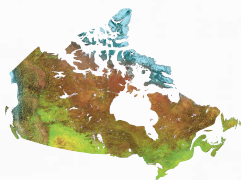


Programme
d'économie
d'énergie
dans l'industrie
canadienne



PEEIC



Réduction des coûts énergétiques dans l'industrie des pâtes et papiers – une analyse comparative de l'énergie

D.W. Francis, M.T. Towers et T.C. Browne
Institut canadien de recherches sur les pâtes et papiers
(Paprican)



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

Canada

Engager les Canadiens sur la voie de l'efficacité énergétique à la maison, au travail et sur la route

L'Office de l'efficacité énergétique de Ressources naturelles Canada renforce et élargit l'engagement du Canada envers l'efficacité énergétique afin d'aider à relever les défis posés par les changements climatiques.

Canada[!]

Réduction des coûts énergétiques
dans l'industrie des
pâtes et papiers
– une analyse comparative de l'énergie

Ce document a été produit sous la direction du comité de l'énergie de :
ASSOCIATION TECHNIQUE DES PÂTES ET PAPIERS DU CANADA
740 Notre-Dame Ouest, Suite 810
Montréal (Québec) Canada H3C 3X6
Tél. : (514) 392-6969
Fax : (514) 392-0369



No de cat. : M92-2377/2002
ISBN 0-662-66163-X

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, 2002

Pour obtenir d'autres exemplaires de cette publication, veuillez écrire à :
Initiative des innovateurs énergétiques
Office de l'efficacité énergétique
Ressources naturelles Canada
580, rue Booth, 18e étage
Ottawa (Ontario) K1A 0E4
Tél. : (613) 995-6950
Télec. : (613) 947-4121

Vous pouvez également consulter ou commander d'autres publications de l'Office de l'efficacité énergétique en ligne. Visitez notre bibliothèque virtuelle Publications Éconergie à oec.rncan.gc.ca/infosource. Le site Internet de l'Office de l'efficacité énergétique est : oec.rncan.gc.ca.



Imprimé sur
papier recyclé



TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	5
USINE MODÈLE DE PÂTE KRAFT COMMERCIALE	6
Transport des copeaux	6
Lessiveur	6
Lavage et classage	7
Délignification à l'oxygène	8
Blanchiment	8
Machine à pâte	8
Évaporation de la liqueur noire	9
Centrale thermique	9
Four à chaux et caustification	9
Système d'eau chaude	10
Traitement des eaux usées	10
Divers	10
CONSOMMATION D'ÉNERGIE DANS LES USINES DE PÂTE KRAFT COMMERCIALE EXISTANTES ET LES USINES MODÈLES	10
USINE DE PAPIER JOURNAL MODÈLE	14
Atelier de pâte thermomécanique	14
Usine de fibre recyclée	15
Machine à papier	16
Traitement des effluents	17
Usine de papier journal intégrée	17
CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DES USINES DE PAPIER JOURNAL EXISTANTES ET DES USINES MODÈLES	19
RÉDUCTION DES COÛTS DE L'ÉNERGIE DANS LES USINES EXISTANTES	22
Revue de la direction	23
Analyse des procédés et optimisation énergétique	23
Procédés et matériel de procédé	24
Stratégies d'achat d'énergie	25
Identification et choix des projets	25
Surveillance et amélioration continues du rendement	26
CONCLUSION	27
RÉFÉRENCES	28

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Consommation de vapeur de procédé – Usines de pâte kraft.	11
Figure 2. Consommation d'électricité de procédé – Usines de pâte kraft.	11
Figure 3. Besoins en combustibles fossiles achetés – Usines de pâte kraft.	12
Figure 4. Demande d'électricité nette – Usines de pâte kraft.	13
Figure 5. Consommation de vapeur de procédé – Usines de papier journal.	20
Figure 6. Consommation d'électricité de procédé – Usines de papier journal.	20
Figure 7. Besoins en combustibles fossiles achetés – Usines de papier journal.	21

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Usine moderne de pâte kraft commerciale – Consommation de vapeur et d'électricité	7
Tableau II. Usine moderne de pâte kraft commerciale – Production de vapeur et d'électricité	7
Tableau III. Usine moderne de pâte kraft commerciale – Besoins en énergie achetée	7
Tableau IV. Atelier de PTM – Consommation de vapeur et d'électricité	15
Tableau V. Machine à papier journal – Consommation de vapeur et d'électricité	16
Tableau VI. Usine moderne de papier journal – Consommation de vapeur et d'électricité	18
Tableau VII. Usine moderne de papier journal – Consommation d'énergie	18

Réduction des coûts énergétiques dans l'industrie des pâtes et papiers

D.W. Francis, M.T. Towers et T.C. Browne
Institut canadien de recherches sur les pâtes et papiers
(Paprican)

INTRODUCTION

La réduction de la consommation d'énergie peut entraîner des économies, souvent moyennant un investissement peu élevé. C'est une tâche complexe, mais accessible aux non-initiés qui ont reçu une formation appropriée. L'Association technique des pâtes et papiers du Canada (l'ATPPC) a préparé un cours abrégé sur l'efficacité énergétique dans l'industrie des pâtes et papiers. Le présent document, élaboré par l'Office de l'efficacité énergétique de Ressources naturelles Canada de concert avec l'ATPPC et Paprican, explique l'utilité d'un programme d'efficacité énergétique et décrit le contenu du cours. En particulier, il répond aux deux questions suivantes :

1. Quelles possibilités de réduction de la consommation d'énergie retrouve-t-on dans les usines de pâte et de papier?
2. Comment ces objectifs de réduction peuvent-ils être atteints?

L'analyse comparative est un outil permettant de déterminer les possibilités de réduction de la consommation d'énergie. On compare la situation d'usines similaires fabriquant le même produit [1]. On peut effectivement comparer la consommation énergétique d'une installation



à celle d'usines de même type ou à celle d'une usine modèle représentant les meilleures pratiques actuelles.

Pour illustrer les possibilités de réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre (GES) qui contribuent aux changements climatiques, on a procédé à des analyses comparatives pour les deux principaux secteurs de production de l'industrie canadienne des pâtes et papiers : la pâte kraft commerciale et le papier journal. Dans chaque cas, nous avons déterminé la consommation énergétique d'une usine moderne selon la technologie éprouvée et on l'a comparée à celle d'usines canadiennes existantes [2].

USINE MODÈLE DE PÂTE KRAFT COMMERCIALE

L'usine modèle de pâte kraft commerciale produit de la pâte entièrement blanchie à partir de copeaux de bois transportés des scieries environnantes. Ses opérations ont un rendement énergétique optimal selon ce qui est techniquement réalisable. La chaudière utilise des déchets de bois, et des turbines à vapeur à condensation-extraction servent à produire de l'électricité. L'effluent liquide total émanant de l'usine serait d'environ 35 m³ de tonnes séchées à l'air (t.a.).

La consommation d'énergie de l'usine modèle est décrite dans le tableau I; sa production d'énergie est présentée dans le tableau II. Enfin, sa consommation d'énergie achetée figure au tableau III. La conception de son procédé est décrite en détail ci-dessous.

Transport des copeaux

On présume que les copeaux sont achetés de scieries. Les copeaux de bois sont transportés par des convoyeurs à courroie entre l'aire d'entreposage et les réservoirs de pré-étuvage. On se sert de la chaleur des réservoirs de liqueur noire pour préchauffer les copeaux dans ce réservoir, de sorte qu'on n'a pas besoin de vapeur vive. Les besoins d'électricité pour les opérations de transport sont évalués à 20 kWh/t.a. [3].

Lessiveur

Une usine moderne de pâte kraft utiliserait un procédé de cuisson continue dans un lessiveur Kamyr. L'indice kappa visé (pour les résineux) serait de 30 afin de préserver le rendement du bois. Ce

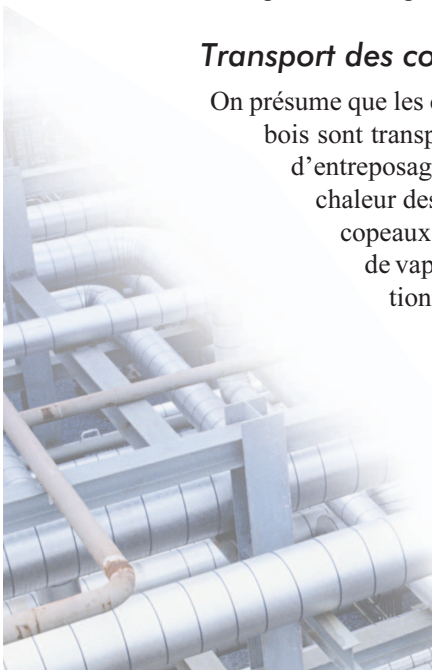


Tableau I. Usine moderne de pâte kraft commerciale – Consommation de vapeur et d'électricité

	<i>Vapeur (GJ/t.a.)</i>	<i>Électricité (kWh/t.a.)</i>
Transport des copeaux	0	20
Lessiveur	1,7	40
Lavage et tamisage	0	30
Déliquification à l'oxygène	0,5	75
Blanchiment	2,3	100
Machine à pâte	2,3	141
Évaporateurs de liqueur noire	3,1	30
Centrale thermique	2,3	60
Four à chaux et caustification	0	50
Alimentation en eau chaude	0	32
Traitement des eaux usées	0	30
Divers	0	30
Consommation totale	12,2	638

Tableau II. Usine moderne de pâte kraft commerciale – Production de vapeur et d'électricité

	<i>Vapeur (GJ/t.a.)</i>	<i>Électricité (kWh/t.a.)</i>
Chaudière de récupération	15,8	655
Production totale	15,8	655

Tableau III. Usine moderne de pâte kraft commerciale – Besoins en énergie achetée

	<i>Vapeur (GJ/t.a.)</i>	<i>Électricité (kWh/t.a.)</i>	<i>Gaz naturel (GJ/t.a.)</i>
Quantité achetée (surplus)	0,0	(17)	1,2

procédé nécessiterait 1,7 GJ/t.a. de vapeur vive [3] et 40 kWh/t.a. d'électricité [3].

Lavage et classage

L'usine a recours à des laveurs hautement efficaces, comme des filtres pressurisés, pour le lavage de la pâte écrue. La concentration de la pâte à l'admission de ces

laveurs est d'environ 4 p. 100, soit plus du double de celle d'une pile laveuse classique, réduisant par le fait même la quantité de liquide de dilution à pomper. Toutefois, le souffleur nécessaire pour mettre le laveur sous pression consomme ces économies d'électricité. Il en résulte un meilleur lavage pour à peu près la même consommation d'énergie. L'atelier de classage est fermé et le classage s'effectue à une concentration de 5 p. 100. La concentration plus élevée réduit les besoins de pompage. Le condensat des évaporateurs de liqueur noire sert d'eau de lavage. On n'utilise pas de vapeur vive pour le lavage et le classage. Les besoins d'électricité sont évalués à 30 kWh/t.a. [3].

Délicnification à l'oxygène

La délicnification à l'oxygène sert à délicnifier la pâte davantage avant son blanchiment. On obtient une délicnification à environ 60 p. 100 en deux stades. L'oxygène est acheté d'un fournisseur externe. Il faut deux stades de lavage après la délicnification à l'oxygène, ce qui exige des presses à rouleaux jumelés. La vapeur vive requise pour chauffer les stades à l'oxygène serait de 0,5 GJ/t.a. [3] et ce processus exigerait 75 kWh/t.a. d'électricité.

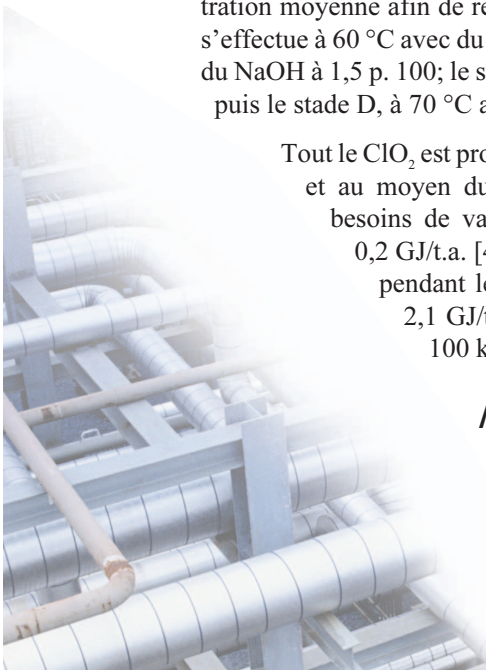
Blanchiment

Une usine moderne peut obtenir de la pâte entièrement blanchie dans un atelier de blanchiment ECF à quatre stades selon la séquence $D_0E_0D_ND$. Des filtres pressurisés hautement efficaces servent au lavage entre les stades de blanchiment. Tous les stades s'effectuent à concentration moyenne afin de réduire les besoins de pompage. Le stade D_0 s'effectue à 60 °C avec du ClO_2 à 0,96 p. 100; le stade E_0 , à 90 °C avec du NaOH à 1,5 p. 100; le stade D_N , à 70 °C avec du ClO_2 à 0,75 p. 100; puis le stade D, à 70 °C avec du ClO_2 à 0,20 p. 100.

Tout le ClO_2 est produit sur place à partir de chlorate de sodium et au moyen du procédé R10. On achète le NaOH. Les besoins de vapeur pour la production de ClO_2 sont de 0,2 GJ/t.a. [4]. Les besoins de vapeur pour le chauffage pendant le reste du blanchiment s'élèvent à environ 2,1 GJ/t.a. L'atelier de blanchiment consommerait 100 kWh/t.a. d'électricité.

Machine à pâte

Une section des presses comportant une double toile sert à obtenir une concentration de 50 p. 100 à l'entrée de la



sécherie de la machine. Cet équipement a permis de réduire la consommation de vapeur à 2,3 GJ/t.a. dans une usine [3]. La consommation d'électricité de cette installation était de 141 kWh/t.a. [3].

Évaporation de la liqueur noire

La liqueur noire faible renferme au départ 15 p. 100 de solides, et elle est ensuite évaporée à 78 p. 100 de solides dans un système d'évaporateurs à sept effets relié à un superconcentrateur intégré. L'économie de vapeur est évaluée à 6,0 kg d'eau par kg de vapeur selon cet arrangement. La liqueur noire contient 1,6 kg de solides par kg de pâte. Les besoins de vapeur pour les évaporateurs sont estimés à 3,1 GJ/t.a. Les évaporateurs consommeraient 30 kWh/t.a. [3] d'électricité.

Centrale thermique

L'usine utiliserait une chaudière de récupération à forte teneur en solides pour obtenir une efficacité chaleur-vapeur de 75 p. 100. La valeur calorifique de la liqueur noire serait d'environ 6 250 Btu/lb de solides (21,0 GJ/t.a. de pâte). L'air de la chaudière est chauffé à 150 °C au moyen de vapeur, et les souffleurs de suie, dont l'utilisation est limitée au minimum, consomment 0,9 GJ/t.a. de vapeur. L'usine récupère 70 p. 100 du condensat de vapeur et la consommation énergétique du désaérateur est de 1,0 GJ/t.a. Des turbines à vapeur à condensation-extraction servent à produire de l'électricité avec un rapport énergie-chaleur de 100 kWh/GJ. La chaudière d'énergie de l'usine brûle des déchets de bois et atteint une efficacité chaleur-vapeur de 70 p. 100. L'usine produit 15,8 GJ/t.a. dans la chaudière de récupération afin de satisfaire aux besoins de chaleur du procédé et aux besoins de production d'électricité. Une turbine à contrepression génère 520 kWh/t.a., tandis que l'excédent de vapeur à haute pression génère 135 kWh/t.a. au moyen d'une turbine à condensation. Le total d'électricité généré par l'usine est donc de 655 kWh/t.a. La centrale thermique consomme environ 60 kWh/t.a. [3] d'électricité parasite.

Four à chaux et caustification

Le four a recours à des séchoirs-éclair et des refroidisseurs pour minimiser la consommation d'énergie. On se sert de gaz naturel pour obtenir les 1,2 GJ/t.a. d'énergie calorifique dont on a besoin. Les filtres pressurisés servent à séparer

les solides des liqueurs de procédé. Les besoins d'électricité sont de 50 kWh/t.a. [3].

Système d'eau chaude

On produit de l'eau tiède (50 °C) en récupérant la chaleur des condenseurs des évaporateurs. L'eau chaude (70 °C) provient de la récupération de la chaleur du condenseur à surface du lessiveur, du refroidissement par décharge à froid de la liqueur et du refroidissement de la liqueur noire. L'eau chaude utilisée dans la machine à pâte est produite par la récupération de la chaleur de la sécherie. Les besoins d'électricité sont de 32 kWh/t.a.

Traitement des eaux usées

On traite l'effluent de l'usine au moyen d'un clarificateur primaire et d'une lagune secondaire à boues activées. L'effluent total de l'usine est de 35 m³/t.a. Il faut une tour de refroidissement pour éliminer la chaleur excédentaire du procédé. Les besoins d'électricité sont de 30 kWh/t.a. pour l'aération et le pompage.

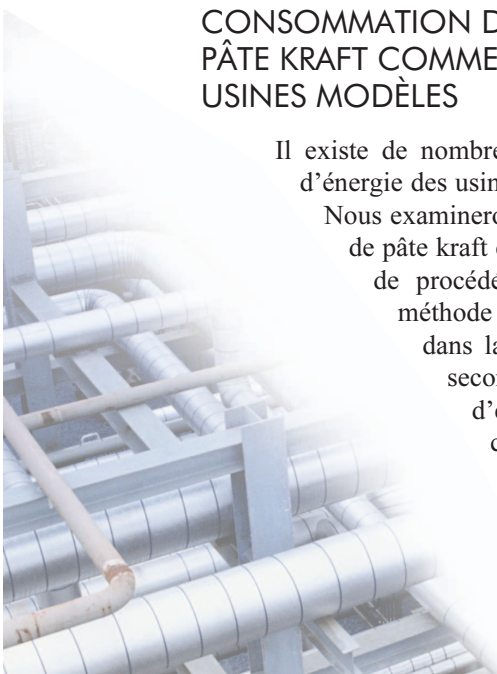
Divers

Cette section comprend le chauffage, la ventilation et la climatisation, l'éclairage, les services de bureau, etc. Aucune vapeur vive n'est requise. Les besoins d'électricité s'élèvent à environ 30 kWh/t.a.

CONSOMMATION D'ÉNERGIE DANS LES USINES DE PÂTE KRAFT COMMERCIALE EXISTANTES ET LES USINES MODÈLES

Il existe de nombreuses façons d'évaluer la consommation d'énergie des usines dans le cadre d'analyses comparatives.

Nous examinerons deux méthodes applicables aux usines de pâte kraft commerciale : la consommation d'énergie de procédé et les achats d'énergie. La première méthode sert à mesurer l'énergie spécifique utilisée dans la fabrication de la pâte et du papier. La seconde est influencée par cette consommation d'énergie de procédé et par la façon dont cette énergie est distribuée aux divers secteurs de la fabrication.



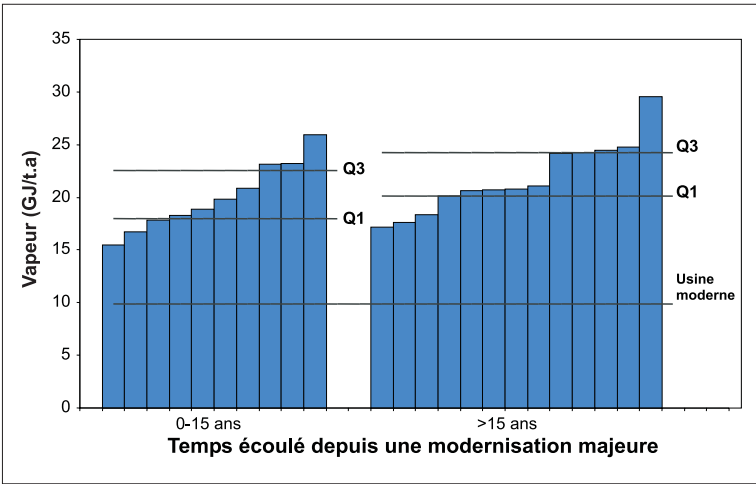


Figure 1. Consommation de vapeur de procédé – Usines de pâte kraft.

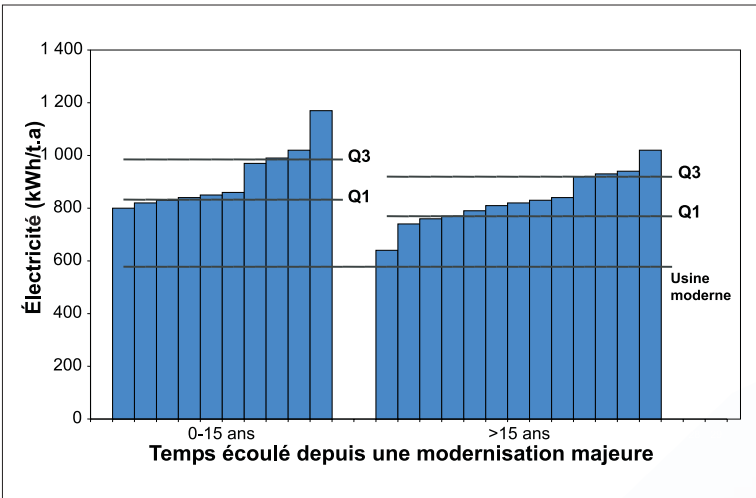


Figure 2. Consommation d'électricité de procédé – Usines de pâte kraft.

Elle permet de mesurer les coûts de l'énergie et ce, sur les plans économique et environnemental.

Les figures 1 et 2 présentent la consommation de vapeur et d'électricité dans les usines canadiennes de pâte kraft

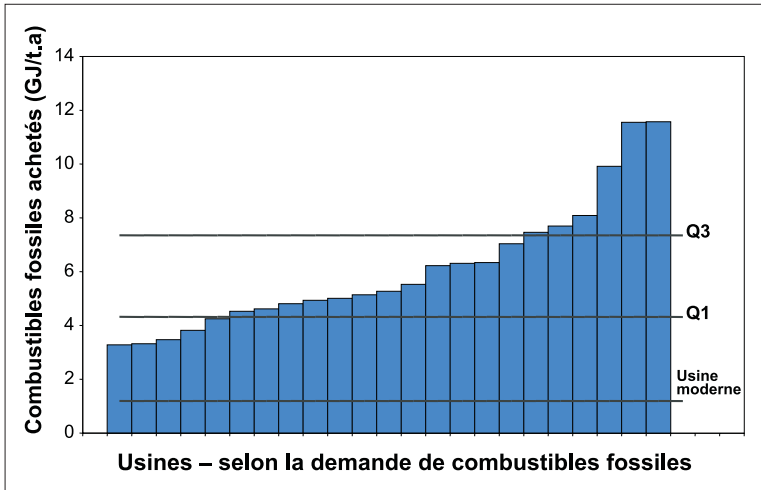


Figure 3. Besoins en combustibles fossiles achetés – Usines de pâte kraft.

commerciale. Ces niveaux de consommation ont été calculés à partir des données du *Energy Monitoring Report* de l'APFC pour 1999 [2]. Les usines de pâte kraft sont regroupées selon le temps écoulé depuis leur dernière modernisation majeure. Les figures indiquent également les besoins de vapeur et d'électricité de l'usine modèle de pâte kraft.

Les données présentées aux figures 1 et 2 indiquent que les usines plus anciennes et les usines modernisées ont une consommation d'énergie supérieure à celle de l'usine moderne. De plus, on constate peu de différence entre la consommation d'énergie des usines plus anciennes et celle des installations modernisées. La consommation de vapeur des premier et troisième quartiles chez les anciennes usines ne dépasse que légèrement celle des usines modernisées; la consommation d'électricité des usines plus anciennes est légèrement inférieure à celle des usines modernisées. Certaines des installations les plus vieilles font partie des plus faibles consommateurs de vapeur et d'électricité de procédé. Donc, les usines nouvelles et les usines modernisées n'atteignent pas les niveaux optimaux de consommation énergétique caractéristiques d'une usine moderne.

Les achats de combustibles fossiles et d'électricité pour les usines de pâte kraft sont présentés dans les figures 3 et 4. Les achats d'énergie sont légèrement supérieurs à ceux de l'usine moderne pour

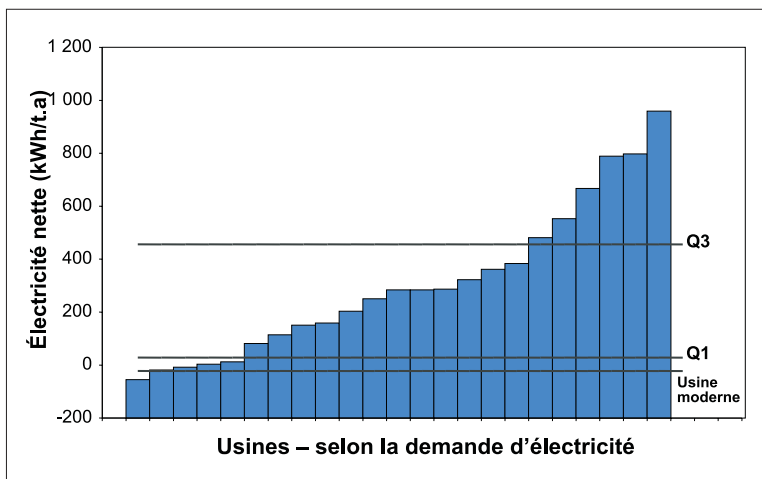


Figure 4. Demande d'électricité nette – Usines de pâte kraft.

deux raisons. D'une part, l'énergie spécifique utilisée dans la fabrication de la pâte et du papier dépasse celle de l'usine moderne. D'autre part, la façon dont cette énergie est distribuée influence la quantité d'énergie achetée. La demande réduite en vapeur pour alimenter le procédé dans l'usine moderne permet de générer plus d'électricité que dans une usine typique, au moyen d'une turbine à condensation.

L'usine moderne consomme du combustible fossile (1,2 GJ/t.a.) principalement pour le fonctionnement du four à chaux. Une partie du combustible fossile sert au démarrage de la chaudière de récupération après un arrêt de production, mais cette quantité serait minime. L'usine moderne comporte aussi une chaudière d'appoint alimentée au combustible fossile pour fournir de la vapeur en périodes de transition ou de difficultés. Les usines canadiennes de pâte kraft ont acheté en moyenne 5,99 GJ/t.a. de combustible fossile en 1999, soit 4,24 GJ/t.a. de gaz naturel et 1,75 GJ/t.a. de mazout et d'autres combustibles fossiles. Si l'on présume un coût de 3,40 \$/GJ pour le gaz naturel et de 4,03 \$/GJ pour le mazout, l'usine moderne paie 17,39 \$/t.a. de moins que l'usine canadienne moyenne pour les combustibles fossiles qu'elle consomme.

L'usine moderne répond à tous ses besoins d'électricité grâce à des turbines à condensation et à contre-pression, avec un léger

surplus de 17 kWh/t.a. On observe d'importants écarts dans les achats d'électricité (figure 4), qui résultent des variations de la quantité d'énergie produite par les usines. Les achats d'électricité moyens s'élèvent à 272 kWh/t.a. Si l'on présume un coût de 0,04 \$/kWh pour l'électricité, les coûts d'électricité de l'usine moderne sont de 11,56 \$/t.a. inférieurs à ceux de l'usine canadienne moyenne.

On peut donc en conclure qu'il est possible de réaliser d'importantes économies en optimisant l'utilisation de l'énergie dans les usines de pâte kraft commerciale. Les économies possibles pour une usine peuvent rapidement être estimées. Premièrement, il faut choisir une cible servant de repère; nous recommandons de choisir une cible à partir des figures 1 et 2 à mi-chemin entre le premier quartile et le rendement optimal de l'usine moderne pour la vapeur et l'électricité de procédé. On soustrait ensuite ces chiffres des niveaux de consommation actuels et on multiplie le résultat par les coûts d'énergie différentiels. Cette référence rapide peut aider les usines à établir des priorités parmi leurs objectifs énergétiques.

USINE DE PAPIER JOURNAL MODÈLE

L'usine de papier journal modèle renferme un atelier de pâte et une machine à papier, et est dotée d'un système de traitement des effluents. La fibre utilisée par une usine moderne comprendrait de la pâte thermomécanique (PTM) ou des matières recyclées, selon la disponibilité de la fibre et les exigences du marché. Les besoins énergétiques pour la fabrication de la pâte et du papier sont décrits dans les sections qui suivent.

Atelier de pâte thermomécanique

Le tableau IV présente la consommation énergétique d'un atelier de PTM moderne. L'usine produit de la PTM afin de fabriquer du papier journal à partir de copeaux de résineux.

Jackson et Wild ont estimé la consommation énergétique d'un atelier de PTM à chaîne unique ayant une capacité de 500 tonnes métriques de bois absolument sec par jour (TMAS/j). [5]. L'énergie spécifique de raffinage totale serait de 2 400 kWh/tonne métrique (t.m.), un niveau typique des ateliers de PTM utilisant des copeaux d'épinette noire pour produire du papier journal [5]. À titre de comparaison, on peut se référer à un audit

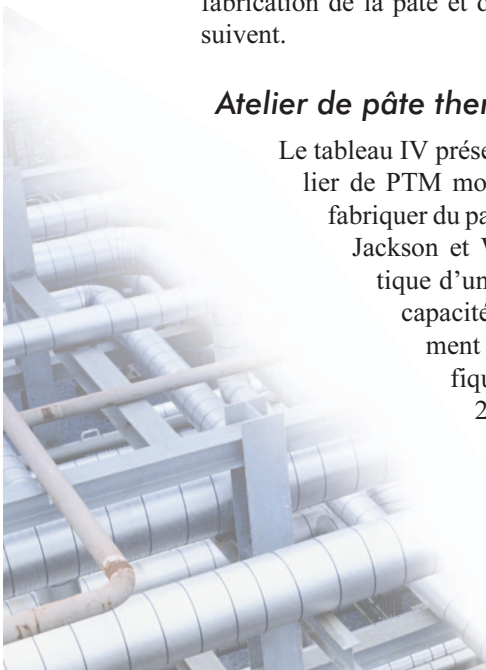


Tableau IV. Atelier de PTM – Consommation de vapeur et d'électricité

	<i>Vapeur (GJ/t.a.)</i>	<i>Électricité (kWh/t.a.)</i>
Manutention des copeaux		40
Raffineurs		2 160
Pompes, tamis, agitateurs, souffleurs		240
Récupération de chaleur	-5,5	10
Total PTM	-5,5	2 450

industriel détaillé mené par Nygaard [6] pour des usines de PTM suédoises, la plupart produisant du papier journal. Ces usines avaient toutes la même demande d'énergie externe moyenne, soit environ 2 420 kWh/t.a.

La quantité d'énergie de raffinage pour la PTM est influencée par l'essence du bois; les essences canadiennes courantes comme le pin exigent plus d'énergie que l'épinette noire [7]. La quantité d'énergie de raffinage dépend aussi de la catégorie de papier, les papiers impression de qualité supérieure à base de pâte mécanique exigeant plus d'énergie. Bien qu'il existe de nouveaux procédés pour réduire quelque peu l'énergie de raffinage [8], l'industrie n'a pas encore atteint un rendement constant.

Les usines modernes de papier journal et de PTM ont recours à la récupération de chaleur pour récupérer une partie de l'énergie de raffinage sous forme de vapeur propre sous pression. La production de vapeur propre présentée au tableau IV a été calculée en fonction de la récupération de chaleur de la vapeur provenant des raffineurs principaux et des raffineurs de rejets par un rebouilleur [5]. La production de vapeur estimée pour l'usine de PTM moderne, soit 5,5 GJ/t.a., est équivalente à la production de vapeur possible calculée par Nygaard, soit 5,2 GJ/t.a., pour la même énergie de raffinage spécifique [6]. La production de vapeur excédentaire moyenne pour les usines de PTM suédoises en 1994 était inférieure, soit d'environ 4,4 GJ/t.a. [6].

Usine de fibre recyclée

La consommation d'électricité d'une usine de fibre recyclée moderne produisant de la pâte

désencrée (PD) pour la fabrication de papier journal s'établit à 400 kWh/t.a. [3]. La demande d'énergie externe moyenne pour les usines de fibre recyclée de Suède en 1994 était inférieure, soit d'environ 330 kWh/t.a. [6]. La consommation de vapeur d'une usine de fibre recyclée moyenne est de 0,8 GJ/t.a., selon l'usine modèle décrite dans l'analyse de Nygaard [6]. La demande de chaleur de combustible moyenne pour les usines de Suède en 1994 était inférieure, soit d'environ 0,3 GJ/t.a. [6].

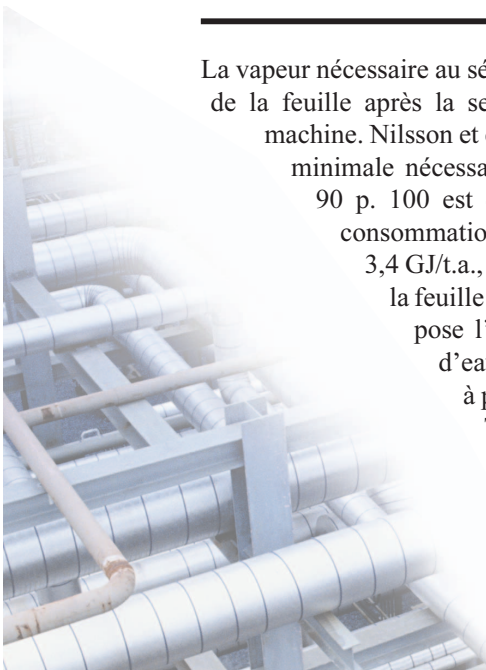
Machine à papier

Le tableau V indique la consommation énergétique d'une machine à papier journal moderne [9]. La consommation d'électricité moyenne pour les usines de papier journal suédoises en 1994 était supérieure, soit d'environ 440 kWh/t.a. [6]. Talja et collab. ont mesuré une consommation d'électricité de 344 kWh/t.a. pour une machine moderne produisant du papier de catégorie SC [10].

Tableau V. Machine à papier journal – Consommation de vapeur et d'électricité

	<i>Vapeur (GJ/t.a.)</i>	<i>Électricité (kWh/t.a.)</i>
Préparation de la pâte	0,7	100
Formation, pressage	0,3	140
Séchage, finition, systèmes auxiliaires	3,4	90
Consommation totale	4,4	330

La vapeur nécessaire au séchage du papier dépend de la concentration de la feuille après la section des presses et de l'efficacité de la machine. Nilsson et collab. ont indiqué que l'énergie de séchage minimale nécessaire pour une concentration allant de 50 à 90 p. 100 est de 2,26 GJ/t.a. de papier produit [3]. La consommation de vapeur de séchage, qui est de 3,4 GJ/t.a., équivaut à la vapeur nécessaire pour sécher la feuille à une concentration de 43 p. 100 si l'on suppose l'évaporation de 1,25 kg de vapeur par kg d'eau [11] et des pertes de 10 p. 100 à la machine à papier en raison du découpage et des casses. Talja et collab. ont mesuré une consommation de vapeur totale de 2,71 GJ/t.a. pour une machine moderne produisant du papier SC [10].



Traitement des effluents

Le système de traitement des effluents comprend une clarification primaire et un traitement de boues activées. Sa consommation d'électricité est de 60 kWh/t.a. [5].

Usine de papier journal intégrée

La consommation énergétique de trois usines de papier journal intégrées modernes est présentée dans le tableau VI. Ces usines fabriquent leur produit à partir de PTM, de PD ou d'une combinaison de 80 p. 100 de PTM + 20 p. 100 de PD. La teneur en fibre recyclée du papier journal produit par les usines de papier journal et de PTM-PD correspond à la teneur moyenne du papier journal produit par les usines décrites dans le *Energy Monitoring Report* de l'APFC [2].

Les différences de consommation de vapeur et d'électricité entre les trois usines s'expliquent par la quantité d'énergie nécessaire pour la mise en pâte et la récupération de chaleur. La production de PD exige moins d'énergie que la fabrication de la PTM, mais elle ne produit pas de vapeur pouvant être récupérée et utilisée dans la machine à papier. La possibilité de production de vapeur propre par récupération de la chaleur dans l'usine de papier journal avec PTM est supérieure aux besoins de vapeur de la machine à papier, ce qui donne une production de vapeur nette de 1,1 GJ/t.a.

La consommation d'énergie des usines de papier journal avec PTM et des usines de papier journal avec PD selon le tableau VI est semblable à celle qui a été obtenue par Lähpelto dans une étude menée par Jaakko Pöyry [12]. La consommation d'énergie d'une usine moderne de papier journal avec PTM était de -1,33 GJ/t.a. de chaleur et de 2 190 kWh/t.a. d'électricité [12]. La consommation d'électricité varie selon l'énergie spécifique utilisée pour le raffinage de la PTM. La consommation d'énergie signalée pour une usine moderne de papier journal avec PD était de 5,27 GJ/t.a. de chaleur et de 870 kWh/t.a. d'électricité [12].

Le tableau VII présente la consommation d'énergie achetée pour les trois usines de papier journal intégrées modernes. L'usine de papier journal avec PTM n'a pas besoin de produire de la vapeur en brûlant des combustibles fossiles durant le fonctionnement normal de son atelier de PTM en raison de la vapeur

**Tableau VI. Usine moderne de papier journal –
Consommation de vapeur et d'électricité**

	PTM		PD		80 % PTM + 20 % PD	
	Vapeur (GJ/t.a.)	Électricité (kWh/t.a.)	Vapeur (GJ/t.a.)	Électricité (kWh/t.a.)	Vapeur (GJ/t.a.)	Électricité (kWh/t.a.)
PTM	-5,5	2 450			-4,4	1 960
Pâte désencrée (PD)			0,8	400	0,2	80
Machine à papier	4,4	330	4,4	330	4,4	330
Traitement des effluents		60		60		60
Consommation totale	-1,1	2 840	5,2	790	0,2	2 430

**Tableau VII. Usine moderne de papier journal –
Consommation d'énergie**

	PTM	PD	80 % PTM + 20 % PD
Électricité (kWh/t.a.)	2 840,0	790,0	2 430,0
Combustibles fossiles (GJ/t.a.)	0,5	6,1	0,8

excédentaire produite par la récupération de chaleur. Par contre, il lui faut un système de vapeur auxiliaire incluant une chaudière autonome et un accumulateur de vapeur pour produire de la vapeur de procédé lors d'un arrêt de production à l'atelier de PTM [5]. On présume dans le tableau VII qu'une chaudière alimentée au gaz naturel produirait une quantité de vapeur auxiliaire équivalant à 10 p. 100 de la consommation de vapeur de la machine à papier avec une chaudière efficace à 85 p. 100.

L'usine de papier journal avec PD a besoin de vapeur parce qu'elle utilise moins d'énergie pour la mise en pâte et parce qu'elle ne récupère pas de chaleur. La vapeur peut provenir de deux sources.

D'une part, l'usine pourrait brûler des combustibles fossiles et des boues pour produire de la vapeur. On présume dans le tableau VII que la vapeur proviendrait d'une chaudière alimentée au gaz naturel et ayant une efficacité de 85 p. 100. D'autre part, un atelier de cogénération faisant appel à une turbine à gaz pourrait produire de la vapeur et de l'électricité. Si l'on présume un rapport énergie-vapeur s'approchant de 1:1, l'atelier de cogénération produirait de l'électricité excédentaire qui pourrait être vendue [13].

L'usine de papier journal avec PTM et PD satisfait la plus grande partie de ses besoins de vapeur grâce à la récupération de chaleur dans des conditions d'exploitation normales. Toutefois, il lui faut également un système de vapeur auxiliaire pour produire de la vapeur de procédé pendant des arrêts de production à l'atelier de PTM. On présume dans le tableau VII qu'une chaudière alimentée au gaz naturel produirait 0,2 GJ/t.a. de vapeur continue et une quantité de vapeur auxiliaire équivalant à 10 p. 100 de la consommation de vapeur de la machine à papier avec une chaudière efficace à 85 p. 100.

On suppose que l'usine de papier journal moderne récupère de la chaleur des raffineurs principaux et des raffineurs de rejets. Certaines usines peuvent décider de ne pas récupérer la vapeur des raffineurs de rejets, ce qui a pour effet d'augmenter la demande de vapeur de la chaudière d'énergie. Cette demande de vapeur serait satisfaite par le brûlage de déchets de bois et de boues. En 1999, les usines canadiennes de papier journal ont produit 3,97 GJ/t.a. de vapeur à partir de déchets de bois et de boues [2]. Donc, cette récupération de chaleur plus faible n'aurait pas nécessairement pour effet de faire grimper la consommation de combustibles fossiles ni les émissions de GES.

CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DES USINES DE PAPIER JOURNAL EXISTANTES ET DES USINES MODÈLES

Les figures 5 et 6 présentent la consommation de vapeur et d'électricité de procédé des usines de papier journal. Ces niveaux de consommation ont été calculés à partir de données contenues dans le *Energy Monitoring Report* de l'APFC pour 1999 [2]. Les usines incluses dans l'étude de l'APFC utilisaient de la PTM ou de la fibre recyclée, la teneur moyenne en matières recyclées étant d'environ 20 p. 100.

Dans la figure 5, on constate que la consommation de vapeur de procédé varie de 2,52 à 12,69 GJ/t, ce qui dépasse la demande de l'usine de papier journal moderne, soit 0,64 GJ/t. Cet important écart résulte des différences dans la quantité de vapeur utilisée dans le procédé et des niveaux variables de récupération de la chaleur à partir des raffineurs. La teneur en fibre recyclée a aussi une influence sur la consommation de

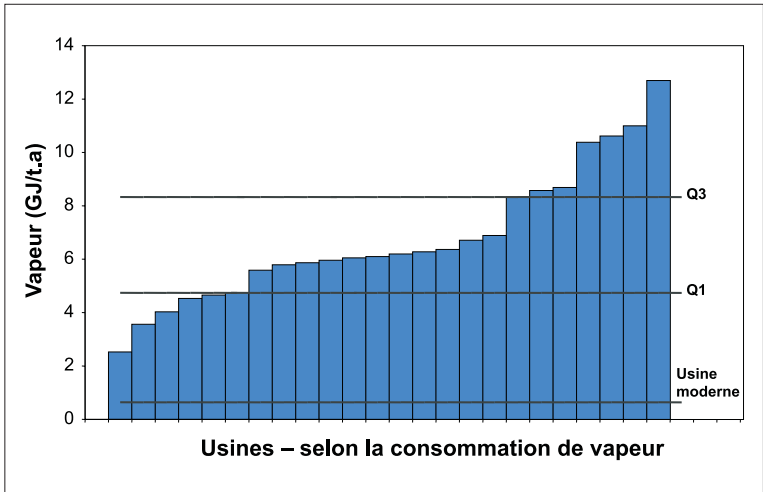


Figure 5. Consommation de vapeur de procédé – Usines de papier journal.

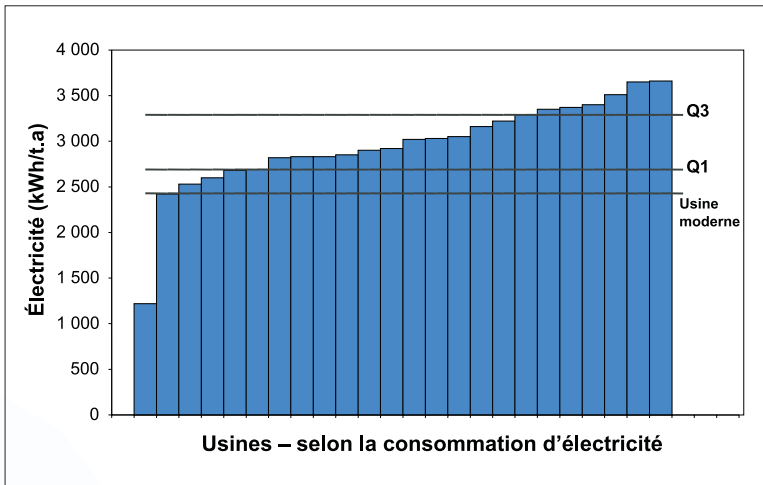


Figure 6. Consommation d'électricité de procédé – Usines de papier journal.

vapeur, puisqu'une usine de fibre recyclée ne dispose pas de vapeur de raffinage pour la récupération de chaleur.

Les achats de combustible fossile des usines de papier journal sont présentés dans la figure 7. Ces achats sont

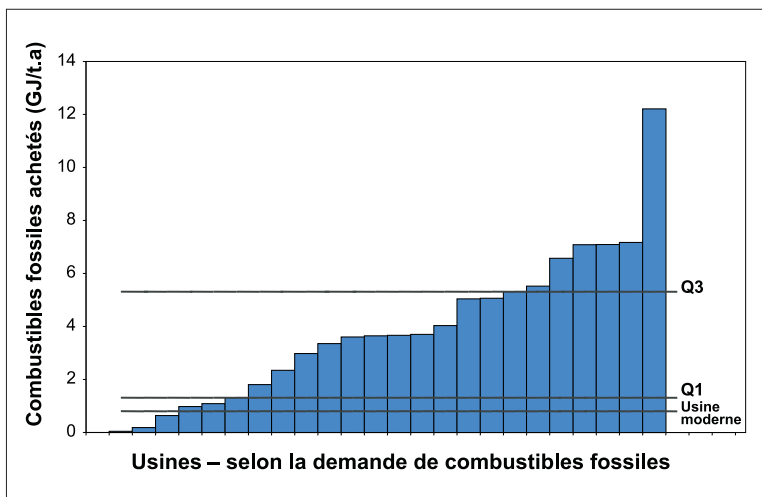


Figure 7. Besoins en combustibles fossiles achetés – Usines de papier journal.

généralement supérieurs à ceux de l’usine moderne en raison d’une plus grande consommation de vapeur du procédé et d’une récupération de chaleur inférieure. Certaines usines utilisent de grandes quantités de déchets de bois pour produire de la vapeur, ce qui a pour effet de réduire les achats de combustible fossile.

L’usine moderne obtient la plus grande partie de ses besoins de vapeur en récupérant la chaleur dans des conditions d’exploitation normales. Elle n’utilise des combustibles fossiles (0,80 GJ/t) que pour obtenir de la vapeur auxiliaire pendant les perturbations. L’usine de papier journal moyenne achetait 3,56 GJ/t en 1999, soit 1,80 GJ/t de gaz naturel et 1,73 GJ/t de mazout et d’autres combustibles fossiles. Elle achetait également 0,90 GJ/t de vapeur. Les coûts de l’énergie thermique (combustibles fossiles et vapeur) pour l’usine moderne sont de 16,69 \$/t.a. inférieurs à ceux de l’usine canadienne moyenne, si l’on suppose que la vapeur achetée est produite en brûlant du gaz naturel.

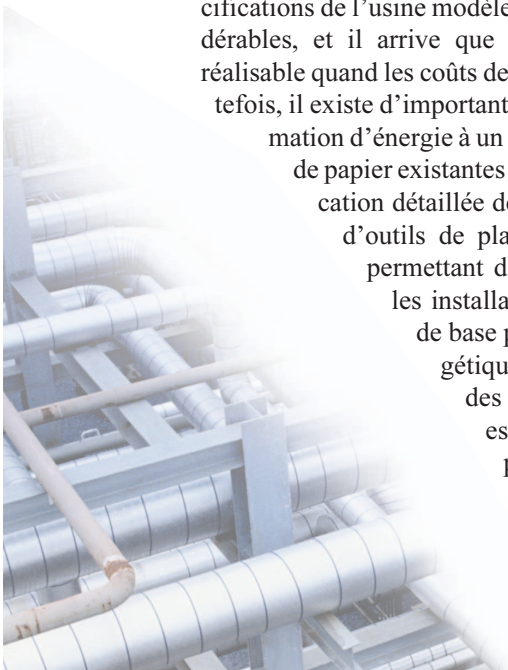
La consommation d’électricité de procédé, illustrée dans la figure 6, variait de 1 220 à 3 660 kWh/t.a. Ces différents niveaux de consommation d’électricité s’expliquent en partie par les variations de la teneur en fibre recyclée et de l’énergie de

raffinage de la PTM. La consommation d'électricité moyenne s'élevait à 2 850 kWh/t.a. La plupart des usines utilisaient plus d'électricité que ce qu'on prévoyait pour l'usine moderne de papier journal et de PTM-PD, soit 2 430 kWh/t.a. Toutefois, la majeure partie de l'électricité utilisée dans une usine de papier journal et de PTM-PD sert au raffinage de la PTM. Donc, une bonne partie de l'augmentation de la consommation énergétique s'explique probablement par l'essence de bois utilisée et la catégorie de papier fabriqué. Des changements apportés aux opérations de pompage et d'agitation dans l'usine peuvent entraîner une baisse globale de 5 p. 100 de la consommation d'électricité, pour des économies potentielles d'environ 5,70 \$/t.a.

Bref, on constate des possibilités d'économie considérables par l'optimisation de la consommation d'énergie dans les usines de papier journal. Les économies qu'une usine en particulier peut réaliser au chapitre des combustibles fossiles peut être estimée de la même manière que pour les usines de pâte kraft. Les économies possibles sur le plan de l'électricité sont plus difficiles à évaluer, puisque la forte consommation d'électricité imputée aux activités de raffinage est régie par des exigences relatives à la qualité du produit.

RÉDUCTION DES COÛTS DE L'ÉNERGIE DANS LES USINES EXISTANTES

La transformation d'une usine existante pour qu'elle réponde aux spécifications de l'usine modèle exige souvent des investissements considérables, et il arrive que ce projet ne soit pas économiquement réalisable quand les coûts de l'énergie en sont l'unique avantage. Toutefois, il existe d'importantes possibilités de réduction de la consommation d'énergie à un coût raisonnable dans les usines de pâte et de papier existantes [14, 16]. La référence 14 donne une explication détaillée des meilleures pratiques et décrit une série d'outils de planification d'une approche systématique permettant d'appliquer ces meilleures pratiques dans les installations actuelles. La référence 14, qui sert de base pour un cours abrégé sur l'efficacité énergétique présenté par l'Association technique des pâtes et des papiers du Canada (ATPPC), est résumée dans la référence 15 et dans les paragraphes qui suivent.



Revue de la direction

Avant de mettre en œuvre un programme d'économie d'énergie dans une usine, il faut souvent transformer sa culture. Les changements culturels commencent au niveau de la haute direction. Les dirigeants doivent en effet s'engager dans le processus, élaborer un plan d'action rationnel, offrir le leadership nécessaire et allouer des ressources suffisantes. Un programme d'économie d'énergie peut entraîner d'importants avantages, mais on constate plus souvent un grand nombre de petits gains. Donc, il faut des efforts continus pour maintenir les avantages le plus longtemps possible après la réalisation des projets.

L'analyse comparative est l'une des premières étapes que doivent entreprendre les usines. Cette étape permet à la haute direction de comparer le rendement de son usine à celui d'usines similaires ou d'une usine modèle représentant les meilleures pratiques actuelles. Elle offre la motivation nécessaire pour chercher des occasions d'économie d'énergie dans toutes les opérations.

Par ailleurs, il faut mettre en place un programme d'efficacité énergétique. Ce programme doit être dirigé par un ingénieur et il faut que des ressources suffisantes lui soient allouées. L'ingénieur doit ainsi être assisté d'une équipe du personnel de l'usine, de consultants externes et d'autres experts provenant de différents secteurs de l'usine. Comme l'explique la référence 1, cette équipe multidisciplinaire verra aux détails de la mise en œuvre du programme.

Analyse des procédés et optimisation énergétique

Les usines existantes comptent souvent plusieurs chaînes de production de pâte et de papier installées à des intervalles de 10 ou 20 ans depuis leur construction originale. Dans bien des cas, le matériel original a été enlevé, mais le matériel auxiliaire comme les systèmes d'approvisionnement en vapeur ou en eau sont toujours en place. On y trouve aussi de nouveaux systèmes de traitement des effluents et peut-être même de nouvelles chaudières ou usines de cogénération installées à des intervalles variables. Au moment de l'installation, chaque nouveau système a été plus ou moins bien intégré aux systèmes en place, de sorte qu'il existe souvent une forte interdépendance entre les anciens et les nouveaux systèmes. En raison de cette complexité, il est difficile

de s'assurer que les économies d'énergie réalisées dans une partie de l'installation n'entraîneront pas de pertes ailleurs. Il est essentiel d'élaborer une approche basée sur l'ingénierie des systèmes pour s'assurer que tout projet d'efficacité énergétique aura pour effet de réduire la consommation énergétique de l'ensemble de l'usine au lieu de déplacer la consommation d'énergie d'un service à un autre.

L'outil d'analyse des procédés le plus simple est la simulation par ordinateur des bilans massique et énergétique de l'usine. Le personnel de l'usine peut ainsi formuler des hypothèses et intégrer des projets dans le modèle informatique pour vérifier leur effet sur la consommation énergétique de l'ensemble de l'installation. Les modèles peuvent également servir à prédire les variations saisonnières des économies d'énergie imputables aux changements de température de l'eau fraîche. Enfin, une simulation dynamique permet d'analyser le comportement du système en régime instable et, par le fait même, d'évaluer l'effet d'un changement apporté au procédé sur le comportement pendant les perturbations du procédé.

Toutefois, la formulation d'hypothèses exige souvent beaucoup de temps et n'aboutit pas nécessairement aux meilleures solutions. Les outils d'intégration des procédés, comme l'analyse de pincement, permettent de définir le niveau de consommation d'énergie minimal théorique d'un procédé et d'élaborer des directives relatives aux modifications devant être apportées pour atteindre ce niveau minimal. L'analyse de pincement est un outil fort utile qui doit être néanmoins utilisé avec rigueur, car de nombreux obstacles peuvent empêcher un projet de récupération de chaleur en particulier d'être réalisé. En outre, le niveau de consommation énergétique minimal peut exiger d'importants investissements et les projets de récupération de chaleur ne sont pas tous économiquement réalisables à un prix donné de l'énergie. Par contre, le simple fait de connaître le niveau de consommation minimal théorique devient un puissant motivateur pour améliorer l'efficacité et réduire le gaspillage.

Procédés et matériel de procédé

Chaque aspect d'un procédé dans une usine doit être comparé à la moyenne de l'industrie et à l'usine modèle pour voir où il se situe par rapport aux meilleures pratiques et comment on peut l'améliorer. La référence 14 traite de la consommation énergétique d'usines de pâte chimique, de pâte mécanique et de pâte désencrée, de machines à papier



et de secteurs tels les centrales thermiques, les chaufferies, les installations de cogénération et les systèmes de traitement des effluents. On y retrouve également des conseils sur le choix et le contrôle des pompes et des ventilateurs. En outre, les références 16 et 17 donnent des exemples de projets réalisés dans des usines, accompagnés d'estimations des coûts en capital et des économies réalisées sur les coûts d'exploitation. Enfin, chaque secteur de l'usine est décrit en détail dans le cours de l'ATPPC intitulé « Improving Energy Efficiency in the Pulp and Paper Industry ».

Stratégies d'achat d'énergie

Compte tenu du contexte de déréglementation, l'achat d'énergie comporte des défis et les variations des prix peuvent avoir un impact important sur les activités d'une usine. Les décisions concernant les sources d'énergie doivent donc viser un certain nombre d'objectifs : exigences opérationnelles de l'usine, nécessité de réduire les coûts, obligation de réduire les émissions de CO₂ et élimination des résidus de scieries et autres. La restructuration des marchés de l'énergie offre des occasions de réaliser des économies au chapitre des achats d'énergie à condition que les usines puissent faire preuve de souplesse dans leur consommation. Il peut être nécessaire de transformer la culture pour pouvoir exploiter ces occasions, notamment par une gestion plus active des demandes d'énergie et par une intégration accrue des fonctions de gestion et d'achat d'énergie. Les outils de gestion des risques financiers prendront de l'importance à mesure que les marchés de l'énergie seront déréglementés.

Identification et choix des projets

Le choix des projets fait partie des tâches courantes du personnel de l'ingénierie d'une usine, qui doit calculer le délai de récupération, le rendement des investissements et d'autres indicateurs économiques. Toutefois, il faut aussi tenir compte d'un certain nombre de préoccupations dans le classement des projets visant à améliorer l'efficacité énergétique.

Par exemple, l'ordre dans lequel une série de projets est réalisée peut avoir un impact sur le rendement total. Ainsi, tout projet dans le cadre duquel la chaleur est transférée à l'eau d'appoint de la chaudière n'aboutira pas à des économies



continues si, à une date ultérieure, d'autres projets visant entre autres à réduire la consommation de vapeur ou à améliorer le retour de condensat ont pour effet de diminuer le débit de l'eau d'appoint. Il est important de tenir compte de ces effets croisés au début du processus de sélection des projets.

En outre, le fait de réduire les émissions de carbone peut entraîner des avantages économiques. L'échange des droits d'émissions est une réalité tout à fait nouvelle qui pourrait procurer des revenus substantiels à mesure que les programmes visant à limiter les émissions de gaz à effet de serre acquerront de la notoriété auprès des organismes législatifs et réglementaires. Il peut arriver que les avantages économiques découlant de la réduction de la consommation d'énergie dépassent les économies dues simplement aux coûts d'énergie, et pourraient inclure un crédit pour chaque tonne de réduction des émissions de carbone rendue possible par la réduction de la consommation de combustibles fossiles ou par le remplacement d'un combustible sale par un autre plus propre.

Enfin, il faut également considérer les possibilités de réduire la consommation d'énergie lorsqu'on planifie des augmentations de production ou des améliorations à la qualité du produit. On obtient souvent de meilleurs délais de récupération au moyen d'un investissement additionnel, peut-être minime, pour acquérir de l'équipement plus efficace ou améliorer les méthodes de traitement que si le projet énergétique était considéré seul à une date ultérieure.

Tout programme visant à améliorer l'efficacité énergétique doit tenir compte de ces préoccupations et d'autres méthodes de classement des projets.

Surveillance et amélioration continues du rendement

Une fois que les budgets d'immobilisations ont été alloués et les projets réalisés, il est important d'être en mesure de démontrer que les économies se répètent d'année en année. De plus, il faut considérer l'efficacité énergétique comme un processus d'amélioration continue : une fois qu'une série de projets a été réalisée, il est important de commencer à planifier la phase suivante. C'est pour ces raisons qu'il faut mettre en place un système de surveillance et d'amélioration continues. S'appuyant sur du matériel, des logiciels et des pratiques de gestion, ces systèmes s'assurent qu'une fois qu'une conduite de vapeur est fermée, elle reste fermée,



qu'une fois qu'un processus a été corrigé, il demeure corrigé et que les avantages économiques continuent de s'accumuler.

CONCLUSION

Il existe des possibilités considérables de réduction de la consommation d'énergie dans les usines de pâte et de papier. L'usine de pâte kraft modèle peut fonctionner avec 9,9 GJ/t.a. de vapeur de procédé, 1,2 GJ/t.a. de combustibles fossiles et 578 kWh/t.a. d'électricité. Les demandes de vapeur et d'électricité peuvent être satisfaites par le brûlage de la liqueur de cuisson usée et des déchets de bois associés à l'approvisionnement en copeaux. Donc, la seule énergie achetée est le 1,2 GJ/t.a. de combustibles fossiles requis par le four à chaux. Toutefois, l'usine de pâte kraft moyenne achète beaucoup plus d'énergie que cela: 5,99 GJ/t.a. de combustibles fossiles et 272 kWh/t.a. d'électricité.

L'usine de papier journal modèle utilise 80 p. 100 de PTM et 20 p. 100 de PD. Elle peut fonctionner avec 0,2 GJ/t.a. de vapeur et 2 430 kWh/t.a. d'électricité. Ces principaux besoins de vapeur sont satisfaits à l'interne par la récupération de chaleur des raffineurs. L'énergie achetée consiste essentiellement en électricité (2 430 kWh/t.a.), et il ne lui faut que 0,8 GJ/t.a. de combustibles fossiles pour maintenir la demande de vapeur de 0,2 GJ/t.a. et fournir la vapeur auxiliaire pendant les perturbations de fonctionnement dans l'atelier de PTM. L'usine de papier journal moyenne achète 2 850 kWh/t.a. d'électricité et beaucoup plus de vapeur et de combustibles fossiles, soit 4,46 GJ/t.a.

Un programme d'efficacité énergétique peut aider les usines existantes à réduire leur demande d'énergie et à s'approcher du rendement des usines modèles. La monographie intitulée *Réduction des coûts énergétiques dans l'industrie des pâtes et papiers* présente une explication détaillée des meilleures pratiques en ce domaine et offre une série d'outils permettant de planifier une approche systématique pour implanter ces meilleures pratiques dans les usines existantes [14]. Cette monographie sert de base au cours abrégé offert par l'Association technique des pâtes et papiers du Canada (ATPPC).

RÉFÉRENCES

1. Connaghan, C. et Wunderlich, R. « Élaboration, mise en œuvre et maintien d'un programme d'efficacité énergétique », dans *Réduction des coûts énergétiques dans l'industrie des pâtes et papiers*, Browne, T.C., (éd. tech.), Paprican (1999).
2. *Energy Monitoring Report*, exercice terminé le 31 décembre 1999, Association des producteurs forestiers du Canada (APFC).
3. Nilsson, L.J., Larson, E.D., Gilbreath, K.R. et Gupta, A., « Energy Efficiency and the Pulp and Paper Industry », American Council for an Energy-Efficient Economy, Berkeley, CA (1995).
4. Bechberger, E.J., "Reduction of Salt Cake and Production of Caustic from a Chlorine Dioxide Generator," Prêtirés de la conférence printanière de 1992 de l'Association canadienne des pâtes et papiers (ACPP), Jasper, Alberta (1992).
5. Jackson, M. et Wild, N. « Fabrication de la pâte mécanique », dans *Réduction des coûts énergétiques dans l'industrie des pâtes et papiers*, Browne, T.C. (éd. tech.), Paprican (1999).
6. Nygaard, J., Energy aspects on mechanical pulp, chemical pulp and recycled fibres. International Mechanical Pulping Conference:17-27 (1997).
7. Laliberté, D., Shallhorn, P.M. et Karnis, A., Comparison of TMP and CTMP Properties from Spruce and Pine Sawmill Chips. *Pulp Paper Can.* 88(3):T71-T100 (1987).
8. Corson, S., Mechanics of Making Better Pulp with Less Energy. *Pulp Pap. Int.* 39(5):61-65 (1997).
9. Publication AF (en suédois), Models for energy conservation in pulp and paper manufacturing. Stockholm, 1978.
10. Talja, R., Kerttula, R. et Karlsson, M., Future paper production line concepts regarding energy and environmental aspects. *Das Papier* 51(6A):V203-V207 (1997).
11. Persson, B., Drying section: The least developed part of the paper machine. *Nordisk Cellulosa* 5(5): 75-77 (1988).
12. Lähempelto, J., Rational use of energy in the Finnish paper industry – The sustainable paper energy research programme. *Das Papier* 51(6A):V200-V203 (1997).
13. Karojärvi, R., Liimatainen, H. et Tapio, M., Impact of advanced co-generation methods on energy demand in mechanical pulping. First EcoPaperTech, an International Conference on Papermaking and Paper-Machine Technology: 303-314 (1995).
14. Réduction des coûts énergétiques dans l'industrie des pâtes et papiers, Browne, T.C. (éd. tech.), Paprican (1999).
15. Browne, T.C., Francis, D.W. et Towers, M.T., Energy cost reduction in the pulp and paper industry: an overview. *Pulp Paper Can.* 102(2):T34-T38 (2001).
16. A Guide to Energy Savings Opportunities in the Kraft Pulp Industry, Pulp & Paper Technical Association of Canada (PAPTAC) (2000).
17. Possibilités d'économie d'énergie, 4 volumes, PAPTAC (1992, 1993, 1994, 2001).

