

teneur en lignine des pâtes mécaniques contrairement aux pâtes chimiques où cette teneur est très faible.

Cette différence en teneur en lignine entraîne une différence de flexibilité des fibres (Koubaa, 1996). En effet, les fibres issues d'un procédé chimique sont plus flexibles que ceux issues d'un procédé mécanique. Une grande flexibilité de fibre se traduit par l'augmentation de la surface liée et la probabilité de formation des liens hydrogène.

A cause de son caractère hydrophobique, la présence de la lignine sur la surface réduit le degré du gonflement des fibres (Casey, 1980; Koubaa et al. 1996), ce qui diminue la surface de contact entre les fibres. En effet, il existe une relation linéaire entre la teneur en lignine et le degré du gonflement des fibres (Jappe, 1958).

En général, la lignine affecte négativement les liaisons fibre-fibre. Plusieurs études ont montré cet effet négatif de la lignine (Jappe, 1958; Jayme et Weststein, 1938; Ratliff, 1949). Parmi ces études, on cite le travail de Jayme (1942), qui a trouvé qu'il est difficile de former des feuilles à partir de la pâte chimique contenant de 12 à 19% de lignine. Après qu'il a dissout la lignine, en utilisant le chlorure de sodium, il a remarqué que la résistance à la traction et au déchirement augmentent considérablement.

#### Les hémicelluloses

D'après Nordman (1961), l'augmentation de la quantité des hémicelluloses dans les pâtes introduit l'augmentation de la résistance des liaisons par unité de surface. Ainsi, les fibres sans hémicelluloses produisent un papier de faible résistance (Casey 1980). Cet effet bénéfique de l'hémicellulose est dû à son faible poids moléculaire qui lui confère une grande mobilité. Cette mobilité permet à leurs groupements hydroxyles de se lier facilement aux groupements hydroxyles de la cellulose (Casey, 1980). En effet, Aiken (1943) a montré que la résistance de liaisons

augmente avec l'addition du xylane et diminue avec l'addition de l'acétyle de xylane. Ceci est dû à l'absence de groupements hydroxyles chez l'acétyle de xylane. Selon Koubaa (1996), l'effet bénéfique de l'hémicellulose sur les propriétés du papier est optimal à une teneur d'environ 20%.

#### *b) Morphologie des fibres*

La longueur des fibres n'a pas d'effet sur la résistance des liaisons des pâtes chimiques et mécaniques (Koubaa, 1996), mais une longueur minimale est nécessaire pour permettre la liaison entre les fibres. En pratique la longueur des fibres est proportionnelle à la résistance au déchirement (Smook, 1989). Par contre, l'augmentation du contenu en fines fibres a un effet bénéfique sur la résistance des liaisons des pâtes chimiques et mécaniques (Koubaa, 1996). Les fines améliorent à la fois la surface de contact et la probabilité de formation des liaisons hydrogène. Les fibres plus épaisses ont tendance à produire une feuille ouverte, absorbante et épaisse, ayant une faible résistance à l'éclatement et à la traction mais une résistance élevée au déchirement (Smook, 1989).

#### *c) Traitement thermique du papier*

Stenberg (Strenberg, 1978) a étudié l'effet du traitement thermique sur le carton double. Il a observé que la résistance  $Z$  atteint un maximum après 3 à 5 secondes de traitement à 350 °C et diminue au-delà de cette période. Cette variation est due essentiellement à la dépolymérisation de la cellulose et des hémicelluloses. Cette dernière se traduit généralement par un raccourcissement des fibres et d'une diminution de leur résistance intrinsèque.

Le traitement thermique entraîne aussi l'écoulement de la lignine (Koubaa et al. 1996). Par son caractère hydrophobe, la lignine protège les liaisons hydrogène, ce qui améliore la résistance humide du papier.

Selon Back (1967), suite à un traitement thermique, il résulte une augmentation importante dans la résistance à la traction du papier humide. Cette augmentation s'explique par une formation abondante des enchaînements par les liaisons transversales entre et à l'intérieure des fibres. Ces liaisons formées peuvent être des liaisons covalentes.

#### *d) Blanchiment des pâtes*

Le blanchiment des pâtes améliore la blancheur du papier et la flexibilité des fibres. En revanche, il cause une dépolymérisation partielle de la cellulose et une dissolution partielle des hémicelluloses (Clark, 1985). Ce qui entraîne une diminution de la résistance spécifique des liaisons entre fibre adjacentes. Par contre, l'amélioration de la flexibilité des fibres entraîne une augmentation de la surface liée. Ce qui se traduit par une augmentation de la résistance des liaisons globales (Clark, 1985).

### **2.8.4 Mesure de la résistance des liaisons fibre-à-fibre**

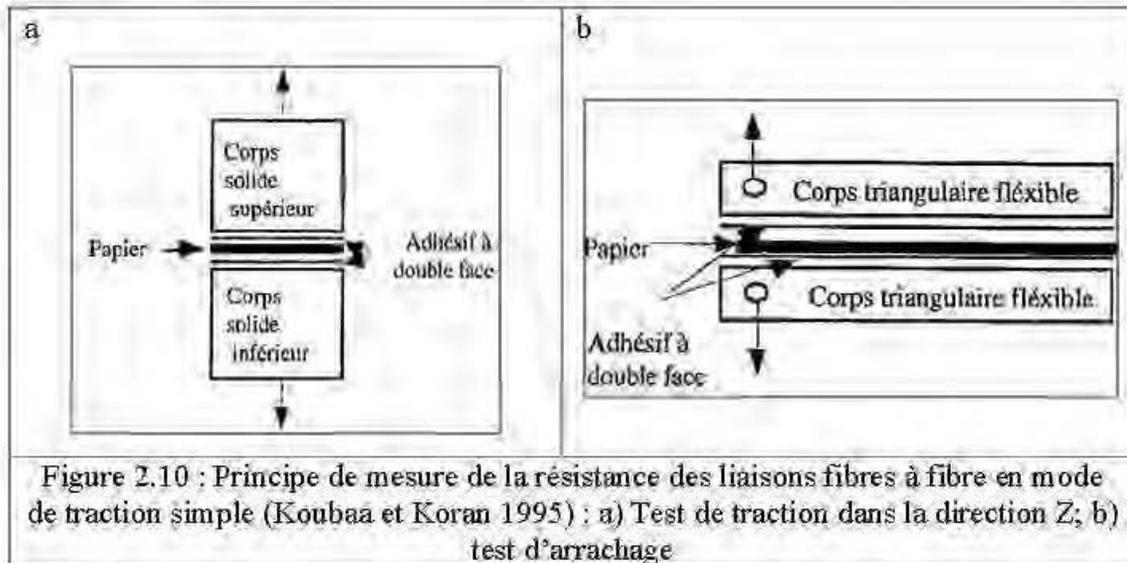
On peut classer les méthodes de mesure de résistance des liaisons fibre-à-fibre selon la nature et le mode d'application de charge.

#### *a) Traction simple*

Ce sont des méthodes statiques, où la charge est appliquée perpendiculairement au plan de la rupture. Ce mode de traction inclut le test de traction dans la direction Z, et le test d'arrachage.

Le test de traction dans la direction Z est un test rapide et répétitif qui consiste à monter l'échantillon du papier entre deux corps solides à l'aide du papier adhésif à double face et mesurer la contrainte à la rupture (en kPa) à l'aide d'une machine d'essai de traction (Figure 2.8). C'est le seul test qui nous permet de mesurer la déformation dans la direction Z (Koubaa, 1996). En effet, il nous permet de mesurer

le module d'élasticité, la déformation maximale et l'énergie de rupture (Koubaa et Koran 1995).



Le test d'arrachage est simple, répétitif et précis (Figure 2.8). Il permet de mesurer la force requise pour la propagation de la rupture sur une longueur de l'échantillon et ensuite de calculer plusieurs paramètres tel que : l'énergie d'arrachage (J), l'énergie d'arrachage par unité de surface ( $J m^2$ ) et la résistance Z en kPa (Koubaa, 1996).

Ce test consiste à appliquer deux bandes adhésives sur les deux surfaces d'échantillon et tirer les bouts des deux bandes à la main jusqu'à initiation de la rupture. Ensuite, on applique une charge perpendiculaire au plan du papier à l'aide d'une machine de traction (Figure 2.8).

#### *b) Méthodes en cisaillement*

Ce sont des méthodes statiques, où les surfaces séparées glissent l'une sur l'autre perpendiculairement au plan de la rupture (Figure 2.9). Ils permettent de mesurer la résistance des liaisons entre croisement de deux fibres. Le test de fibre

unique (Figure 2.9a) et le test de cisaillement entre feuille double (Figure 2.9b) sont les principales méthodes de mesure selon ce mode (Koubaa et Koran 1995).

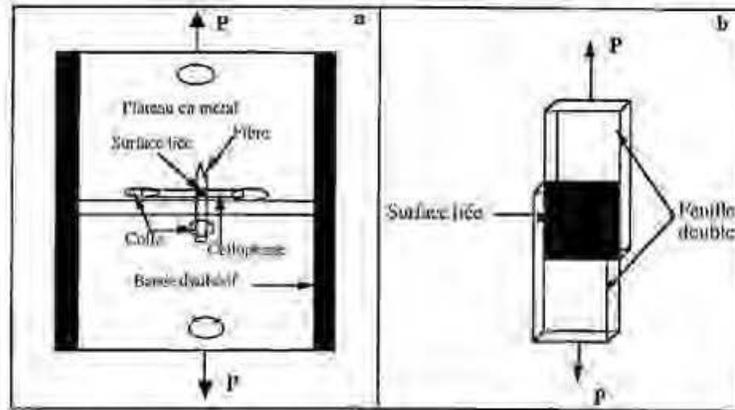


Figure 2.9 : Principe de mesure de la résistance des liaisons selon le mode cisaillement (Koubaa et Koran 1995): a) Test de fibre unique b) Test de cisaillement entre feuille double.

Les tests de croisement sont considérés comme les seuls tests qui mesurent la vraie résistance de liaisons fibre-a-fibre (Koubaa, 1996). En revanche, ce sont des tests non répétitifs, qui demandent de grands soins durant la préparation et la réalisation du test. L'inconvénient majeur de ces tests est la surévaluation de la résistance des liaisons, parce que la résistance des liaisons déterminée par cisaillement possède deux composantes : la force requise pour causer la rupture des liaisons et la force agissant dans le plan de la feuille.

### c) Méthodes dynamiques

Les méthodes dynamiques incluent principalement le test d'impact de Scott et les méthodes non-destructives comme la vitesse de propagation des ondes ultrasonores.

C'est un test simple et rapide, conçu pour calculer la résistance des liaisons dans le papier en ( $J/m^2$ ) par le rapport de l'énergie de rupture sur la surface

d'échantillon. Ce test consiste à attacher un échantillon entre un bloc de métal et un angle d'aluminium à l'aide d'un papier adhésif à double face, puis, placer l'ensemble sur un instrument supportant un pendule (Figure 2.10). Le pendule frappe la partie supérieure d'angle aluminium ce qui cause la rupture de la feuille. L'énergie de rupture est calculée en terme de perte d'énergie potentielle par la différence d'énergies cinétiques du pendule avec et sans obstacle.

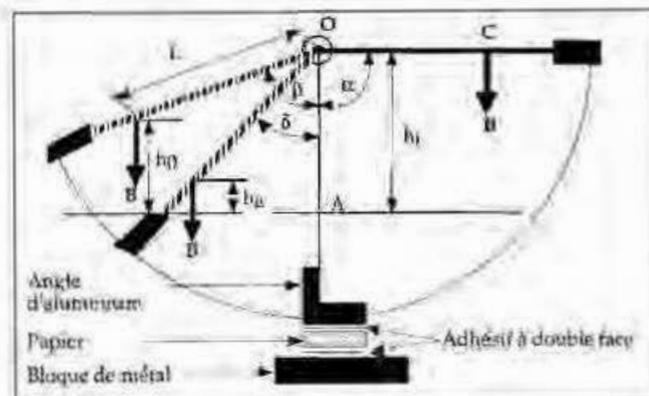


Figure 2.10 : Principe de détermination de l'énergie de rupture selon le test d'impact de Scott (Koubaa et Koran 1995)

Durant ce test, la rupture peut prendre place à la fois dans les liaisons et dans les parois des fibres. Aussi que la nature dynamique du test tend à surévaluer la valeur de la résistance des liaisons fibre-fibre. Ce qui est considéré comme les principaux inconvénients de la méthode.

Le test de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores, c'est un test rapide et non destructif qui repose sur la mesure du module d'élasticité par onde ultrasonore selon l'équation 2.4 (Koubaa 1996). La faible sensibilité vis-à-vis l'amélioration des liaisons par additifs chimiques est le principal inconvénient qui limite cette méthode (Koubaa, 1996).

$$E_z = v^2 \cdot \rho \quad [2.1]$$

Où :

$E_z$  : Module d'élasticité dynamique dans la direction Z, Pa ;

$v$  : Vitesse de propagation de l'onde, (m/s);

$\rho$  : Masse volumique de la feuille, kg/m<sup>3</sup>.

## 2.9 Hypothèses et objectifs de la recherche

L'analyse des travaux antérieurs a mis en évidence que les boues papetières peuvent être valorisées pour la production de panneaux à base de fibres de bois. En fait, les boues primaires, riches en fibres, peuvent être utilisées pour cette application. De la même façon, les boues secondaires sont riches en protéines et par conséquent ils peuvent avoir un certain pouvoir adhésif bénéfique pour l'adhésion des fibres dans les panneaux à base de fibres de bois.

Pour valoriser les boues pour une utilisation donnée, la caractérisation des propriétés importante pour cette application est essentielle. De plus, n'importe quelle alternative de valorisation doit être économiquement rentable.

Ainsi, les hypothèses sont :

- 1) La valorisation des boues papetières passe par une caractérisation approfondie des propriétés morphologiques et chimiques des boues primaires et secondaires issues de 3 procédés papetiers. Ces propriétés sont importantes pour étudier le pouvoir adhésif des fibres de boues.
- 2) Les boues secondaires, riches en lignine et en protéines, permettent d'améliorer considérablement l'adhésion dans les panneaux des fibres.
- 3) La valorisation des boues papetières pour la fabrication des panneaux de fibres est une alternative rentable.

L'objectif général de cette étude est de caractériser les propriétés des boues primaires et secondaires issues de trois procédés papetiers (thermomécanique (TMP), Chimicothermomécanique (CTMP) et Chimique (kraft) dans une perspective de valorisation pour la fabrication de panneaux à base de fibres de bois. Plus spécifiquement, les objectifs de cette étude sont :

1. Caractériser les propriétés morphologiques et chimiques des boues primaires et secondaires issues des trois procédés papetiers.
2. Évaluer le pouvoir adhésif des boues papetières en utilisant une approche papetière, basé sur l'étude de la résistance des liaisons fibre-à-fibre.
3. Évaluer la rentabilité financière de trois alternatives de valorisation des boues papetières soit : l'utilisation comme énergie, la fertilisation des terres agricoles et la fabrication de panneaux.

## CHAPITRE III

### Matériel et méthodes

#### 3.1 Matériel

Des boues primaires (BP) et secondaires (BS) issues des procédés de mise en pâtes thermomécaniques (TMP), chimico-thermomécaniques (CTMP) et chimiques kraft ont été obtenues de papeteries du Québec<sup>4</sup>. Les boues furent conservées à une température de 4°C jusqu'au moment de leur préparation et leur caractérisation pour une période maximale de 10 jours.

La teneur en humidité (H%) des boues a été calculée selon l'équation suivante (3.1)

$$H(\%) = \frac{M_h - M_a}{M_a} \times 100 \quad [3.1]$$

Où

H% : Teneur en humidité des boues, %;

M<sub>h</sub> : Masses des boues à l'état humide, g ;

M<sub>a</sub> : Masses des boues à l'état anhydre (24h, 105 °C); g

La teneur en matières en suspension des boues a été calculée, après filtration de 20 ml des boues, selon l'équation suivante (3.2).

$$H(\%) = \frac{MES}{V} \times 100 \quad [3.2]$$

Où

MES : La teneur en matières en suspension, g/l;

---

<sup>4</sup> Les noms des papeteries, origines des boues papeteries utilisées dans cette présente étude, ne sont pas divulgués pour des raisons de la confidentialité.

$M_{f0}$  : Masse du filtrat à l'état anhydre (24h, 105 °C), g;

V : Volume des boues filtré, L.

La teneur en humidité et la teneur en matières en suspension vont servir à la détermination des volumes des boues nécessaires pour former des formettes de 60 g/m<sup>2</sup>. De plus, des pâtes commerciales issues de trois procédés (TMP, CTMP et kraft) ont été utilisées pour la préparation de formettes. Les caractéristiques générales de ces pâtes sont présentées au Tableau 3.1. Ces pâtes serviront comme témoins.

Tableau 3.1 : Description et caractéristiques des pâtes témoins

Type de pâte (Usine)	Essence	Indice d'égouttage	Longueur des fibres
TMP (Abitibi-Bowater, Amos)	Résineux épinette, sapin)	(pin, 160 ml	0,63 mm
CTMP (Tembec, Témiscamingue)	Feuillu blanc)	(Bouleau 420 ml	0,56 mm
Kraft (Tembec, Skookumchuk pulp)	Résineux épinette)	(Pin et 690 ml	1,26 mm

## 3.2 Méthodes

### 3.2.1 Mesure des propriétés morphologiques des fibres des boues.

L'analyseur de la qualité de la fibre (AQF) optique de marque OPTEST a servi pour mesurer les caractéristiques morphologiques des fibres des BP et des BS issues des trois procédés papetiers (TMP, CTMP et kraft) soient : la longueur des fibres, la largeur des fibres et la teneur en fines. Pour chaque type de boues 5 échantillons furent extraits et analysés. Sur chaque échantillon, 5000 fibres furent mesurées.

L'AQF mesure automatiquement et avec précision les propriétés des fibres à savoir la longueur qui varie de 0,20 mm à 10 mm, la largeur comprise entre 10 µm et

75  $\mu\text{m}$ , la masse linéique des fibres en  $\text{mg/m}$  qui exprime la masse de fibres rapportée à la longueur, qui varie de 0,1 à 0,5  $\text{mg/m}$  et la rectitude des fibres caractérisée par la courbure, les angles et le nombre des coudes par fibre. La longueur des fibres est exprimée selon trois variables, la moyenne arithmétique, LN (Eq. 3.3), la moyenne pondérée selon la longueur, LW (Eq. 3.4) et la moyenne pondérée selon le poids LWW (Eq. 3.5). Dans la présente étude la valeur LWW a été utilisée pour désigner la longueur des fibres.

$$L_N = \frac{\sum n_i l_i}{\sum n_i} \quad [3.3]$$

$$L_W = \frac{\sum n_i l_i^2}{\sum n_i l_i} \quad [3.4]$$

$$L_{WW} = \frac{\sum n_i l_i^3}{\sum n_i l_i^2} \quad [3.5]$$

### 3.2.1 Mesure des propriétés chimiques des fibres des boues.

Sur chacune des boues des essais ont été réalisés pour mesurer leur composition chimique soient la teneur en polysaccharides, de lignine soluble à l'acide (Klason), de lignine insoluble, les teneurs en extractibles à l'eau chaude et à l'eau froide et la teneur en cendres. Ces propriétés ont été mesurées selon les normes TAPPI en vigueur (Tableau 3.3). La composition des polysaccharides en arabinane, xylane, mannane, galactane et glucane a été déterminée par chromatographie à phase gazeuse. La contribution du glucose aux hémicelluloses a été estimée à partir d'un rapport 2 : 1 pour le mannose : glucose et 10 : 1 xylose : glucose. La proportion de cellulose a été par la suite calculée à partir de la différence entre le glucose total et le glucose associé aux hémicelluloses. Les teneurs des boues en cellulose, hémicellulose et lignine ont été quantifiées selon les normes TAPPI illustrées dans le tableau 3.3.

Tableau 3.2 Normes Tappi et PAFTAC utilisées pour la caractérisation des propriétés chimiques des boues

Composé chimique	Norme
Polysaccharides	TAPPI T-249 cm-85
Lignine non soluble à l'acide (Klason)	TAPPI T-222 om-88
Lignine soluble à l'acide	TAPPI UM-250
Teneur en extractibles	TAPPI T-207 om-88
Teneur en cendres	PAPTAC G.10

### **3.2.3 Caractérisation des propriétés papetières des boues**

#### *3.2.3.1 Préparation des formettes*

Pour caractériser le pouvoir adhésif des boues papetières nous avons utilisé les méthodes et procédures employées pour la caractérisation des propriétés des pâtes et papiers. Les différentes étapes de préparation de formettes sont présentées à la figure 3.1. En premier lieu, les boues furent filtrées pour enlever les bûchettes. Par la suite, on a préparé des formettes de 60 g/m<sup>2</sup> (5 formettes par condition expérimentale) selon les spécifications de la norme PAPTAC C.4 à partir de mélanges de boues primaires et secondaire issues de trois procédés papetiers (TMP, CTMP et Kraft).



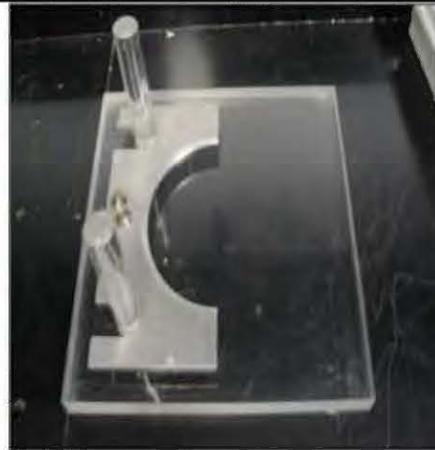
Étape 1 : Filtration des boues



Étape 2 : Désintégration des fibres



Étape 3 : Formation des feuilles à l'aide d'une formette anglaise



Étape 4 : Préparation des feuilles pour pressage



Étape 5 : Pressage humide des feuilles



Étape 6 : Pressage et séchage simultané des feuilles

Figure 3.1 : Étapes de préparation des formettes

Pour les boues issues des 3 procédés, on a utilisé trois formulations sur base du poids anhydre : 100% BP / 0% BS, 80% BP / 20%BS et 60% BP / 40 % BS. La procédure de séchage des formettes a été modifiée par rapport à la spécification de la norme PAPTAC C4 compte tenu des températures de séchage utilisées dans le cadre de cette étude. En fait, pour étudier le mécanisme d'adhésion des fibres des boues en fonction de la température de séchage, on a utilisé 5 cinq différentes température de séchage soient : 23°C, 60°C, 100°C, 140°C et 180°C selon la procédure de pressage et séchage simultanés décrite dans Koubaa (1996). La température de 23°C correspond à celle des spécifications de la norme PAPTAC C.4. Celle de 60°C correspond à la température utilisée dans le séchage du papier. Les températures de 100°C et de 140°C correspondent aux températures de fusion des hémicelluloses et de la cellulose. La température de 180 °C correspond à la température de fusion de la lignine (Back 1967; Koubaa 1996; Koubaa et al. 1996; Strenberg et al. 1978). Lors du séchage, une pression constante à 100 psi a été appliquée. Le temps de séchage pour chaque température a été déterminé expérimentalement (Tableau 3.4). Après séchage, les formettes ont été conditionnées selon les spécifications de la norme PAPTAC D.12.

Tableau 3.3 : Temps de séchage en fonction de la température du pressage et séchage simultanés des feuilles

<b>Température de séchage (°C)</b>	<b>Temps de séchage</b>
23	24 heures
60	20 minutes
100	10 minutes
140	1 minute
180	30 secondes

### *3.2.3.2 Caractérisation des propriétés des formettes*

Les feuilles obtenues ont été testées selon les méthodes normalisées de TAPPI et de PAPTAC. Les propriétés mesurées incluent: la masse volumique apparente ( $\rho$ ), la résistance à la traction dans la direction Z (RTDZ), le coefficient de diffusion de la

lumière ( $D_L$ ), l'indice de déchirure ( $I_D$ ), la longueur de rupture ( $L_R$ ), la résistance intrinsèque des fibres ( $ZS$ ). La résistance spécifique des liaisons ( $RSL$ ) a été déterminée selon l'équation 3.6 (Koubaa et al. 1996; Koubaa 1996).

Certaines formettes ont été formées selon la norme PAPTAC C.4, c'est-à-dire, les formettes ont été séchées à une température de 23°C. D'autres formettes ont été formées selon la norme PAPTAC C.4 avec une modification au niveau de la température de séchage à : 60°C, 100°C, 140°C et 180°C à l'aide d'une presse munie de plateaux chauffants selon la procédure décrite dans Koubaa (1996)

$$RSL = \frac{RTDZ}{\rho} \quad [3.5]$$

Les feuilles formées ont été conditionnées dans un environnement contrôlé selon la norme PAPTAC D.4. La densité apparente, l'indice de déchirure, la longueur de rupture à sec, le module d'élasticité en traction, le coefficient de diffusion de la lumière et la résistance à la rupture selon la direction Z ont été mesurés selon les spécification des normes PAPTAC (Tableau 3.5).

Tableau 3.4 : Méthodes de mesure des propriétés des formettes issues de boues papetières

Propriété	Norme	Unité de mesure	Légende
Densité apparente	PAPTAC D.12	g/cm <sup>3</sup>	$\rho$
Indice de déchirure	PAPTAC D.9	mN.m <sup>2</sup> /g	$I_D$
Longueur de rupture	PAPTAC D.6H	km	$L_R$
Coefficient de diffusion de la lumière	PAPTAC E.2.	%	$D_L$
Résistance à la traction dans la direction Z	PAPTAC D.37P	kPa	RTDZ

### **3.3 Étude financière comparative de différentes alternatives de valorisation des boues papetières**

Afin d'effectuer une étude financière comparative entre la rentabilité de différentes alternatives de valorisation des boues papetières, on s'est basé sur des données réelles d'une usine dont l'identité ne sera pas dévoilée pour des raisons de confidentialité.

L'usine génère 30 tonnes humides de boue par jour. Les boues mélangées accumulées ont une teneur en solide moyenne de 37%. L'usine dispose de ses boues primaires et secondaires en les vendant à une firme qui les récupère pour la fertilisation des sols agricoles. Les boues sont vendues à 16 \$ la tonne sur une base de teneur en solide de 60%. Pour respecter les spécifications du client, la papetière utilise un séchoir à haute fréquence. Le coût des traitements de séchage des boues pour respecter les spécifications est estimé à 8 \$ la tonne. La compagnie envisage trois autres scénarios pour disposer des boues :

1. La génération énergétique pour l'unité de séchage du papier;
2. La fabrication de granules énergétiques dont elle donnera le contrat de commercialisation à une entreprise de bûches énergétique locale;
3. La vente à une usine de panneaux de fibres à moyenne densité.

Pour l'option 1, un investissement de 1,8 millions de dollars et des dépenses annuelles de 140 000\$ sont nécessaires. Cet investissement permet à l'usine d'économiser 200 000 \$ par année sur les coûts énergétiques et 5 \$ de polymères par tonne humide. La production d'énergie résulte également en 5% de cendres que l'industrie doit disposer.

Pour l'option 2, un investissement de 1 millions de dollars est requis. De plus les coûts d'opérations annuels sont estimés à 120 000 \$. Un traitement de désodorisation est nécessaire est évalué à 20\$ la tonne anhydre. Les granules sont vendus à 0,25 \$ par kg (teneur en solide =96%).

Pour l'option 3, l'usine de panneaux de fibres exige que les boues aient une teneur en humidité maximale de 10%. Une partie de l'installation de production de bûche (séchoir) pourrait être utilisée pour le traitement de séchage des boues. Cette partie nécessite un investissement de 750 000 \$ et un coût d'opération annuel de 80 000\$. Le prix de vente estimé pour une tonne anhydre de boues est évalué à 75\$.

Dans cette étude nous avons utilisé la méthode de la valeur actuelle nette (VAN) (Degarmo, 1989) pour déterminer la rentabilité des alternatives étudiées selon 3 périodes d'amortissement 10, 20 et 25 ans, un taux d'imposition de 34% et un taux d'intérêt de 6%. La VAN est une technique d'analyse qui détermine la rentabilité financière d'un projet en tenant compte des chronologies différentes des flux financiers liés à ses coûts et ses revenus (Degarmo, 1989). Autrement dit, le calcul de la VAN a pour objet de convertir tous les flux monétaires du projet en leur "valeur actuelle", c'est-à-dire leur valeur aujourd'hui et calculée selon l'équation 3.6. Le flux monétaire est calculé selon l'équation 3.7 alors que le bénéfice net et le bénéfice imposable sont estimés selon les équations 3.8 et 3.9, respectivement. L'amortissement a été calculé selon l'équation 3.10 (Degarmo, 1989).

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+k)^t} - C_0 \quad [3.6]$$

Où :

n : La durée du projet

t : indice désignant la période (t=0 pour la période courante)

k : le taux d'actualisation ou le taux d'intérêt

C<sub>t</sub> : le flux monétaire réel net à la période t

C<sub>0</sub>: l'investissement effectué au départ

$$\text{Flux monétaire} = \text{Bénéfice net} + \text{Amortissement} \quad [3.7]$$

$$\text{Bénéfice net} = \text{Bénéfice imposable} - \text{Impôt} \quad [3.8]$$

$$\text{Bénéfice imposable} = \text{Revenu annuel} - (\text{Dépenses annuelles} + \text{amortissement}) \quad [3.9]$$

$$\text{Amortissement} = \text{Investissement} \times \text{Taux Amortissement} \quad [3.10]$$

## CHAPITRE IV

### RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans les sections suivantes nous présentons les résultats et discussion des essais sur les propriétés physico-chimiques, morphologiques et papetières des boues issues de trois procédés papetiers. Il faut noter que les travaux de cette étude ont fait l'objet d'une publication scientifique dont le contenu intégral est présenté à l'Annexe 1.

#### 4.1 Propriétés physico-chimiques

Les caractéristiques physico-chimiques des boues échantillonnées dans le cadre de la présente étude sont présentées au Tableau 4.1. On y présente le pH et les teneurs en humidité et en matières en suspension.

Tableau 4.1 : Caractéristiques physico-chimiques des boues primaires (BP) et secondaires (BS) issues des procédés TMP, CTMP et Kraft

Procédé	TMP		CTMP		Kraft	
	BP	BS	BP	BS	BP	BS
Teneur en humidité, %	89,3	90,3	87,4	89,7	86,8	89,5
pH	7,00	7,19	5,6	7,2	5,3	6,8
Matières en suspension, g/l	26,2	14,3	50,4	18,0	44,7	26,5

Les boues ont une teneur d'humidité d'environ 90%. Les pH des boues primaires varient entre un pH faiblement acide (pour ceux issus d'un procédé CTMP et Kraft) à un pH neutre pour les boues primaires issues d'un procédé TMP. Par

contre, les boues secondaires ont un pH neutre. En effet, durant le traitement secondaire il existe des limites de pH en dehors desquelles les bactéries ne peuvent pas se développer, et c'est pour cela qu'il faut maintenir un pH neutre afin d'assurer un meilleur rendement.

Généralement, avant le traitement secondaire, les boues subissent un traitement physico-chimique (primaire) dont le but est d'éliminer les matières en suspension (MES). Ceci explique les teneurs élevées en MES pour les boues primaires et faibles pour les boues secondaires. La teneur en MES des boues varie aussi selon leur origine. On constate que les boues issues d'un procédé CTMP et kraft ont une teneur élevée en MES et largement supérieure à celle des boues issues d'un procédé TMP.

## **4.2 Propriétés morphologiques**

Les propriétés morphologiques des boues échantillonnées dans le cadre de la présente étude sont présentées au Tableau 4.2. On y présente la longueur moyenne pondérée des fibres, la largeur des fibres et la proportion de fines.

La morphologie des fibres traitées peut varier d'une manière importante selon l'espèce utilisée, le procédé de mise en pâte et le type du procédé du traitement des effluents (traitement primaire ou secondaire) pour les boues. En effet, les pâtes issues d'un procédé chimique contiennent des fibres plus longues. Par contre, ceux issues d'un procédé mécanique sont caractérisés par des fibres plus courtes, et une teneur en fines fibres élevée

Tableau 4.2 : Caractéristiques morphologiques des fibres des boues primaires et secondaires issues de trois procédés papetières

	TMP			CTMP			Kraft		
	Pâte	BP	BS	Pâte	BP	BS	Pâte	BP	BS
Longueur des fibres (mm)	2,37	1,95	1,82	1,16	1,01	0,85	2,34	1,87	1,85
Teneur en fine fibres (%)	51,85	64,62	75,94	40,12	45,68	63,6	34,87	61,78	68,93
Largeur des fibres (µm)	28,34	22,14	23,0	22,94	20,94	20,12	22,9	22,56	22,26

Les fibres des pâtes TMP et Kraft ont des fibres plus longues que celles des pâtes CTMP (Figure 1). Ce résultat s'explique par le fait que les pâtes TMP et kraft sont issues de bois résineux alors que celles de la pâte CTMP sont issues du bouleau blanc, un bois feuillu. Les feuillus possèdent des fibres plus courtes que celles des résineux (Panshin et de Zeuw 1980). La variation de la longueur des fibres des BP suit la même tendance que celle des échantillons témoins des 3 pâtes. Les fibres des BP de TMP et de kraft sont plus longues que celles des CTMP. En général, les BP ont des fibres plus courtes que celles des pâtes témoins. Les fibres des BS ont des fibres plus courtes. En général, les fibres de BS sont les plus courtes (Figure 4.1a). Les fibres des boues sont plus courtes que celles des échantillons témoins à cause de leurs teneurs en fines plus élevée (Figure 4.1b). En général, les boues secondaires ont des teneurs en fines supérieures aux BP, généralement plus élevées que 60% pour les 3 procédés de mise en pâtes. De la même façon, la teneur en fines des BP est largement supérieure à celle des pâtes. La variation des teneurs en fines en fonction du procédé de mise en pâte s'explique par l'action mécanique des raffineurs qui ont tendance à briser les fibres et générer des fines (Garceau 1989).

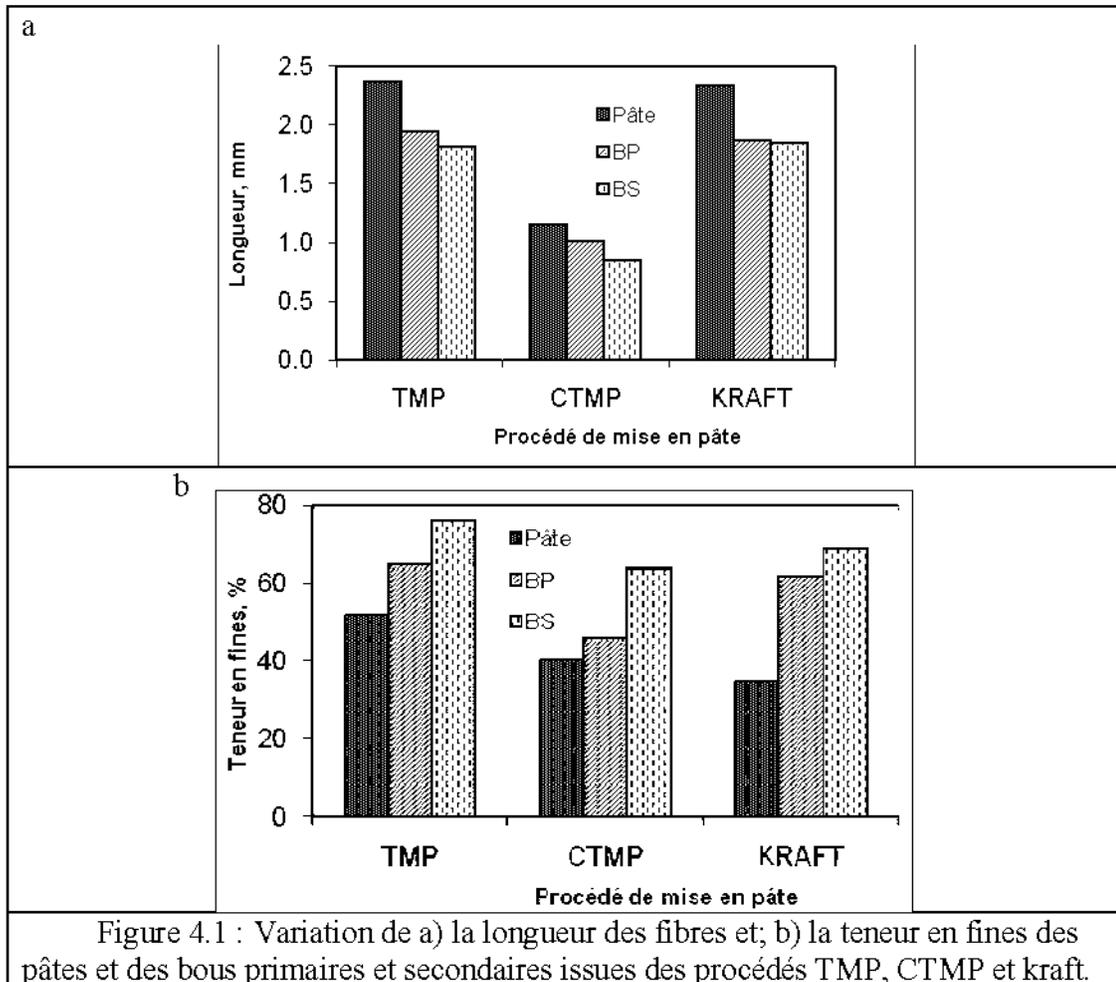


Figure 4.1 : Variation de a) la longueur des fibres et; b) la teneur en fines des pâtes et des bous primaires et secondaires issues des procédés TMP, CTMP et kraft.

### 4.3 Propriétés chimiques

Les résultats des analyses chimiques sont présentés au tableau 4.3. On y présente, les teneurs en lignine soluble et insoluble en milieu acide et les teneurs en polysaccharides totaux, en arabiane, xylane, mannane, galactane et glucane.

Tableau 4.3 : Propriétés chimiques des BP et des BS issues de trois procédés papetiers

	TMP			CTMP			Kraft		
	Pâte	BP	BS	Pâte	BP	BS	Pâte	BP	BS
Lignine insoluble en milieu acide (Klason) (%)	28,5	30,7	26,7	19,3	26	22,5	0,41	30,2	24,6
Lignine soluble en milieu acide (%)	0,3	0,96	8,52	2,43	2,59	10,2	0,28	1,13	7,35
Lignine totale (%)	28,8	31,7	35,2	21,7	29,2	32,7	0,69	31,3	34,0
Polysaccharides (%)	68	45,9	7,3	71,3	53,5	5,8	94,3	45,4	10
Arabinane (%)	1,5	1,0	0,4	0,5	0,6	0,6	0,5	1,0	0,6
Xylane (%)	5,8	4,0	0,6	20,7	14,2	0,9	9,2	4,8	0,8
Mannane (%)	9,8	6,4	1,0	1,5	1,1	0,7	4,2	5,4	1,2
Galactane (%)	4,5	1,4	0,8	1,0	0,6	0,8	0,3	1,5	1,3
Glucane (%)	46,4	33,1	4,5	47,6	37,0	2,8	80,1	32,7	6,1
Hémicelluloses (%)	27,1	16,42	3,4	26,5	18,5	3,4	17,2	15,9	5,4
Celluloses (%)	40,9	29,5	3,9	44,8	35,0	2,4	77,1	29,5	4,6
Teneur en cendres, %	-	10,4	30,2	-	2,9	17,0	-	12,5	27,4

La teneur en cendre dépend fortement des additifs chimiques ajoutés lors de la fabrication des pâtes. Les boues issues d'un procédé kraft ont la teneur la plus élevée en teneur en cendres. Ce résultat s'explique en partie par les produits chimiques utilisés lors de la mise en pâte kraft. La présence de cendres dans les trois boues s'explique aussi par les minéraux utilisés dans différentes étapes de production de papiers dont ceux utilisés pour le couchage et l'impression du papier. Pour les trois procédés de mise en pâte, les teneurs en cendres sont plus élevés dans les boues secondaires. Les traitements primaires et secondaires ne permettent pas de traiter les composés minéraux, en revanche, ils sont éliminés avec les boues secondaires sous forme particulière ce qui explique la teneur élevée des boues secondaires en cendres par rapport aux boues primaires (Bassompierre, 2007).

### **4.3.1 Teneur en lignine**

Les variations des teneurs en lignine totale soluble et insoluble à l'acide sont présentées à la Figure 4.2. Tel que prévu, les pâtes TMP possèdent la teneur en lignine totale la plus élevée suivie par la CTMP et la kraft. La teneur en lignine de la pâte kraft est négligeable compte tenu que ce procédé de mise en pâte dissout la quasi-totalité de la lignine des parois cellulaires. Des tendances similaires sont observées pour les teneurs en lignine soluble (Figure 4.2b) et insoluble (Figure 4.2 c).

Les teneurs en lignine totaux des BP et des BS sont supérieures à celles des pâtes témoins (Figure 4.2). Les teneurs en lignine totaux des BP et des BS des pâtes kraft ne sont pas très différents de ceux des pâtes TMP et CTMP (Figure 4.2a). La même tendance est observée pour la lignine soluble (Figure 4.2b) et insoluble (Figure 4.2c). Ce résultat s'explique par le fait que les boues kraft sont composées principalement de bûchettes et de résidus de bois non défibrés.

### **4.3.2 Teneur en polysaccharides**

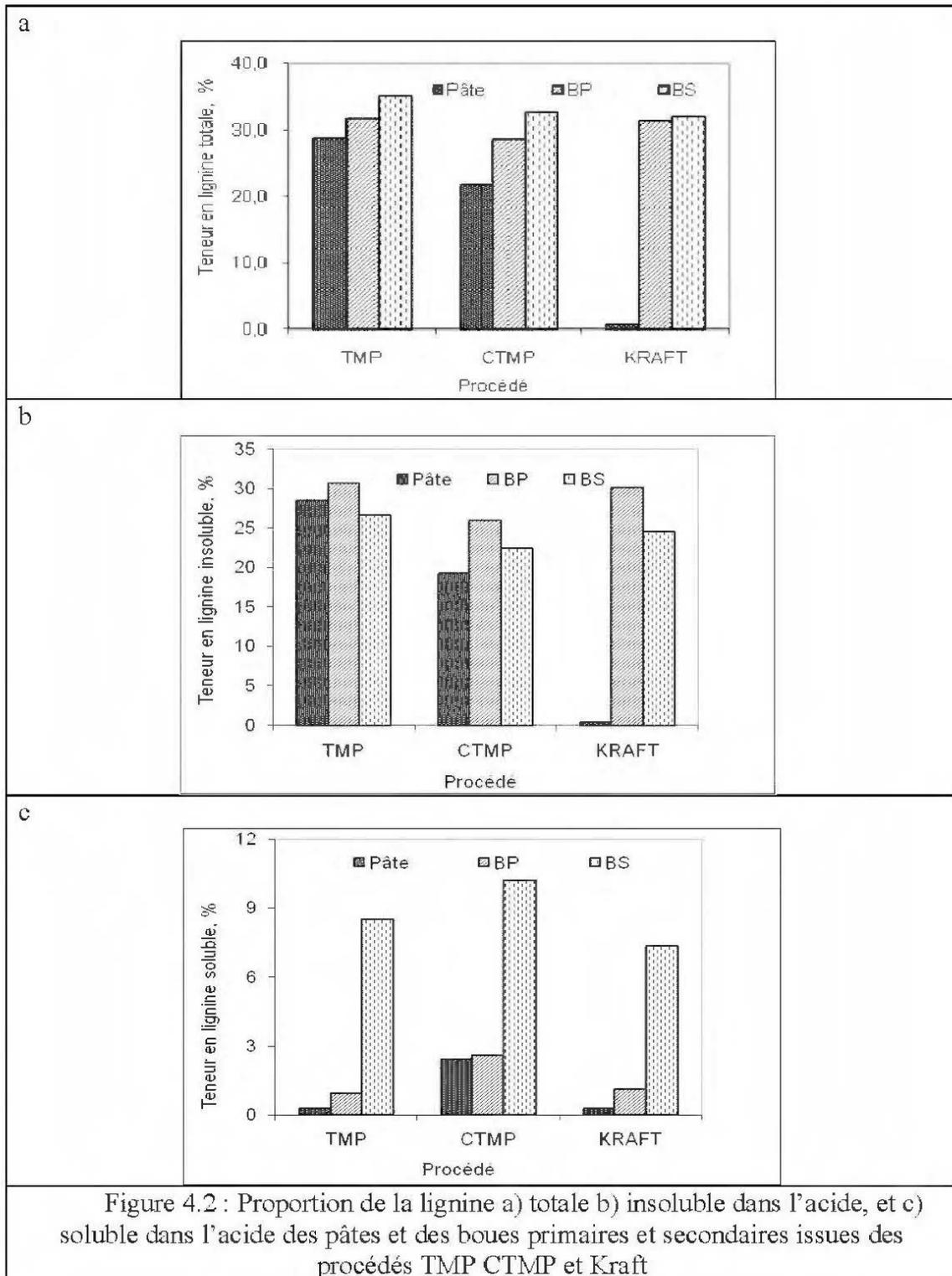
Tel que prévu la teneur en polysaccharides varie en fonction du procédé de mise en pâte. La pâte kraft montre la teneur en polysaccharides la plus élevée (Figure 4.3a). La teneur en polysaccharides des boues primaires était inférieure à celle des pâtes témoins mais nous n'avons pas observé de différences substantielles entre les boues issues des 3 procédés. Il est à noter que la teneur en polysaccharides dans les boues secondaire était inférieure ou égale à 10 %. La teneur en polysaccharides des BS varie entre les 3 procédés de mise en pâte. Les BS des pâtes kraft ont montré la teneur en polysaccharides la plus élevée (10%) suivies par celles des pâtes TMP (7,3%) et CTMP (5,8%), respectivement. La teneur plus élevée en polysaccharides des BS Kraft s'explique par sa proportion de cellulose plus élevée (Tableau 4.3).

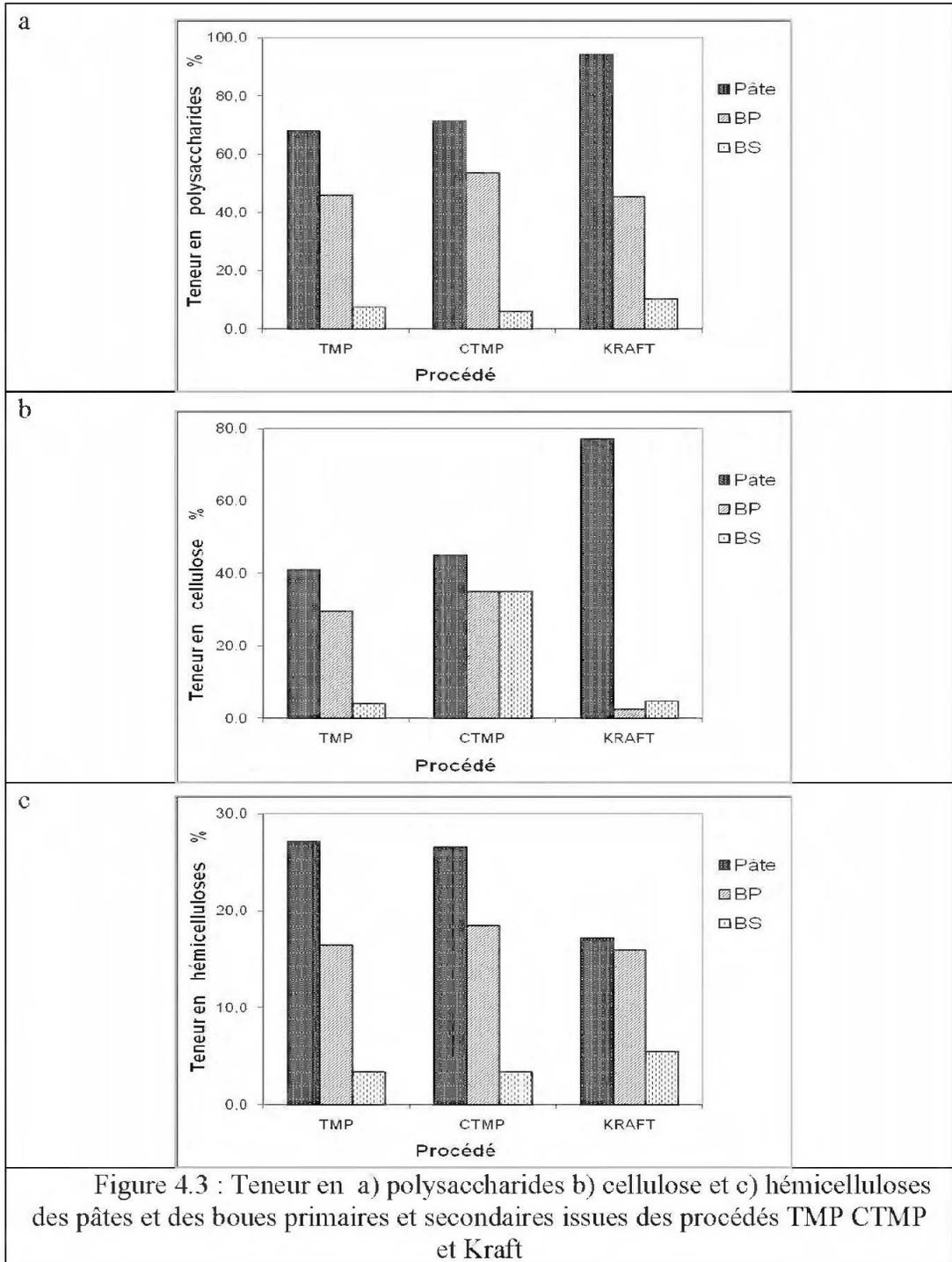
Plus en détail, nous n'avons pas observé de différences notables dans les polysaccharides des pâtes TMP et CTMP (Tableau 4.3). Par contre, les teneurs en glucane, arabiane et mannane (Figure 4.4) sont plus faibles dans la pâte kraft

comparativement aux BP et aux pâtes TMP et CTMP. Ces différences peuvent s'expliquer par la solubilisation de ces polysaccharides dans le procédé de mise en pâte chimique.

Le tableau 4.3 indique que la teneur en cellulose est plus élevée dans la pâte kraft (77,1 %) suivi par la pâte CTMP (44,8%) et la pâte TMP (40,9%), respectivement. Ce résultat est attendu et concorde avec les résultats rapportés dans la littérature (Clark 1985) et s'explique par le fait que la pâte TMP contient la totalité de la lignine présente dans le bois, une partie de lignine a été dissoute dans le procédé de mise en pâte CTMP et que la quasi totalité de la lignine dans la pâte kraft a été dissoute.

Les boues primaires issues des 3 procédés de mise en pâte contiennent des teneurs en cellulose comparables qui se situent aux alentours de 30% (Tableau 4.3). Cela s'explique par le fait que les boues des 3 procédés sont riches en bûchettes et en résidus du bois dont la constitution chimique n'a pas changé. Les teneurs en hémicelluloses et en lignine des BP issus des trois procédés confirment cette affirmation.





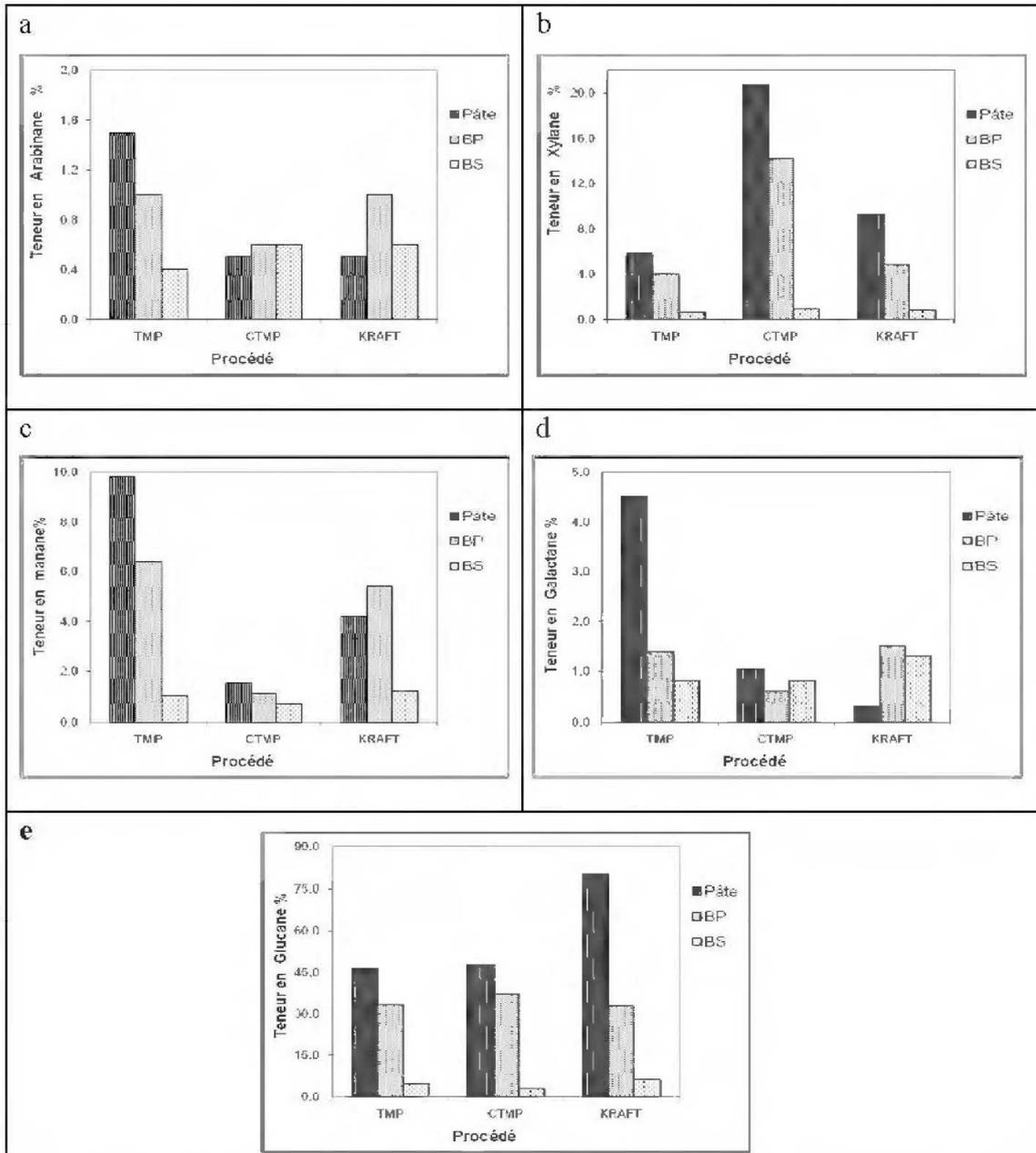


Figure 4.4 : Teneur en a) arabiane b) xylane c) mannane d) galactane et e) glucane des pâtes, des boues primaires et secondaires issues des procédés TMP CTMP et Kraft

## **4.4 Propriétés papetières**

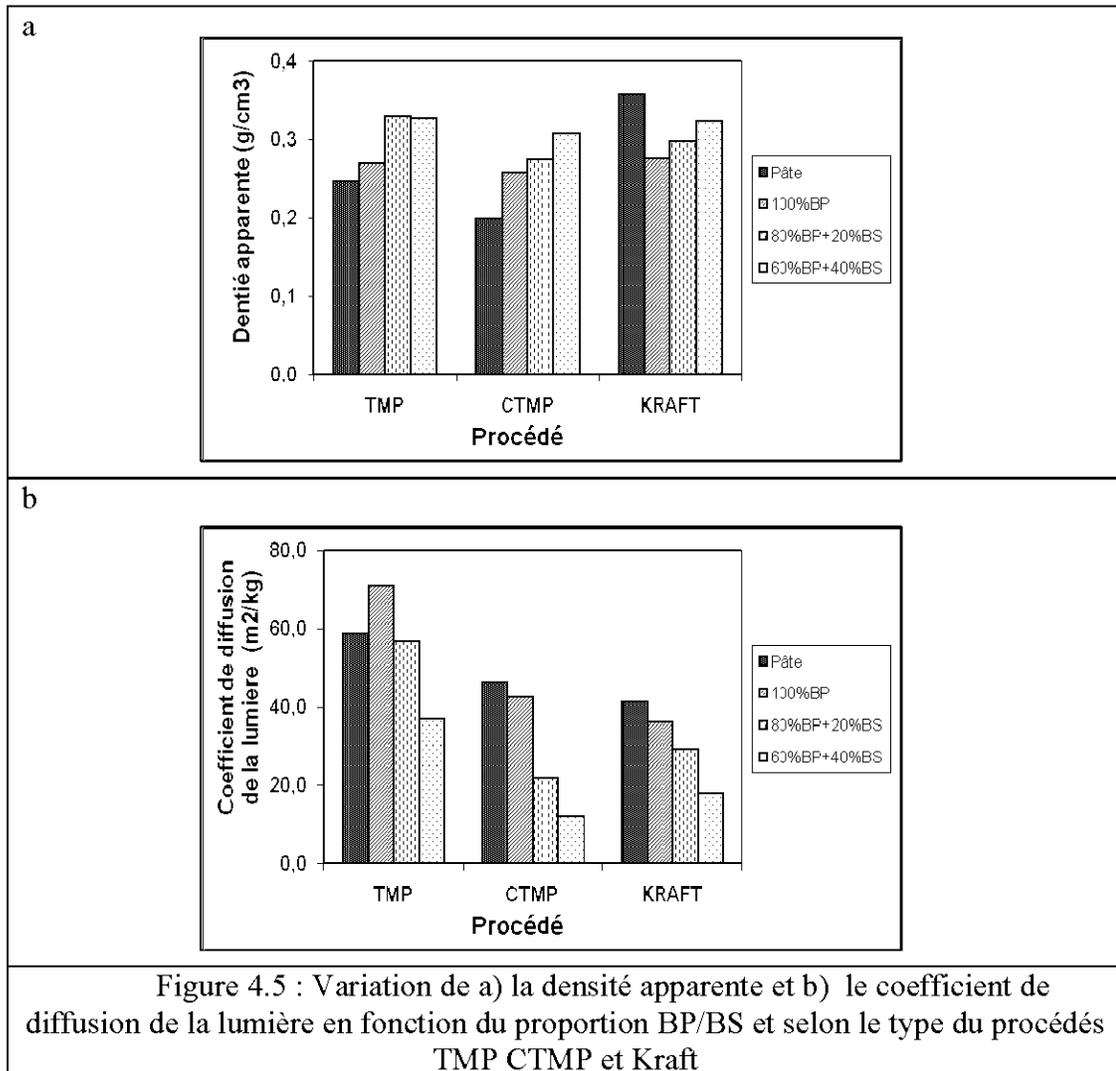
Les propriétés papetières sont présentées à l'Annexe 2. L'objectif de l'évaluation des propriétés papetières n'est pas d'évaluer le potentiel des boues primaires et secondaires pour la fabrication du papier mais d'évaluer comment les boues secondaires agissent sur l'adhésion mesurée par la résistance des liaisons fibre-à-fibre en premier lieu et en deuxième lieu comment la variation de cette propriété va se traduire en termes de propriétés du papier.

### **4.4.1 Densité apparente**

La densité apparente du papier est étroitement liée à la plus part de ces propriétés mécaniques (Clark 1985, Koubaa 1996). La résistance des liaisons fibre-à-fibre augmente avec l'augmentation de la densité à cause de l'augmentation de la surface de contact entre les fibres et par conséquent, la surface liée (Koubaa et Koran 1995). L'augmentation de la proportion de boues secondaires dans les feuilles est associée à une augmentation de la densité apparente et par conséquent la surface liée (Figure 4.5 a). Cette tendance s'explique par la teneur élevée en fines des boues secondaire.

### **4.4.2 Coefficient de diffusion de la lumière**

Le coefficient de diffusion de la lumière est en inversement proportionnel à la surface liée (Clark 1985, Koubaa 1996). Une proportion de boues secondaire plus élevée diminue le coefficient de diffusion de la lumière (Figure 4.5 b).

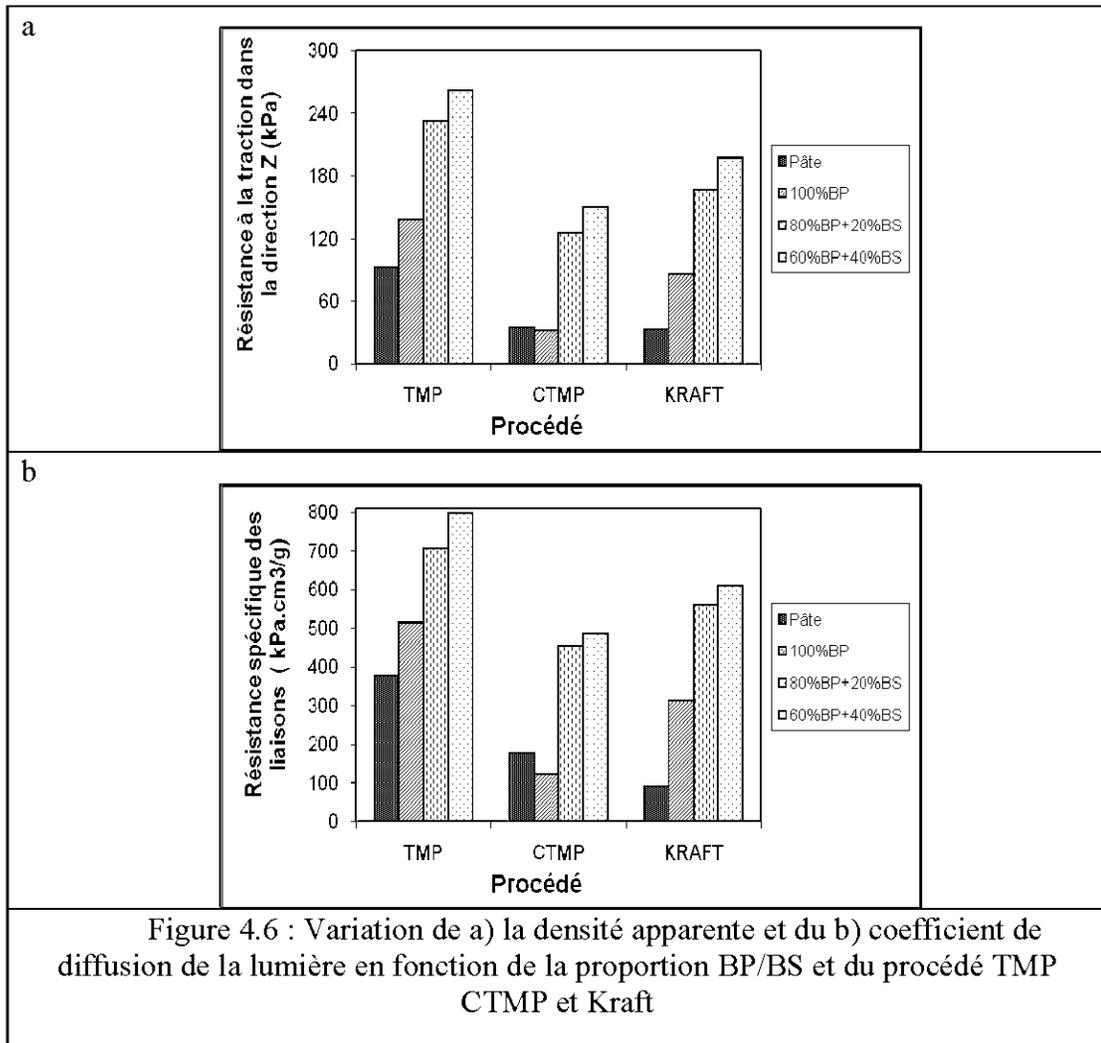


#### 4.4.3 Résistance des liaisons

La résistance des liaisons a été déterminée en termes de résistance à la traction dans la direction Z (RTDZ) et de résistance spécifique des liaisons (RSL). Pour les boues issues des trois procédés, l'ajout de boues secondaires a amélioré d'une façon substantielle la RTDZ (Figure 4.6a). L'amélioration de RTDZ avec l'augmentation de la teneur en BS s'explique par l'augmentation de la surface liée tel qu'illustrée par les variations de la densité apparente (Figure 4.5a) et le coefficient de diffusion de la

lumière (Figure 4.5b). Il est donc logique de penser à une augmentation de la fréquence de liens hydrogène (Clark 1985, Koubaa 1996). Cependant, la résistance spécifique des liaisons (RSL) a augmenté aussi avec la proportion de BS (Figure 4.6b). Par conséquent, les liens hydrogène ne sont pas le seul mécanisme qui explique l'amélioration de la résistance des liaisons. Les liens mécaniques par chevauchement et la formation de liens chimiques sont parmi les hypothèses pour expliquer les améliorations dans la résistance des liaisons et la résistance spécifique des liaisons.

La résistance spécifique des liaisons des BP et des BS des pâtes TMP est largement supérieure à celles des BP et des BS issues des pâtes CTMP et Kraft (Figure 4.6b). Ce résultat montre que les boues TMP ont un meilleur pouvoir adhésif que celui des boues CTMP et kraft. La différence entre les compositions chimiques entre les boues issues des trois procédés est parmi les explications plausibles. En effet, les boues TMP possèdent des teneurs en lignine plus élevées et des teneurs en polysaccharides plus faibles que celles des pâtes CTMP et kraft (Tableau 4.3).



#### 4.4.4 Indice de déchirure

Les résultats du tableau 4.4 indiquent que pour les 3 procédés papetiers les feuilles formées de boues montrent des indices de déchirure de loin inférieurs à ceux des feuilles formées à partir des pâtes témoins du même procédé. Cela s'explique par plusieurs facteurs dont les principaux sont les teneurs élevées en lignine et en cendres et les teneurs faibles en cellulose dans les boues. La longueur des fibres plus courtes est un autre facteur qui a une influence négative sur la plus part des propriétés des pâtes particulièrement l'indice de déchirure (Clark 1985).

L'indice de déchirure est une des propriétés les plus importantes des pâtes et papier. Elle est importante à la fois pour la formation du papier et pour sa résistance en service. La longueur des fibres et la résistance des liaisons sont les principaux facteurs qui influencent cette propriété. Il est bien connu que l'indice de déchirure augmente linéairement avec la longueur des fibres (Clark 1985, Koubaa 1996) et diminue avec l'augmentation de la teneur en fines.

L'augmentation de la proportion des BS dans les feuilles formées de boues diminue la longueur des fibres et augmente la proportion de fines (figures 4.1a et 4.1b). Les effets de ces variations sont montrés à la figure (4.7), en accord avec les résultats de la littérature (Clark 1985, Koubaa 1996, Koubaa et Koran 1995), l'indice de déchirure augmente avec l'augmentation de la longueur des fibres et diminue avec l'augmentation de la proportion de fines.

Quant à la résistance des liaisons, son influence sur l'indice de déchirure est caractérisée par une augmentation initiale pour atteindre un maximum, aux alentours d'une résistance des liaisons de 232 kPa pour les boues TMP, 124 kPa pour les boues CTMP et 166 kPa pour les boues Kraft, suivi par une diminution après ce maximum. La même tendance est observée pour les pâtes issues de bois feuillus et résineux (Koubaa 1996). Les résultats de la présente étude confirment la tendance de la diminution de l'indice de déchirure avec l'augmentation de la résistance des liaisons (Figure 4.8). En fait, l'amélioration de la résistance des liaisons due à l'augmentation de la surface liée s'est traduite par une diminution de l'indice de déchirure.

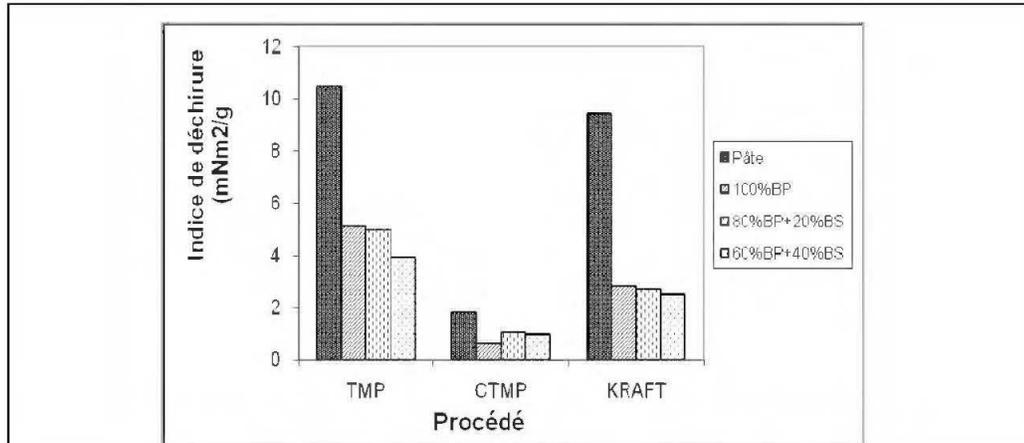


Figure 4.7 : Variation de l'indice de déchirure en fonction du proportion BP/BS et selon le type du procédés TMP CTMP et Kraft

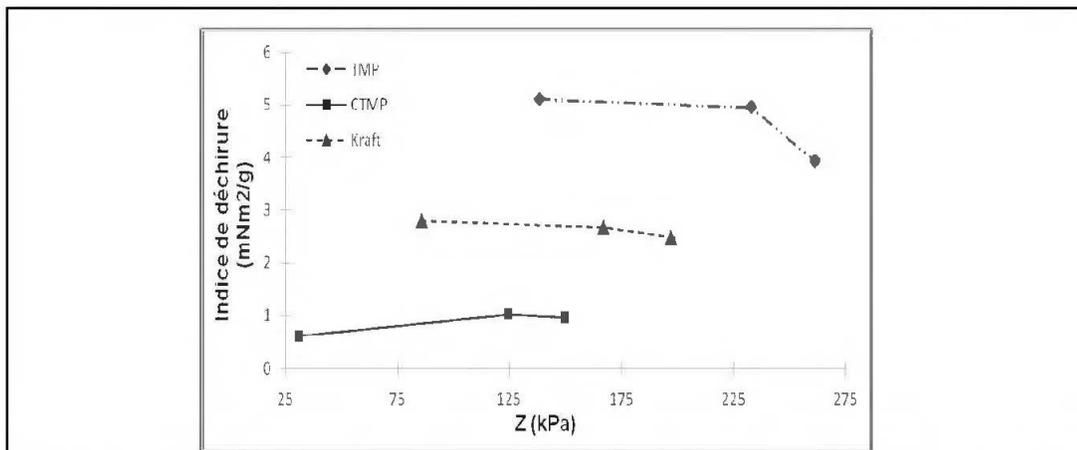


Figure 4.8 : Variation de l'indice de déchirure en fonction de la résistance des liaisons (Z) pour les trois types du procédés TMP CTMP et Kraft

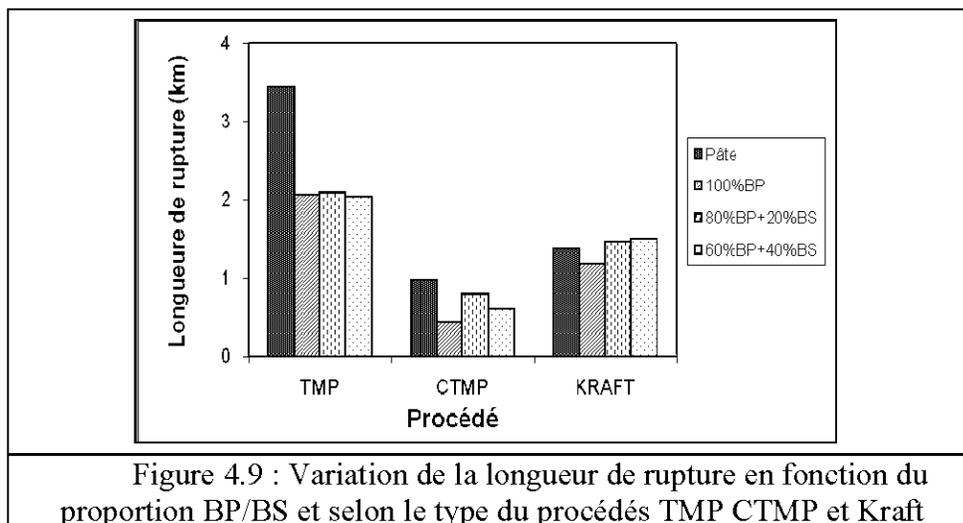
#### 4.4.5 Longueur de rupture

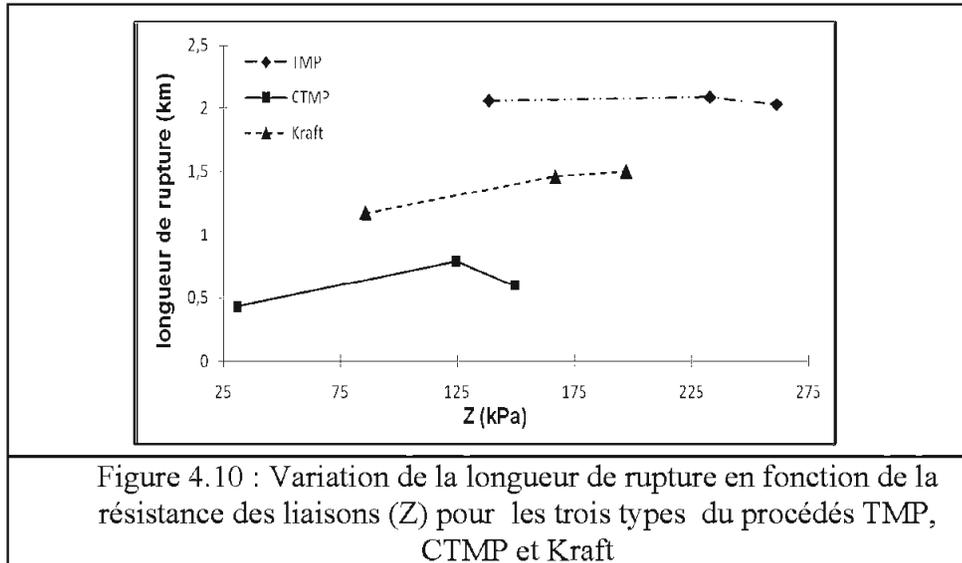
Les résultats du tableau 4.4 indiquent que pour les 3 procédés papetiers, les feuilles formées de boues montrent des longueurs de rupture inférieures à ceux des feuilles formées à partir des pâtes témoins du même procédé. De la même façon que pour l'indice de déchirure, ce résultat peut s'expliquer par les teneurs élevées en lignine et en cendres et les teneurs faibles en cellulose dans les boues. La longueur

des fibres plus courtes est un autre facteur qui a une influence négative sur la plus part des propriétés des pâtes dont la longueur de rupture (Clark 1985).

La longueur de rupture est aussi une propriété très importante des pâtes et papier à la fois pour la formation du papier et pour sa résistance en service. La longueur des fibres et la résistance des liaisons sont les principaux facteurs qui influencent cette propriété. Il est bien connu que la longueur de rupture augmente linéairement avec la longueur des fibres (Clark 1985, Koubaa 1996). Par contre, la longueur de rupture est maximale à une teneur en fines se situant entre 20 et 40% (Koubaa 1996). Au delà de cet étendu, la longueur de rupture diminue linéairement. L'augmentation de la proportion des BS dans les feuilles formées de boues diminue la longueur des fibres et augment la proportion de fines. Les effets de ces variations sur la longueur de rupture sont montrés à la figure 4.9 .

En général, l'augmentation de la résistance des liaisons est associée à une augmentation de la longueur de rupture pour les feuilles de boues issues des trois procédés papetiers (Figure 4.10).





#### 4.5 Effets de la température de pressage et de séchage simultanés sur la résistance des liaisons

La variation de la température de pressage et séchage simultanés a un effet significatif sur les mécanismes d'écoulement et d'adhésion des composantes de la fibre (Back 1967, Koubaa et Koran 1995, Koubaa 1996). À des températures inférieures à 100 °C, la température de transition vitreuse des différentes composantes de la fibre incluant les polysaccharides n'est pas atteinte. Par conséquent, aucun écoulement ne prend place. À des températures entre 100°C et 140°C, seule la température de transition vitreuse des hémicelluloses est atteinte et il est probable que cette composante se ramollie. À 180 °C, la température de transition vitreuse de la lignine est excédée et cette composante s'écoule (Koubaa 1996; Koubaa et al. 1996). À partir de ces résultats, il est possible qu'il y ait des changements à la surface des fibres à des températures entre 100 et 140 °C et à 180 °C.

L'évolution de la résistance des liaisons en fonction de la température de pressage et séchage simultanés et la teneur en BS est présentée à la figure 4.11 pour les procédés TMP, CTMP et kraft. Pour les boues issues des trois procédés,

l'augmentation de la proportion de BS a augmenté la RTDZ pour toutes les températures de séchage. Ce résultat pourra s'expliquer partiellement par l'augmentation de la surface liée due à la plus forte teneur en fines dans les BS tel qu'il a été discuté dans les sections précédentes.

Pour les boues issues des 3 procédés, l'augmentation de la température de 23 à 140 °C a légèrement amélioré la résistance des liaisons. Par contre, l'amélioration à 180 °C est très importante pour les boues issues des 3 procédés. L'amélioration est particulièrement remarquable dans les échantillons avec la plus forte teneur en BS. Cette amélioration peut s'expliquer par divers facteurs dont la surface liée plus importante à des températures de séchage plus élevées et par conséquent, une fréquence de liaisons hydrogène plus élevée.

La variation de la résistance spécifique des liaisons en fonction de la température de pressage et séchage simultanés et la teneur en boues secondaire est présentée à la figure 4.12 pour les boues issues des procédés (TMP, CTMP et kraft). La variation de la résistance spécifique des liaisons est similaire à celle de la résistance des liaisons. Par conséquent, l'amélioration de la résistance des liaisons n'est pas due seulement à l'augmentation de la fréquence des liens hydrogène. Il est probable que d'autres liens telle que les liens à faible intensité (liaison de Van der Waals) ou mécaniques peuvent être formés en présence de chaleur et de composés chimiques comme l'azote et l'abondance de la lignine. Cette question dépasse la portée de ce travail.

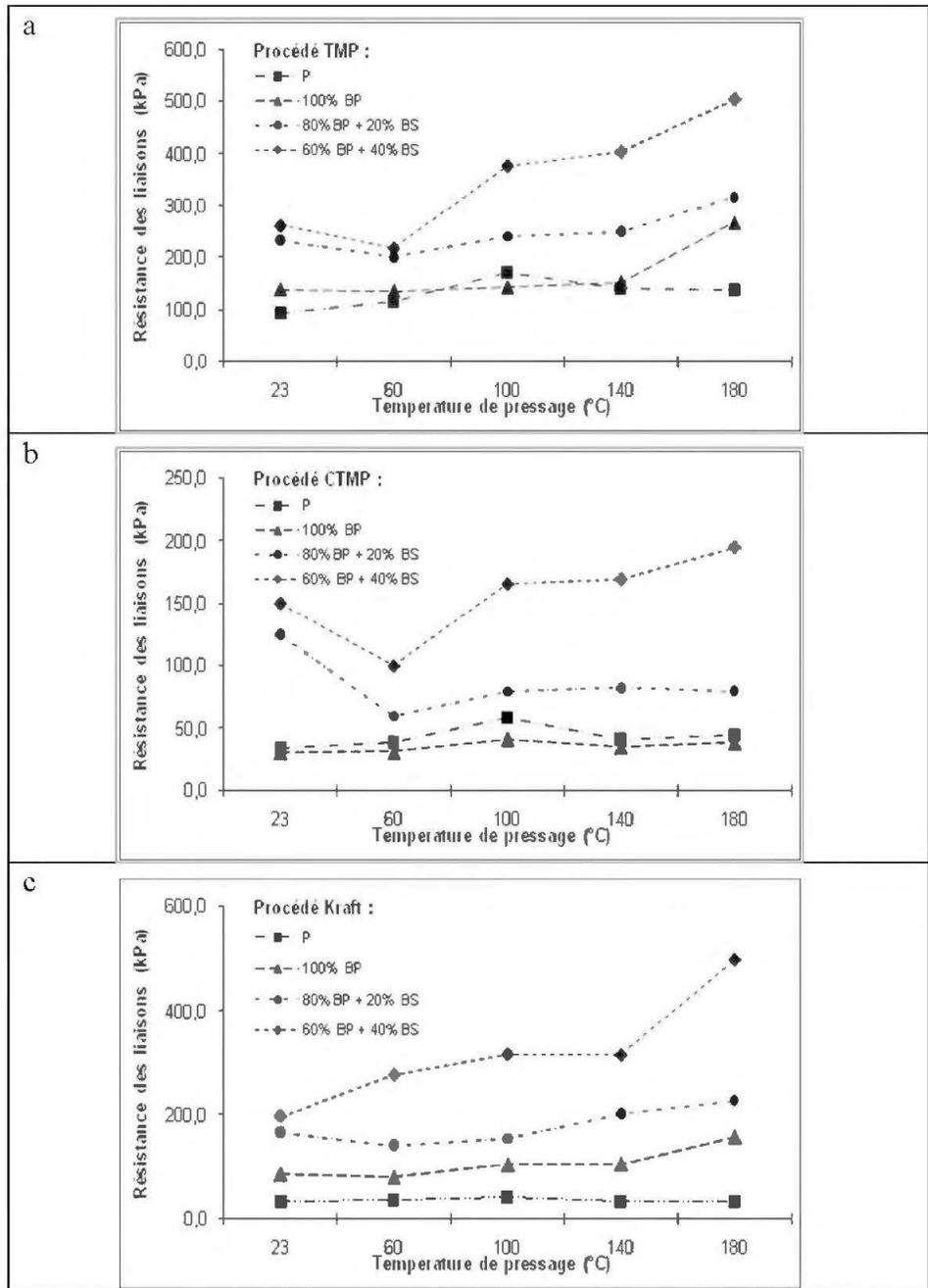
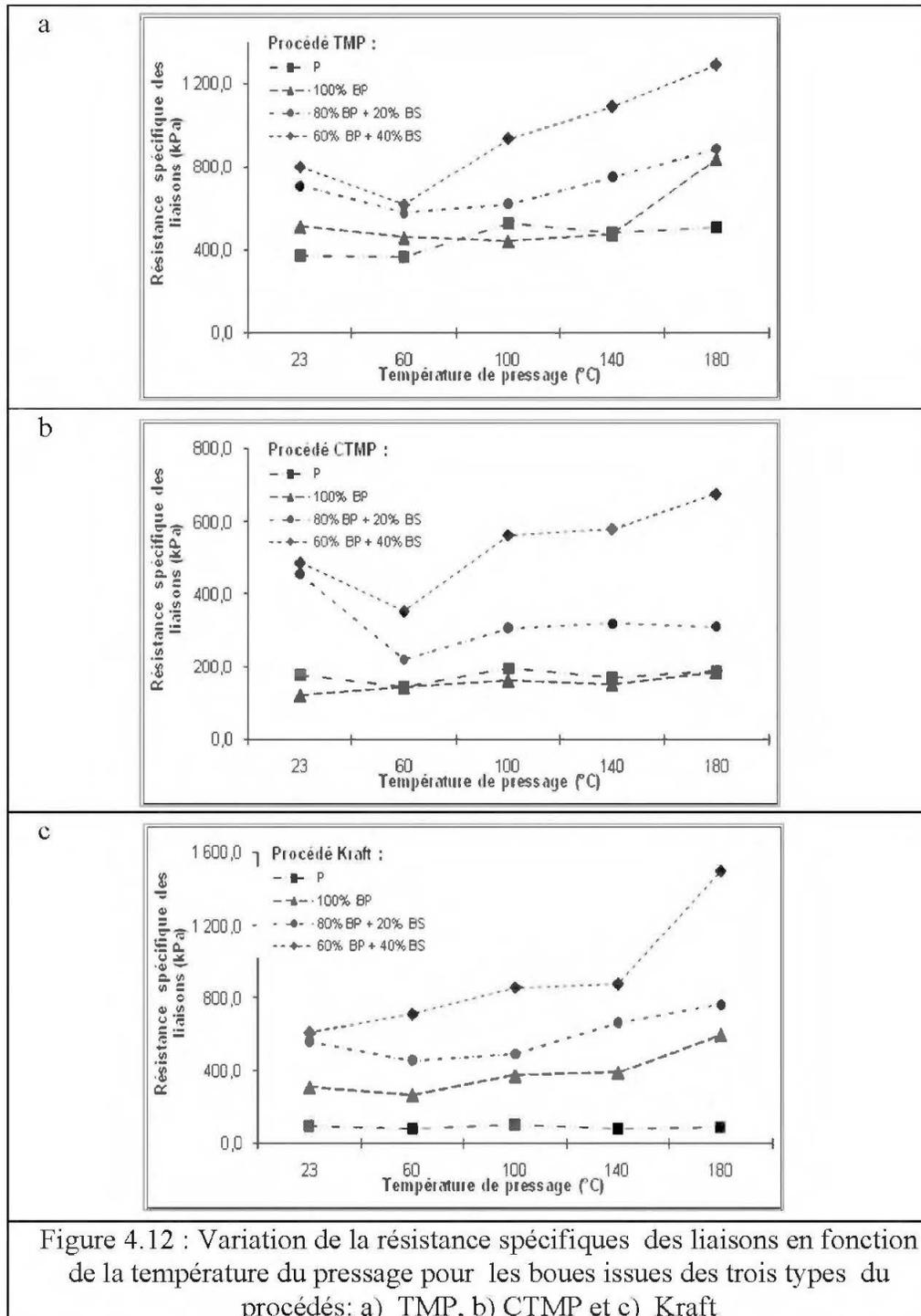


Figure 4.11 : Variation de la résistance des liaisons en fonction de la température du pressage pour les boues a) TMP, b) CTMP et c) Kraft



## **4.6 Analyse économique de différentes options de valorisation des boues.**

Les détails de l'analyse économique comparative des options étudiées pour la valorisation des boues papetières sont présentés à l'Annexe III. Pour comparer les 4 options étudiées, nous avons utilisé la valeur actuelle nette (VAN). L'option la plus rentable c'est l'option qui a la plus grande VAN. Dans cette analyse, nous avons étudié 3 périodes d'amortissement 10, 20 et 25 ans, un taux d'imposition de 34% et un taux d'intérêt de 6%. Le Tableau 4.4 présente un récapitulatif des résultats obtenus.

Tableau 4.4 : Récapitulatif des valeurs actuelles nettes (VAN) des 4 options étudiées sur des périodes d'amortissement (PA) de 10, 20 et 25 ans.

<b>Options</b>	<b>P.A = 10 ans</b>	<b>P.A = 20 ans</b>	<b>P.A = 25 ans</b>
Valorisation agricole	141 925 \$	221 175 \$	246 502 \$
Génération énergétique	- 901 349 \$	- 547 496 \$	- 489 543 \$
Granules énergétiques	3 191 038 \$	5 315 733 \$	5 991 470 \$
Panneaux de fibres	649 710 \$	1 269 632 \$	1 465 289 \$

Un projet rentable est un projet qui a une VAN supérieure à 0. Ainsi, des 4 projets étudiés, seul le projet de génération énergétique pour l'unité de séchage du papier n'est pas rentable. Les trois autres projets sont rentables tenant en compte les hypothèses formulées et les coûts utilisés lors de l'analyse.

Plus la VAN d'un projet est grande plus le projet est plus rentable. Donc l'utilisation des boues dans la fabrication des granules énergétiques et la fabrication de panneaux de fibres sont des alternatives rentables pour l'usine. L'utilisation des granules énergétiques est l'alternative de valorisation la plus rentable. Cependant, dans cette analyse, nous n'avons pas tenu en compte des coûts de gestion des cendres, particulièrement dans un contexte industriel. En fait, la teneur en cendres dans les boues papetières est très élevée (Tableau 4.1). Les cendres doivent être récupérés et

disposés qui représente un coût non négligeable. La valorisation des boues comme matière première pour la production de panneaux arrive en deuxième position avec une VAN de l'ordre de 1,5 millions de dollars après une PA de 25 ans.

## **4.7 Implications pratiques des résultats**

### **4.7.1 Besoins en adhésifs**

L'effet de la résistance spécifique des liaisons à n'importe quelle teneur en BS est amélioré avec l'augmentation de la température. Cette amélioration est particulièrement remarquable à 180 °C et à 40% de BS. Cette température est utilisée pour la fabrication de panneaux à base de fibres de bois dont les panneaux de fibres à moyenne densité (MDF) et les panneaux de particules. Par conséquent, l'utilisation de boues comme matière première pour ces panneaux aurait un effet positif non négligeable sur la cohésion interne. Les travaux de Migneault et al. (2010) et de Geng et al (2006) supportent cette affirmation. Ces deux études confirment qu'il est possible de fabriquer des panneaux MDF sans aucun adhésif et que les panneaux rencontrent la plupart des normes ANSI en vigueur. Considérant que l'adhésif représente 40% du coût de fabrication des panneaux à base de fibres de bois (FAO 1993), l'utilisation des boues pourra réduire considérablement la teneur en adhésif et se traduire par une réduction substantielle du coût de fabrication et une amélioration des profits.

### **4.7.2 Pouvoir adhésif des BS**

La résistance des liaisons des boues papetières augmente considérablement avec la teneur en BS. Ce résultat indique que les BS ont un certain pouvoir adhésif et contribue à l'adhésion entre fibres cellulosique. Le mécanisme qui explique le pouvoir adhésif des BS ne figure pas dans l'objectif de cette étude. Par contre, l'examen des analyses chimiques des BS indique une teneur élevée en lignine qui pourrait agir comme adhésif. Les BS sont aussi riches en protéines. Ces derniers sont

utilisés pour la fabrication de bio-adhésifs. La compréhension du mécanisme avec lequel les BS agissent comme adhésif représente un déficit scientifique de taille.

#### **4.7.3 Potentiel des boues primaires pour la fabrication de panneaux**

Les analyses de la morphologie des fibres et des caractéristiques chimiques des boues primaires indiquent que la longueur des fibres des BP est légèrement inférieure à celle des pâtes avec une teneur plus élevée en fines. La longueur plus faible de fibres pourrait présenter un inconvénient pour les propriétés de résistance en flexion et en traction. Par contre, la teneur plus élevée en fines représente un avantage pour l'adhésion dans les panneaux compte tenu de l'augmentation de la surface de contact entre les fibres et l'augmentation de la probabilité de formation de liens hydrogène tel que discuté dans les sections précédentes.

La teneur élevée en cendres des boues primaires pourrait représenter des problèmes de formation et lors de l'usinage des panneaux finis. Pour limiter les inconvénients qu'occasionnent les cendres dans la fabrication de panneaux à base de fibre de bois, il serait prudent de limiter la teneur en boues dans la matière première. À titre d'exemple, Migneault et al. (2010) suggèrent de limiter la teneur en boues à 25% pour la fabrication de panneaux MDF.

#### **4.7.4 Rentabilité de l'utilisation des boues pour les panneaux de fibres**

Les résultats de l'analyse économique démontrent que la valorisation des boues pour la production est une alternative rentable. Contrairement à l'option de valorisation pour granules énergétiques, la valorisation des boues pour la fabrication de panneaux présente un avantage substantiel étant donné qu'il n'a pas de problème de disposition de résidus.

Par ailleurs, les résultats de l'étude montrent un apport important des boues secondaires pour l'adhésion. Ainsi, une alternative de valorisation des boues secondaires comme adhésif peut être très lucrative compte tenu que les adhésifs sont très chers et ils représentent la composante la plus chère dans la fabrication de panneaux.

## CHAPITRE V

### CONCLUSIONS

Dans une perspective d'évaluation du potentiel d'utilisation des boues dans la fabrication des panneaux de fibres, l'objectif de ce mémoire était de caractériser les propriétés morphologiques, chimiques et le pouvoir adhésifs des fibres de boues primaires et secondaires issues de trois procédés papetiers, soient le procédé thermomécanique (TMP), chimico- thermomécanique (CTMP) et kraft. Les résultats de ces travaux ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ les caractéristiques morphologiques et chimiques de la fibre des boues dépendent essentiellement de leurs origines (procédés : TMP, CTMP et Kraft) et de la nature du traitement (primaire ou secondaire). Les fibres des boues primaires issues d'un traitement physico-chimique sont plus longues et contiennent plus de polysaccharides que celles issues du traitement biologique (boues secondaire). Par contre, les boues secondaires ont des teneurs en fines fibres et en lignine plus grandes que celles des boues primaires.
- ✓ Le pouvoir adhésif des fibres des boues a été évalué à partir de la résistance des liaisons fibre-fibre. Les essais physico-mécaniques ont montré que les feuilles formées à partir de 60% BP/40%BS possèdent le coefficient de dispersion de la lumière (DL) le plus bas et la résistance à la rupture en direction Z la plus élevée par rapport au feuilles formées à partir 100% BP et 80% BP/20%BS. Ces résultats sont cohérents et suggèrent que les feuilles formées à partir de 60% BP/40%BS possèdent la résistance de liaisons fibre-à-fibre la plus élevée.

- ✓ La variation de la température de séchage a montré que cette dernière, a un effet bénéfique sur l'amélioration de la résistance des liaisons fibre-à-fibre. En passant d'une température de séchage de 23°C à 180°C, la résistance de liaisons fibre-à-fibre est devenue presque deux fois plus grande. Ceci est nettement remarquable, pour les feuilles formées à partir de 60% BP/40%BS des boues issues du procédé TMP. Ces résultats montrent l'effet bénéfique de l'ajout des boues secondaires sur l'adhésion dans une structure fibreuse.
- ✓ Les améliorations importantes de la résistance des liaisons et de la résistance spécifique des liaisons des feuilles contenant des boues secondaires à une température de séchage de 180 °C suggèrent que l'incorporation des boues secondaires dans la fabrication des panneaux de fibres pourrait être bénéfique par une meilleure adhésion entre fibres et par conséquent pourrait se traduire par une réduction des besoins en adhésifs.

L'analyse économique comparative entre quatre options de valorisation des boues papetières, à savoir, la valorisation agricole, la génération énergétique, la fabrication des granules énergétiques et la fabrication des panneaux de fibres, a révélé que l'utilisation des boues papetières dans la fabrication des granules énergétiques et la production de panneaux à base de fibres, sont les voies de valorisations les plus rentables.

## RÉFÉRENCES

- Ahmadi, B. et Al-khaja, W. (2001). Utilisation of paper waste sludge in the building construction industry. *Ressources conservation and recycling*. Vol. 32. pp. 105-113.
- Amrouz, A. (1996). Transformation des boues de papeteries en pouzzolanes artificielles . Thèse. Lyon : INSA de Lyon.
- Aiken, W.H. (1943). Effect of Acetylation on Water-Binding Properties of Cellulose. *Industrial and Engineering Chemistry*, 35, No. 11, 1206-1210 (Nov).
- Atiken, M.N., Evans, B. and Lewis, J.G. (1998). Effect of applying paper mill sludge to arable land on soil fertility and crop yields. *Soil Use and Management* 14: 215-222.
- B.A.C.E. (2005). Bilan annuel de conformité environnementale, secteur des pâtes et papiers. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. Québec, Canada.
- Back, E.L. (1967). Thermal Auto-Crosslinking in Cellulose Material. *Pulp and Paper Mag.Can.* 68 : T165-T171.
- Bassompierre, C. ( 2007). Procédé à boues activées pour le traitement d'effluents papetiers : de la conception d'un pilote à la validation de modèles . Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France.
- Battaglia, A., Calace, N., Nardi, E. et al. (2003). Paper mill sludge-soil mixture kinetic and thermodynamic tests of cadmium and lead sorption capability. *Microchemical Journal*, 2003, Vol. 75, N° 2, pp.97-102.

- Beauchamp, C.J., Charest, M.H. et Gosselin, A. (2002). Examination of environmental quality of raw and composting de-inking paper sludge. *Chemosphere*, Vol. 46, N° 6, pp.887-895.
- Bellamy, K.L., Chong, C. et R.A. Cline R.A. (1995). Paper sludge utilization in agriculture and container nursery culture. *Journal of Environmental Quality* 24:1074-1082.
- Boisselle, F. (1999). Évaluation des performances de l'incinération de boues de désencrage dans un lit fluidisé circulant interne . Thèse de doctorat de l'école polytechnique de Montréal.
- Brouillette, F. (1996). Valorisation des boues de désencrage par combustion. Mémoire de maîtrise en sciences de l'environnement de l'Université de Trois-Rivières.
- Caroll, R.C., et Gajda, T. P. (1990). Mills considering New deinking Line Must Answer Environmental Question. *Pulp Paper* 64 (9) : 201-205 (1990).
- Casey, J.P. (1980). *Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology*. 3ème édition, Vol II, John Wiley& Sons.
- Cetin, S. & A. Erdinçler (2004). The role of carbohydrate and protein parts of extra cellular polymeric substances on the dewaterability of biological sludges. *Water Science and Technology* 50: 49-56
- Clark, J. d'A. (1985). *Pulp Technology and Treatment of Paper*. Miller Freeman Publication Inc.
- Colburn, R. et Dolan, G. (1995). Beneficial use of paper mill sludge . *Biocycle* (ISSN:0276-5055), vol. 36, september, p. 69-71.
- Crawford, J. H. 1983. Composting of agricultural wastes: a review. *Process Biochem.* Jan.-Feb, pp. 14-18.

- Curnoe, W.E. 1998. Agronomic Benefits of Pulp and Paper Biosolids. Kemptville College, University of Guelph, Personal communication.
- Degarmo, E.P., Sullivan, W.G. et Bontadelli, J. A. (1989). *Engineering Economy*. Eighth Edition, Macmillan publishing company.
- Diehn, K., et Zuercher, B.A. (1990). Waste mangement program for paper mill sludge high in ash, *Tappi* 73(4):81-86.
- El Hadji B. LY. (2008). Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.
- El Ouazzani, D.C. (2005). Caractérisation physico-chimique et valorisation en bâtiment et travaux publics des cendres issues de l'incinération des boues de papeterie. Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Lyon.
- Fan, Z., et Lee, R. (2007). Conversion of paper sludge to ethanol. I: Impact of feeding frequency and mixing energy characterization. *LyndBioprocess Biosyst Eng.* 30:27–3.
- FAO 1993. Les panneaux à base de bois. Étude FAO Forêts 116. FAO, Rome, 50 pages.
- Garceau, J., R., Chen, C., Danneault , K., Goel, K., Kokta, B.V., Koran, Z. , Lavallée, H.C., Law, K.N., Lebel, R.G., Lemay, Y. et Rémillard, B. (1989). Pâtes mécaniques et chimico-mécaniques. Section technique de l'PAPTAC .
- Gea, T., Artola, A. et Sanchez, A. (2005) Composting of de-inking sludge from the recycled paper manufacturing industry. *Bioresource Technology*, Vol. 96, N° 10, pp. 1161-1167.

- Geng, X., Deng, J., et Zhang, S.Y. (2006). Effects of Hot-Pressing Parameters and Wax Content on the Properties of Fiberboard Made from Paper Mill Sludge. *Wood Fiber Sci.* 38:736-741.
- Geng, X., Deng, J., Zhang, S.Y., (2007a). Characteristics of paper mill sludge and its utilization for the manufacture of medium density fiberboard. *Wood Fiber Sci.* 39(2), 345-351.
- Geng, X., Deng, J., Zhang, S.Y., (2007b). Paper mill sludge as a component of wood adhesive formulation. *Holzforschung* 61(6), 688-692.
- Genthe, D.R., Cutbirth, J., et Weber, R. (1993). Strength evaluation of low solids content pulp and paper mill sludge by factorial design. In *Proceedings of the Tappi Environmentd Conference*, Boston, MA: March 28-31. Atlanta, GA: Tappi Press, 77-84.
- Goss, M.J. et Rashid, M.T. (2004). Best Management Practices, Barriers and Opportunities to the Use of Paper Mill Biosolids on Field Crops. *Annual Reports, 2002, 2003 and 2004*. Department of Land Resource Science, University of Guelph.
- Gullichsen, J. et Paulapuro, H. (1998). *Papermaking Science and Technology :Paper Physics*. Vol. 16, 1ère ed., Helsinki, Finlande.
- Haag, A. P. ; Geesey, G. ; Mittleman, G., Ma. W. (2006). Bacterially derived wood adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 26(3): 177-183
- Haag, A. P.; Maier, R. M.; Combie, J.; Geesey, G. (2004). Bacterially derived biopolymers as wood adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 24 (6): 495-502
- Hon, D. N. S. et Nobuo S. (1991). *Wood and Cellulosic Chemistry*. Marcel Decker.

- Jackson, M.J. et Line M.A. (1997). Organic composition of a pulp and paper mill sludge determined by FTIR 13C CP MAS NMR, and chemical extraction techniques. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 45: 2354- 2358.
- Jappe, N.A. (1958). Hypochlorite as the third stage in bleaching aspen neutral sulphite semichemical pulp. *Tappi*, 41, No.5, 224-231.
- Jayme, G. (1942). Wege zur Erzeugung von Papierzellstoffen maximaler Festigk. *Papier-Fabr.*, 40, No.36, 137-152.
- Jayme, G. and Weststein, R. (1938). Studie über die Chlorierung von Asplundnadelholzfasern. *Papier-Fabr.*, 36, No. 49, 519-531.
- Jesùs A.G. (2008). Feasibility of recycling pulp and paper mill sludge in the paper and board industries. *Resources, Conservation and Recycling* 52, 965–972.
- Kang, T. et Paulapuro, H. (2006). Characterization of chemical pulp fines. *Tappi* 5(2) :25-28.
- Kellison, R.C., Deal, E.L., Pearson, R.G. et Hitchings, R.G. (1984). Utilization of the changing wood resource in the Southern US. NC State Univ, Raleigh, NC.
- Koubaa, A. (1996). Amélioration de la résistance des liaisons dans le papier et le carton par raffinage et par pressage et séchage simultanés . Thèse de doctorat de l'Université de Québec à Trois-Rivières.
- Koubaa, A., Riedl B. et Koran, Z. (1996). Surface analysis of press dried-CTMP paper samples by electron spectroscopy for chemical analysis. *J. Applied Polymer Science*, Vol. 61: 545-552.
- Koubaa, A., et Koran, Z. (1995). Measure of the internal bond strength of paper/ board. *Tappi*, 78 (3): 103-111.
- Krigstin, S. G. 2008. Characterization of recycled paper mill sludge and evaluation of potential applications. Thèse de doctorat de l'Université de Toronto.

- Lamure, A. (2007). Adhésion et adhérence des matériaux. Site internet : [http://www.inp-toulouse.fr/tice/pdf/01Extrait\\_Adhesion\\_et\\_Adherence.pdf](http://www.inp-toulouse.fr/tice/pdf/01Extrait_Adhesion_et_Adherence.pdf).
- Lapointe, R. E. (1995). Précis de chimie de la cellulose. Cégep de Trois-Rivières. Décembre.
- Leclere, J., Liard, A., Villeneuve, F., et Desilets, I. (1999). Beneficial use of pulp and paper residues for soil amendment in the province of Quebec. Pulp and Paper Canada 100 : (7) 68-70.
- Mahmood, T., et Champoux, M. (2009). Les boues d'effluents deviennent source d'énergie verte. La Maîtrise de l'énergie – Mars 2009.
- Makansi, J. (1984). Power from sludg. Power (New-York. NY), vol. 128, february, p. s.1-s.16.
- Maloney, T. M. (1986). In Proc: Juvenile wood: what does it mean to forest management and forest products? FPS, Madison, WI. Pp.72-74.
- Maloney, T. M. (1993). Modern Particleboard and Dry-Process Fiberboard Manufacturing. Miller Freeman, Inc., San Francisco.
- Mckenzie, A. W. (1985). Interpretation of pulp evaluation results. Appita 38 (4): 284-290.
- Migneault, S., Koubaa, A., Erchiqui, F., Chaala, A., Englund, K. et Wolcott, M.P. (2009). Effect of Processing Method and Fiber Size on the Structure and Properties of Wood-Plastic Composites. Composites. Part A. 40 : 80–85.
- Migneault, S., Koubaa, A., Erchiqui, F., Chaala, A., Englund, K., Krause, C. et Wolcott, M.P. (2008). Effect of Fiber Length on Processing and Properties of Extruded Wood-Fiber/HDPE Composites. J. Appl. Polymer Sci. 110:1085–1092.

- Migneault, S., Koubaa, A., Nadji, H., Riedl, B., Zhang, S.Y. et Deng, J. (2010). Medium-density fiberboard produced using pulp and paper sludge from different pulping processes. *Wood Fiber Sci* 42(3):12p.
- Miner, R. et al. (1991). Environmental considerations and information needs associated with an increased reliance on recycled fiber. In focus 95 proceedings, TAPPI PRESS, Atlanta, p. 343-362.
- Montplaisir, D. (2004). Modification chimique de la pâte thermomécanique de résineux. Thèse de doctorat de l'Université de Trois-Rivières.
- Morin, N. (2007). Guide d'évaluation et d'adaptation de l'utilisation des biosolides papetiers. Centre d'expérimentation et de développement en forêt boréale. Site internet : [http://www.cedfob.qc.ca/documents/Guide\\_Ericacees.pdf](http://www.cedfob.qc.ca/documents/Guide_Ericacees.pdf).
- Mustin, M. (1987). Le composte, Gestion de la matière organique. François Dubusc (ed.), Paris, pp. 954.
- Ngueho Yemele, M.C., Cloutier, A., Diouf, P.N., Koubaa, A., Blanchet, P. et Stevanovic, T. (2008a). Physical and mechanical properties of particleboard made from extracted black spruce and trembling aspen bark. *Forest Prod. J.* 58(10):38-46.
- Ngueho Yemele, M.C., Koubaa, A., Diouf, P. N., Blanchet, P., Cloutier, A. Stevanovic, T. (2008b). Effects of hot water treatment of black spruce and trembling aspen bark raw material on the physical and mechanical properties of bark particleboard. *Wood Fiber Sci.* 40: 325-334.
- Ngueho Yemele, M.C., Blanchet, P., Cloutier, A., Koubaa, A. (2008c). Effects of bark content and particle geometry on the physical and mechanical properties of particleboard made from black spruce and trembling aspen bark. *For. Prod. J.* 58(11):48-56

- Niskanen, K. (1998). Fiber and bond. In: Paper Physics.ed. Fapet Oy, Helsinki, Finland
- Nissan, A. H. et Higgins H.G. (1959). A Molecular Approach to the Problem of Viscoelasticity. Nature 184 :1477.
- Nordman L. (1961). Bonding in Paper Sheets, Fundamentals of Paper Making Fibres. Section of the british Paper Board Maker's Association (Inc.)pp.333-347.
- Nougier P. et Lecourt, M. (2005). L'analyse morphologique des fibres. Afocel, Informations-Forêt, N°1, Fiche n° 704.
- Pandey, K.K. (1999). A Study of Chemical Structure of Soft and Hardwood and Wood Polymers by FTIR Spectroscopy. J. Appl. Polymer Sci. 71 :1969–1975.
- Panshin, A. J. et de-Zeeuw C. (1980). Text Book of Wood Technology. New York, McGraw-Hill Inc. 722 P.
- PAPTAC C.4 (2003). Préparation des formettes de pâte destinées aux essais physiques. Association technique des pâtes et papiers du Canada.
- PAPTAC D.6H (1984). Détermination de la résistance à la rupture par traction des papiers et cartons (à l'aide d'un appareil à accroissement de force constant). Association technique des pâtes et papiers du Canada.
- PAPTAC D.9 (1993). Détermination de la résistance au déchirement du papier, du carton et des formettes. Association technique des pâtes et papiers du Canada.
- PAPTAC D.12 (1991). Essais physiques des formettes de pâte. Association technique des pâtes et papiers du Canada.
- PAPTAC D.37P (1996). Résistance à la rupture en direction z : Papier et carton. Association technique des pâtes et papiers du Canada.

- PAPTAC E.2 (1993). Détermination de l'opacité du papier. Association technique des pâtes et papiers du Canada. Association technique des pâtes et papiers du Canada.
- PAPTAC G.10 (1993). Détermination de la teneur en cendres de la pâte ou du bois. Association technique des pâtes et papiers du Canada.
- Philips, V.R., Kirkpatrick, N., Scotford, I.M. et al. (1997). The use of paper-mill sludges on agricultural land . *Bioresource Technology* 60: 73-80
- Pickelle, J., et Wunderlich, R. (1995). Sludge disposal: Current practices and future options. *Pulp and paper Canada* 96 : (9) 41-47.
- Priesnitz, W. (1999). Sludge on your supper table. *Natural Life* 69.
- Raitio, L. (1992). The properties of deinking sludge. *Papen Ja Puu* 74(2): 132-1 38.
- Rashid, M.T., Barry, D. and Goss, M. (2006). Paper mill biosolids application to agricultural lands: benefits and environmental concerns with special reference to situation in Canada. *Soil & Environ.* 25(2): 85-98.
- Ratliff, F. T. (1949). The possible correlation between hemicelluloses and the physical properties of bleached kraft pulps. *Tappi* 32(8): 357-367.
- Robertson, J.E., Robertson, R.R.P. (1977) Review of filler and extender quality evaluation. *Forest Prod. J.* 27:30–38.
- Rock, C.A. (1991). Papermill sludges: disposal options and environmental impacts: overview: 20 percent of mill wastes. Waste management seminar. Univ. Main, Orono, ME. pp. 1-3.
- Scott, G.M. et Smith A. (1995). Sludge Characteristics and disposal alternatives for the pulp and paper industry. Proc of the 1995 International environmental conference, Tappi press : 269-279.

- Shi, J.L., Zhang SY, Riedl, B. (2005a). Effect of juvenile wood on strength properties and dimensional stability of black spruce medium-density fiberboard panels. *Holzforschung*, 59(1):1-9.
- Shi, J.L., Zhang SY, Riedl, B. (2005b). Flexural properties, internal bond strength, and dimensional stability of medium density fiberboard panels made from hybrid poplar clones. *Wood and Fiber Science*, 37(4):629-637.
- Simard, R.R., Baziramakenga, R., Yelle, R. et Coulombe, J. (1998). Effects of de-inking paper sludges on soil properties and crop yields. *Can J Soil Sci.* 78: 689-697.
- Simons, H. A. (1994). Méthodes de gestion des boues générées par les fabriques des pâtes et papiers. Rapport Synthèse.
- Smook, G.A., (1989). Manuel du Technicien et de la Technicienne en Pâtes et Papiers. Cégep de Trois-Rivières.
- Srinivasan, D. et Unwin, J. P. (1995). Pulp and paper effluent management. *Water Environment Research*, Vol. 67, No 4, June , p. 531-544.
- Strenberg, E.L. (1978). Effect of Heat Treatment on the Internal Bonding of Kraft Line. *Svensk Papperstidning* 81(2):49-54(1978).
- Sutherland, I.W. (1977) Surface carbohydrates of the prokaryotic cell. , Academic Press, New York.
- TAPPI T 203 om-83 (1983). Alpha-, beta- and gamma-cellulose in pulp and wood. TAPPI Test Methods, Atlanta.
- TAPPI T 207 om-88 (1988). Water solubility of wood and pulp. TAPPI Test Methods, Atlanta
- TAPPI T 222 om-88 (1988) , Acid-Insoluble Lignin in Wood and PuIp. TAPPI Test Methods, Atlanta.

- TAPPI T 249 cm-85 (1997). Carbohydrate Composition of Extractive-free Wood and Wood Pulp by Gas-Liquid Chromatography. TAPPI Test Methods, Atlanta
- TAPPI Um 250 (1991). Acid-soluble lignin in wood and pulp. TAPPI Test Methods, Atlanta.
- Thiebaud, S. (1995). Valorisation Chimique de Composés Lignocellulosiques Obtention de Nouveaux Matériaux. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Vance, E.D. (2000). Utilizing paper mill bi-products as forest soil amendments: forest responses, recommendations and industry case studies. NCASI Technical Bulletin No. 798 NCASI.
- Vincent, R. (2006). Modélisation et simulation en trois dimensions d'un réseau fibreux en vue de prédire ses propriétés physique. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Warren E. M. (2001). Study of woody fibre in papermill sludge. Thèse de doctorat de l'université de Toronto.
- Weigand, P. S et Unwin, J. P. (1994). Alternative management of pulp and paper industry solid wastes. *Tappi* 77(4):91-97.
- Xing, C., Deng, J., Zhang, S.Y., Riedl B., et Cloutier, A. (2006). Properties of MDF from black spruce tops as affected by thermomechanical refining conditions. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 64(6):507-512.
- Yang, L. et Liu S. (2005). Kinetic model for Kraft pulping process. *Industrial & engineering chemistry research*, 44(18):7078-7085
- Zhang, S.Y., Koubaa, A. 2009. Zhang, S. Y. Les résineux de l'Est du Canada: écologie forestière, caractéristiques, transformation et usages. SP-526F, FPInnovations. ISBN 978-0-86488-538-8.

Zibilske, L.M. 1987. Dynamics of nitrogen and carbon in soil during papermill sludge decomposition. *Soil Science* 143: 26-33.

## **ANNEXE I:**

**The Use of Paper Mill Biotreatment Residue as Furnish or as a Bonding agent in the Manufacture of Fibre-Based Boards**

# THE USE OF PAPER MILL BIOTREATMENT RESIDUE AS FURNISH OR AS A BONDING AGENT IN THE MANUFACTURE OF FIBRE-BASED BOARDS

A. Zerhouni<sup>1</sup>, T. Mahmood<sup>2</sup> and A. Koubaa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn Noranda, QC

<sup>2</sup>FPIinnovations – Paprican, Pointe-Claire, QC

## ABSTRACT

Using paper mill effluent treatment residues for manufacturing fibre-based boards, such as medium density fibreboard (MDF) or particle board, as furnish or as a bonding agent is among the potential re-use alternatives. However, thorough characterization of this material, from different mills and processes, is a major requirement to develop this alternative. Key characteristics for this application include fibre morphology, chemical properties, and mechanical properties, including fibre strength and bonding ability. Thus, we initiated a series of investigations to assess these properties of primary sludge (PS) and secondary sludge (SS) from three commercial pulping processes (TMP, CTMP and Kraft). Fibre properties (length, width, proportion of fines, etc.) and chemical properties (carbohydrates, lignin and ash) of sludge were measured. Standard handsheets were made with PS and SS mixed in three proportions (PS/SS: 100/0, 80/20 and 60/40) and dried at different temperatures (23°C, 60°C, 100°C, 140°C and 180°C). All handsheets were tested for physical and mechanical properties. Results showed that morphological properties varied mainly with the pulping process and the sludge type. Fibres in PS were found to be longer with lower fines content than those in the SS. Chemical properties also varied with the pulping process and sludge type. Secondary sludge from the three processes contained higher total lignin content while the primary sludge contained higher carbohydrates content. Regarding mechanical properties of handsheets, the TMP sludge fibres showed the highest specific bond strength compared to sludge from the two other processes. The specific bond strength increased with SS content and drying temperature. This increase is especially important at 180°C. This result has practical implications for the fibreboard industry as incorporating certain amounts of SS in the fibre furnish might improve the internal bond strength of the board and consequently its overall mechanical properties. Thus, there seems to be a great potential that a portion of the petroleum-derived binders could be replaced with sludge while manufacturing fibre-based boards.

## INTRODUCTION

Primary and secondary sludges are the main residues generated from pulp and paper mills. These residues result from effluent treatment. Primary sludge (PS) is mainly composed of waste fibres, fines, and fillers [1]. The

secondary sludge (SS) is biological in nature containing dispersed or flocculated microorganisms, predominantly bacterial cells, and other organic and inorganic materials [2].

Paper mill sludge is generally incinerated or landfilled. Incineration could require substantial supplemental fuel depending upon sludge feed rate, its characteristics, and the combustion temperature [3]. Landfilling is a very costly operation and results in the emission of greenhouse gases such as CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> [4]. For these reasons the number of landfills has been declining in recent years [5].

Sludge has been used as soil amendment and soil fertiliser [6,7]. However, low nitrogen and phosphorus content of PS [8], contaminants contained in sludge [9], often high transportation costs [10], and future liability concerns are limiting factors for this application.

Several studies investigated additional alternatives for beneficial use applications of sludge including concrete [11] and cement [12] manufacturing. However, such investigations did not demonstrate promising results. Geng et al. [13] evaluated the potential of sludge for medium density fiberboard (MDF) manufacturing. They showed that sludge is a low cost fibre-rich material that adheres easily to wood fibres reducing adhesive requirements in the manufacturing process.

The objective of this study was to evaluate morphological, chemical and bonding properties of primary and secondary sludge from three commercial pulp mills.

## MATERIALS AND METHODS

Primary and secondary sludge samples were obtained from a TMP, a CTMP and a kraft mill. All samples were passed through a Somerville screen and thickened before making handsheets.

Morphological properties, including fibre length and width and fines content were measured using the OPTEST fiber quality analyser (FQA). Cellulose, hemicelluloses and lignin contents were measured according to TAPPI T-203 om-83 and TAPPI T-222 om-88 standard methods.

PS and SS from TMP, CTMP and Kraft mills were used to make 60 g/m<sup>2</sup> Standard handsheets (C1. PAPTAC Standard method) at three different ratios: 100% PS; 80% PS - 20% SS; and 60% PS - 40 % SS.

To study the bonding mechanism of the sludge fibres as a function of temperature, five drying temperatures were used: 23°C, 60°C, 100°C, 140°C and 180°C. The 23°C temperature corresponds to the specifications of the C1 PAPTAC Standard test. The 60°C corresponds to drying temperature used in the paper drying. The 100°C and 140°C correspond to the temperature of flow of the hemicellulose and cellulose components of the fibre. The 180°C corresponds to the temperature of flow of lignin component of the fibre [14-17]. While drying, the handsheets were pressed at 100 psi. For each temperature, the drying time (Table 1) was determined experimentally. Handsheets were

then conditioned according to D1 PAPTAC standard method. Handsheets were tested according to TAPPI and PAPTAC Standard methods. Properties measured included apparent density ( $\rho$ ), Z-directional tensile strength (ZDTS), and light scattering coefficient (LSC). The apparent density ( $\rho$ ) and the light scattering coefficient were used to evaluate the bonded area. The specific bond strength (SBS) is determined according to the following equation [15,16]:

$$BS = \frac{ZDTS}{\rho}$$

Table 1: Drying times as a function of temperature.

Drying temperature, °C	Drying time
23	24 hours
60	20 minutes
100	10 minutes
140	1 minute
180	30 seconds

## RESULTS AND DISCUSSION

### Morphological properties

Results of fibre length and fines content variations as a function of pulping process (control) and effluent treatment are shown in Figures 1 and 2, respectively. The fibre length of the Kraft and TMP pulp samples are higher than those of the CTMP samples. This variation is explained by the fact that the TMP, kraft and CTMP samples are from softwood species, while that of CTMP is from a hardwood species (white birch). It is interesting to note that the variation of fibre length in the PS and SS samples followed the same tendency as that of the control samples. The TMP and Kraft sludge samples showed longer fibres than that of the CTMP sample. In general, the PS samples had shorter fibres than the pulp samples. Similarly, the SS samples had even shorter fibres than the PS and the pulp samples (Figure 1).

The shorter average fibre length of sludge samples, as compared to the pulp samples, is due to the higher fine particulate content of the sludge (Figure 2). In general, the SS had a fine content higher than that of the pulp and PS, and well above 60% for the three pulping processes. Similarly, the fines content of the PS sample is much higher than that of the pulp samples. The variation of the fines content among the pulping processes is mainly explained by the damaging action on fibres of the mechanical action during the pulping process.

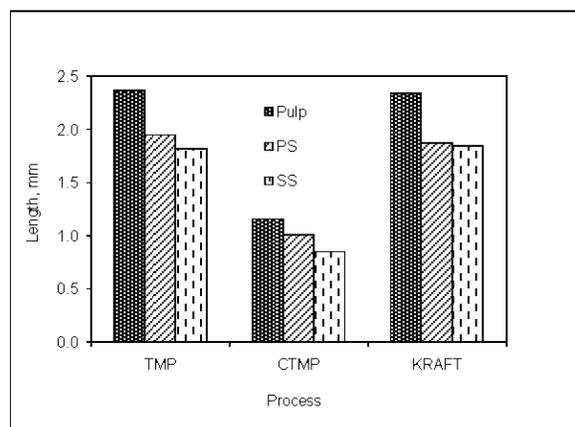


Figure 1: Variation of average fibre length. Pulp samples represent standard reference pulp.

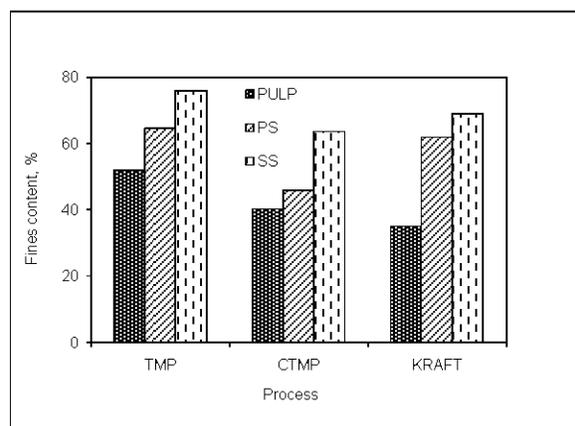


Figure 2: Variation of fines content. Pulp samples represent standard reference pulp.

### Chemical properties

#### Lignin content

Results of the total, soluble and insoluble lignin contents are shown in Figures 3 to 5. As expected, the TMP pulp showed the highest total lignin content (Figure 3), followed by the CTMP and Kraft pulp. The total lignin content of the Kraft pulp is negligible due to the fact that the chemical process removes lignin from the middle lamella of the fibre. Similar trends are shown for the insoluble (Figure 4) and acid soluble (Figure 5) lignin contents.

The total lignin contents of PS and SS sludge samples were higher than that of pulps (Figure 3). Surprisingly, the total lignin content of the Kraft PS and SS was highly different from the TMP and CTMP sludge. Similar trends are shown for the insoluble (Figure 4) and soluble (Figure 5) lignin contents in the PS and SS. For the PS, this result could be attributed to the fact that kraft PS is mainly composed of shives.

### Carbohydrate content

The total carbohydrate content varied with the pulping process as expected. The chemical kraft pulp had the highest carbohydrate content (Figure 6). The carbohydrate content of PS was lower than that of pulps but did not vary substantially among the three pulping processes. The carbohydrate content of the secondary sludge was very low (less than 5%) compared to that of PS and the three pulp types and did not vary significantly among processes. For the TMP and CTMP, most polysaccharides showed the same trends of variation as the total carbohydrates contents (not shown). However, galactan, arabian and mannan contents were lower in the kraft pulp compared to the PS. The difference could be explained by the fact that these polysaccharides might have been solubilized during the pulping process.

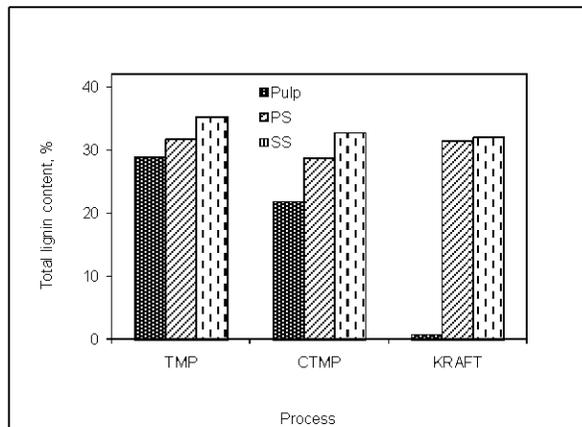


Figure 3: Variation of total lignin content.

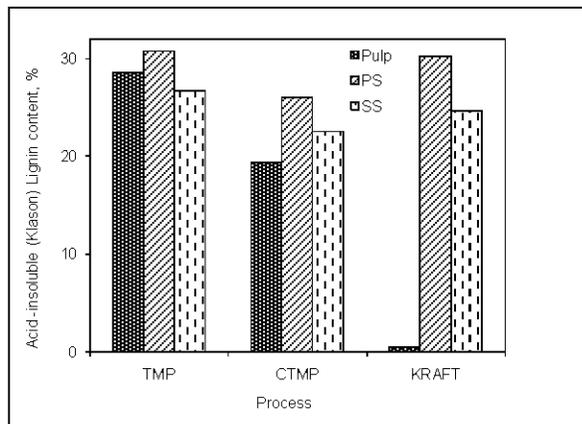


Figure 4: Variation of insoluble lignin content.

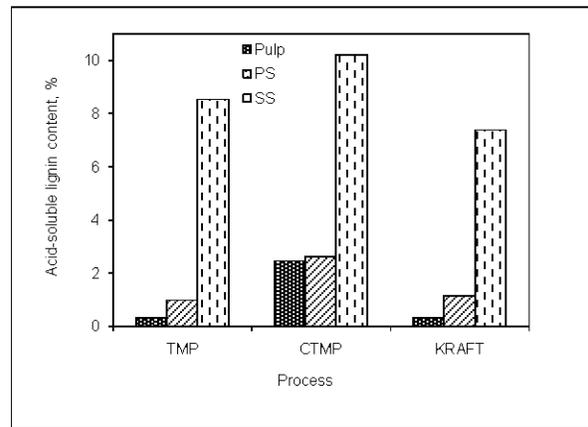


Figure 5: Variation of acid-soluble lignin content.

### Bonding properties

#### Bonded area

The bonded area in a handsheet is closely related to the apparent density. As shown in Figure 7, increase in SS proportion is associated to an increase in apparent density and consequently to the bonded area due to the increase in fines content (Figure 2). Similarly, the light scattering coefficient is also closely related to the bonded area in a handsheet. The increase in SS proportion decreased the light scattering coefficient (Figure 8) indicating also an increase in the bonded area.

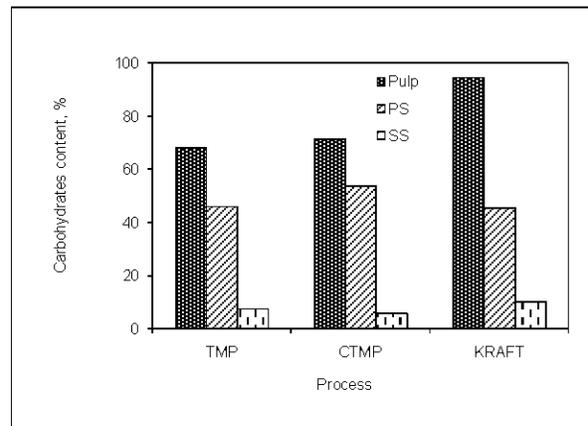


Figure 6: Variation of total carbohydrates content.

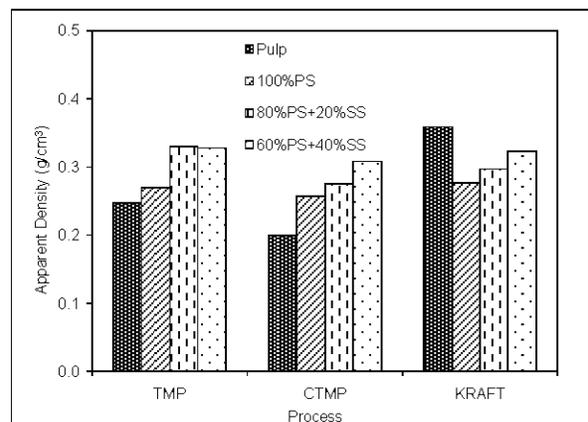


Figure 7: Variation of apparent density.

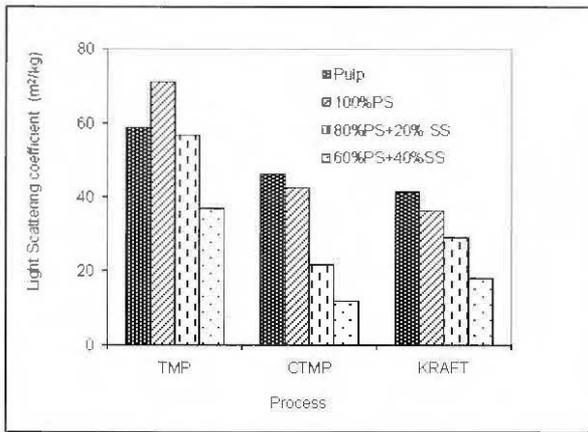


Figure 8: Variation of the light scattering coefficient.

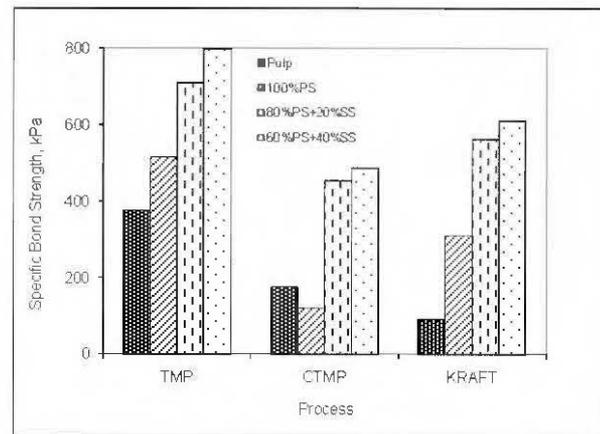


Figure 10: Variation of SBS for pulp and sludge samples.

### Bond strength

The ZDTS and the SBS were used to evaluate the bond strength. As shown in Figure 9, adding SS sludge to PS improved the ZDTS. This improvement could be attributed to the increase in the bonded area (Figures 7 and 8) and consequently to a higher frequency of hydrogen bonding. However, the specific bond strength improved as the proportion of the SS increases (Figure 10). Thus, hydrogen bonding is not the only mechanism responsible for the improvement in bond strength. Mechanical interlocking or the occurrence of chemical bonds is among the possible hypothesis that could explain the improvement in ZDTS and the SBS.

The SBS of PS and SS from the TMP process are much higher than those from the CTMP and Kraft processes (Figure 10) showing its better bonding ability. Increase in the bonded area is not the only explanation for the higher bonding ability of TMP sludge fibres. The differences in the chemical composition could be among the plausible explanations. In fact, the TMP sludge fibres have higher lignin content (Figure 4) and lower carbohydrate contents compared to the CTMP and kraft sludge fibres (Figure 6).

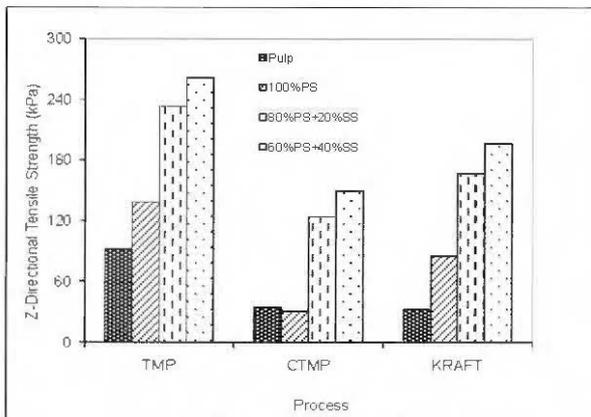


Figure 9: Variation of ZDTS for pulp and sludge samples.

### Impact of temperature on bond strength

The variation of drying temperature has significant impact on the flow and adhesion mechanisms of fibre components [14-16]. In general at temperatures lower than 100°C, none of the fibres components will flow taking in account the glass transition temperature of the fibre components including carbohydrates. At temperatures between 100°C and 140°C, the glass transition temperature of only carbohydrates is exceeded and they are expected to flow. At 180°C, the glass transition temperature of lignin is exceeded and is expected to flow. From these results, changes in surface could happen at drying temperatures from 100°C to 140°C and at 180°C.

The evolution of the bond strength as a function of drying temperature and secondary sludge proportions are shown in Figures 11 to 13 for kraft, CTMP, and TMP processes, respectively. For the sludge from the three processes, increasing sludge proportion improved the ZDTS at all drying temperatures. This could be explained partially by the increase in bonded area due to the higher fines content in SS as discussed above. For the three processes, increasing temperatures from 25°C to 140°C slightly improved the bond strength. However, the improvement at 180°C is very important for the sludge from the three processes. The improvement is especially noticeable for samples containing higher proportions of SS samples. This improvement could be explained by several factors mainly higher bonded area at higher drying temperatures, and consequently higher frequency of hydrogen bonds.

The evolution of the SBS as a function of drying temperature and SS proportions are shown (Figures 14 to 16) for kraft, CTMP, and TMP processes. The variation of the SBS with SS proportion and drying temperature is similar to that of bond strength. Thus, the improvement of the bond strength could not be attributed only to higher frequency of hydrogen bonds. Additional bonds such as chemical bonds could also have been involved.

The impact of temperature on the specific bond strength at any SS proportion improved with drying temperature. This improvement is especially noticeable at 180°C and 40% SS. This temperature is used in the fiberboard manufacturing

including particleboard and MDF. Thus, using sludge as furnish for fiberboard is expected to have an impact on its internal bond strength. This impact is beneficial and could lead to reducing the adhesive proportion for the fiberboard manufacturing. Adhesive represent about 40% of the cost of the fiberboard. Reducing the adhesive content in the fiberboard will reduce the overall cost of manufacturing operation and improves economic profitability.

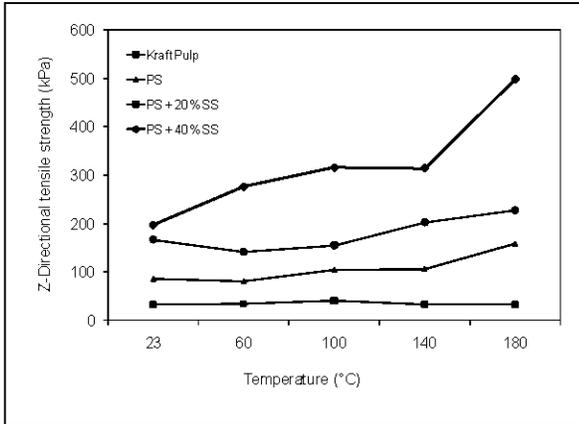


Figure 11: Evolution of the ZDTS with drying temperature and SS proportion for the kraft sample.

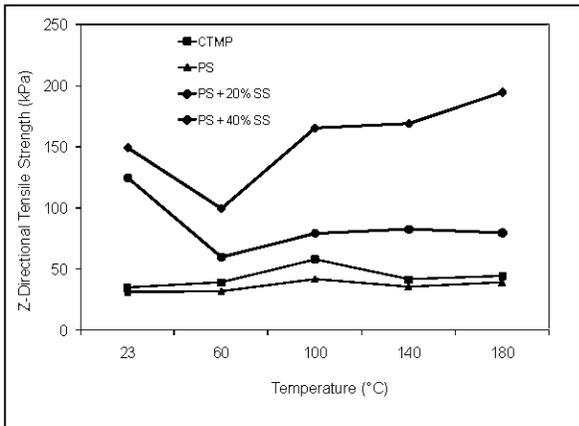


Figure 12: Evolution of the ZDTS with drying temperature and SS proportion for the CTMP sample.

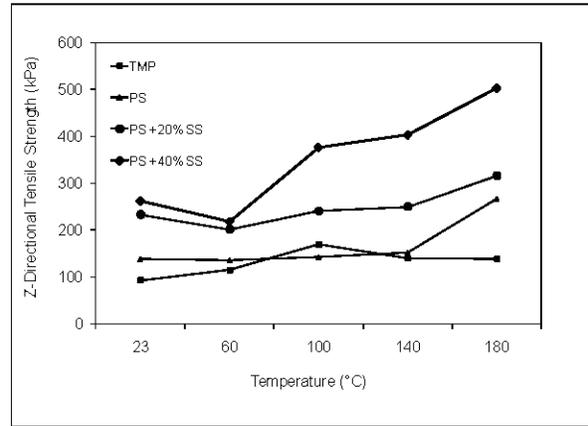


Figure 13: Evolution of the ZDTS with drying temperature and SS proportion for the TMP sample.

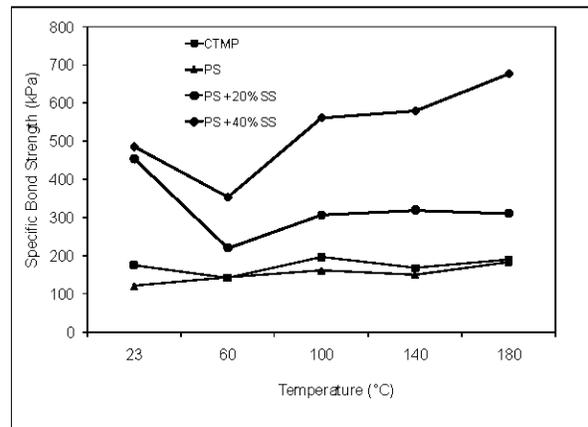
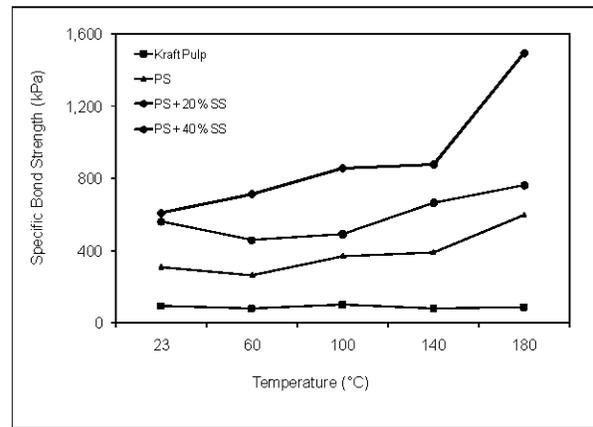


Figure 15: Evolution of the SBS with drying temperature and SS proportion for the CTMP sample.

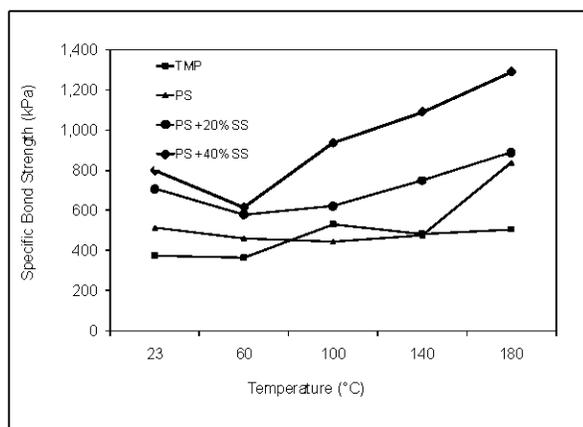


Figure 16: Evolution of the SBS with drying temperature and SS proportion for the TMP sample.

## CONCLUSIONS

This study led to the following conclusions:

- Sludge morphological properties varied with the pulping and effluent treatment processes. SS contained shorter fibres and more fines than PS.
- Chemical composition of PS varied substantially from SS. Compared to pulp and PS, SS had very low carbohydrates but high lignin content.
- SS improves the bond strength between fibres. This improvement is explained partially by the increase in the frequency of hydrogen bonding.
- Combination of SS and high temperature led to substantial increase in the specific bond strength. This increase was attributed to the possible occurrence of chemical bonds between SS and fibres.
- Using sludge fibres as furnish or as adhesive for fibreboard manufacturing could lead to reduced adhesives requirement and consequently the manufacturing costs.

## REFERENCES

1. MAHMOOD T. AND ELLIOTT A. (2006). "A Review of Secondary Sludge Reduction Technologies for the Pulp and Paper Industry", *Water Research*, 40(11):2093-2112, (2006).
2. METCALF AND EDDY, "Wastewater Engineering – Treatment and Reuse." 4<sup>th</sup> Ed., McGraw-Hill, Inc., New York, NY, (2003).
3. ELOUZZANI, D. C., "Caractérisation physico-chimique et valorisation en bâtiment et travaux publics des cendres issues de l'incinération des boues de papeterie", Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Lyon (2005).
4. CORBUN, R, and DOLAN, G., "Beneficial use of paper mill sludge. *Biocycle* 36:69 (1995).
5. SIMONS, H. A., "Methodes de gestion des boues générées par les fabriques de pâtes et papiers", Rapport Synthèse, Mars (1994).
6. BONI, M.R., D'APRILE, L. et DE CASA, G. "Environmental quality of quality of primary paper sludge" *Journal of hazardous materials*, Vol.108, N° 1-2, pp.125-128, (2004).
7. BEAUCHAMP, C.J., CHREST, M.H et GOSSELIN, A., "Examination of enviromental quality of raw and composting deinking paper sludge" *Chemosphere*, 46(6):887-895, (2002).
8. MARSH, M., MURRAY,D., and KLEYWEGT, S. Field and laboratory biossays on atlontic packaging biosolids, Final Report. Phytotoxicology and Soil Standards Section, Standards Development Branch, Rep. SDB-051-3511 (1998).
9. PRIESNITZ, W. "Sludge on your supper table" *Natural Life* 69 (1999).
10. PICKELL, J., and WUNDERLICH, R. "Sludge disposal: Current practices and future options", *Pulp and Paper Canada* 96: (9) 41-47, (1995).
11. AHMADI, B. and AL-KHAJA,W., "Utilisation of paper waste sludge in the building construction industry", *Ressources conservation and recycling*. 32: 105-113, (2001)
12. AMROUZ, A. "Transformation des boues de papeteries en pouzzolanes artificielles". Thèse. Lyon : INSA de Lyon, 1996.
13. GENG, X., DENG J., and ZHANG S.Y. "Effects of Hot-Pressing Parameters and Wax Content on the Properties of Fiberboard Made from Paper Mill Sludge", *Wood Fiber Science*, 38:736-741 (2006).
14. BACK, E.L, "Thermal Auto-Crosslinking in Cellulose Materiel", *Pulp paper Mag. Can.* 68:T165-T171 (1967).
15. KOUBAA, A. "Amélioration de la résistance des liaisons dans le papier et le carton par raffinage et par pressage et séchage simultanés". Thèse de doctorat de l'Université de Trois-Rivières (1996).
16. KOUBAA, A. RIEDL, B. and Z. KORAN. "Surface analysis of press dried-CTMP paper samples by electron spectroscopy for chemical analysis", *J. of Applied Polymer Sci.*, 61: 545-552, (1996).
17. STRENBORG, E.L, "Effect of Heat Treatment on the Internal Bonding of Kraft", *Liner, Svensk Papperstidning* 81(2):49-54(1978).
18. GARCEAU ,J.J., CHEN, R. DANNEAULT, C., GOEL, K.G,KOKTA, K.,B.V., KORAN, K., LAVALLÉE, H.C., LAW, K.N. LEBEL, R .G. LEMAY, Y. and RÉMILLARD, B., "Pâtes mécaniques et chimico-mécaniques", Section technique de l'ACPP (1989).
19. CLARK, J. D'A., "Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology", 3<sup>rd</sup> Edition, Vol II, John Wiley and Sons (1980).

## ANNEXE II

### Propriétés papetières des boues Issues des 3 procédés

Tableau A2.1 : Propriétés papetières de feuilles formées à partir de boues primaires et secondaires des pâtes TMP séchées à différentes températures.

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$I_D$ (mNm <sup>2</sup> /g)	$L_R$ (km)	$D_L$ (m <sup>2</sup> /kg)	RTDZ (kPa)	RSL (kPa)
<b>25 °C</b>						
Témoin	0,25	10,48	3,43	58,6	92,5	376
BP:BS=100:00	0,27	5,11	2,06	71,1	138,4	514
BP:BS=80:20	0,33	4,96	2,09	56,7	232,9	707
BP:BS=60:40	0,33	3,93	2,03	36,8	261,3	798
<b>60 °C</b>						
Témoin	0,31	9,14	3,86	54,83	115,1	371
BP:BS=100:00	0,30	4,74	2,01	69,88	136	453
BP:BS=80:20	0,35	5,1	2,11	54,97	200,9	574
BP:BS=60:40	0,35	4,03	1,92	42,08	218,3	624
<b>100 °C</b>						
Témoin	0,32	8,94	4,56	438	94	294
BP:BS=100:00	0,32	4,33	2,04	255	96	300
BP:BS=80:20	0,39	3,86	1,78	253	187	479
BP:BS=60:40	0,4	2,87	2,38	381	213	533
<b>140 °C</b>						
Témoin	0,29	9,64	5,02	45,62	140,1	483
BP:BS=100:00	0,32	4,45	2,67	75,7	152,7	477
BP:BS=80:20	0,33	4,2	2,76	51,65	249,6	756
BP:BS=60:40	0,37	2,95	2,62	39,19	403,2	1090
<b>180 °C</b>						
Témoin	0,27	10,15	4,86	47,76	138,5	513
BP:BS=100:00	0,32	4	2,4	71,13	266,6	833
BP:BS=80:20	0,36	3,89	2,3	40,79	316,2	878
BP:BS=60:40	0,39	3,26	2,01	30	502,7	1289

Tableau A2.2 : Propriétés papetières de feuilles formées à partir de boues primaires et secondaires des pâtes CTMP séchées à différentes températures.

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$I_D$ (mNm <sup>2</sup> /g)	$L_R$ (km)	$D_L$ (m <sup>2</sup> /kg)	RTDZ (kPa)	RSL (kPa)
25 °C						
Témoin	0,20	1,80	0,97	46,1	34,8	175,3
BP:BS=100:00	0,26	0,61	0,43	42,5	31,0	120,7
BP:BS=80:20	0,27	1,03	0,79	21,6	124,4	454,0
BP:BS=60:40	0,31	0,97	0,60	11,9	149,4	485,4
60 °C						
Témoin	0,32	8,94	4,56	51,97	169,7	530
BP:BS=100:00	0,32	4,33	2,04	71,83	142,4	445
BP:BS=80:20	0,39	3,86	1,78	27,67	240,2	615
BP:BS=60:40	0,4	2,87	2,38	31,54	376,1	940
100 °C						
Témoin	0,26	0,9	38	37,44	41,4	159
BP:BS=100:00	0,26	1,24	63	21,24	79,3	305
BP:BS=80:20	0,29	1,43	129	12,88	165,4	570
BP:BS=60:40	0,41	9,85	56	41,98	40,9	100
140 °C						
Témoin	0,25	2,04	1,58	40,08	41,6	166
BP:BS=100:00	0,23	0,78	0,63	38,55	35,3	153
BP:BS=80:20	0,26	1,22	1,2	21,23	82,5	317
BP:BS=60:40	0,29	1,31	1,4	13,59	169,1	583
180 °C						
Témoin	0,23	2,13	1,46	39,05	44,2	192
BP:BS=100:00	0,21	0,66	0,43	38,54	38,7	184
BP:BS=80:20	0,26	1,13	0,96	24,13	79,7	307
BP:BS=60:40	0,29	1,24	1,5	12,01	194,8	672

Tableau A2.3 : Propriétés papetières de feuilles formées à partir de boues primaires et secondaires des pâtes kraft séchées à différentes températures.

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$I_D$ (mNm <sup>2</sup> /g)	$L_R$ (km)	$D_L$ (m <sup>2</sup> /kg)	RTDZ (kPa)	RSL (kPa)
25 °C						
Témoin	0,36	9,41	1,37	41,3	32,7	91
BP:BS=100:00	0,28	2,80	1,17	36,2	85,6	310
BP:BS=80:20	0,30	2,68	1,46	29,1	166,7	562
BP:BS=60:40	0,32	2,49	1,50	17,9	196,9	610
60 °C						
Témoin	0,44	8,9	1,52	41,11	34,6	79
BP:BS=100:00	0,3	2,73	1,14	33,11	80,1	267
BP:BS=80:20	0,31	2,72	1,31	27,86	141,2	455
BP:BS=60:40	0,39	2,82	1,23	15,33	276,1	708
100 °C						
Témoin	0,41	9,85	56	41,98	40,9	100
BP:BS=100:00	0,28	2,81	77	34,88	104,2	372
BP:BS=80:20	0,31	2,46	115	25,53	154,8	499
BP:BS=60:40	0,37	2,29	209	16,18	315,3	852
140 °C						
Témoin	0,42	7,23	1,45	37,94	32,9	78
BP:BS=100:00	0,27	2,56	1,45	32,62	105,6	391
BP:BS=80:20	0,3	2,74	1,63	24,41	202	673
BP:BS=60:40	0,36	2,42	1,52	16,84	313,9	872
180 °C						
Témoin	0,39	8,86	1,32	44,74	33,3	85
BP:BS=100:00	0,26	2,75	1,24	32,0	157,7	607
BP:BS=80:20	0,3	2,62	1,45	22,91	227,2	757
BP:BS=60:40	0,33	2,19	1,83	14,44	498,4	1510

## ANNEXE III

### Étude financière comparative des différentes alternatives de valorisation des boues papetière

L'usine génère 30 tonnes humides de boue par jour. Les boues mélangées accumulées ont une teneur en solide moyenne de 37%.

Afin de trancher entre ces quatre options, On va se baser sur la rentabilité économique sous forme de la valeur actuelle nette (VAN), l'option la plus rentable c'est l'option qui a la plus grande VAN. Dans notre étude, on va utiliser 3 périodes d'amortissement 10, 20 et 25 ans, un taux d'imposition de 34% et un taux d'intérêt de 6%.

#### A3.1 Valorisation agricole

Les boues vont être vendues à 16 \$ la tonne, sur une base de teneur en solide de 60%, à une firme qui les récupère pour la fertilisation des sols agricoles.

Le coût des traitements de séchage des boues pour respecter les spécifications est estimé à 8 \$ la tonne.

Cette option ne nécessite aucun investissement.

#### *a) Calcul de la production annuelle des boues*

L'usine génère 30 tonnes par jour de boues humides d'une teneur en solide moyenne de 37%, donc la quantité de boues, d'une teneur en solide moyenne de 60%, générée par jour (P.J.B (60%)) est :

$$P.J.B (60\%) = \frac{30 \times 37}{100} \times 100 = 18,5 \text{ tonnes/jour}$$

Donc la production annuelle de boues mélangées d'une teneur en solide moyenne de 60% (P.A.B (60%)) est :

$$P.A.B (60\%) = P.J.B (60\%) \times 365 = 6752,5 \text{ tonnes/année}$$

b) *Calcul des dépenses annuelles (D.A)*

$$D.A = 8 \$ \times 30 \text{ t} \times 365 \text{ jours} = 87600 \$$$

c) *Calcul de la revenue annuelle (R.A)*

$$R.A = 16 \$ \times 6752,5 \text{ t} = 108040 \$$$

d) *Calcul du flux monétaire*

Tableau A3.1 : Calcul du flux monétaire pour l'option « Valorisation agricole»

Période d'amortissement	10 ans	20 ans	25 ans
Investissement	0 \$	0 \$	0 \$
Revenu annuel	108040 \$	108040 \$	108040 \$
Dépenses annuelles	87600 \$	87600 \$	87600 \$
Amortissement	0 \$	0 \$	0 \$
Bénéfice imposable	20440 \$	20440 \$	20440 \$
Impôt	0 \$	0 \$	0 \$
Bénéfice net	20440 \$	20440 \$	20440 \$
Flux monétaire net	20440 \$	20440 \$	20440 \$

e) *Calcul de la VAN*

Tableau A3.2 : Calcul de la VAN pour l'option « Valorisation agricole»

Période d'amortissement	10 ans	20 ans	25 ans
Taux d'actualisation annuel	6%	6%	6%
Coût d'investissement	0 \$	0 \$	0 \$
Rentabilité par année	20 440 \$	20 440 \$	20 440 \$
Van	141 925 \$	141 925 \$	141 925 \$

### **A3.2 Génération énergétique pour l'unité de séchage du papier**

Pour cette option, un investissement de 1,8 millions de dollars et des dépenses annuelles de 140 000\$ sont nécessaires. Cet investissement permet à l'usine d'économiser 200 000 \$ par année sur les coûts énergétiques et 5 \$ de polymères par tonne humide. La production d'énergie résulte également en 5% de cendres que l'industrie doit disposer.

a) *Calcul des dépenses annuelles (D.A)*

$$\mathbf{D.A = 140\ 000\ \$}$$

b) *Calcul de la revenue annuelle (R.A)*

$$\mathbf{R.A = 200000 + (5 \times 30 \times 365) = 254750\ \$}$$

c) *Calcul du flux monétaire*

Tableau A3.3 : Calcul du flux monétaire pour l'option « Génération énergétiques»

<b>Période d'amortissement</b>	<b>10 ans</b>	<b>20 ans</b>	<b>25 ans</b>
<b>Investissement</b>	1 800 000 \$	254750 \$	<b>254750 \$</b>
<b>Revenu annuel</b>	254750 \$	140 000 \$	<b>140 000 \$</b>
<b>Dépenses annuelles</b>	140000 \$	90 000 \$	<b>90 000 \$</b>
<b>Amortissement</b>	180000 \$	24 750 \$	<b>72 000 \$</b>
<b>Bénéfice imposable</b>	- 65250 \$	8 415 \$	<b>42 750 \$</b>
<b>Impôt</b>	0 \$	16 335 \$	<b>14 535 \$</b>
<b>Bénéfice net</b>	- 65250 \$	254 750 \$	<b>28 215 \$</b>
<b>Flux monétaire net</b>	<b>114750 \$</b>	<b>106 335 \$</b>	<b>100 215 \$</b>

d) Calcul de la VAN

Tableau A3.4 : Calcul de la VAN pour l'option « Génération énergétiques »

Période d'amortissement	10 ans	20 ans	25 ans
Taux d'actualisation annuel	6%	6%	6%
Coût d'investissement	-1 800 000 \$	-1 800 000 \$	-1 800 000 \$
Rentabilité par année	114750 \$	106 335 \$	100 215 \$
Van	- 901 349,07 \$	- 547 496 \$	- 489 543 \$

**A3.3 La fabrication de granules énergétiques**

Pour cette option, un investissement de 1 millions de dollars est requis. De plus les coûts d'opérations annuels sont estimés à 120 000 \$, un traitement de désodorisation est nécessaire est évalué à 20\$ la tonne anhydre.

Les granules sont vendus à 0,25 \$ par kg (teneur en solide =96%).

a) Calcul de la production journalière des boues (96% t.s) :

$$P.J.B (96\%) = \frac{\frac{30 \times 37}{100} \times 100}{96} = 11,56 \text{ tonnes/jour}$$

b) Calcul de la production annuelle des boues (96% t.s) :

$$P.A.B (96\%) = P.J.B (96\%) \times 365 = 4 220,3 \text{ tonnes/année}$$

c) Calcul des dépenses annuelles (D.A) :

$$D.A = 120 000 \$ + (20\$ \times 4220,3 \text{ t}) = 204 406 \$$$

d) Calcul de la revenue annuelle (R.A) :

$$R.A = 0,25\$ \times 4220,3 \text{ t} \times 1000 = 1 055 075 \$$$

e) Calcul du flux monétaire

Tableau A3.5 : Calcul du flux monétaire pour l'option « granules énergétiques»

Période d'amortissement	10 ans	20 ans	25 ans
Investissement	1 000 000 \$	1 000 000 \$	1 000 000 \$
Revenu annuel	1 055 075 \$	1 055 075 \$	1 055 075 \$
Dépenses annuelles	204406 \$	204406 \$	204406 \$
Amortissement	100 000 \$	50 000 \$	40 000 \$
Bénéfice imposable	750 669 \$	800 669 \$	810 669 \$
Impôt	255 227 \$	272 227 \$	275 627 \$
Bénéfice net	495 441 \$	528 441 \$	535 041 \$
Flux monétaire net	595 441 \$	106 335 \$	575 1\$

f) Calcul de la VAN

Tableau A3.6 : Calcul de la VAN pour l'option « granules énergétiques»

Période d'amortissement	10 ans	20 ans	25 ans
Taux d'actualisation annuel	6%	6%	6%
Coût d'investissement	-1 000 000 \$	-1 000 000 \$	-1 000 000 \$
Rentabilité par année	595 441 \$	578 441 \$	575 041 \$
Van	3 191 038,07 \$	5 315 733 \$	5 991 470 \$

### A3.4 Panneaux de fibres

Les boues vont être vendues à 75 \$ pour une tonne anhydre de boues, sur une base de teneur d'humidité de 10%, à une usine de panneaux de fibres.

Cette option nécessite un investissement de 750 000 \$ pour l'installation d'un producteur de bûche. Le coût d'opération annuel est de 80 000\$.

Le prix de vente estimé pour une tonne anhydre de boues est évalué à 75\$.

a) Calcul de la production journalière des boues (10% t.h) :

$$P.J.B (10 \%) = \frac{\frac{30 \times 37}{100} \times 100}{90} = 12,33 \text{ tonnes/jour}$$

b) Calcul de la production annuelle des boues (10% t.h) :

$$\text{P.A.B (10 \%)} = \text{P.J.B (10\%)} \times 365 = 4500,45 \text{ tonnes/année}$$

c) *Calcul des dépenses annuelles (D.A)*

$$\text{D.A} = 80\,000 \$$$

d) *Calcul du revenu annuelle (R.A)*

$$\text{R.A} = 75 \$ \times 4500,45 \text{ t} = 337\,534$$

e) *Calcul du flux monétaire*

Tableau A3.7 : Calcul du flux monétaire pour l'option « Panneaux de fibres »

Période d'amortissement	10 ans	20 ans	25 ans
<b>Investissement</b>	750000 \$	750000 \$	750 000 \$
<b>Revenu annuel</b>	337 534 \$	337 534 \$	337 534 \$
<b>Dépenses annuelles</b>	80 000 \$	80 000 \$	80 000 \$
<b>Amortissement</b>	75 000 \$	37 500 \$	30 000 \$
<b>Bénéfice imposable</b>	182 534 \$	220 034 \$	227 534 \$
<b>Impôt</b>	62 061 \$	74 811 \$	77 361 \$
<b>Bénéfice net</b>	120 472 \$	145 222 \$	150 172 \$
<b>Flux monétaire net</b>	<b>195 472 \$</b>	<b>182 722 \$</b>	<b>180 172 \$</b>

f) *Calcul de la VAN*

Tableau A3.8 : Calcul de la VAN pour l'option « Panneaux de fibres »

Période d'amortissement	10 ans	20 ans	25 ans
<b>Taux d'actualisation annuel</b>	6%	6%	6%
<b>Coût d'investissement</b>	-750000 \$	-750000 \$	-750000 \$
<b>Rentabilité par année</b>	195 472 \$	182 722 \$	180 172 \$
<b>Van</b>	<b>649 710,34 \$</b>	<b>1 269 632 \$</b>	<b>1 465 289 \$</b>

### **A3.5 Conclusion**

Tableau A3.9 : Récapitulatif des VANs

<b>Options</b>	<b>P.A = 10 ans</b>	<b>P.A = 20 ans</b>	<b>P.A = 25 ans</b>
<b>Valorisation agricole</b>	141 925 \$	221 175 \$	246 502 \$
<b>Génération énergétique</b>	- 901 349 \$	- 547 496 \$	- 489 543 \$
<b>Granules énergétiques</b>	3 191 038 \$	5 315 733 \$	5 991 470 \$
<b>Panneaux de fibres</b>	649 710 \$	1 269 632 \$	1 465 289 \$

Un projet rentable, c'est un projet qui a une VAN supérieure à 0. C'est à dire, le projet qui n'est pas rentable parmi les quatre options est le projet numéro 2 : Génération énergétique pour l'unité de séchage du papier.

Plus la VAN d'un projet est grande plus le projet est plus rentable. Donc l'utilisation des boues dans la fabrication des granules énergétiques et la fabrication de panneaux de fibres sont des alternatives rentables pour l'usine. Plus la période d'amortissement est grande, plus ces projets deviennent de plus en plus rentables.