

# GUIDE DE DÉVELOPPEMENT

## *LE BIORAFFINAGE FORESTIER : POSSIBILITÉ POUR LES ENTREPRISES QUÉBÉCOISES DE PÂTES ET PAPIERS*

PRODUIT EN MARS 2009

Mm

## Note au lecteur

L'information contenue dans ce document est fournie à titre indicatif seulement et n'engage aucunement la responsabilité du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) (gouvernement du Québec).

## Auteurs

Le contenu de ce guide a été réalisé par M. Thomas Browne, directeur de programme de recherche en pâte mécanique et bioraffinerie, avec la collaboration de MM. Michael Paice, chercheur principal, groupe environnement, Naceur Jemaa, chercheur senior, groupe de pâte chimique, Michael Paleologou, chercheur principal, groupe de pâte chimique, Xiao Zhang, chercheur senior, groupe environnement et Martin Champoux, directeur des relations avec les membres et des communications de FPInnovations – division Paprican. A participé également à sa réalisation, M<sup>me</sup> Nathalie Leclerc de la Direction du développement de l'industrie des produits forestiers (DDIPF) du ministère des Ressources naturelles et de la Faune.

## Remerciements

Les auteurs remercient M<sup>me</sup> Josée Grondin de la DDIPF du MRNF qui a effectué l'édition de ce document, MM. Jean-Claude Havard et Martin MacLeod, rédacteurs-pigistes pour le compte de FPInnovations-Paprican

## Diffusion

Cette publication, conçue pour une impression recto verso, est disponible en ligne uniquement à l'adresse suivante :  
[www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/bioraffinage-forestier.pdf](http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/bioraffinage-forestier.pdf)

© Gouvernement du Québec  
Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2009  
Dépôt légal — Bibliothèque nationale du Québec, 2009  
ISBN 978-2-550-56818-6

## Réalisation

**MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE**  
Direction du développement de l'industrie des produits forestiers  
880, chemin Sainte-Foy, bureau 7.50  
Québec (Québec) G1S 4X4  
CANADA  
Téléphone : 418 627-8644, poste 4106  
Télécopieur : 418 643-9534  
Courriel : [prodfor@mrnf.gouv.qc.ca](mailto:prodfor@mrnf.gouv.qc.ca)

## TABLE DES MATIÈRES

	PAGE
<b>AVANT-PROPOS</b> .....	<b>V</b>
<b>1. UNE POSSIBILITÉ DE DÉVELOPPEMENT POUR L'INDUSTRIE PAPETIÈRE DU QUÉBEC</b> .....	<b>1</b>
1.1 Qu'est-ce que le bioraffinage? .....	1
1.2 Pourquoi le bioraffinage suscite-t-il tant d'intérêt? .....	1
1.3 Les atouts de l'industrie papetière et les défis à relever .....	3
1.4 Collaborer avec l'industrie chimique .....	3
1.5 Un processus qui est déjà engagé .....	3
<b>2. LE BOIS, SOURCE DE PRODUITS CHIMIQUES ET DE CARBURANTS</b> .....	<b>5</b>
2.1 Historique .....	5
2.2 Une matière première riche, abondante et renouvelable .....	5
2.3 Les produits de base offerts par la biomasse et leurs applications possibles .....	7
• L'hémicellulose .....	7
• La lignine .....	8
• La cellulose .....	8
• Les matières extractibles .....	9
<b>3. LES PRINCIPALES TECHNIQUES DE BIORAFFINAGE</b> .....	<b>11</b>
3.1 La fermentation .....	11
• Fermentation de liqueur usée de sulfite .....	11
• Fermentation d'une solution obtenue par préhydrolyse des copeaux .....	11
• Extraction de polymère dans les effluents .....	11
• Fermentation de matière cellulosique .....	12
• Traitement anaérobique .....	12
3.2 Les procédés thermochimiques .....	12
• La gazéification .....	12
• La pyrolyse .....	13

## TABLE DES MATIÈRES (suite)

	<b>PAGE</b>
<b>4. LES CLÉS DU SUCCÈS</b> .....	<b>15</b>
4.1 Les enjeux .....	15
• Diversifier pour prospérer .....	15
• Connaissance de la matière première et infrastructures .....	15
• Expérience de la chimie industrielle du bois .....	16
• Appui de la recherche .....	16
• Appui des gouvernements pour la recherche en transformation .....	16
4.2 Le bioraffinage au Québec .....	16
• Tembec .....	16
• Enerkem .....	17
4.3 L'importance des partenariats .....	17
• Besoin de connaissances complémentaires .....	17
• Apports en capital .....	18
• Exemples de partenariat .....	18
<b>5. CONCLUSION</b> .....	<b>21</b>
<b>ANNEXE 1 : PROGRAMMES DU GOUVERNEMENT DU QUÉBEC</b> .....	<b>23</b>
<b>ANNEXE 2 : USINES DE PÂTES, PAPIERS ET CARTONS CONSOMMANT DU BOIS AU QUÉBEC</b> .....	<b>25</b>
<b>ANNEXE 3 : PRODUITS CHIMIQUES OBTENUS PAR LE RAFFINAGE DU PÉTROLE ET DE LA BIOMASSE</b> .....	<b>27</b>
<b>ANNEXE 4 : LISTE DES CENTRES DE RECHERCHE QUÉBÉCOIS AYANT UN RÔLE À JOUER DANS LE BIORAFFINAGE</b> .....	<b>29</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE</b> .....	<b>31</b>

## AVANT-PROPOS

### **Une possibilité de développement pour l'industrie papetière du Québec**

L'industrie québécoise des pâtes et papiers vit actuellement une crise majeure. Sa position concurrentielle a largement souffert de la montée en flèche du prix de l'énergie, des restrictions d'approvisionnement, du prix des matières premières, de l'appréciation du dollar canadien, de la baisse du marché, en particulier de celui du papier journal, impression et écriture, et de la concurrence des pays émergents.

Pour faire face à cette situation et assurer sa prospérité à long terme, l'industrie, les centres de recherche du secteur des produits forestiers et ses partenaires gouvernementaux ont mis sur pied une stratégie d'innovation technologique. Annoncé en 2007, le programme fédéral des technologies transformatrices consacre 55 millions de dollars sur trois ans au développement de technologies visant à renouveler et relancer l'industrie. Le bioraffinage est l'un des axes de recherche retenus dans le cadre de ce programme. Au Québec, c'est par l'intermédiaire du Livre vert : *La forêt, pour construire le Québec de demain* que le gouvernement s'est positionné dans le dossier. En effet, dans le cadre de l'orientation 9 du Livre vert, soit de « se doter d'une stratégie de développement industriel axée sur les produits à forte valeur ajoutée », une des quatre filières présentées porte sur le bioraffinage et la chimie verte.

Ce guide a pour but d'initier le lecteur au concept de bioraffinage, de présenter les principales filières en cours de développement au Québec et d'expliquer les grands défis techniques et économiques qui se posent.



## GUIDE DE DÉVELOPPEMENT

### **LE BIORAFFINAGE FORESTIER : POSSIBILITÉ POUR LES ENTREPRISES QUÉBÉCOISES DE PÂTES ET PAPIERS**

---

## **1. UNE POSSIBILITÉ DE DÉVELOPPEMENT POUR L'INDUSTRIE PAPETIÈRE DU QUÉBEC**

### **1.1 Qu'est-ce que le bioraffinage?**

Le bioraffinage, c'est un peu comme le raffinage du pétrole brut, c'est-à-dire une série de procédés industriels permettant de transformer la matière ligneuse en une variété de produits chimiques commerciaux. Dans une bioraffinerie, les principaux composés chimiques issus du bois (cellulose, hémicellulose, lignine et matières extractibles) servent à la fabrication de produits à valeur ajoutée tels que des combustibles, des produits chimiques spéciaux, des matières premières de base pour d'autres industries et des précurseurs de matières plastiques ainsi que d'autres polymères. Les activités de bioraffinage viennent compléter et diversifier la production de pâte, toujours nécessaire.

Exemples d'activités de raffinage compatibles avec une usine de pâte à papier :

- Gazéification et pyrolyse des écorces, des boues et des déchets ligneux pour produire du gaz synthétique et des biocarburants.
- Traitement biochimique des déchets solides et des effluents pour fabriquer des précurseurs servant à la fabrication de plastiques biodégradables.
- Production de phénols à partir du traitement chimique de la lignine dissoute.
- Fermentation des résidus d'hémicellulose dissoute pour produire de l'éthanol et d'autres produits de faible poids moléculaire.

### **1.2 Pourquoi le bioraffinage suscite-t-il tant d'intérêt?**

Le renouveau d'intérêt que l'on observe actuellement pour le bois comme matière première dans la fabrication de produits chimiques ou de carburants s'explique à la fois par la hausse et les fluctuations du prix du pétrole<sup>1</sup>, par la nécessité de valoriser au maximum l'ensemble de la matière première ligneuse et par la recherche de naturalité (désir de produits « verts ») des consommateurs.

---

1. Selon de nombreux analystes, la récente chute du prix du pétrole ne change pas sérieusement la donne, car les facteurs fondamentaux qui déterminent l'offre et la demande réimposeront des prix plus élevés dès que la crise financière actuelle sera résorbée. Par ailleurs, la crise économique ne peut que confirmer la nécessité de diversifier la production des usines de pâtes et papiers. Quant aux facteurs environnementaux, ils demeurent inchangés.

Les combustibles fossiles affichent des prix aussi volatils qu'imprévisibles et, à long terme, il semble que la tendance va se poursuivre compte tenu des incertitudes qui pèsent sur les approvisionnements pétroliers. La biomasse forestière a, par contre, l'avantage d'être disponible au pays en grande quantité, en plus d'être renouvelable. Les inquiétudes liées aux changements climatiques favorisent, par ailleurs, l'émergence de produits verts qui ont un impact limité, voire nul, sur le cycle du carbone. Sans modifier la structure primaire d'une usine de pâte existante, le bioraffinage lui permettrait d'accroître sa rentabilité et de diversifier sa production en accédant à des marchés plus lucratifs.

Aux États-Unis, une nouvelle législation (Energy Independence and Security Act), entrée en vigueur en 2007, maintiendra l'intérêt pour les biocarburants, et ce, indépendamment des fluctuations du prix du pétrole, car elle fixe des objectifs précis de volumes de biocarburants de 2008 à 2022. Ainsi, il est prévu qu'à la fin de cette période un total de 36 milliards de gallons de biocarburants devront être produits annuellement. Tout comme au Québec, la filière cellulosique y est privilégiée, car elle est perçue comme plus performante d'un point de vue environnemental et qu'elle n'entre pas en conflit avec les besoins alimentaires des humains. Le tableau ci-dessous résume les mesures incitatives mises de l'avant dans différents pays pour soutenir l'utilisation des carburants renouvelables :

<b>Pays/Région</b>	<b>Taxe sur l'essence (\$ US/gal)</b>	<b>Exemption de taxe sur les biocarburants 2010</b>	<b>Tarifs à l'importation d'éthanol</b>	<b>Autres mesures</b>
Australie	1,40	100 %	90 ¢/gal	-
Chine	0,15	100 %	0	15 % d'éthanol dans l'essence en 2010
Amérique latine et centrale	0,70	50 %	27 ¢/gal	-
Europe	2,80	90 %	90 ¢/gal	-
Inde	1,90	0 %	200 %	-
Japon	1,85	90 %	17 %	-
Corée du Sud	3,02	90 %	0	-
États-Unis	0,42	51 ¢/gal	50 ¢/gal	-
Canada	0,25	100 %	20 ¢/gal	5 % d'éthanol dans l'essence en 2010

Source : US Department of Energy, 2008.

### **1.3 Les atouts de l'industrie papetière et les défis à relever**

L'industrie québécoise des pâtes et papiers bénéficie de nombreux atouts pour adopter avec succès le bioraffinage. Les usines sont nombreuses, leur capacité de production est importante et les coûts de fabrication, raisonnables. L'industrie gère une imposante chaîne d'approvisionnement à faible distance de la matière ligneuse. Elle connaît parfaitement la chimie du bois. Elle est bien implantée dans d'importants marchés d'exportation.

Les défis à relever sont cependant de taille. Pour tirer profit du bioraffinage, l'industrie devra intégrer de nouvelles technologies dans ses usines, former ses travailleurs et pénétrer des marchés dont elle connaît mal les règles (celui de l'éthanol, par exemple), tout en restant concurrentielle sur ses marchés traditionnels de la pâte et du papier, et ce, dans un contexte où les fonds disponibles sont rares et les inconnues nombreuses.

### **1.4 Collaborer avec l'industrie chimique et pétrochimique**

Sa maîtrise des marchés du secteur chimique et des paramètres de qualité recherchés fait de l'industrie chimique et pétrochimique un partenaire incontournable pour le succès du bioraffinage dans l'industrie québécoise des pâtes et papiers. Elle ignore tout ou presque de la chaîne de valeur forestière, mais la matière ligneuse représente pour elle une source complémentaire de matière première qui offre l'avantage supplémentaire d'être « verte ». Le bioraffinage lui ouvre aussi la porte à de nouveaux produits issus des propriétés spécifiques de la matière ligneuse.

### **1.5 Un processus qui est déjà engagé**

Les entreprises qui s'intéressent au bioraffinage sont déjà nombreuses et beaucoup ne proviennent pas du secteur des pâtes et papiers. Alors que certaines, la majorité, n'en sont encore qu'au stade de la réflexion ou de la planification, d'autres se sont déjà engagées de façon concrète. Quelques-unes ont même pris une longueur d'avance et atteint le stade de l'usine pilote, voire celui de la production commerciale.

Au Canada, Tembec fabrique depuis plusieurs années une résine adhésive à partir de liqueur de sulfite usée. À cette production, elle a ajouté en 1991 la fabrication d'éthanol industriel par fermentation. Les sociétés Lignol Energy Corporation et Weyerhaeuser ont signé une entente de principe pour évaluer la faisabilité de produire des bioproduits autres que des carburants. À Fribourg, en Allemagne, Choren Industries BmbH s'apprête à démarrer une usine de démonstration capable de transformer 200 tonnes par jour de matière ligneuse sèche en biodiesel. Parmi les partenaires du projet, on retrouve Shell, Volkswagen et Daimler.

On constate que, dans la plupart des cas, les investisseurs qui s'intéressent au bioraffinage établissent des partenariats pour élargir la gamme des ressources à leur disposition, qu'il s'agisse de matière première, de capitaux, de technologie ou de marchés.

Autre signe des temps, le bioraffinage attire de plus en plus l'attention du monde de la recherche, tant au Québec que dans le reste du Canada, aux États-Unis, en Europe et ailleurs.



## 2. LE BOIS, SOURCE DE PRODUITS CHIMIQUES ET DE CARBURANTS

### 2.1 Historique

L'emploi du bois comme source de produits chimiques remonte probablement à plusieurs millénaires. Au Québec même, nos ancêtres calfeutraient leurs bateaux à l'aide d'une poix extraite du pin ou du sapin. Avec l'émergence du pétrole et de ses dérivés, les applications chimiques du bois ont presque disparu, à l'échelle industrielle du moins, pour ne réapparaître qu'en période de crise alors que le pétrole se faisait rare, comme ce fut le cas en Allemagne pendant la Seconde Guerre mondiale. De nos jours, l'industrie forestière se limite généralement à brûler ses résidus de production pour générer l'énergie nécessaire aux procédés de transformation du bois en pâtes et papiers.

### 2.2 Une matière première riche, abondante et renouvelable

Le bois se compose principalement de cellulose, d'hémicellulose, de lignine et de matières extractibles dans des proportions qui varient selon l'essence. Tous ces composés organiques sont formés de carbone, d'hydrogène (comme le pétrole et le gaz naturel) et d'oxygène.

Composition chimique du bois				
	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Matières extractibles
Résineux	41-46 %	25-32 %	26-31 %	2-5 %
Feuillus	42-49 %	23-24 %	20-26 %	3-8 %
Écorces	16-40 %	38-58 %	40-50 %	2-25 %

N. B. : Le bois comprend aussi une quantité infime (habituellement inférieure à 0,5 %) de matières minérales (potasse, silice, etc.). Les écorces peuvent contenir jusqu'à 15 % de matières minérales et leur contenu varie considérablement d'une essence à l'autre.

Source : FPIInnovations - division Paprican.

Au Québec, la récolte de bois rond est en majorité acheminée vers les scieries ou les usines de panneaux (panneaux OSB). Ce sont les sous-produits du sciage (copeaux d'équarrissage) qui constituent la principale source de matière première des usines de pâte et papiers. Les autres sous-produits (sciures et rabotures) alimentent les usines de panneaux de particules, panneaux de fibres de moyenne densité (MDF) ou de haute densité (HDF) tandis que les écorces servent à la production d'énergie nécessaire à la fabrication de la pâte et du papier.

Traditionnellement, une **usine de pâtes et papiers** (chimique ou mécanique) transforme les copeaux de bois en pâte écrue que l'on utilise sans traitement chimique supplémentaire (carton couverture kraft, par exemple), ou que l'on soumet à un blanchiment chimique pour l'intégrer à la fabrication des « papiers blancs » (papier d'impression et écriture). Quel que soit le type de pâte, il s'agit de cellulose.

**La mise en pâte kraft** est un procédé chimique alcalin à haute pression et haute température qui dissout la plus grande partie de la lignine des copeaux de bois et sépare ainsi les fibres. La liqueur de cuisson usée (liqueur noire) contient de la lignine dissoute et de l'hémicellulose ainsi que des produits chimiques inorganiques. Elle est concentrée et utilisée comme combustible dans une chaudière de récupération afin de produire de la vapeur et de l'électricité. Les usines modernes de pâte kraft peuvent être autosuffisantes en énergie et certaines vendent même de l'électricité. Le rendement typique de la pâte kraft de bois va de 40 à 50 %, selon l'essence du bois et la catégorie de pâte. La cuisson kraft est de loin le procédé le plus utilisé au monde, mais reste minoritaire au Québec où le prix relativement bas de l'électricité favorise la mise en pâte mécanique.

Pour la **mise en pâte mécanique**, on triture les copeaux de bois dans des raffineurs à disques entraînés par de puissants moteurs électriques. Le rendement peut atteindre 95 %, parce que les polysaccharides ou l'hémicellulose et la lignine demeurent essentiellement intacts. Les volumes de résidus de cette forme de mise en pâte sont donc très limités. La mise en pâte thermomécanique est le procédé dominant au Québec.

Comme sources de matière ligneuse pouvant être utilisées pour le bioraffinage, il y a donc certains sous-produits de sciage (contenant de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine) et les résidus de mise en pâte chimique (qui contiennent surtout de l'hémicellulose et de la lignine). La cellulose, qui sert à la fabrication de la pâte à papier, pourrait bien sûr servir, elle aussi, à la fabrication de carburants ou de produits chimiques, comme nous le verrons un peu plus loin. Dans tous les cas, c'est une simple question de rentabilité (coûts de transformation versus prix de vente). Lorsque les sous-produits sont utilisés comme source d'énergie pour la production de chaleur ou d'électricité, un modèle économique devra déterminer si la production d'éthanol, de biodiesel ou de tout autre produit chimique envisagé est plus rentable que l'utilisation actuelle.

On trouvera à l'annexe 2 un tableau récapitulatif des usines de pâtes et papiers du Québec, indiquant leur situation géographique, le type de mise en pâte et le volume de bois autorisé à être consommé provenant du registre forestier du ministère des Ressources naturelles et de la Faune.

Il existe une autre source importante de matière première potentielle, celle que représentent les houppiers et autres formes de bois qui sont laissées sur les parterres de coupe. Des études sont en cours quant à la faisabilité de récupérer cette fibre. Ici encore, il faudra analyser la rentabilité de récolter cette matière première pour la production de biocarburants ou autres bioproduits.

Enfin, il faut mentionner la possibilité de planter systématiquement certaines essences ligneuses à croissance rapide (de l'aulne, par exemple) et de les récolter à intervalles réguliers de cinq ou six ans. C'est une voie qu'explore actuellement Weyerhaeuser en collaboration avec Chevron aux États-Unis; elle est toutefois réservée aux entreprises possédant de grandes surfaces propres à ce genre d'agroforesterie.

## 2.3 Les produits de base offerts par la biomasse et leurs applications possibles

Comme nous l'avons indiqué ci-dessus, la matière ligneuse contient de la cellulose, de l'hémicellulose, de la lignine, des matières extractibles et des minéraux en petites quantités. Voyons rapidement les caractéristiques chimiques de ces composants et les principaux produits commerciaux que l'on peut fabriquer à partir de ceux-ci.

- **L'hémicellulose**

L'hémicellulose est un sous-produit de la mise en pâte chimique. Constituée de polysaccharides (polymères des sucres), elle est composée de plusieurs sucres simples alors que la cellulose ne contient que du glucose.

Dans les usines de pâte chimique du Québec, on brûle les produits solubilisés de l'hémicellulose et la lignine pour produire de la chaleur ainsi que de l'électricité, et l'on recycle les produits chimiques inorganiques qui sont alors transformés en liqueur fraîche de cuisson. La plus grande partie de cette hémicellulose pourrait être affectée à des usages plus rentables.

L'hémicellulose des feuillus contient des pentoses (sucres à cinq atomes de carbone) difficiles à fermenter soit à cause des sucres simples ou des polymères courts qu'ils contiennent, soit à cause d'autres composés (acide acétique et formique, furfural, composés phénoliques) qui s'opposent à la fermentation.

Dans le cas des essences de bois résineux, l'hémicellulose est principalement composée d'hexoses (sucres à six atomes de carbone) faciles à fermenter. Contrairement à celle des essences feuillues, l'hémicellulose des résineux contribue à augmenter la résistance du papier, d'où l'importance de ne pas l'extraire totalement de la pâte.

Quant aux produits dérivés de l'hémicellulose, on les classe en plusieurs catégories :

- Les matières polymères : additifs pour la fabrication du papier, de pellicules d'emballage transparentes, de produits pharmaceutiques, etc.
- Les sucres (comme les divers monosaccharides et oligosaccharides) et le xylitol, qui servent de précurseurs à une large gamme de produits
- Les produits de fermentation : éthanol (employé comme biocarburant ou comme produit chimique servant à d'autres applications), butanol, acide lactique, etc., servant de précurseurs à de nombreux autres produits.

La rentabilité relative à la fabrication de l'un ou l'autre de ces produits dépend en particulier du rendement financier offert par ce produit par comparaison avec la valeur marchande des produits actuels de l'usine. Supposons qu'une usine de pâte chimique ayant un rendement de 45 % vende sa pâte au prix de 800 \$ la tonne; elle obtient une valeur de 360 \$ par tonne de bois. Si cette même usine décidait d'utiliser ses copeaux pour fabriquer, par exemple, de l'éthanol à 0,50 \$ le litre, et obtenait 500 litres d'éthanol par tonne de bois, elle ne recevrait que 250 \$ la tonne, soit beaucoup moins que la valeur de la pâte. Il faudrait bien entendu tenir compte aussi des frais de production dans les deux cas, mais il est à peu près certain que c'est seulement en utilisant les résidus d'hémicellulose dissous dans la liqueur de cuisson — et non les copeaux — que la production d'éthanol par fermentation afficherait une certaine rentabilité.

- **La lignine**

La lignine est un polymère à poids moléculaire élevé composé de nombreux monomères phénoliques. Chimiquement, elle contient plusieurs types de groupes fonctionnels, ce qui en fait une source potentiellement riche en produits chimiques divers.

La lignine dissoute dans la liqueur de cuisson obtenue par la mise en pâte chimique est généralement concentrée et utilisée comme combustible dans une chaudière de récupération. Des procédés en cours d'élaboration, notamment par acidification de la liqueur de cuisson, permettent de la précipiter et donc de la récupérer sous forme solide. L'« extraction » de la lignine est à l'étude dans deux usines de pâte canadiennes, l'objectif étant d'évaluer les méthodes d'extraction et de purification, puis de trouver des façons de la modifier.

Les produits commerciaux envisageables comprennent notamment les lignosulfonates, les phénols et les polyols, le polyuréthane, le charbon activé, les fibres de carbone et les antioxydants. Jusqu'ici, la plupart des produits fabriqués à partir de la lignine se sont révélés peu concurrentiels par rapport à ceux de l'industrie pétrochimique. Cependant, les conditions semblent changer, et les modèles économiques dont il a été question précédemment devront déterminer à quel moment et pour quels produits la production commerciale devient rentable.

Comme on le verra plus loin, Tembec à Témiscaming fabrique des adhésifs pour les panneaux de bois, et l'entreprise poursuit ses recherches dans ce domaine en collaboration avec la division Forintek de FPIInnovations. Quant aux entreprises Abitibi-Bowater et Goodyear, en collaboration avec l'Université Lakehead, elles travaillent actuellement à la fabrication d'un substitut au noir de carbone entrant dans la fabrication des pneus.

Quelques chiffres sur l'économie de la lignine :

- On pourrait extraire de l'industrie papetière du Québec un total de 130 000 tonnes de lignine par année (basé sur un potentiel d'extraction conservateur de 5 % de la lignine produite dans les usines de pâte du Québec) sans nuire au reste du procédé de mise en pâte;
- Valeur thermique de la lignine : 200 \$/tonne;
- Valeur des résines dérivées de la lignine : 400 \$/tonne de lignine;
  - Adhésifs pour panneaux (déjà commercialisés),
  - Polyuréthanes (à moyen terme),
  - Fibres de carbone (à long terme);
- Valeur du noir de carbone dérivé de la lignine : 1 000 \$/tonne ou plus;
  - Utilisation dans les pneus (moyen terme).

- **La cellulose**

Même si la cellulose ne semble pas *a priori* présenter un potentiel particulièrement attrayant pour le bioraffinage dans le cadre des pâtes et papiers, puisque c'est l'ingrédient essentiel de la pâte, il semble exister certaines possibilités susceptibles d'intéresser quelques entreprises.

La cellulose est une molécule linéaire constituée d'une longue chaîne dont chaque maillon est un glucose. On la trouve surtout sous forme cristalline, ce qui la rend très résistante aux attaques chimiques et aux contraintes mécaniques.

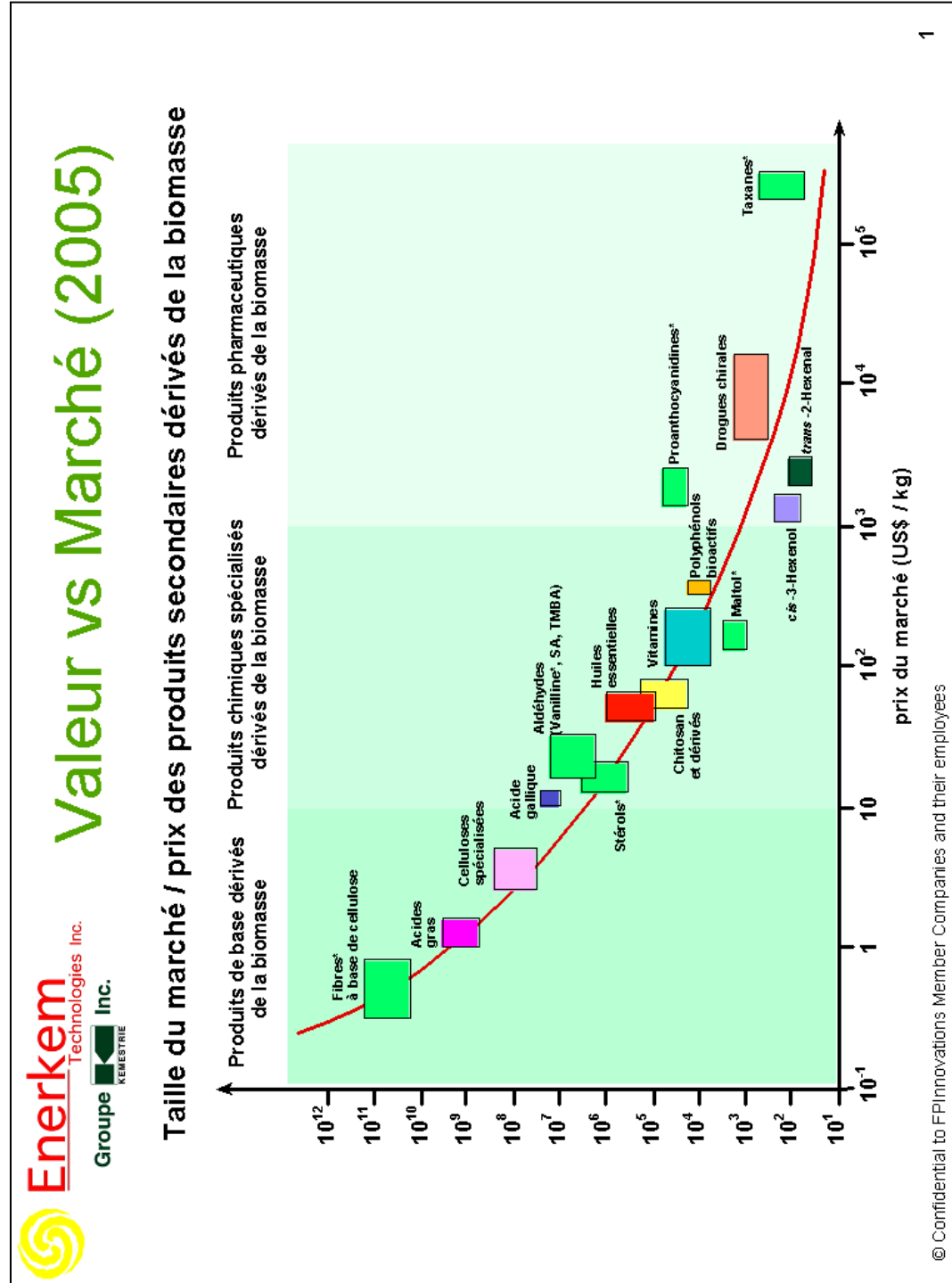
L'industrie de la cellulose chimique est aussi ancienne que celle des pâtes et papiers. La cellulose est extraite par des procédés de mise en pâte chimique classiques (kraft ou sulfate, bisulfite ou préhydrolyse). La pâte produite doit ensuite être blanchie afin d'obtenir une qualité de cellulose particulièrement pure. Elle est alors convertie en dérivés chimiques ou rendue soluble et régénérée sous forme de fibres et pellicules de cellulose comme les pellicules d'acétate de cellulose (polyesters) pour emballage et les filtres de cigarette, ou encore comme les tissus et les câbles en rayonne. Les dérivés commerciaux de la cellulose comprennent aussi la nitrocellulose (explosif) et les polyéthers employés comme additifs dans la crème glacée, les shampoings, les détergents et les peintures. La matière de base est habituellement du bois, mais on peut aussi préparer la cellulose à partir d'autres plantes.

Comme tous les nanomatériaux (nm), la nanocellulose cristalline est minuscule et ses propriétés sont différentes de celles du matériau dont elle a été extraite. On l'obtient sous forme d'aiguilles (200 nm sur 10 nm) en contrôlant la digestion acide de la cellulose. Découverte par un chercheur suédois dans les années 1950, développée par un chercheur de l'Université McGill dans les années 1990 et produite en quantités de plusieurs kilogrammes par Paprican dans les années 2000, elle offre entre autres propriétés un rapport résistance-poids exceptionnel, une capacité de transformation en pellicule et l'efficacité des cristaux liquides. On peut l'utiliser comme agent de renforcement des polymères biodégradables et des nanocomposites, comme additif dans la peinture et le vernis et aussi pour empêcher l'infiltration des gaz à l'intérieur des emballages. Les méthodes actuelles permettent d'en fabriquer des kilogrammes par jour et la prochaine étape est d'en produire des tonnes.

- **Les matières extractibles**

Les matières extractibles contenues dans le bois peuvent également servir à la fabrication de nombreux produits chimiques. Les volumes étant faibles, ces produits ne présentent un intérêt que si leur prix de vente est très élevé et leur fabrication relève plutôt de petites unités de production spécialisées. Cependant, ce développement ne semble possible qu'à l'ombre d'importants complexes comme les usines de pâtes et papiers, capables de gérer les grands volumes correspondants de lignine, cellulose et hémicellulose.

- ▶ En complément aux paragraphes ci-dessus, on trouvera à l'annexe 3 la référence d'un document produit par le ministère de l'Énergie américain indiquant les divers produits que l'on peut fabriquer à partir du pétrole et de la matière ligneuse. On trouvera également dans le diagramme ci-joint une courbe indiquant, pour un certain nombre de produits dérivés de la matière ligneuse, leur prix de vente par rapport au volume de la demande.



Le diagramme ci-dessus illustre, sur une échelle logarithmique, le prix de vente de certains produits du bioraffinage (en \$ US/kg, prix de 2005) par rapport au volume de la demande annuelle (en kilogrammes). À titre d'exemples, les acides gras, qui représentent un marché de un million de tonnes (10<sup>9</sup> kg, soit 1 000 000 000 kg) par année ont une valeur marchande d'environ 2 \$ US/kg, alors que les vitamines, d'une valeur de l'ordre de 200 \$ US/kg, ne représentent qu'un marché d'une vingtaine de tonnes (2 X 10<sup>4</sup> kg, soit 20 000 kg).

### 3. LES PRINCIPALES TECHNIQUES DE BIORAFFINAGE

#### 3.1 La fermentation

La fermentation est une des méthodes offertes à l'industrie des pâtes et papiers pour diversifier sa gamme de produits et améliorer sa rentabilité. Même si les nouvelles usines de production d'éthanol-carburant ou autres annoncées dans la presse font appel au maïs plutôt qu'à la matière ligneuse, il existe diverses façons très réalistes permettant de récupérer les sucres présents dans certains circuits et de les fermenter pour fabriquer de l'éthanol ou d'autres produits [acétone, acide lactique, propanediol, poly-hydroxy-butyrates (PHB) et autres précurseurs de polymères], selon les types de sucres présents dans la solution et selon le microorganisme choisi.

Des travaux de recherche sont en cours au Québec et ailleurs sur différentes sources de matières premières, procédés, produits précurseurs et produits secondaires. Bien évidemment, ces études portent aussi sur les moyens d'améliorer la faisabilité économique des différents procédés, souvent le principal obstacle auquel font face les entreprises qui souhaitent s'engager dans cette voie. Nous nous contenterons d'évoquer ci-dessous les techniques les plus susceptibles de présenter un intérêt à court ou moyen terme pour l'industrie des pâtes et papiers.

- **Fermentation de liqueur usée de sulfite**

La liqueur usée de sulfite contient des hémicelluloses et des sucres en solution que l'on peut fermenter pour obtenir de l'éthanol (comme le fait Tembec) ou d'autres produits. Le reste de la liqueur de sulfite contient des lignosulfonates vendus pour différentes applications comme la fabrication du béton.

- **Fermentation d'une solution obtenue par préhydrolyse des copeaux**

La fabrication de papier exige que l'on conserve une partie de l'hémicellulose présente dans le bois. Si, par contre, la pâte est destinée à la transformation chimique (fabrication de rayonne, par exemple), il faut extraire toute l'hémicellulose. On soumet alors les copeaux à une préhydrolyse à l'aide de vapeur ou d'acide avant de les acheminer à la cuisson. La solution obtenue contient des sucres fermentables. Ce procédé est, semble-t-il, en voie d'exploitation commerciale dans une usine qui s'est jusqu'ici contentée d'utiliser les sucres résultants de l'hydrolyse comme combustible.

- **Extraction de polymères dans les effluents**

La fabrication de la pâte entraîne la production d'effluents qu'il faut traiter avant de s'en défaire, en tenant compte des normes environnementales en vigueur. Ces effluents, contrairement à ceux provenant des eaux usées municipales, sont typiquement faibles en nutriments, mais riches en carbone. Cette caractéristique a un avantage : les bactéries qui digèrent la matière organique contenue dans les effluents la convertissent en polyhydroxybutyrates (PHB), un monopolymère servant à la fabrication de matières plastiques biodégradables. Une coentreprise d'Archer Daniels Midland Company (ADM) et de Metabolix Inc., fabrique de telles matières plastiques dans une usine de l'Iowa aux États-Unis, dont la capacité annoncée est de 50 000 tonnes par année.

- **Fermentation de matière cellulosique**

Mis à part les procédés mentionnés ci-dessus, le bioéthanol-carburant provient en presque totalité de la fermentation de l'amidon de maïs ou d'autres plantes annuelles, l'exemple le plus proche étant l'usine de Greenfield Ethanol à Varennes, d'une capacité annuelle de 160 000 000 litres. Les projets de fermentation de biomasse cellulosique (à partir de copeaux, d'autres formes de bois sous-utilisées ou de bois provenant de plantations à rotation courte) n'en sont encore qu'à l'état de projet. Cette situation s'explique en bonne partie par la stabilité chimique de la cellulose cristalline du bois qui exige une technologie plus complexe, donc plus coûteuse. Le procédé comporte un prétraitement pour désintégrer la matière ligneuse, une hydrolyse enzymatique pour libérer les sucres et la fermentation proprement dite. L'avenir de ces projets dépend non seulement du prix du pétrole, mais aussi des obstacles qui peuvent nuire au développement de biocarburants à partir de plantes agricoles (effet sur les prix des aliments, par exemple).

- **Traitement anaérobique**

Bien que le traitement anaérobique (c'est-à-dire en l'absence d'oxygène) d'effluents en solution et la digestion d'effluents solides ne constituent pas à proprement parler une fermentation, ces procédés se retrouvent souvent dans la même catégorie, sans doute parce que l'on emploie des microorganismes (des bactéries, cette fois) pour transformer les résidus solubles ou solides en méthane. Ce méthane pourrait en principe servir de base à une industrie biochimique, mais la réalité économique veut que, pour le moment, il serve essentiellement de combustible (voir l'exemple de Tembec ci-dessous). Comme dans le cas de la fermentation des boues, le traitement anaérobique génère donc un produit « vert » valorisé tout en apportant une solution à un problème environnemental.

### **3.2 Les procédés thermochimiques**

La gazéification et la pyrolyse sont des procédés thermochimiques au cours desquels on soumet la matière première organique (la matière ligneuse) à de très hautes températures afin de la transformer en gaz synthétique (gazéification) ou en liquide (pyrolyse). Dans les deux cas, on transforme des molécules complexes en molécules plus simples et l'on obtient, d'une matière possiblement mixte ou hétérogène, une matière plus homogène, donc plus facile à employer dans les procédés de transformation chimique. On perd en contrepartie les molécules complexes qui pourraient avoir une valeur particulière, d'où l'importance d'évaluer avec soin les différentes options avant de prendre une décision.

- **La gazéification**

Le produit de la gazéification est un gaz très inflammable composé principalement de monoxyde de carbone, d'hydrogène et de diverses quantités de dioxyde de carbone, d'oxydes d'azote, de vapeur d'eau et d'autres gaz en faibles concentrations, selon l'alimentation et les conditions d'exploitation.

Le gaz synthétique (ou gaz de synthèse) ainsi obtenu est couramment utilisé comme source d'énergie pour la production de chaleur ou d'électricité. On peut également en augmenter la valeur en le transformant en produits chimiques comme le méthanol, le méthoxyméthane, le biodiesel ou l'essence.

Plusieurs usines pilotes exploitant ainsi la biomasse sont en cours de construction et l'on connaîtra bientôt leur efficacité. La gazéification est plus complexe que la fermentation et elle exige davantage de capitaux, mais le rendement chimique peut être plus élevé. Elle présente aussi l'avantage de pouvoir utiliser d'autres sources de résidus organiques, comme certains déchets municipaux.

L'ajout de la gazéification à la panoplie de techniques de transformation de l'industrie des produits forestiers semble logique pourvu, bien sûr, que les modèles économiques le justifient. On trouvera à l'annexe 3 un bon aperçu des produits fabricables grâce à la gazéification.

- **La pyrolyse**

La pyrolyse donne un liquide souvent appelé biohuile, bien qu'il ne se mélange pas au pétrole et ne soit pas réellement une huile. Les « huiles » de la pyrolyse sont des mélanges complexes visqueux et très acides de composés phénoliques et d'autres précurseurs chimiques contenant jusqu'à 30 % d'eau. La composition exacte dépend de la matière première employée et des conditions de fabrication. Comme pour le gaz synthétique, les huiles de pyrolyse peuvent être brûlées lorsqu'on ne peut employer du combustible solide soit dans une chaudière conçue pour fonctionner au gaz naturel ou avec des huiles visqueuses. Leur pouvoir calorifique n'est que la moitié de celui de l'huile lourde.

Dans certains cas, il sera plus avantageux de fractionner les huiles de la pyrolyse pour en extraire des produits chimiques d'intérêt commercial. Comme la gazéification, le procédé est gourmand en ce qui a trait aux capitaux et les analyses de rentabilité seront d'autant plus critiques que la valorisation des huiles de pyrolyse exigera probablement la conception de techniques nouvelles adaptées aux besoins.



## 4. LES CLÉS DU SUCCÈS

### 4.1 Les enjeux

- **Diversifier pour prospérer**

L'industrie québécoise des pâtes et papiers souffre de la concurrence d'entreprises étrangères qui bénéficient de grands volumes de matière première relativement bon marché et de coûts d'exploitation plus faibles. À l'instar de l'industrie canadienne des pâtes et papiers, elle fait simultanément face à une baisse structurelle de la demande de papier journal et de pâte commerciale traditionnelle. Comme la plupart des industries de première transformation, elle doit envisager des stratégies de diversification majeure pour retrouver sa rentabilité et continuer à jouer le rôle économique qui est le sien depuis des décennies dans les régions ressources.

- **Connaissance de la matière première et infrastructures**

L'industrie connaît parfaitement la matière ligneuse, les caractéristiques des différentes essences ainsi que les techniques d'aménagement forestier et de récolte assurant la durabilité à long terme des ressources. Elle est intégrée à un système qui comprend également le sciage et la production de panneaux, et bénéficie d'une importante infrastructure de transport qui la lie à la fois à la forêt (routes) et aux grands centres urbains canadiens et étrangers (transport routier, ferroviaire ou maritime). Les complexes de pâtes et papiers sont équipés de systèmes de récupération de l'énergie et de résidus organiques ou inorganiques. Ils sont aussi dotés d'équipement pour la production de produits chimiques de base (soude caustique, par exemple). L'industrie dispose par ailleurs d'une infrastructure de vente qui est en liaison avec tous les marchés mondiaux importants. Enfin, dans la perspective d'un monde qui privilégie la recherche de ressources renouvelables et la réduction des gaz à effet de serre (GES), l'accès à de grandes étendues forestières aménagées représente un atout majeur.

- **Expérience de la chimie industrielle du bois**

Les techniques de production de pâte exigent une bonne maîtrise de la chimie industrielle. Au cours des années, l'industrie s'est dotée de nouvelles connaissances pour améliorer l'efficacité de ses procédés, augmenter la qualité et la quantité de la pâte produite quant à la matière première disponible, minimiser et utiliser les résidus, et trouver des solutions aux divers problèmes compromettant la qualité de l'air, de l'eau et des sols. Dans certains cas, la solution de ces problèmes a conduit au développement de produits à valeur ajoutée susceptibles de contribuer à la profitabilité du groupe industriel. Ainsi, la fabrication de résines chez Tembec contribue à valoriser la liqueur de sulfite, sous-produit de la mise en pâte.

- **Appui de la recherche**

L'industrie québécoise des pâtes et papiers bénéficie d'études scientifiques et techniques réalisées par plusieurs universités et centres de recherche qui se consacrent directement ou indirectement à la transformation chimique et mécanique de la matière ligneuse. On trouvera à l'annexe 4 une liste de ces centres ainsi que quelques exemples de domaines de recherche touchant le bioraffinage ou susceptibles de faciliter le développement industriel dans cette direction. Le Réseau canadien de bioraffinage forestier, créé en 2007, regroupe des universitaires et des chercheurs désireux de collaborer au développement de ce nouveau secteur d'activité.

- **Appui des gouvernements pour la recherche en transformation**

En 2007, le gouvernement fédéral a annoncé un programme de 55 millions de dollars sur trois ans pour encourager l'innovation forestière et l'investissement dans les techniques transformatrices. Il accordait dans le même temps 10 millions de dollars supplémentaires (toujours sur trois ans) au Centre canadien de la fibre ligneuse (Service canadien des forêts et division virtuelle de FPIInnovations) pour poursuivre des recherches destinées à transformer l'industrie forestière. Au nombre des cinq thèmes sur lesquels FPIInnovations doit se concentrer, on trouve notamment la création de nouvelles chaînes de valeur, d'énergie et de produits chimiques issus de la biomasse et de bioproduits d'origine ligneuse.

Le gouvernement du Québec a lancé en 2006 la stratégie énergétique du Québec 2006-2016, intitulée : *L'énergie pour construire le Québec de demain*. Cette stratégie porte notamment sur l'utilisation de la matière ligneuse pour produire de l'énergie grâce entre autres au bioraffinage. Par ailleurs, il a lancé, en février 2008, le Livre vert : *La forêt, pour construire le Québec de demain*, qui propose en particulier l'établissement d'une stratégie de développement industriel basée sur les produits à haute valeur ajoutée tels que l'« énergie verte », issue du bioraffinage, le biodiesel, l'éthanol, le méthanol, etc. Le Livre vert préconise par ailleurs l'introduction de mesures destinées à soutenir l'innovation dans cette perspective. Il faut aussi mentionner l'avantage que représente pour l'industrie la politique fiscale particulièrement généreuse du Québec pour les industriels qui investissent dans la recherche.

## **4.2 Le bioraffinage au Québec**

Nous nous limiterons à deux exemples qui ont atteint le stade de l'exploitation commerciale : Tembec et Enerkem.

- **Tembec**

Selon son site Web, Tembec Inc. est producteur de pâte depuis 1973. La compagnie produit aussi des résines à base de lignosulfonates depuis 1984, de l'éthanol depuis 1991 et du biogaz depuis 2006. C'est aujourd'hui le deuxième fournisseur d'alcool industriel au Canada. Cet alcool, obtenu par fermentation de sucres présents dans la liqueur de sulfite, est pur à 95 % et il est destiné à la fabrication de produits pharmaceutiques et à la consommation humaine. Le volume produit représente, semble-t-il, la moitié de la consommation canadienne d'alcool industriel.

Tembec est aussi le deuxième fabricant mondial de lignosulfonates. Initialement destinés à la combustion, ces lignosulfonates servent maintenant à de nombreuses applications, dont la fabrication de résines adhésives pour les panneaux composites (recherche réalisée en collaboration avec FPInnovations) et d'adjuvants pour béton (55 % de la production de ce dernier). On peut aussi mentionner le noir de carbone.

Quant aux installations de traitement anaérobique de l'entreprise, ce sont les plus importantes en Amérique du Nord, et le biogaz obtenu remplace 80 % du gaz naturel originellement consommé pour le séchage rapide de pâte de haut rendement.

- **Enerkem**

Enerkem inc. a mis au point une méthode de gazéification et de conversion catalytique du gaz de synthèse et elle exploite depuis 2003 une usine pilote, à Sherbrooke, produisant des biocarburants de transport de deuxième génération (méthanol, éthanol cellulosique).

Une première usine de démonstration commerciale d'une capacité de cinq millions de litres d'éthanol cellulosique par année doit ouvrir ses portes à Westbury (Québec) avant la fin de 2008. Selon le site Web de l'entreprise, ce sera une des premières usines de production d'éthanol cellulosique au monde.

En 2008, Enerkem s'est associée à Éthanol GreenField, un important producteur d'éthanol à partir du maïs, pour développer des projets canadiens. Elle s'appuie également sur les travaux de recherche de l'Université de Sherbrooke dans le domaine des biocarburants.

Jusqu'ici, l'entreprise utilise des sources de fibres urbaines (vieux poteaux électriques et autres déchets ligneux), mais elle travaille avec FPInnovations à intégrer son procédé de gazéification à une usine de pâte.

#### **4.3 L'importance des partenariats**

Malgré les nombreux atouts dont dispose l'industrie québécoise des pâtes et papiers pour diversifier ses activités par le bioraffinage, l'expérience extérieure montre que rares sont les papetières qui prennent le risque d'affronter seules les défis que soulève cette expansion. Au Canada et aux États-Unis, de même qu'en Europe, les candidats au bioraffinage à base de matière ligneuse établissent d'abord un partenariat avec une entreprise bien implantée dans le milieu de la pétrochimie.

- **Besoin de connaissances complémentaires**

Le premier objectif d'un tel partenariat est d'obtenir l'accès à la technologie souvent pointue qu'exige la fabrication de produits situés hors de la zone de connaissances traditionnelles d'une usine de pâtes et papiers. Le partenaire apporte ainsi son expérience des nombreux produits possibles issus du raffinage (voir annexe 3) et des procédés de fabrication de produits prometteurs, à partir des substances chimiques de base, tels que phénol, éthanol ou méthanol. Il connaît les marchés correspondant aux différents produits, leur potentiel de croissance, la structure de prix et, le cas échéant, la valeur ajoutée que peut conférer un produit « vert ». Il a, de plus, l'avantage d'être connu par les clients éventuels.

- **Apports en capital**

Contrairement à l'industrie forestière, les grandes pétrolières affichent des bénéfices exceptionnels. Si l'on fait abstraction de la situation qui prévaut en cette fin de 2008, et des problèmes bancaires qui se répercutent dans l'ensemble du réseau économique, leurs inquiétudes relèvent plutôt de la raréfaction et de l'accessibilité à plus ou moins long terme de leur matière première qu'est le pétrole. Indépendamment des décisions gouvernementales relatives à la diminution des gaz à effet de serre, elles souhaitent améliorer leur image de marque et se donner un profil plus écologique, d'où leur intérêt à investir dans le bioraffinage. Dans certains cas, l'alliance d'une papetière et d'une pétrolière représente également un moyen de financer la diversification.

- **Exemples de partenariat :**

On trouvera ci-dessous quelques exemples de partenariats entre entreprises du secteur forestier et du secteur pétrolier ou pétrochimique.

- **... en Amérique du Nord**

#### **Weyerhaeuser — Lignol**

En septembre 2008, Weyerhaeuser Company et Lignol Energy Corporation ont annoncé à Vancouver la signature d'une entente de principe dans le but d'explorer la commercialisation de produits biochimiques provenant de la technologie développée par Lignol, une entreprise canadienne spécialisée dans la création de techniques de bioraffinage pour la production d'éthanol de qualité carburant et autres produits biochimiques à partir de la biomasse non alimentaire. Il est à noter que l'entente exclut les carburants destinés au transport. Dans ce cas, l'intérêt de Weyerhaeuser semble bien être d'ordre strictement technique, l'objectif étant de diversifier ses activités en y ajoutant une gamme de bioproduits dérivés des sous-produits de ses usines de pâte.

#### **Red Shield Environmental (RSE) — American Process**

En avril 2008, le US Department of Energy a accordé un montant de 30 millions de dollars à un projet de bioraffinerie soutenu par un consortium de 22 partenaires américains et canadiens, dont RSE Pulp and Chemical, American Process Inc. et l'Université du Maine (Orono). RSE, qui a repris l'ancienne usine de pâte kraft de Georgia-Pacific de Old Town (Maine), a démontré en laboratoire et en usine pilote la viabilité d'un procédé qu'elle a mis au point pour la production d'éthanol cellulosique à partir d'hémicellulose provenant de l'usine de pâte. L'objectif est de confirmer la viabilité de l'exploitation commerciale<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> En novembre 2008, l'usine de RSE a été vendue à un nouvel investisseur. Il est donc difficile de prévoir aujourd'hui ce que lui réserve l'avenir.

## **Weyerhaeuser — Chevron**

En février 2008, Weyerhaeuser Company et Chevron Corporation ont annoncé le lancement d'une coentreprise, Catchlight Energy LLC, qui se consacre à la recherche et au développement de technologies pour transformer la biomasse cellulosique en biocarburants. Weyerhaeuser, qui possède de vastes territoires boisés, estime que la matière ligneuse représente une solution durable aux problèmes d'approvisionnement en carburant. Il s'agirait dans ce cas d'exploiter des essences à croissance rapide (aulne ou autres, par exemple) sur une base de rotation de quatre ou cinq ans. La filière forestière offre l'avantage supplémentaire d'éviter les conséquences qu'entraîne le recours au maïs et aux autres sources servant à l'alimentation humaine, notamment l'augmentation du prix des aliments.

## **Abitibi-Bowater — Goodyear — FPIInnovations — Université Lakehead**

En juillet 2008, un symposium tenu par l'Université Lakehead de Thunder Bay (Ontario) faisait le point sur un programme de recherche orienté sur la biochimie et le développement de produits à partir de la lignine générée par les papetières. Le programme, qui bénéficie de l'appui financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG), fait aussi intervenir la papetière Abitibi-Bowater et le fabricant de pneus Goodyear, qui s'intéresse en particulier au potentiel de la lignine pour le remplacement de ses sources traditionnelles de noir de carbone. Jusqu'à présent, cette collaboration n'a pas pris la forme d'un partenariat véritable.

### ➤ ... en Europe

## **Choren**

Basée en Allemagne, la société Choren Industries a annoncé la construction d'une usine de gazéification et de synthèse, conçue pour transformer 75 000 tonnes par année de matière ligneuse (bois de résineux et écorces, principalement) en biodiesel. La capacité de la nouvelle usine est de 16 millions de litres, ce qui représente une étape commerciale intermédiaire entre les 4 millions de litres de l'usine pilote actuelle et les 250 millions de litres prévus pour la prochaine étape. Le site choisi pour ce projet se trouve à Schwedt, à proximité de la plus grosse raffinerie pétrochimique d'Allemagne, gérée par PCK, qui est du reste partenaire de Choren, de même que Linde Engineering, Shell et Jakko Pöyry. Le coût du projet en cours est estimé à plus de 800 millions d'euros. En plus des subventions et autres garanties gouvernementales, Choren s'est acquis le soutien de Daimler et Volkswagen.

## **Stora Enso — Neste Oil**

Dans le cadre d'une coentreprise nommée NSE Biofuels OY, la papetière Stora Enso et la pétrolière Neste Oil, toutes deux finlandaises, ont annoncé la construction d'une usine de démonstration de 14 millions d'euros conçue, elle aussi, pour la fabrication de biodiesel à partir de la matière ligneuse par voie thermo-chimique. Elle sera située à proximité de la papeterie de Stora Enso à Varkaus. La nouvelle entreprise travaille en étroite collaboration avec le centre de recherche VTT, d'Helsinki, qui possède une bonne expérience en matière de gazéification. Les partenaires ont également annoncé le lancement ultérieur d'une usine commerciale. Leur communiqué de presse rappelle que l'Union européenne s'est engagée à remplacer 5,75 % (soit 18 millions de tonnes) des carburants fossiles actuellement consommés pour le transport par des biocarburants d'ici 2010, et 10 % (30 millions de tonnes) d'ici 2020.

## **Chemrec**

Chemrec est une entreprise suédoise qui exploite une usine pilote de gazéification de liqueur noire sous pression à haute température en marge d'une usine kraft située à Piteå (Suède). Elle a aussi construit une usine de gazéification de liqueur noire à pression atmosphérique qu'exploite Weyerhaeuser à son usine de New Bern (Caroline du Nord). Chemrec a récemment annoncé son intention d'implanter une petite usine de diméthyléther qui utilisera le gaz synthétique provenant de Piteå, dans le cadre d'un projet de 28 millions d'euros financé par l'Union européenne pour encourager la production de biocarburants. En 2007, Chemrec a également annoncé, avec l'entreprise papetière américaine NewPage, la réalisation d'une étude de faisabilité pour un autre projet de gazéification de liqueur noire lié à l'usine de NewPage d'Escanaba (Michigan).

## **Lignoboost**

STFI-Packforst, une entreprise suédoise de recherche et développement, a mis au point et commercialisé en 2007 le procédé Lignoboost, destiné à extraire de la lignine de haute qualité par précipitation de liqueur noire. D'une capacité de 10 000 tonnes, l'usine pilote située à Blackhammar a produit en un an quelque 4 000 tonnes de lignine en poudre qui, pour le moment, sert en partie à alimenter une usine de chauffage domestique de Stockholm. L'implantation de cette usine a bénéficié de l'appui d'entreprises connues : Södra, Stora Enso, Fortum et Nordic Paper, sans compter celui de l'Agence suédoise de l'énergie. En vendant Lignoboost AB à Metso, un équipementier majeur du domaine des pâtes et papiers, qui s'est diversifié dans la thermochimie de la matière ligneuse et d'autres sources d'énergie, les inventeurs espèrent accélérer le développement de nouveaux produits à valeur ajoutée basés sur la lignine.

## 5. CONCLUSION

L'industrie québécoise des pâtes et papiers explore de nouveaux horizons et le bioraffinage lui offre la possibilité d'accroître ses revenus en utilisant plus efficacement la matière ligneuse déjà concentrée dans ses usines ou encore inutilisée des parterres de coupe.

Les usines de pâtes et papiers représentent une solution logique pour le bioraffinage. En plus de posséder d'importantes quantités de matière première utilisable pour cette nouvelle voie de l'industrie, elles sont situées dans des régions forestières qui contiennent encore des volumes considérables de biomasse sous-utilisée, voire non utilisée. Ces usines possèdent également l'infrastructure nécessaire à l'implantation de complexes de bioraffinage, notamment pour ce qui est des services essentiels, de la gestion des résidus et du traitement des effluents.

Les possibilités techniques sont innombrables et les orientations de développement seront finalement déterminées par la nature de la matière première choisie, la valeur marchande des produits et le marché potentiel. Si les investisseurs actuels semblent s'orienter de préférence vers les biocarburants qui garantissent des volumes substantiels, d'autres préfèrent des bioproduits de plus faible volume, mais de plus grande valeur ajoutée. Dans tous les cas, le modèle d'affaires reflétant les circonstances uniques de l'entreprise permettra de guider les décisions.

Il reste beaucoup à faire pour donner aux entreprises des pâtes et papiers et aux organismes de développement les outils nécessaires pour évaluer le potentiel que représente le bioraffinage dans leur cas particulier. C'est pourquoi l'industrie, les gouvernements et les organismes de recherche tentent de faciliter la mise en œuvre de projets prenant la forme d'usines pilotes ou d'usines de démonstration commerciale. On peut penser que, dans cet esprit, le Réseau canadien de bioraffinage forestier jouera un rôle important dans l'évolution de ce nouveau secteur industriel.

Les lecteurs curieux d'approfondir certains aspects de ce dossier trouveront à l'annexe 5 quelques références utiles.



## ANNEXE 1 - PROGRAMMES DU GOUVERNEMENT DU QUÉBEC

---

### **1. Programme d'aide aux études spécialisées — Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF)**

Appuyer les entreprises dans le montage de leurs projets par la réalisation d'études de marché, de pré faisabilité, de faisabilité ou par des diagnostics d'usine ou de plan de redressement ou de plan de commercialisation.

Aide financière : Subvention de 75 % du coût de l'étude, aide maximale de 50 000 \$ par projet.  
Coût minimal de l'étude de 20 000 \$.

### **2. Programme d'aide financière au développement de technologies et de produits — MRNF**

Appuyer la conception, la recherche et le développement de produits ou de procédés nouveaux.

Aide financière : Subvention de 25 % des dépenses, maximum 300 000 \$ par projet.  
Coût minimal du projet de 200 000 \$.

### **3. Programme de réduction de la consommation de mazout lourd — Agence d'efficacité énergétique (AEE)**

Programme d'aide financière visant la réduction de la consommation de mazout lourd ou pour la conversion vers des sources d'énergie moins polluantes tels le gaz naturel et la biomasse forestière. Les quatre composantes du programme sont : A- Efficacité énergétique, B- Conversion vers la biomasse forestière, C- Conversion vers le gaz naturel et D- Conversion vers d'autres combustibles.

Aide financière : Le moindre des montants suivants : 1- Récupération du PRI à un an pour A et B; ou 2- 40 \$ la tonne de GES réduite annuellement durant un maximum de 10 ans; ou 3- 75 % des coûts pour A et B, 50 % pour C et 50 % des coûts additionnels pour D; ou 4- maximum de 2 millions de dollars par projet pour A et C et 5 millions de dollars pour B; ou 5- Montant demandé par le requérant.

Site Internet : <http://www.aee.gouv.qc.ca/industries/mazout/mazout.jsp>

#### **4. Programme de démonstration des technologies vertes visant la réduction des émissions de GES, Technoclimat — AEE**

Programme d'aide visant à soutenir le développement de technologies permettant de diminuer les émissions de GES ainsi qu'à améliorer l'efficacité énergétique dans le but de réduire la consommation d'énergie fossile et de remplacer les carburants et combustibles fossiles par de l'énergie renouvelable.

Aide financière : Aide financière pouvant atteindre 3 millions de dollars par projet, l'aide financière peut couvrir jusqu'à 50 % des dépenses admissibles. L'aide financière peut prendre la forme d'une aide remboursable ou non remboursable qui ne peut excéder 40 % des dépenses admissibles.

Site Internet : <http://www.aee.gouv.qc.ca/innovation-technologique/technoclimat/>

#### **5. Programme d'appui au secteur manufacturier — AEE**

Programme d'aide financière visant la réduction de la consommation de certains combustibles ciblés (mazout léger, propane et butane). Programme comportant deux volets : analyse et implantation.

Aide financière : Le moindre des montants suivants pour le volet analyse : 50 % des coûts admissibles ou un cumulatif maximum de 100 000 \$ par site. Le moindre des montants suivants pour le volet implantation, réduire la PRI à une année, un maximum de 75 % des coûts admissibles, un cumulatif maximum de 250 000 \$ par projet jusqu'à une limite de 1,5 million de dollars par site ou le montant original par le requérant.

Site Internet : <http://www.aee.gouv.qc.ca/clientele-affaires/industries/programmes-et-aide-financiere-destines-aux-industries/programme-dappui-au-secteur-manufacturier/>

#### **6. Programme relatif à la délivrance d'un permis autorisant, pour une certaine période, la récolte annuelle de biomasse forestière dans les forêts du domaine de l'État — MRNF (décret 722-2008, 25 juin 2008)**

Appels de propositions visant la récupération de la biomasse forestière dans les forêts du domaine de l'État.

**7. Le Livre vert *La forêt, pour construire le Québec de demain*, l'orientation 9, « Se doter d'une stratégie de développement industriel axée sur les produits à forte valeur ajoutée ».**

**8. Plan d'action sur les changements climatiques 2006-2012, *Le Québec et les changements climatiques, un défi pour l'avenir*.**

**ANNEXE 2 - USINES DE PÂTES, PAPIERS ET CARTONS CONSOMMANT DU BOIS AU QUÉBEC**

***Usines de pâtes, papiers et cartons consommant du bois<sup>3</sup> au Québec***

Entreprises/ Usines	Régions	Municipalités	Procédés de mise en pâte	Autorisation (tonnes métriques anhydres)
ABI	Saguenay– Lac-Saint-Jean	Alma	Chimico-thermo- mécanique	290 000
ABI	Abitibi- Témiscamingue	Amos	Thermo-mécanique	200 000
ABI	Côte-Nord	Baie-Comeau	Thermo-mécanique	546 000
ABI	Capitale-Nationale	Beaupré	Chimico-thermo- mécanique	195 000
ABI	Capitale-Nationale	Clermont	Thermo-mécanique	350 000
ABI	Saguenay– Lac-Saint-Jean	Dolbeau	Chimico-thermo- mécanique	210 000
ABI	Outaouais	Gatineau	Thermo-mécanique	290 000
ABI	Saguenay– Lac-Saint-Jean	Saguenay (Kénogami)	Thermo-mécanique	175 000
ABI	Mauricie	Shawinigan (Grand-Mère)	Mécanique Chimique au sulfite à haut rendement	265 100
Cascades	Bas-Saint-Laurent	Cabano	Mi-chimique au sulfite (NSSC)	176 900
Cascades	Estrie	East Angus	Chimique au sulfate (Kraft)	102 000
Cascades <sup>4</sup>	Saguenay– Lac-Saint-Jean	Saguenay (Jonquière)	Chimique au sulfate (Kraft)	205 000
Matériaux BP	Montréal	Montréal (LaSalle)	Thermo-mécanique	18 000
Matériaux BP	Capitale-Nationale	Pont-Rouge	Thermo-mécanique	75 000
Domtar	Estrie	Windsor	Chimique au sulfate (Kraft)	840 950
Fraser	Outaouais	Thurso	Chimique au sulfate (Kraft)	486 450
Kruger	Estrie	Sherbrooke (Bromptonville)	Thermo-mécanique	228 000
Kruger	Mauricie	Trois-Rivières	Thermo-mécanique Mécanique	487 350

3 Billes, copeaux, rabotures ou sciures.

4 Usines fermées indéfiniment.

Entreprises/ Usines	Régions	Municipalités	Procédés de mise en pâte	Autorisation (tonnes métriques anhydres)
Kruger- Wayagamack	Mauricie	Trois-Rivières (Île Potherie)	Thermo-mécanique Mécanique Chimique au sulfate (Kraft)	363 300
Matériaux Louiseville	Mauricie	Louiseville	Thermo-mécanique	35 000
SFK	Saguenay– Lac-Saint-Jean	Saint-Félicien	Chimique au sulfate (Kraft)	760 000
Smurfit Stone	Mauricie	La Tuque	Chimique au sulfate (Kraft)	813 400
Smurfit Stone	Bas-Saint-Laurent	Matane	Mi-chimique au sulfite (NSSC)	25 000
Tembec	Bas-Saint-Laurent	Matane	Chimico-thermo- mécanique	257 100
Tembec	Abitibi- Témiscamingue	Témiscaming	Chimico-thermo- mécanique Chimique au sulfite à bas rendement	699 300
White Birch	Outaouais	Gatineau (Masson)	Thermo-mécanique	255 000
White Birch	Capitale-Nationale	Québec	Thermo-mécanique	285 000
White Birch	Bas-Saint-Laurent	Rivière-du-Loup	Thermo-mécanique	264 000
Total : 28 usines <sup>5</sup>	9 régions	24 municipalités	6 procédés différents	8 897 850

5 Les 20 autres usines du Québec utilisent des pâtes achetées et des fibres récupérées.

**ANNEXE 3 – PRODUITS CHIMIQUES OBTENUS PAR LE RAFFINAGE  
DU PÉTROLE ET DE LA BIOMASSE**

**Voir le document suivant avec le lien hypertexte :**

*Top Value Added Chemicals from Biomass, Volume I—Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas*, Werpy, T. and Petersen, G., US Department of Energy, August 2004, [en ligne]. [<http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/35523.pdf>]



## ANNEXE 4 – LISTE DES CENTRES DE RECHERCHE QUÉBÉCOIS AYANT UN RÔLE À JOUER DANS LE BIORAFFINAGE

CANMET-Varenes — Centre de la technologie de l'énergie

Énergies renouvelables et efficacité énergétique, optimisation des procédés.

FPInnovations — Division Feric

Récolte et transport de la biomasse forestière résiduaire (parterres de coupe).

FPInnovations — Division Forintek

Résines adhésives pour panneaux provenant de liqueur sulfite résiduaire<sup>6</sup>, utilisation de la nanocellulose dans certains composites du bois.

FPInnovations — Division Paprican

Procédés d'extraction et de transformation d'hémicellulose en usine de pâte kraft, extraction et évaluation de lignine, évaluation de la gazéification, production de nanocellulose.

Université de Montréal — École Polytechnique

Intégration des procédés de bioraffinage aux usines papetières.<sup>7</sup>

Université de Sherbrooke

Chaire de recherche industrielle en éthanol cellulosique.

Université du Québec à Trois-Rivières

Sciences des pâtes et papiers (autres types de recherche).

Université Laval

Chimie du bois. Divers projets de diversification dans les domaines de l'énergie provenant de la biomasse ligneuse et du bioraffinage (nanotechnologie<sup>8</sup>, sous-produits du bioraffinage et matières extractibles).

Université McGill

Chimie verte : remplacement des solvants traditionnels par l'eau dans la fabrication de produits chimiques non polluants et de matières plastiques décomposables (neutres en carbone).

---

<sup>6</sup> En collaboration avec FPInnovations-Forintek.

<sup>7</sup> En collaboration avec FPInnovations-Paprican et CANMET.

<sup>8</sup> En collaboration avec FPInnovations-Paprican.



## BIBLIOGRAPHIE

### Survols :

“A compelling case for integrated biorefineries, Part I”, Thorp, B.A., Thorp, B.A. IV and Murdock-Thorp, L.D., Paper360, Vol. 3, No. 3, p. 14-15, March 2008.

“A compelling case for integrated biorefineries, Part II”, Thorp, B.A., Thorp, B.A. IV and Murdock-Thorp, L.D., Paper360, Vol. 3, No. 4, p. 20-22. April 2008.

“A compelling case for integrated biorefineries, Part III”, Thorp, B.A., Thorp, B.A. IV and Murdock-Thorp, L.D., Paper360, Vol. 3, No. 5, p. 12-14. May 2008.

“A compelling case for integrated biorefineries, Part IV”, Thorp, B.A., Thorp, B.A. IV and Murdock-Thorp, L.D., Paper360, Vol. 3, No. 6, p. 16-17, June/July 2008.

“From wood to fuels: Integrating biofuels and pulp production”, Ragauskas, A.J., Nagy, M., Kim, D.H., Eckert, C.A., Hallett, J.P. and Liotta, C.L. *Industrial Biotechnology*, 1 March 2006, 2(1): 55-65.

*Top Value Added Chemicals from Biomass. Volume I—Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas*, Werpy, T. and Petersen, G., US Department of Energy, August 2004, [en ligne]. [<http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/35523.pdf>]

*Top Value Added Chemicals from Biomass. Volume II—Results of Screening for Potential Candidates from Biorefinery Lignin*, Bozell, J.J., Holladay, J.E., Johnson, D., and White, J.F., US Department of Energy, October 2007, [en ligne]. [[http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical\\_reports/PNNL-16983.pdf](http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-16983.pdf)]

Cellulosic biofuels, Werner, C., Environmental and Energy Study Institute, July 2008, [en ligne]. [[http://www.eesi.org/files/eesi\\_cellethanol\\_factsheet\\_072308.pdf](http://www.eesi.org/files/eesi_cellethanol_factsheet_072308.pdf)]

### Communiqués de presse :

Chevron, avril 2007, [en ligne]. [<http://www.chevron.com/news/press/Release/?id=2007-04-12>]

Enerkem, 26 juin 2008, [en ligne]. [[http://www.enerkem.com/uploads/editor/documents/Enerkem%20Press%20Release\\_June26-2008\\_English.pdf](http://www.enerkem.com/uploads/editor/documents/Enerkem%20Press%20Release_June26-2008_English.pdf)]

Ensyn, octobre 2008, [en ligne]. [[http://www.ensyn.com/news/UOP\\_Ensyn\\_Joint\\_Venture.pdf](http://www.ensyn.com/news/UOP_Ensyn_Joint_Venture.pdf)]

DOE, 14 juillet 2008, [en ligne]. [<http://www.doe.gov/news/6413.htm>]

DOE, 18 avril 2008, [en ligne]. [<http://www.doe.gov/6164.htm>]

Choren, 11 octobre 2007, [en ligne].

[[http://www.choren.com/en/choren\\_industries/information\\_press/press\\_releases/?nid=177](http://www.choren.com/en/choren_industries/information_press/press_releases/?nid=177)]

UPM-Kymmene, 23 mai 2007, [en ligne].

[[http://w3.upmkymmene.com/upm/internet/cms/upmcms.nsf/\(\\$all\)/3ed4d077ffc471b1c22572e4002de186?OpenDocument&qm=menu,0,0,9](http://w3.upmkymmene.com/upm/internet/cms/upmcms.nsf/($all)/3ed4d077ffc471b1c22572e4002de186?OpenDocument&qm=menu,0,0,9)].

Neste Oil, 16 mars 2007, [en ligne].

[<http://www.nesteoil.com/default.asp?path=1;41;540;1259;1261;7440;7846>]

*Chevron and Weyerhaeuser Form Biofuels Joint Venture*, 29 February 2008, [en ligne].

[<http://www.omvstprodeasecp./news/022908c.asp>]

« Demain, l'or boréal », Jean-Benoît Nadeau, *L'Actualité*, 1er avril 2008, [en ligne].

[[http://www.lactualite.com/economie/article.jsp?content=20080306\\_170202\\_2512&PAGE=3](http://www.lactualite.com/economie/article.jsp?content=20080306_170202_2512&PAGE=3)]

Enerkem, [en ligne]. [<http://www.enerkem.com/index.php?module=CMS>]

*Expérience opérationnelle de bioraffinage chez Tembec Témiscaming*, Lyle Biglow, [en ligne].

[[http://www.fpinnovations.ca/pdfs/13h15-Biglow-Ethanol\\_Cellulosique-FR.pdf](http://www.fpinnovations.ca/pdfs/13h15-Biglow-Ethanol_Cellulosique-FR.pdf)]

*Lignol to Collaborate with Weyerhaeuser to Explore Commercial Development of Cellulose-based Products and Biochemicals*, 30 September 2008, [en ligne].

[[http://www.lifesciencesbc.ca/News/Member\\_Press\\_Releases/pr09300801.asp](http://www.lifesciencesbc.ca/News/Member_Press_Releases/pr09300801.asp)]

*Symposium Provides Insight on Use of Lignin in Value-Added Products*, Lakehead University, 18

July 2008, [en ligne]. [<http://communications.lakeheadu.ca/news/?display=news&nid=483>]

### Détails techniques :

*Lignin carbohydrate complexes (LCC) in the autohydrolysis extract of hardwoods*, Tunc, M.S. and van Heiningen, A.R.P., Preprints, 94th Annual Meeting, Pulp and Paper Technical Association of Canada, Montreal, 6-7 February 2008.

*Refining of Bio-Oil into Green Hydrocarbons*, Holmgren, J., BIO Pacific Rim Summit, Vancouver (BC), 10-12 September 2008.

*Case Study: 2 MWe biomass gasification plant in Güssing (Austria)*, Simander, G.R., Austrian Energy Agency, April 2004, [en ligne].

[<http://www.opet-chp.net/download/wp3/q%FCssingaustria.pdf>]

[<http://www.renet.at/english/sites/guessing/technology.php>]

*Operation experiences of Carbo-V process for FTD production*, Rudloff, M., presented at Synbios II: International Conference on the Introduction of Second Generation Automotive Biofuels, Stockholm, Sweden, 23-24 May 2007.

*The Chemrec Black Liquor Gasifier at New Bern—A Status Report*, Brown, C.A., Leary, R., Gorog, J.P. and Abdullah, Z., Preprints, 2004 International Chemical Recovery Conference, Charleston (SC). 6-11 June 2004.

*The status of the Chemrec black liquor gasification concept*, Landälv, I., 2nd European Summer School on Renewable Motor Fuels, Warsaw, Poland. 29-31 August 2007, [en ligne]. [<http://www.baumgroup.de/Renew/download/8%20-%20Landalv%20-%20slides.pdf>]

“Towards economic evaluation of a hardwood biorefinery using the ‘near-neutral’ hemicellulose pre-extraction process”, Mao, H., Genco, J.M., van Heiningen, A.R.P., and Pendse, H. J., *Biobased Materials Bioenergy*, 2: 1-9 (2008).

“Recovery of water-soluble acetylgalactoglucmannans from mechanical pulp of spruce”, Willfor, S., Rehn, P., Sundberg, A., Sundberg, K., and Holmbom, B. Tappi J., 2:(11): 27-32 (2003).

“Metabolic engineering for improved fermentation of pentoses by yeasts”, Jeffries, T. W., Jin, Y.S., *Applied Microbiology Biotechnology*, 63:495-509 (2004).

“ORNL’s Carbon Fibre Pilot Plant”, *Oak Ridge National Laboratory Review*, Vol. 40, #2, 2007, [en ligne]. [[http://www.ornl.gov/info/ornlreview/v40\\_2\\_07/index.shtml](http://www.ornl.gov/info/ornlreview/v40_2_07/index.shtml)]

*Preliminary Screening—Technical and Economic Assessment of Synthesis Gas to Fuels and Chemicals with Emphasis on the Potential for Biomass-Derived Syngas*, Spath, P.L. and Dayton, D.C., US Department of Energy, December 2003, [en ligne]. [<http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34929.pdf>]

“Feasibility Study of Sludge Lysis and Recycle in the Activated Sludge Process”, Springer, A.M., Dietrich-Velazquez, G., Higby, C.M. and DiGiacomo, D. Tappi J., 79(5), p. 162-170 (1996).

“Pulp and Paper Bio-solids Dewatering: Why We Can Win the War with Water. A Freeze/Thaw Technology Increased Final Dryness to 35% from 13%”, Kantardjieff, A. and Jones, J.P., *Pulp and Paper Canada*, 101(10), p. 56-59 (2000).

*Pulp and Paper Sludge to Energy: Preliminary Assessment of Technologies*, a Canmet Energy Technology Centre Report prepared by ADI Limited, Rappart Canmet #34, 0173–479.1 (2005).

*Operating Experience at Lake Utopia Paper Co., St. George, New Brunswick Increases Confidence in UASB Process*, Smith, M., Fournier, P. and de Vegt, A., in *TAPPI Proceedings of the International Environmental Conference*, Portland (OR), Vol. 1, p. 153-156 (1994).

*Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, Metcalf and Eddy, 4th Edition, revised by Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, H.D., McGraw-Hill, New York, NY (2003).

“Methanol Formation during Alkaline Wood Pulping”, Zhu, J.Y., Yoon, S.H., Liu, P.H., and Chai, X.S., Tappi J., 83(7): 65-78 (2000).

## **Documents d'analyse et de politiques gouvernementales :**

*Analyse de la chaîne d'approvisionnement de la bioraffinerie intégrant les industries forestières, pétrochimiques et énergétiques*, Louis Patrick Dansereau, [en ligne]. [[http://www.polymtl.ca/pate-papier/doc/LPDansereau\\_fr.doc](http://www.polymtl.ca/pate-papier/doc/LPDansereau_fr.doc)]

*Demeurer concurrentiel*, Ressources naturelles Canada, 1er septembre 2007, [en ligne]. [<http://foretscanada.rncan.gc.ca/articlesujet/121?format=print>]

Livre vert — La forêt, pour construire le Québec de demain, gouvernement du Québec, Février 2008, [en ligne]. [<http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/consultation/livre-vert.pdf>]

*Mémoire intérimaire du Conseil de l'industrie forestière du Québec portant sur le Livre vert du gouvernement du Québec* La forêt, pour construire le Québec de demain, CIFQ, Avril 2008, [en ligne]. [[http://www.cifq.qc.ca/imports/\\_uploaded/memoire-CIFQ-livre-vert.pdf](http://www.cifq.qc.ca/imports/_uploaded/memoire-CIFQ-livre-vert.pdf)]

« Tirer la meilleure valeur possible de la fibre disponible », Alain Castonguay et Gilles Brunette, *Le Couvert Boréal*, été 2008 [en ligne]. [[http://www.partenariat.qc.ca/pdf/fiches\\_tech/valorisation/OT-108\\_gilles\\_brunette.pdf](http://www.partenariat.qc.ca/pdf/fiches_tech/valorisation/OT-108_gilles_brunette.pdf)]

*Valorisation de la biomasse forestière et des résidus de transformation*, 2e symposium, ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 22 avril 2008, [en ligne]. [<http://www.quebecwoodexport.com/biomasse/documents/rouleau.pdf>]