

Titre: Méthodologie pour la réduction simultanée eau-énergie dans les usines intégrées de papier journal
Title: usines intégrées de papier journal

Auteur: Sébastien Lafourcade
Author:

Date: 2006

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Lafourcade, S. (2006). Méthodologie pour la réduction simultanée eau-énergie dans les usines intégrées de papier journal [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/7746/>
Citation:

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7746/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Paul R. Stuart
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MÉTHODOLOGIE POUR LA
RÉDUCTION SIMULTANÉE EAU – ÉNERGIE
DANS LES USINES INTÉGRÉES DE PAPIER JOURNAL

SÉBASTIEN LAFOURCADE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR
(GÉNIE CHIMIQUE)
AVRIL 2006



Library and
Archives Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*
ISBN: 978-0-494-17978-9

Our file *Notre référence*
ISBN: 978-0-494-17978-9

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

**
Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

MÉTHODOLOGIE POUR LA
RÉDUCTION SIMULTANÉE EAU – ÉNERGIE
DANS LES USINES INTÉGRÉES DE PAPIER JOURNAL

présentée par : LAFOURCADE Sébastien
en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiae Doctor
a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. SAMSON Réjean, Ph.D., président
M. STUART Paul, Ph.D., membre et directeur de recherche
M. PERRIER Michel, Ph.D., membre
Mme SAVULESCU Luciana Elena, Ph.D., membre

À mon éolienne.

*« Ce n'est pas dans la science qu'est le bonheur,
mais dans l'acquisition de la science »*

Edgar Allan Poe (1809-1849)

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier :

Le Professeur Paul Stuart qui m'a appuyé, guidé et m'a accordé sa pleine confiance pendant toutes ces années.

Le CRSNG et la Chaire en génie de conception environnementale pour leur appui financier indispensable à la réalisation de ces travaux de recherche.

Ulrika Wising pour son expertise, ses judicieux conseils et ses encouragements qui m'ont remis si souvent sur les rails. Kevin Riemer et Tom Browne pour les fructueuses discussions, Martin Fairbank et Leonid Akim d'Abitibi Consolidated Inc. pour m'avoir permis de mettre en application mes travaux de recherche.

Agnès, dont le secret de l'infaillible disponibilité n'a d'égal que l'efficacité déconcertante avec laquelle elle nous rend la vie plus facile.

Les quelques personnes qui, en croisant ma route, m'ont donné le goût de la science, de sa rigueur et de ses doutes, et par dessus tout l'amour de la découverte.

Les étudiants de la Chaire qui tout au long de ces années ont partagé mes victoires, mes doutes, mes coup de... mes emportements, mes bonnes blagues, mes moins bonnes, mes présentations techniques, et tous les bons moments passés ensemble au pavillon Aisenstadt ou au 29 de la rue Laurier Est.

Ma famille et mes amis, sans qui cette aventure humaine ne serait pas complète. Plus spécialement, aux trois compères du parc Laurier (je vous mets tous les trois dans le même sac), à ma sœur (faraway, so close!) et à mes parents, qui ont toujours cru en moi (je vous l'avais dit que je finirais un jour mes études).

Merci enfin à toi, Chantal, de m'avoir interdit de parler de pincement à table. Merci de ta patience et de tes soins, ils ont été le plus précieux des encouragements. Merci enfin pour ton énergie et ta spontanéité qui me font déplacer des montages.

RÉSUMÉ

L'industrie papetière doit en permanence relever des défis liés à son importante utilisation d'eau et d'énergie. Les brusques augmentations des coûts énergétiques, liés aux prix fluctuants du pétrole et du gaz naturel, affectent de façon significative la rentabilité des usines. Dans le cadre du Protocole de Kyoto, l'industrie doit de plus réduire ses émissions de gaz à effet de serre. Par ailleurs, des exigences environnementales imposent des restrictions de plus en plus grandes sur le rejet d'effluent liquide. À long terme, l'opération à effluent – zéro pourrait être une solution inévitable face à ces exigences. Dans ce contexte, des programmes à long terme de réduction eau – énergie sont nécessaires pour anticiper les contraintes futures et assurer la gestion durable d'une usine.

La réduction simultanée eau – énergie nécessite l'application d'une approche holistique et systématique. Étant donnée les interactions entre les réseaux d'eau d'énergie dans les usines intégrées de pâtes et papiers, le système doit être étudiée dans sa globalité, plutôt que par l'identification de projets un par un.

Une telle approche n'existe pas encore pour les procédés papetiers, en particulier dans un contexte de rétro-installation. L'analyse de pincement thermique classique est une méthode appliquée avec succès pour l'étude énergétique dans les usines de pâtes et papiers. Cependant elle n'est pas adaptée à la réduction simultanée eau – énergie : les interactions entre les transferts de masse et de chaleur ne sont pas systématiquement prises en compte. Quant à la méthode d'analyse de pincement massique, sa mise en œuvre est loin d'être pratique pour les procédés papetiers à cause du manque de modèles capables de représenter avec précision les interactions entre les différents constituants de la pâte.

L'objectif principal de cette thèse est de développer une méthodologie, systématique et pratique, pour générer des programmes de réduction eau – énergie qui considèrent le court et le long terme.

La première étape de la méthodologie est la définition du profil énergétique de l'usine. Ensuite une analyse eau – énergie en trois phases est appliquée :

- Identification, avec une étude de procédé, de projets classiques en pâtes et papiers.
- Identification d'échanges de chaleur directs, c'est-à-dire par mélange ou par recirculation, en utilisant une analyse de pincement modifiée.
- Identification d'échangeurs de chaleur indirects en utilisant une analyse de pincement classique.

L'utilisation des techniques de pincement dans l'analyse en trois phases assure l'identification systématique d'opportunités de projets, qui sont ensuite organisés en programmes cohérents avec des objectifs à court terme et à long terme.

Des règles de conception de nature heuristiques ont été créées à chaque étape de la méthodologie proposée, pour assurer son application pratique dans les usines intégrées de papier journal. Ces règles sont justifiées par l'étude des bases théoriques de l'analyse de pincement thermique et des approches traditionnelles de réduction d'eau et d'énergie dans l'industrie papetière. Les aspects les plus intéressants qui résultent de l'application de ses règles sont :

- Un format d'extraction de données permet d'utiliser les courbes composites pour définir et évaluer le profil énergétique d'une usine qui inclut : le point d'engorgement, les inefficacités énergétiques et le potentiel d'intégration. Associé à un modèle général d'usine de papier journal, ce format ne requiert qu'un nombre minimal de données.

- Un guide pour l'application des analyses de pincement modifiée et classique : extraction de données, étapes des analyses, choix des valeurs optimales de ΔT_{min} , contraintes massiques pour la conversion d'échangeurs indirects en projets de mélange et de recirculation.
- Identification de projets d'échange de chaleur directs (mélange et recirculation) à partir des techniques classiques de l'analyse de pincement thermique.

Concernant la réduction d'eau et d'énergie pour les différentes configurations d'usines de papier journal, nous avons identifié :

- Un nombre fini de projets clés qui peuvent servir à l'évaluation d'une usine, en particulier de son niveau d'intégration et de son potentiel d'amélioration.
- Des routes technologiques qui mènent éventuellement à l'opération à effluent – zéro.

La méthodologie a été finalement appliquée à une usine de papier journal existante. Cette étude de cas confirme la pertinence des règles de conception proposées et montre que l'application de la méthodologie aboutit de façon pratique à des réductions importantes de l'utilisation d'eau et d'énergie.

Les recommandations pour de futurs travaux incluent l'évaluation techno-économique et environnementale de l'implantation de l'effluent – zéro, en utilisant des outils telles que l'analyse de cycle de vie (ACV) et la prise de décision multicritère.

ABSTRACT

The pulp and paper industry faces continuous challenges related to its considerable water and energy usage. Sudden increase in energy costs, mainly related to fluctuating prices of oil and natural gas, significantly affects mill profitability. In the context of the Kyoto protocol, industry must also reduce its greenhouse gases emissions. Furthermore, environmental requirements impose increasingly stringent restrictions on effluent discharge. Zero-effluent operation can be hence the ultimate solution in the long term to face this problem. In this regards, programs for water and energy reduction are needed to anticipate future constraints and guarantee a sustainable mill operation.

Simultaneous reduction of water and energy usage requires the application of a holistic and systematic approach. Given the interactive nature of water and energy networks in integrated paper mills, the system needs to be analyzed globally rather than on a project-by-project basis.

Such an approach has not been yet applied to pulp and paper processes, especially in retrofit design. Classical thermal pinch analysis is a widely applied method to study energy in pulp and paper mills. However, its application is not suitable for simultaneous water and energy reduction since mass and energy interactions are not systematically taken into account. As to mass pinch analysis, its application to pulp and paper processes is far from being practical due to of the lack of a modeling framework capable of accurately representing the interaction between pulp components.

The main objective of this thesis aims at developing a systematic and practical methodology to generate water and energy reduction programs that take into consideration both the short and long term operation.

The methodology starts by defining the energy profile of the mill. Then a three-step analysis is applied:

- Exploration of typical solutions implemented in pulp and paper processes through a process study
- Identification of direct heat exchange projects (i.e. stream mixing and recirculation projects) using a modified pinch analysis
- Identification of indirect heat exchanger projects using a classical pinch analysis

The use of pinch techniques in the three-step analysis allows for a systematic identification of project opportunities which are then organized into programs that are consistent with both mill short-term and long-term mill objectives.

Heuristic design rules were created at each step of the proposed methodology to guarantee a practical application to integrated newsprint mills. These rules are based on thermal pinch fundamentals and on traditional approaches for water and energy reduction in pulp and paper mills. The most interesting aspects resulting from the application of the rules are:

- A data extraction pattern that allows for using the composite curves to benchmark the mill's energy profile, including: bottleneck, inefficiencies and potential for process integration. Together with a newsprint mill generic model, this pattern required a minimal amount of data.
- A guide for the application of the modified and classical pinch analyses, including: data extraction, steps of the analyses, choice for optimal value of ΔT_{min} and mass constraints to be considered for the conversion of indirect heat exchangers into direct exchanges.
- In particular, identification of direct heat exchanges (stream mixing and recirculation) using classical thermal pinch techniques.

Regarding reduction of water and energy usage for the different newsprint mills configurations considered in this work, we have identified:

- A finite number of key projects that can be used to benchmark a mill in term of assessing its level of integration and potential for improvement.
- Technology roadmaps leading to the possible zero-effluent operation.

Finally, the methodology is applied to an existing newsprint mill. This case study confirms the relevance of the proposed design rules in a real situation, and shows that the application of the methodology leads to significant practical reductions in water and energy usage.

Recommendations for future work include a techno-economic and environmental assessment to address the implementation of zero-effluent operation, using tools such as life cycle analysis (LCA) and Multi-criteria decision making.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	IV
REMERCIEMENTS.....	V
RÉSUMÉ	VII
ABSTRACT	X
TABLE DES MATIÈRES.....	XIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XIX
LISTE DES FIGURES	XXI
LISTE DES ANNEXES	XXIV
LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS.....	XXV
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 Problématique	1
1.2 Hypothèse principale	3
1.3 Objectifs	3
1.4 Méthode analytique.....	4

1.5 Description des usines étudiées	5
1.5.1 Étude de cas 1.....	6
1.5.2 Étude de cas 2.....	6
1.5.3 Simulation des études de cas.....	6
1.5.4 Usines de papier journal de référence	6
CHAPITRE 2 : REVUE DE LA LITTÉRATURE	9
2.1 Utilisation d'eau et d'énergie dans une usine de papier journal	9
2.1.1 Configurations d'une usine pâte mécanique - papier journal.....	9
2.1.2 Réduction de la consommation d'énergie	13
2.1.3 Réduction de la consommation d'eau	16
2.1.4 Effluent – zéro.....	23
2.1.5 Conséquences énergétiques de la réduction d'eau	24
2.2 Conception des réseaux d'échanges de chaleur.....	25
2.2.1 Revues des méthodes de conception.....	25
2.2.2 Analyse de pincement thermique	26
2.2.3 Évolution de l'analyse de pincement thermique	31
2.3 Application de l'analyse de pincement en pâtes et papiers	34
2.4 Conclusions de la recherche bibliographique.....	37
2.4.1 Synthèse	37
2.4.2 Lacunes dans le corps de la connaissance.....	39
CHAPITRE 3 : DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE EAU – ÉNERGIE	40
3.1 Méthodologie proposée	40
3.1.1 Étapes	40

3.1.2	Approche heuristique	41
3.2	Collecte et organisation des données	42
3.3	Extraction représentative	43
3.3.1	Principes.....	43
3.3.2	Format d'extraction.....	44
3.4	Simulation	45
3.5	Ciblage.....	45
3.5.1	Goulot d'étranglement (bottleneck)	46
3.5.2	Inefficacités du procédé	47
3.5.3	Potentiel d'intégration.....	47
3.6	Étude de procédé	48
3.7	Base théorique de l'analyse de pincement modifiée.....	50
3.7.1	Objectif.....	50
3.7.2	Ciblage	50
3.7.3	Échangeurs verticaux et d'intervalles de température	50
3.7.4	Ciblage d'un mélange de courants	55
3.7.5	Ciblage d'un projet de recirculation.....	59
3.7.6	Exemple.....	61
3.8	Analyse de pincement modifiée.....	63
3.8.1	Principe	63
3.8.2	Paramètres de l'analyse modifiée.....	63
3.8.3	Extraction	65
3.8.4	Étapes de l'analyse	66
3.8.5	Intervention de contraintes massiques	67
3.8.6	Obtention de résultats pratiques	68

3.9 Analyse de pincement classique	70
3.9.1 Objectifs résiduels	70
3.9.2 Étape de l'analyse	70
3.9.3 Lignes directrices de conception	71
3.10 Estimation des niveaux atteignables.....	71
3.11 Contexte d'application.....	72
3.11.1 Principes	72
3.11.2 Opération à effluent – zéro.....	74
3.11.3 Identification des routes technologiques	75
3.11.4 Température finale de l'effluent.....	75
3.11.5 Routes technologiques	77
3.11.6 Refroidissement de l'effluent.....	78
3.12 Conclusions	80
CHAPITRE 4 : GÉNÉRALISATION.....	81
4.1 Application de la méthodologie.....	81
4.2 Ciblage.....	82
4.2.1 Courbes composites représentatives	82
4.2.2 Courbes composites ciblées	84
4.2.3 Bottlenecks	86
4.2.4 Inefficacités du procédé	87
4.2.5 Potentiel d'intégration	87
4.2.6 Conclusions	90
4.3 Structure des programmes eau – énergie.....	91
4.3.1 Étude de procédé	91
4.3.2 Analyse de pincement modifiée	91

4.3.3	Analyse de pincement classique.....	93
4.3.4	Aspects pratiques	94
4.3.5	Efficacité de chaque phase d'analyse.....	95
4.3.6	Conclusions.....	96
4.4	Résultats : performance des programmes	99
4.4.1	Nomenclature	99
4.4.2	Consommation de vapeur.....	99
4.4.3	Consommation d'eau fraîche	102
4.4.4	Utilisation de ressources	102
4.4.5	Niveaux atteignables	104
4.4.6	Conclusions.....	107
4.5	Aspect effluent zéro.....	108
4.5.1	Température de l'effluent.....	108
4.5.2	Routes technologiques vers effluent – zéro	108
4.5.3	Implantation des stratégies.....	109
4.5.4	Conclusions.....	112
4.6	Discussion.....	113
4.6.1	Bottlenecks.....	113
4.6.2	Consommation d'eau fraîche	114
4.6.3	Récupération de chaleur	115
4.6.4	Réseau d'eau blanche	117
4.6.5	Usine ultramoderne	119
4.6.6	Vieilles machines	119
4.6.7	Augmentation de la fraction de pâte désencrée produite	120
4.6.8	Énergie électrique.....	121

CHAPITRE 5 : APPLICATIONS	122
5.1 Application à une usine de papier journal réelle.....	122
5.1.1 Collecte des données et simulation	122
5.1.2 Benchmarking	122
5.1.3 Ciblage	123
5.1.4 Analyse eau – énergie	125
5.1.5 Résultats	126
5.1.6 Conclusion de l'étude de cas.....	128
5.2 Application aux autres classes d'usine de papier	130
CHAPITRE 6 : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	132
6.1 Contributions.....	132
6.2 Conclusions	136
6.3 Travaux futurs.....	138
6.3.1 Application à une vieille usine	138
6.3.2 Développement de règles heuristiques pour les usines de pâte Kraft	138
6.3.3 Analyse techno–économique	139
6.3.4 Évaluation environnementale des différentes routes technologiques	139
6.3.5 Études des routes technologiques pour atteindre l'effluent – zéro	139
RÉFÉRENCES	140
ANNEXES	154

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Description des deux études de cas.....	5
Tableau 1.2 : Description des usines de papier journal de référence.	7
Tableau 2.1 : Sources des principaux solides dissous et colloïdaux.....	19
Tableau 2.2 : Problèmes liés à l'accumulation de contaminants (Paulapuro, 2000).....	20
Tableau 2.3 : Principales technologies de traitement de l'eau.	22
Tableau 3.1 : Format d'extraction pour les usines intégrées de papier journal.....	44
Tableau 3.2 : Exemple numérique comparant les échangeurs verticaux et croisés	54
Tableau 3.3 : Exemple d'extraction pour l'étude de cas 1	61
Tableau 3.4 : Analyse de sensibilité sur l'analyse de pincement modifiée.....	64
Tableau 3.5 : Stratégies pour aller vers l'effluent – zéro.	74
Tableau 4.1 : Extraction pour l'analyse de pincement modifiée du cas de base.....	92
Tableau 4.2 : Extraction pour l'analyse de pincement classique du cas de base.	93
Tableau- A.1 : Extraction initiale pour l'étude de cas 1 (Partie 1).	155
Tableau- A.2 : Extraction initiale pour l'étude de cas 1 (Partie 2).	156
Tableau- A.3 : Comparaison du choix de courants extraits avec d'autres études.....	156
Tableau- A.4 : Comparaison du traitement des courants extraits avec d'autres études.	157
Tableau- A.5 : Format d'extraction pour l'étude de cas No.1.	159
Tableau- A.6 : Programmes eau – énergie, l'étude de cas 1.....	161
Tableau- A.7 : Résultats des programmes, étude de cas 1.....	162
Tableau- B.1 : Classes d'usines papier journal de référence.	164
Tableau- B.2 : Paramètres du procédé définissant les principales configurations.....	166
Tableau- B.3 : Configuration du cas de base.	168
Tableau- B.4 : Performances eau et énergie pour le cas de base.	168
Tableau- B.5 : Configuration des usines de référence 100% PTM.....	171
Tableau- C.1 : Impact des éléments de configuration sur les courbes composites.....	175

Tableau- C.2 : <i>Bottleneck</i> pour plusieurs niveaux de fermeture des circuits d'eau.	176
Tableau- C.3 : Projets clés pour les usines de référence.	183
Tableau- D.1 : Description des projets, étude de cas 2.	186
Tableau- D.2 : Résultats des programmes eau – énergie, étude de cas 2.	187
Tableau- E.1 : Équivalence des terminologies entre la thèse et les articles	189

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Étapes des travaux de recherche.....	4
Figure 2.1 : Usine intégrée de papier journal.....	10
Figure 2.2 : Cycle d'amélioration continue.....	15
Figure 2.3 : Les quatre étapes de traitement au point de rejet.....	17
Figure 2.4 : Compromis de coût pour la conception d'un réseau d'échangeurs.....	28
Figure 2.5 : Procédure de ciblage.....	28
Figure 2.6 : Courbes Composites (a) et Grande Courbes Composite (b).....	29
Figure 3.1 : Méthodologie d'analyse eau – énergie.....	40
Figure 3.2 : Courbes composite à $\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$ pour l'étude de cas 1.....	46
Figure 3.3 : Application de l'analyse eau – énergie à partir de l'étude de procédé.....	49
Figure 3.4 : Échange de chaleur indirect à contre courant.....	50
Figure 3.5 : Échanges de chaleur verticaux (a) et croisés (b).	51
Figure 3.6 : Construction des courants composites.....	52
Figure 3.7 : Détermination des cibles à partir des courbes composites.	53
Figure 3.8 : Mélange de deux courants.	55
Figure 3.9 : Comparaison échangeur indirect – mélange.....	56
Figure 3.10 : Identification des mélanges verticaux.	58
Figure 3.11 : Différentes évolutions d'un mélange à partir d'un échangeur indirect.	59
Figure 3.12 : Identification d'une recirculation.	61
Figure 3.13 : Courbes composites pour l'atelier PTM et le réseau d'eau ensemble.....	62
Figure 3.14 : Étapes de l'analyse de pincement modifiée.....	66
Figure 3.15 : Courbes composites pour l'analyse de pincement modifiée.	69
Figure 3.16 : Contexte d'application de la méthodologie eau – énergie.....	73
Figure 3.17 : Effet des programmes sur la température de l'effluent.	76
Figure 3.18 : Routes technologiques pour l'étude de cas 1.....	77
Figure 3.19 : Évolution du refroidissement avec l'implantation d'un programme.....	78
Figure 4.1 : Composition typique des courbes composites.....	82

Figure 4.2 : Courbes composites pour $\Delta T_{min} = 10^\circ C$	85
Figure 4.3 : Potentiel d'intégration pour les usines de référence 100% PTM.	88
Figure 4.4 : Potentiel d'intégration pour les usines de référence avec désencrage.....	88
Figure 4.5 : Projets clés pour les usines de papier journal.	96
Figure 4.6 : Programmes eau – énergie pour les usines de référence.	97
Figure 4.7 : Résultats des programmes eau et énergie pour le cas de base.....	100
Figure 4.8 : Résultats pour les usines avec désencrage sans projet PTM.	100
Figure 4.9 : Impact du projet PTM sur les usines avec désencrage.	102
Figure 4.10 : Niveaux minimums de consommation de vapeur atteignables.	104
Figure 4.11 : Niveaux minimums de consommation d'eau atteignables.	105
Figure 4.12 : Routes technologiques générales pour aller vers effluent – zéro.	108
Figure 4.13 : Débit à traiter pour les stratégies effluent – zéro.....	110
Figure 4.14 : Charge de refroidissement finale pour les stratégies effluent – zéro.....	110
Figure 4.15 : Répartition de l'énergie totale pour les usines de papier journal.	121
Figure 5.1 : Potentiel d'intégration pour l'étude de cas 2	124
Figure 5.2 : Routes technologiques pour l'étude de cas 2.....	126
Figure 5.3 : Résultats des programmes eau – énergie pour l'étude de cas 2.....	127
Figure 5.4 : Généralisation des règles de conception.....	130
Figure- A.1 : Courbes composites pour l'atelier PTM seul	160
Figure- A.2 : Courbes composites pour le réseau d'eau seul.....	160
Figure- B.1 : Étapes de création des usines de papier journal de référence.....	163
Figure- B.2 : Capacité de production de machines de papier journal en Amérique du Nord en fonction de leur année de mise en service.	164
Figure- B.3 : Consommation de vapeur de machines de papier journal en fonction de leur année de mise en service.	165
Figure- B.4 : Développement des usines de papier journal de référence.....	166
Figure- B.5 : Blocs élémentaires dans le modèle général.	167

Figure- B.6 : Analyse de sensibilité pour les consommations (a) de vapeur et (b) d'eau	169
Figure- B.7 : Identification des usines de référence 100% PTM.....	170
Figure- C.1 : Ciblage pour plusieurs niveaux de fermeture des circuits d'eau.....	176
Figure- C.2 : Courbes pour l'analyse de pincement modifiée, cas de base	177
Figure- C.3 : Courbes pour l'analyse de pincement modifiée, DES 20.....	177
Figure- C.4 : Courbes pour l'analyse de pincement modifiée, DES 40.....	178
Figure- C.5 : Courbes pour l'analyse de pincement modifiée, DES 100.....	178
Figure- C.6 : Énergie excédentaire disponible après l'application des programmes... .	181
Figure- C.7 : Aire d'échange supplémentaire pour les usines de référence 100% PTM.....	181
Figure- C.8 : Débit d'effluent à traiter pour recirculation interne.....	182
Figure- C.9 : Aire d'échange supplémentaire pour les usines avec désencrage.	182
Figure- C.10 : Courbes composites à $\Delta T_{min} = 10^{\circ}\text{C}$ pour les cas spéciaux.....	184
Figure- D.1 : Courbes composites représentatives – Ciblage à $\Delta T_{min} = 10^{\circ}\text{C}$	185
Figure- D.2 : Courbes composites représentatives – Format d'extraction.....	185
Figure- D.3 : Programmes eau – énergie, l'étude de cas 2.	186

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A :	DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODOLOGIE	155
ANNEXE B :	USINES PAPIER JOURNAL DE RÉFÉRENCE	163
ANNEXE C :	GÉNÉRALISATION.....	175
ANNEXE D :	ÉTUDE DE CAS 2	185
ANNEXE E :	PUBLICATIONS.....	188

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

A	aire d'échange de chaleur (m^2)
A_{min}	aire minimum ciblée d'échange de chaleur (m^2)
BT	basse température
c	concentration massique (%)
CP	produit du débit massique et de la capacité calorifique ($kW/^\circ C$)
Cp	capacité calorifique ($kJ/kg.^\circ C$)
Cp _e	capacité calorifique moyenne de l'eau ($kJ/kg.^\circ C$)
Cp _s	capacité calorifique moyenne de la matière fibreuse ($kJ/kg.^\circ C$)
D	demande en eau fraîche ($m^3/\text{tonne de papier séché à l'air}$)
EB	eau blanche
ECH	projets d'échangeur(s) de chaleur indirect(s)
EF	eau fraîche
ENP	projets de recirculation d'eau non procédé en boucle fermée
f _e	facteur de potentiel atteignable de réduction d'eau
f _v	facteur de potentiel atteignable de réduction de vapeur
h	coefficient de transfert de chaleur ($kW/m^2.^\circ C$)
HT	haute température
m	débit massique (kg/s)
NP	non procédé
PAV	projet de recirculation de l'eau des pompes à vide
PDE	pâte désencrée
PTM	pâte thermo-mécanique
PTM*	projet de récupération de l'énergie au PTM
Q	Quantité de chaleur échangée (kW ou MW)
Q _c	Demande en refroidissement externe (kW ou MW)
Q _{ech}	Quantité de chaleur échangée par échangeur indirect (kW ou MW)

Q_h	Demande en chauffage externe (kW ou MW)
Q_m	Quantité de chaleur échangée par mélange (kW ou MW)
REC	Réseau d'échangeurs de chaleur
T_e	Température initiale ($^{\circ}\text{C}$)
T_m	Température de mélange ($^{\circ}\text{C}$)
T_s	Température finale ou ciblée ($^{\circ}\text{C}$)
tsa	Tonne de papier séchée à l'air
U	Coefficient d'échange global ($\text{kW}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
ΔH	Gradient d'enthalpie (kW)
ΔT	Gradient de température ($^{\circ}\text{C}$)
ΔT_{LM}	Différence de température logarithmique ($^{\circ}\text{C}$)
ΔT_{min}	Différence minimum de température ($^{\circ}\text{C}$)

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

*« Il faut d'abord savoir ce que l'on veut,
il faut ensuite avoir le courage de le dire,
il faut ensuite l'énergie de le faire. »*
Georges Clémenceau (1841-1929)

1.1 Problématique

L'industrie fait face régulièrement à des augmentations des coûts énergétiques liés aux prix fluctuants du pétrole et du gaz naturel. De brusques augmentations peuvent ainsi affecter directement la rentabilité d'une usine. De plus, le protocole de Kyoto, ratifié en 2005, engage 38 pays industrialisés dont le Canada à réduire de 5,2 % leurs émissions de gaz à effet de serre entre 2008 et 2012 par rapport à celles de 1990. En tant que « grand émetteur », l'industrie doit faire sa part. Par ailleurs, les exigences environnementales imposent des restrictions de plus en plus grandes sur le rejet des effluents liquides. Dans ce contexte, la réduction de la consommation d'eau et d'énergie est un défi permanent pour anticiper les contraintes imposées par l'extérieur et assurer la gestion durable d'un site industriel.

Secteur clé de l'économie canadienne et grande utilisatrice d'eau et d'énergie, l'industrie papetière doit relever ces défis techniques, économiques et environnementaux. Ces dernières années, l'augmentation des coûts de l'énergie a placé la réduction énergétique au cœur de ses préoccupations. De plus de nouveaux règlements comme les attestations d'assainissement au Québec, peuvent obliger une usine à traiter son effluent pour un contaminant en particulier, selon la nature du milieu receveur. À long terme, l'opération à effluent – zéro pourrait devenir une solution inévitable pour faire face à ces contraintes. La réduction de l'utilisation d'eau et d'énergie est donc critique pour le futur de l'industrie.

Une des particularités des procédés de fabrication du papier est la forte interaction qu'il existe entre les réseaux d'eau et les réseaux d'énergie. Plus le procédé est intégré, plus cette interaction augmente. Les méthodes classiques d'amélioration, par inspection du procédé, sont limitées quand il s'agit de réduction simultanée de la consommation d'eau et d'énergie. Au lieu d'identifier des projets individuellement, il faut étudier le système dans sa globalité en considérant les impacts de chaque opportunité les unes vis-à-vis des autres. Les projets d'amélioration doivent de plus répondre aux objectifs à court terme tout en s'inscrivant dans des stratégies à long terme, comme l'opération à effluent – zéro. Un outil holistique et systématique est donc nécessaire pour réaliser la réduction simultanée eau – énergie dans les usines de pâtes et papiers.

L'analyse de pincement thermique est devenue une méthode incontournable pour l'amélioration énergétique dans l'industrie, en particulier en rétro-installation. Développée initialement pour la conception optimale des réseaux d'échangeurs de chaleur, elle permet de considérer de façon globale les flux d'énergie dans le procédé, d'identifier systématiquement des opportunités de réduction de consommation de vapeur et enfin d'organiser les projets en ensemble cohérent. Cependant sous sa forme classique, elle n'est pas adaptée à la réduction simultanée eau – énergie. En effet l'analyse de pincement thermique ne considère que des échangeurs de chaleur indirects sans envisager des échanges directs. Une analyse de pincement massique pour la réduction d'eau a été développée par analogie. Cependant sa mise en œuvre, en particulier couplée avec le pincement thermique, ne se fait pas de façon pratique pour les procédés papetiers.

Une approche intéressante combinerait les études classiques du procédé et l'utilisation des techniques d'analyse de pincement thermique pour l'identification pratique d'échanges de chaleur directs et indirects, le tout dans un cadre d'application permettant d'organiser les projets obtenus avec une vision à long terme.

1.2 Hypothèse principale

Une approche de conception en rétro-installation, basée sur l'analyse de pincement thermique, permet d'élaborer de façon pratique et systématique des programmes de réduction simultanée eau – énergie pour atteindre des niveaux de consommation minimums ainsi que l'opération à effluent – zéro.

1.3 Objectifs

Les objectifs de nos travaux de recherche sont les suivants.

1. Développer une méthodologie qui permette de générer de façon systématique des programmes de réduction simultanée eau – énergie en rétro-installation, pour le court et le long terme, en s'appuyant sur :
 - les bases théoriques de l'analyse de pincement thermique,
 - les approches traditionnelles de réduction d'eau et d'énergie.
2. Créer des règles de conception de nature heuristiques pour assurer l'application pratique de la méthodologie dans les usines de papier journal, en particulier pour le ciblage et l'identification des projets d'échanges de chaleur directs et indirects.
3. Identifier, pour les principales classes de papier journal, les routes technologiques qui permettent d'atteindre des niveaux minimums de consommation d'eau et d'énergie et à long terme d'atteindre l'opération à effluent – zéro.

1.4 Méthode analytique

La Figure 1.1 présente les étapes nécessaires pour atteindre les objectifs de recherche qui ont été fixés.

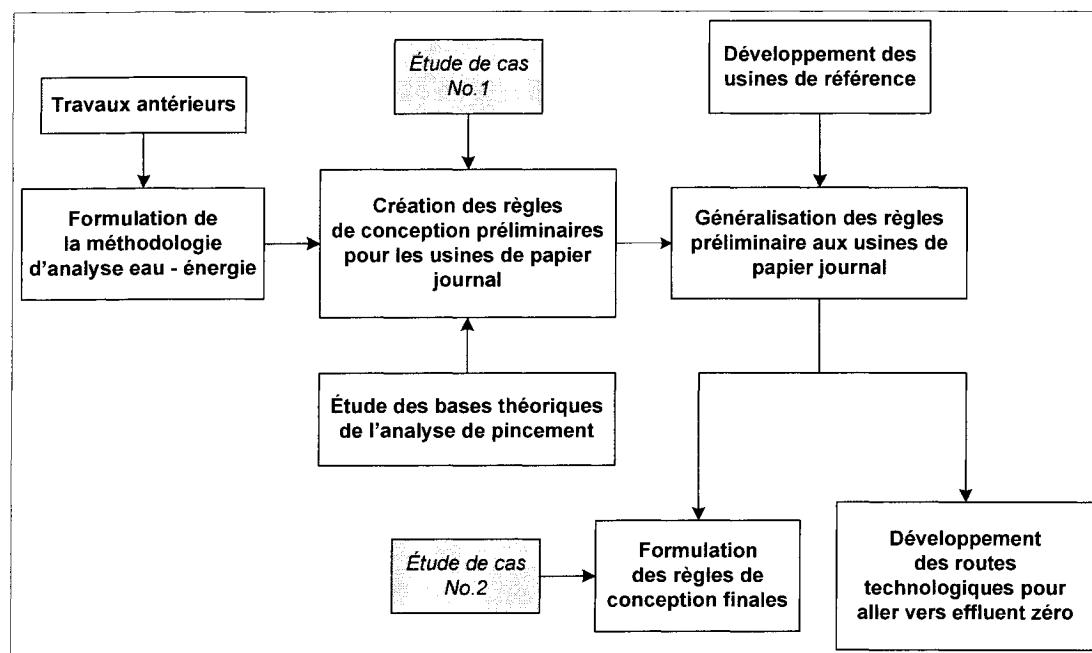


Figure 1.1 : Étapes des travaux de recherche.

La première étape est le développement de la méthodologie d'analyse eau – énergie (Chapitre 3).

- Dans un premier temps, la méthodologie est formulée en s'appuyant sur des travaux exploratoires (Lafourcade, 2001).
- Ensuite, pour chaque étape de la méthodologie, des règles de conception de nature heuristiques sont créées et justifiées à partir des bases théoriques de l'analyse de pincement et des approches traditionnelles de réduction eau – énergie en pâtes et papiers.
- Enfin, à partir de ces résultats et d'une première étude de cas, des règles de conception pour les usines de papier journal sont proposées.

L’application de la méthodologie à des usines de références permet ensuite de généraliser les règles de conception heuristiques pour les principales configurations d’usines de papier journal (Chapitre 4). Cette étape détermine aussi les niveaux minimums de consommation d’eau et d’énergie qui sont atteignables ainsi que les routes technologiques pour l’opération à effluent – zéro.

Enfin la méthodologie est appliquée à une seconde usine de papier journal (Chapitre 5). Cette seconde étude de cas permet de confirmer la pertinence des règles de conception dans un contexte réel. Elle confirme aussi que l’application de la méthodologie se fait de façon pratique.

1.5 Description des usines étudiées

Les travaux de recherche se basent sur deux usines réelles (« études de cas ») et sur huit modèles d’usines fictives (« usines de papier journal de référence »).

Tableau 1.1 : Description des deux études de cas.

	Étude de cas 1	Étude de cas 2
Consommation d’énergie thermique nette (GJ/t)	5.6	2.9
Production d’énergie thermique	Chaudière à écorce	Vapeur achetée à une usine voisine
Récupération d’énergie à l’atelier de pâte thermo-mécanique (PTM)	Système eau tiède et système eau/glycol	Production de vapeur propre, 6 GJ/t
Récupération d’énergie à la sécherie	Système eau tiède et système eau/glycol	Aucune
Effluent total (m ³ /t)	34.5	29.2
Effluent procédé (m ³ /t)	9.2	25.2
Effluent non procédé (m ³ /t)	23.3	4
Traitement de l’effluent	Traitement primaire et secondaire	Effluent envoyé au système de traitement de l’usine Kraft voisine

1.5.1 Étude de cas 1

La première étude de cas est une usine intégrée 100% pâte thermomécanique – papier journal produisant 610 tonnes par jour sur 1 machine (Tableau 1.1). Mise en service au début des années 80 dans le Nord du Québec, elle est relativement moderne dans le contexte canadien. Elle a été utilisée pour formuler la méthodologie et les règles de conception préliminaires.

1.5.2 Étude de cas 2

La seconde étude de cas est une usine intégrée de papier journal, produisant 730 tonnes par jour sur une seule machine à partir de 80% de pâte thermomécanique et 20% de pâte désencrée (Tableau 1.1). Cette usine moderne, mise en service au début des années 90, est située dans le Sud des États-unis. Elle a été utilisée pour illustrer l'application de la méthodologie et confirmer les règles de conception.

1.5.3 Simulation des études de cas

Des simulations détaillées ont été réalisées sur le logiciel WinGEMS pour les deux études de cas. Elles comprennent les bilans de masse et d'énergie pour : la totalité du procédé, le réseau d'eau procédé et non procédé, le réseau de production et de distribution de vapeur, les systèmes de récupération d'énergie à l'atelier de pâte thermo-mécanique et aux machines à papier (incluant les bilans d'air), les échangeurs de chaleur, y compris les applications non procédé comme le chauffage des bâtiments.

1.5.4 Usines de papier journal de référence

Les usines de référence sont des modèles qui couvrent les configurations typiques pour les usines intégrées de papier journal. Elles ont été utilisées pour généraliser les règles de conception préliminaires et établir des routes technologiques vers l'opération à effluent – zéro pour les usines de papier journal.

Le Tableau 1.2 présente les 8 usines de papier journal de référence et les 5 modèles complémentaires.

Tableau 1.2 : Description des usines de papier journal de référence.

Nom	Configuration	Niveau d'intégration	Commentaires
Cas de base		-	-
PTM 1		Réseau d'énergie plus intégré	Récupération de la vapeur sale PTM (3.5 GJ/t sèche de pâte)
PTM 2	100% PTM. 1 machine à papier 650 t/j	Réseau d'eau plus intégré	-Eau blanche pour combler 50% de la demande des douches de la machine -Eau non procédé de refroidissement en boucles fermées
PTM 3		Réseaux d'énergie et d'eau plus intégrés	PTM1 + PTM2
PTM 4		Réseau d'eau moins intégré	-Moins d'eau blanche machine vers l'atelier PTM -Moins de recirculation d'eau non procédé
DES 20	20% désencrée, 1 machine à papier 650 t/j	Idem cas de base	-Eau blanche machine vers l'atelier PTM et le reste vers atelier de désenrage (avec une limite de température de 45°C)
DES 40	40% désencrée, 2 machines à papier 1100 t/j	Idem cas de base	-Pas d'eau blanche PTM vers l'atelier de désenrage
DES 100	100% désencrée, 2 machines à papier 1100 t/j	Idem cas de base	Point de consigne de température pour les circuits de désenrage et de la machine : 40°C
AGE	100% PTM, 4 machines à papier 1100 t/j	Réseaux d'énergie et d'eau moins intégrés au niveau machines	Machines à papier moins efficaces
LAV 1		Idem cas de base	-Consistance de sortie de la PTM : 30% -Charge de refroidissement atelier PTM : 4.6 MW -Consistance de sortie de la pâte désencrée : 10%
LAV 2	40% désencrée, 2 machines à papier 1100 t/j	Idem cas de base	-Consistance de sortie de la PTM : 8% -Consistance de sortie de la pâte désencrée : 30%
LAV 3		Idem cas de base	-Consistance de sortie de la PTM : 30% -Charge de refroidissement atelier PTM : 4.6 MW -Consistance de sortie de la pâte désencrée : 30%
MIN	100% PTM, 1 machine à papier 650 t/j	Utilisation d'eau minimum (10 m ³ /t)	-

Le développement des modèles est supporté par des sondages réalisés dans l'industrie, par l'étude des classes d'usines de papier journal canadiennes, et l'étude des configurations de plusieurs usines existantes. Les principales classes d'usines de papier journal ont été établies à partir du niveau de production, des types de pâte utilisés et du nombre de machines à papier. Ensuite les configurations de procédé susceptibles d'avoir un impact sur les consommations d'eau et de vapeur ont été identifiées.

Un modèle général a été développé sur Excel. Les modèles pour les usines de référence ont ensuite été créées à partir d'un cas de base en faisant varier le niveau d'intégration et la fraction de pâte désencrée produite. Les détails du développement des usines de référence sont donnés en annexe B.

Le modèle général peut être aussi utilisé pour représenter une usine réelle : dans ce cas, 40 à 70 données suffisent pour atteindre un niveau de précision acceptable.

CHAPITRE 2 : REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ex nihilo nihil

« *J'ai des questions à toutes vos réponses.* »

Woody Allen (Né à Brooklyn en 1935)

2.1 Utilisation d'eau et d'énergie dans une usine de papier journal

Le procédé de fabrication du papier journal consomme de grandes quantités d'eau et d'énergie thermique et électrique. Même si les usines ont fait beaucoup d'effort pour réduire leurs consommations au cours des dernières années, la gestion de l'eau et de l'énergie reste un enjeu majeur pour l'industrie.

2.1.1 Configurations d'une usine pâte mécanique - papier journal

Le papier journal est fabriqué principalement à partir de pâte thermomécanique avec un appoint très variable de pâte désencrée (de 0.5% à 40%) qui est importée ou produite sur le site. Certaines usines utilisent 100% de pâte désencrée. La majeure partie des usines de papier journal nord – américaine sont intégrées : la production de pâte et de papier se fait sur le même site.

La Figure 2.1 présente les principaux éléments d'une usine intégrée de papier journal : l'atelier de pâte thermomécanique (PTM), l'atelier de pâte désencrée (PDE), l'atelier de machine à papier (MaP), le réseau d'eau procédé, le réseau d'eau non procédé (NP). Les références générales utilisées dans cette partie sont : Leask (1987) et Sundholm (2000) pour la pâte thermomécanique, Gottsching (2000) pour la pâte désencrée, Paulapuro (2000) et Karlsson (2000) pour la fabrication du papier, Smook (1992) pour des considérations générales.

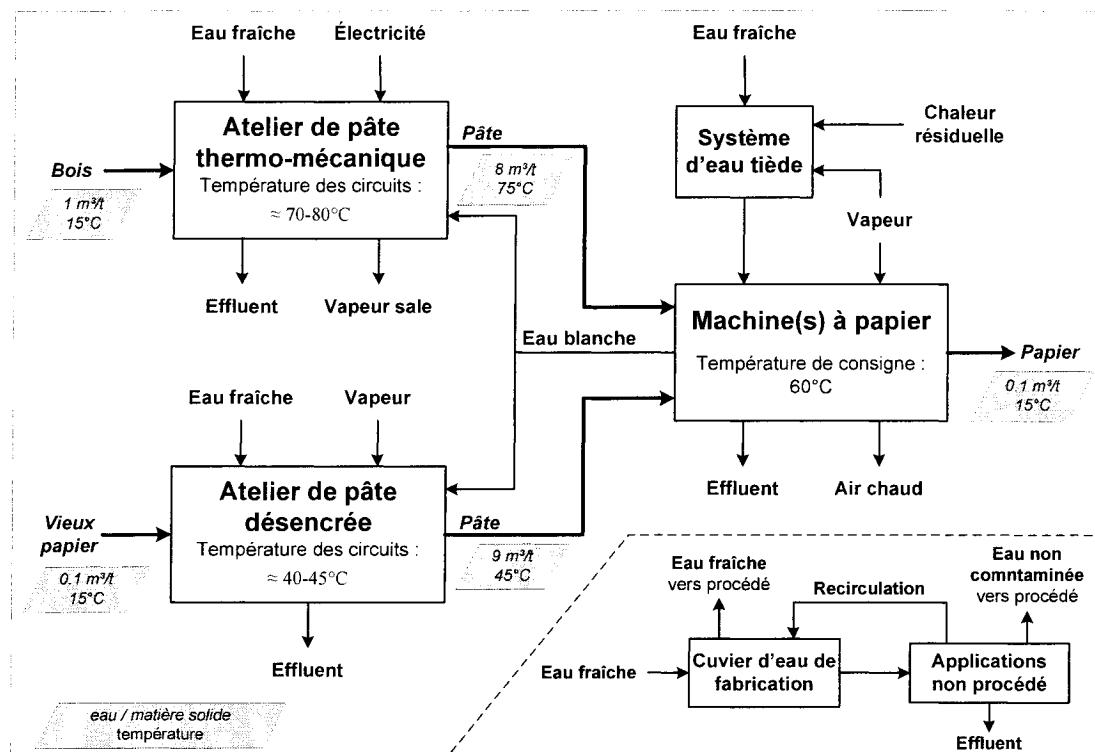


Figure 2.1 : Usine intégrée de papier journal.

a) Réseau d'eau procédé

La Figure 2.1 donne le contenu en eau (exprimé en mètre cube par tonne de matière sèche) pour les matières premières, pour les lignes de pâte et pour le papier. Du fait même des procédés de mise en pâte et de la nature de la matière première, les ateliers de pâte thermomécanique et de pâte désencrée sont des demandeurs d'eau. La demande totale d'eau d'appoint de chaque département peut s'exprimer par :

$$D_{appoint} = \text{Eau entrant avec la matière première} - \text{Eau sortant avec la pâte} - \text{Pertes}$$

Les débits sortant avec la pâte dépendent de la consistance à laquelle la pâte est stockée. Dans l'atelier PTM, les pertes dues à l'effluent et à l'eau évaporée dans les raffineurs (vapeur sale) sont en principe relativement faibles. Les pertes de l'atelier de désenrage, dues à l'effluent, varient typiquement de 10 à 25 m³ par tonne de pâte.

Lors des processus de fabrication du papier, l'eau contenue dans la pâte est évacuée pour former une feuille à 8% d'humidité : la machine à papier est une source d'eau. L'eau disponible totale est donnée par :

$$D_{excès} = Eau entrant avec la pâte + Eau tiède utilisé aux douches de machine + Eau fraîche ajoutée aux circuits machine - Eau évaporée dans la sécherie de la machine - Eau sortant avec le papier.$$

Les quantités d'eau évaporée lors du séchage de la feuille et d'eau sortant avec le papier sont négligeables par rapport aux autres termes. L'eau est disponible sous forme d'eau blanche provenant de l'égouttage à la partie humide ou des débordements des circuits de la machine. La demande totale d'eau des ateliers de pâte est assurée par l'eau blanche disponible des circuits machine et par de l'eau fraîche.

L'objectif principal de la gestion des eaux procédé dans une usine de papier journal est de garder le niveau de substances dissoutes et colloïdales le plus bas possible au niveau de la machine. L'épaississement de la pâte à la fin des ateliers de PTM et de PDE permet de garder les solides dissous dans les ateliers de pâte.

b) Réseau d'eau non procédé

Les applications non procédé comprennent : l'eau d'étanchéité des pompes à vide, les eaux de refroidissement (moteurs des raffineurs, systèmes de lubrification, systèmes de ventilation), l'eau d'étanchéité des pompes et des agitateurs et des demandes diverses (boyaux d'arrosage et de nettoyage, refroidissement d'échantillons, ...). L'eau d'étanchéité des pompes à vide et les eaux de refroidissement sont considérées comme non contaminées et peuvent être recirculées de trois manières : recirculation en boucle fermée vers la même application, recirculation vers le cuvier d'eau principal, recirculation vers une application procédé.

c) *Bilans énergétiques*

La principale entrée d'énergie à l'atelier de PTM est l'électricité fournie aux raffineurs. Elle est dissipée en énergie thermique qui est en partie transférée à la pâte, en partie évacuée sous forme de vapeur. Cette vapeur est qualifiée de sale car elle contient des fibres et des contaminants. L'atelier de pâte thermomécanique est donc une source d'énergie thermique et la pâte sort de l'atelier à environ 70-80°C (Figure 2.1). La pâte désencrée devant être chauffée jusqu'à une température de 40-45°C, l'atelier de désencrage est une demande d'énergie thermique.

Au niveau de la machine, trois applications requièrent l'utilisation d'énergie thermique :

- chauffage de l'eau blanche de la boucle courte. La pâte dans la caisse de tête de la machine est habituellement maintenue à une température de 60°C. La pâte mécanique contribue à atteindre cette température de consigne alors que la pâte désencrée refroidit les circuits. Il y a aussi des pertes de chaleur au niveau de la zone de formation. L'apport d'énergie complémentaire a lieu en général au silo hors machine.
- chauffage de l'eau tiède des douches. La température de consigne de l'eau tiède est en général 55°C.
- séchage du papier. C'est de loin la plus grande demande en énergie. La majeure partie de l'énergie fournie à la sécherie est évacuée sous forme d'air chaud humide.

Les demandes de chauffage d'eau blanche et d'eau tiède peuvent être comblées en utilisant soit de la vapeur vive, soit de l'énergie excédentaire avec un appoint de vapeur. La PTM est plus chaude que les circuits de la machine et la PDE est plus froide. Le ratio PTM / PDE a donc une influence sur la demande en chauffage de l'eau blanche machine. De même, la circulation d'eau blanche de la machine vers les ateliers

de pâte a pour conséquence de refroidir l'atelier PTM et de chauffer l'atelier de désencrage.

d) Énergie excédentaire

Au sens large, l'énergie excédentaire est définie par l'énergie résiduelle qui sort avec l'effluent liquide et les courants de vapeur et d'air chaud rejetés dans l'atmosphère. D'autres définitions, plus restreintes, sont utilisées. L'énergie excédentaire peut être définie comme l'énergie disponible au dessus d'une température donnée. Elle peut aussi être définie par l'énergie qui peut être extraite de l'effluent liquide et de l'air chaud en fixant une température cible.

L'énergie excédentaire peut être utilisée pour plusieurs applications :

- Chauffage dans le procédé (Pettersson et Soderman, 2003)
- Chauffage urbain (Bengtsson, 2004)
- Évaporation de l'effluent (Berntsson et al., 2002)
- Chauffage de serres maraîchères (Smurfit Stone, 2005)
- Pompes à chaleur (Costa et al., 2004)

2.1.2 Réduction de la consommation d'énergie

a) Contexte

Les usines de pâtes et papiers consomment une grande quantité d'énergie sous forme thermique et électrique. Au Canada, la consommation totale moyenne d'une usine de pâte mécanique – papier journal est 18.1 GJ/tonne, dont 8.0 GJ/t d'énergie thermique et 10.1 GJ/t d'énergie électrique (CPPA, 1998).

b) Protocole de Kyoto

Dans le protocole de Kyoto signé en 1997 au Japon et ratifié en 2005, 38 pays industrialisés s'engagent à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) entre 2008 et 2012 de 5,2 % par rapport à celles de 1990 (Environnement Canada, 2003). Le terme gaz à effet de serre comprend en particulier les gaz qui se forment lors de la combustion de matériaux fossiles (principalement CO₂, CH₄ et N₂O). Les émissions sont exprimées en tonnes d'équivalent CO₂, valeur basée sur le potentiel de réchauffement de chacun des gaz.

Les usines de pâtes et papiers peuvent participer de deux manières à l'émission de GES : directement par production de vapeur dans des chaudières et indirectement par la consommation d'électricité produite avec des combustibles fossiles. Si l'électricité est produite sur site par cogénération, elle représente une part de l'énergie produite dans les chaudières. L'émission de GES d'une usine dépend principalement du combustible utilisé dans les chaudières.

Les défis de réduction des émissions de GES impliquent l'utilisation accrue de biomasse (résidus du bois et boues du traitement des eaux), de la cogénération et la mise en place de programmes de réduction énergétiques incluant les nouvelles technologies et l'intégration des procédés.

c) Programmes d'amélioration énergétique

Un programme d'amélioration énergétique comprend trois grandes étapes (Figure 2.2, d'après PAPRICAN, 1999) : 1) définition des objectifs et identification des projets, 2) implantation des projets et 3) suivi des résultats.

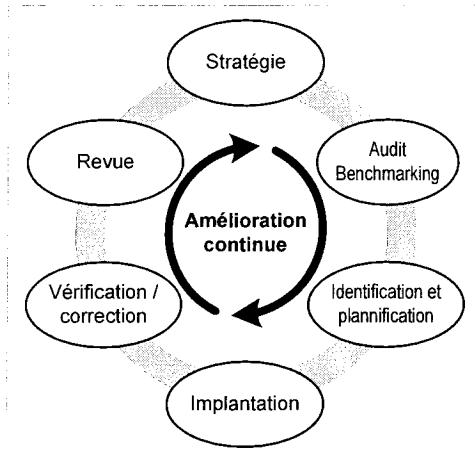


Figure 2.2 : Cycle d'amélioration continue.

La première étape s'appuie sur trois activités clés : l'audit qui permet d'avoir une vision globale de l'usine, l'étude comparative (*benchmarking*) externe ou interne et l'analyse de procédé. Cette dernière est réalisée soit par inspection, soit par application d'outils d'analyse plus systématiques comme l'analyse de pincement thermique. Les projets d'amélioration énergétiques doivent être planifiés avec soin car l'implantation doit être progressive pour espacer les investissements de l'usine.

d) *Les niveaux d'analyse*

L'analyse énergétique se déroule à deux niveaux. Au niveau supérieur, la totalité de la chaîne d'approvisionnement énergétique est considérée et l'emphase est mise sur les aspects stratégiques et économiques de l'interaction de l'usine avec l'extérieur. Au niveau inférieur, des outils basés sur les aspects techniques et thermodynamiques du procédé sont mis en œuvre pour identifier des projets qui doivent être cohérents avec le niveau stratégique supérieur. Bengtsson et al. (2002) proposent une méthode pour coordonner une analyse énergétique par optimisation (niveau supérieur) avec une analyse de pincement thermique (niveau inférieur).

e) Cas de la cogénération

La cogénération est la production simultanée de puissance, sous forme mécanique ou sous forme électrique, et de chaleur utile sous forme de vapeur (PAPRICAN, 1999). L'électricité ainsi produite peut servir à l'usine ou être vendue à l'extérieur. La configuration la plus commune dans les usines de pâtes et papiers est l'utilisation de turbine à contre pression avec une chaudière produisant de la vapeur. L'utilisation de turbines à condensation permet de générer plus d'électricité. On produit alors plus de vapeur que le procédé en nécessite et l'excès est condensé.

Il existe un compromis entre efficacité énergétique et cogénération (Axelsson et al., 1999). En effet en réduisant la consommation d'énergie le potentiel de cogénération diminue. Des modifications majeures du procédé et l'implantation de nouvelles technologies ont aussi un impact sur le potentiel de cogénération (Janssen et al., 2005), (Manninen et al., 2002).

2.1.3 Réduction de la consommation d'eau

a) Contexte

En 1994, les usines de pâtes et papiers canadiennes consommaient en moyenne 65 m^3 d'eau par tonne de papier produit. Lors des dernières décennies, les exigences économiques et des contraintes environnementales toujours plus strictes et toujours en évolution (Stuart et al. 1999a) ont amené les usines à réduire leur consommation d'eau fraîche et leurs rejets d'effluent. Dans les usines modernes de papier journal, les niveaux qui peuvent être atteints sont entre de 10 et $20 \text{ m}^3/\text{t}$. Les développements futurs tendront à diminuer encore l'utilisation d'eau avec en ligne de mire le concept d'effluent – zéro.

b) *Stratégie générale pour la réduction de l'utilisation d'eau*

L'objectif général n'est pas seulement de réduire la consommation spécifique d'eau des opérations unitaires mais d'augmenter la recirculation pour réduire la consommation d'eau fraîche. La stratégie la plus simple consiste à traiter la totalité de l'effluent jusqu'au niveau de qualité de l'eau fraîche et à le réutiliser entièrement. Klinker et Ronald (1996) présentent un exemple d'usine de carton nord-américaine. Cette méthode peut se révéler très inefficace d'un point de vue technologique et économique (Houle et al., 1999).

Pour répondre plus efficacement au problème, une méthodologie en trois étapes est proposée (Stuart et al., 1999b, Das, 2005) :

- 1) Identification et, si possible, élimination des contaminants à la source et optimisation du système de traitement des effluents.
- 2) Recirculation sélective après ségrégation des courants d'eaux selon leur niveau de contamination. Cette étape permet en particulier d'éviter de traiter de gros débits d'effluent et de diminuer la taille et les coûts des équipements de traitement éventuels.
- 3) Identification des solutions pour le traitement au point de rejet, propres à chaque usine (Figure 2.3) : traitements primaire et secondaire pour le rejet et traitement tertiaire et quaternaire pour la recirculation.

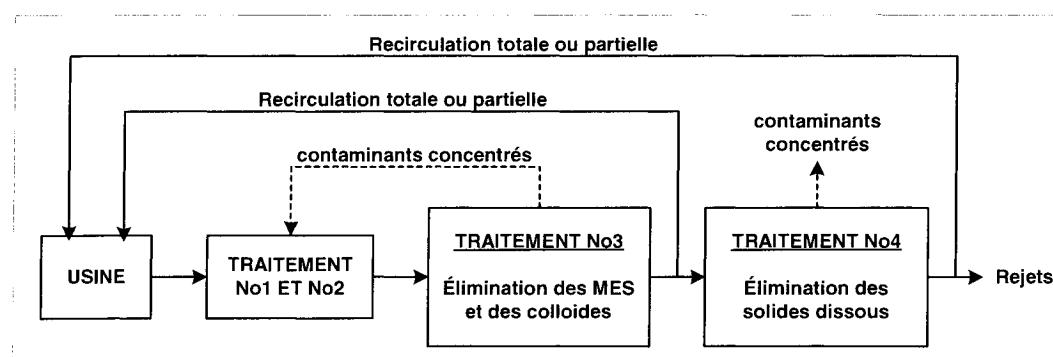


Figure 2.3 : Les quatre étapes de traitement au point de rejet.

Paulapuro (2000) expose une stratégie pour la recirculation sélective :

- 1) Définir la qualité requise pour chaque application. C'est l'étape la plus critique et la plus compliquée à mettre en oeuvre (Barnes, 1994a).
- 2) Répertorier des sources disponibles à différents niveaux de qualité.
- 3) Recirculer l'eau en associant les demandes et les sources, avec un traitement si nécessaire. L'eau doit être réutilisée le plus près possible de sa source et il faut utiliser la qualité minimale permise pour une application donnée.

Le problème d'association sources – demandes peut être résolu soit par intuition et expérience, soit à l'aide de l'analyse de pincement massique (Jacob et al. 1998), soit à l'aide de la programmation mathématique (Shafiei et al., 2002).

Les stratégies de recirculation d'eau sont donc intimement liées aux contaminants présents dans les circuits.

c) Contaminants dans les circuits papetiers

La notion de contaminant est définie par la qualité requise pour une application donnée. Par exemple, les fibres constituent la base du produit final mais deviennent un contaminant si l'on souhaite recirculer de l'eau blanche aux douches de la machine

La caractérisation des contaminants dans les circuits de pâte mécanique se heurte à des difficultés majeures (Wearing et al. 1985). La nature et la qualité des contaminants dépendent de l'espèce et du cycle de croissance de l'arbre, des types de vieux papiers utilisés, du procédé et des additifs. De plus la recirculation interne dans le réseau d'eau PTM et la recirculation d'eau blanche de la machine vers les ateliers de pâtes favorisent les interférences et les interactions entre systèmes complexes. Il est cependant possible de dresser un portrait général des contaminants dans les circuits.

Les contaminants peuvent être classés en deux catégories selon leur nature : les solides en suspension et les solides dissous et colloïdaux. Les solides en suspension regroupent certaines catégories de matériaux fibreux (fines) ou non fibreux (fibres des toiles et feutres de la machine à papier) et les additifs chimiques ajoutés au papier (charges). Les fines et les charges sont des composants à part entière du papier, cependant, lors de la formation de la feuille, une partie de ces éléments n'est pas retenue et se retrouve dans les circuits. Ils peuvent alors devenir des contaminants pour certaines applications.

Tableau 2.1 : Sources des principaux solides dissous et colloïdaux.

Nature	Sources
Hémicellulose	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Écorçage ▪ Défibrage mécanique ▪ Blanchiment (dissolution par augmentation du pH)
Pectines	
Lignines et dérivée	
Extractibles	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Écorçage ▪ Défibrage mécanique
Acide gras	
Sels inorganiques	
Silice polymérisée anionique	Produits chimiques résiduels du blanchiment
Agent chélateur	
Silicate de sodium	Blanchiment au peroxyde, désencrage, papier récupéré
Polyphosphate	
Polyacrylate	Agents de dispersion (circuits de la machine)
Acides organiques	
Carboxymethylcellulose	Cassés couchés
Amidon	Papier récupéré, cassés, agents de rétention
Lignosulfonate	Pâte sulfite, PCTM
Sulphate d'aluminuim	Additif (circuit de la machine)
Hydrosulphite de sodium	
Divers	Fuites d'étanchéité et de lubrification et dissolution de matériaux des équipements
Acide humique et substances organiques et inorganiques	Eau fraîche

Le Tableau 2.1 présente l'origine de solides dissous et colloïdaux dans les usines de papier journal (Sundholm, 2000, Paulapuro, 2000). Les substances dissoutes proviennent en majorité des matières premières (bois et vieux papiers, eau fraîche), de la fabrication de la pâte (défibrage, produits chimiques de désencrage, blanchiment) et des additifs chimiques ajoutés à la machine.

d) Effets des différents contaminants

L'accumulation des matières colloïdales et dissoutes ainsi que l'augmentation de température due à la fermeture des circuits ont des effets négatifs sur le procédé (en particulier sur les équipements) et sur la qualité du produit final (Tableau 2.2).

Tableau 2.2 : Problèmes liés à l'accumulation de contaminants (Paulapuro, 2000).

Matière en suspension	Solides dissous et colloïdaux	Température élevée
<ul style="list-style-type: none"> ▪ obturations des douches ▪ augmentation des fines et problème de rétention ▪ dépôts et abrasion ▪ réduction de la durée de vie des toiles 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ dépôts ▪ altération de la chimie de la partie humide ▪ augmentation de l'activité biologique ▪ corrosion ▪ couleur et odeur 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ problème de dimensionnement ▪ réduction de la capacité des pompes à vide ▪ augmentation de l'activité biologique

Les matières en suspension ont majoritairement un impact sur les équipements (par exemple : obturation des buses de douches), et altèrent ainsi la productivité de la machine à papier. Si elles sont recirculées dans les circuits de la machine, les fibres synthétiques des feutres de la machine peuvent réduire les propriétés mécaniques de la feuille.

Les solides dissous et colloïdaux ont en général un impact négatif sur les équipements. Les cendres anioniques consomment les aides à la rétention cationiques et augmentent donc les coûts d'utilisation d'additifs chimiques à la machine. Les substances organiques provoquent une activité microbienne, favorisée par l'augmentation de la température, qui s'accompagne de dépôts de boue et de corrosion. Les substances inorganiques (sels dissous) associées à l'augmentation de la température, favorisent la corrosion. L'accumulation de ces contaminants se solde donc par l'augmentation des coûts de maintenance, la réduction de la productivité de la machine et affecte indirectement la qualité du papier.

Asselman (1995) et Paris (2000) répertorient plusieurs études qui montrent l'impact négatif de plusieurs solides dissous et colloïdaux sur la qualité du papier. Les cendres anioniques affectent les liaisons fibre – fibre, le degré de blancheur et l'accessibilité des produits chimiques et les sels dissous provoquent le gonflement des fibres. La plupart des études s'accordent sur les effets négatifs des solides dissous et colloïdaux sur les propriétés mécaniques et optiques de la feuille (Wearing et al., 1985, Francis et Ouchi, 2001).

Les études consultées portant sur les effets des contaminants sur la qualité du papier et l'opération du procédé permettent de qualifier l'effet de la plupart des contaminants. Cependant, elles ont été réalisées en laboratoire et aucune étude ne permet de déterminer des concentrations maximales acceptables à la caisse de tête. Aucune étude ne propose de modèles pour représenter les interactions entre contaminants, la combinaison de leurs effets et surtout pour prévoir les effets d'une composition donnée de pâte sur les qualités du papier.

e) Méthodes de traitement

Il est nécessaire de traiter les eaux d'usine soit pour respecter des règles environnementales de rejets, soit pour atteindre un niveau de qualité donnée pour la recirculation vers une demande ciblée, soit pour purger le système des contaminants accumulés.

Le Tableau 2.3 résume les technologies de traitement qui sont envisageables (Gerbasi et al., 1993, Barnes, 1994b, Lagace et al., 1995, Paulapuro, 2000, Hynninen, 2000, et Savoie et al., 2001,). Des combinaisons de ces technologies sont à déterminer selon le procédé, le type d'effluent, la stratégie de recirculation et les applications.

Certaines de ces technologies sont utilisées au point de rejet (sédimentation, traitement biologique). D'autres interviennent dans des traitements localisés pour des recirculations partielles dans le procédé (Asselman, 1995, Tizon et al., 2005, Albert et al., 2006, Wearing et al., 2006).

Tableau 2.3 : Principales technologies de traitement de l'eau.

Technologie	Principe	Contaminants	Étape ¹
Sédimentation	Élimination par déposition, principalement grâce à la gravité, utilisation possible d'agents floculant.	Solides en suspension	1 et 2
Flottation	Flottation les particules à la surface de l'eau en y faisant adhérer des bulles ou des amas de bulles d'air.	Solides en suspension	3
Traitement biologique	Dégénération par des micro-organismes (bactéries) dans un réacteur biologique en milieu aérobie ou anaérobie.	Solides dissous (basse masse moléculaire)	1 et 2
Traitement physico-chimique	Action sélective physico-chimique pour éliminer le bon montant de contaminants pour chaque application.	Solides dissous organiques	3 et 4
Filtration	Passage l'eau à travers un média poreux, un tamis à grilles ou un matériau perforé.	Solides en suspension	3
Ultrafiltration	Séparation basée sur la masse moléculaire par filtration sous pression à travers une membrane poreuse.	Solides en suspension fins, solides dissous organiques (haute masse moléculaire)	3
Osmose inverse	Séparation utilisant les phénomènes d'osmose à travers une membrane semi-perméable.	Solides dissous inorganiques	4
Échange d'ions	Passage à travers un lit de résine échangeuse d'ion ou de granulés d'aluminium.	Anions et cations	4
Cristallisation par gel	Concentration des contaminants par gel du solvant aqueux.	Solides en suspension et solides dissous	-
Évaporation	Concentration des contaminants par évaporation du solvant aqueux.	Solides en suspension et solides dissous	-

1 : voir Figure 2.3.

2.1.4 Effluent – zéro

a) *Concept d'effluent – zéro*

L’Agence pour la Protection Environnementale américaine (EPA, 2004) définit ainsi un système opérant à effluent – zéro : « un système dont la somme d’eau fraîche et d’eau entrant avec la matière première est égale à la somme de l’eau qui sort avec le produit final, dans les courants de rejets venant de l’épuration (incluant les boues) et l’eau perdue via l’évaporation ». Quand la consommation d’eau fraîche se réduit alors à des applications non contaminantes (par ex. : refroidissement) ou sensibles (par ex. : certaines douches) et à compenser les pertes (par ex. : eau évaporée lors du séchage du papier), on parle de pseudo effluent – zéro.

b) *Application de l'effluent – zéro*

La faisabilité de l’application de l’effluent – zéro a été étudiée principalement pour des usines de carton à partir de fibres recyclés et plus rarement pour des usines de papier journal ou des usines de pâte Kraft (Stuart et al., 1994, Lagace et al. 2000). Le critère principal pour l’implantation de stratégies effluent – zéro est l’impact de la réutilisation des eaux usées sur la qualité du papier et sur l’opération de la partie humide de la machine (Lagace et al. 1997).

La faisabilité dépend aussi du niveau d’intégration, du contexte énergétique de l’usine, de la capacité d’incinérer les contaminants concentrés et de la résistance des équipements à la corrosion. En particulier, afin de réduire la taille des équipements, il est capital que la consommation d’eau soit réduite à son niveau minimum avant d’envisager les stratégies à effluent – zéro. L’opération à effluent – zéro n’est pas généralisable et la stratégie, les technologies à considérer et l’estimation des coûts sont spécifiques à chaque usine.

L'opération à effluent – zéro est relativement courante dans les usines de carton utilisant des fibres récupérées non désencrées (Barton et al. 1996). Pour les usines intégrées de papier journal, où le niveau de qualité du produit final est plus élevé que pour le carton, les solutions existent mais sont encore difficiles à justifier économiquement.

Gerbasi et al. (1993) identifient trois technologies susceptibles d'atteindre l'effluent – zéro : le traitement membranaire, la cristallisation et l'évaporation. L'ultrafiltration et l'osmose inverse sont utilisées en particulier pour des procédés papetiers avec couchage (Tizon et al., 2005) et la faisabilité technique est discutable pour le traitement de l'effluent. Cependant, les coûts des matériaux baissent et cette solution devient de plus en plus attrayante. Une unité de cristallisation a été implantée pour traiter l'effluent d'une usine de PCTMB mais les difficultés d'opération ont aboutie à l'abandon de cette option. Déjà utilisée dans les usines de pâte Kraft pour la récupération chimique, l'évaporation est la technologie la plus intéressante pour le traitement total d'un effluent avec un faible taux de solide. Actuellement en Amérique du Nord, les seules usines qui opèrent à effluent – zéro, autres que celles de papier carton, sont deux usines de PCTMB marchande où des technologies d'évaporation ont été implantées (Fromson et Leslie, 1994, Das, 2005). La seule solution évoquée dans la littérature pour éliminer les rejets concentrés résultant de ces différents traitements est l'incinération.

2.1.5 Conséquences énergétiques de la réduction d'eau

Il y a de grandes interactions entre les réseaux d'eau et d'énergie thermique dans les procédés de fabrication du papier journal. La circulation d'eau blanche, à l'intérieur d'un département ou entre des départements qui ont des températures de circuits différentes, a un impact direct sur la consommation de vapeur.

Dans une usine papier journal, chaque mètre cube d'eau fraîche consommée par le procédé correspond à une quantité d'énergie à fournir pour maintenir les circuits à la température d'opération, soit environ 0.2 GJ/m^3 . Le chauffage étant assuré par de la vapeur vive et/ou de l'énergie résiduelle (vapeur de l'atelier PTM et/ou air de la sécherie), une réduction de consommation d'eau fraîche va aboutir à la réduction de l'utilisation de vapeur vive et/ou de l'énergie résiduelle.

Quand on réduit la consommation d'eau, on observe ainsi une augmentation de la quantité d'énergie résiduelle disponible (Wising, 2003, Lafourcade et al., 2003). Cependant le potentiel de récupération de l'énergie résiduelle diminue car la température des courants à chauffer est plus élevée (Manninen cité de AIE, 2004).

Dans un système possédant de telles interactions, les approches d'identification de projets comme l'inspection ou l'étude de procédé, atteignent leurs limites. D'une part, rien n'assure que chaque projet identifié individuellement ne compromet pas les résultats obtenus par les autres projets. D'autre part ces approches donnent une liste de projets sans ordre d'implantation logique, même quand un objectif stratégique est considéré. Une méthode systématique et holistique est alors nécessaire pour mener à bien des programmes d'amélioration énergétique.

2.2 Conception des réseaux d'échanges de chaleur.

2.2.1 Revues des méthodes de conception

Furman et al. (2002) classent les techniques de conception d'échangeurs de chaleur en deux groupes qui sont, dans l'ordre historique de leur apparition : la génération séquentielle et la génération simultanée. Dans le premier groupe, le problème de construction est séparé en plusieurs parties, abordé soit avec des méthodes de conception évolutives, soit avec des techniques de programmation mathématique

appliquées de façon séquentielle. Dans le second groupe, le problème est résolu globalement par programmation mathématique pour obtenir un réseau optimal.

À la fin des années 1970, les premières méthodes proposées sont de type séquentielle évolutive (Linnhoff et Flower, 1978, Flower et Linnhoff 1978, Linnhoff et al., 1982). Elles posent les principes de l'analyse de pincement qui seront ensuite utilisés dans les travaux sur la conception des réseaux d'échangeur de chaleur. Au début des années 1980, les méthodes de type séquentiel faisant intervenir la programmation mathématique font leur apparition. Elles se concentrent sur la minimisation des utilités et du nombre d'unités d'échange (Cerda et al. 1983, Papoulias et al., 1983) et sur la minimisation du coût d'investissement (Floudas et al., 1986, Floudas et Grossmann, 1986). À la fin des années 1980, des techniques sont développées pour résoudre le problème de génération globale (Floudas et Cricic, 1989).

Les méthodes utilisant la programmation mathématique garantissent en théorie un résultat optimum mais débouchent sur des problèmes à résoudre beaucoup plus complexes que l'analyse de pincement. Elles sont moins conviviales, moins visuelles et surtout moins flexibles vis à vis du procédé. De plus elles nécessitent des modèles mathématiques fiables qui n'existent pas toujours pour décrire les systèmes étudiés.

2.2.2 Analyse de pincement thermique

L'analyse de pincement thermique est une technique séquentielle évolutive. Elle est basée sur les lois de la thermodynamique et sur le concept d'intervalles de température. L'analyse se décompose en trois étapes : l'extraction de données, la détermination des cibles de l'analyse et la conception du réseau d'échangeurs (Linnhoff et Hindmarsh, 1983).

a) Extraction

L'extraction consiste à sélectionner dans le procédé, les courants qui participent à l'analyse : les courants chauds, qui doivent être refroidis, et les courants froids, qui doivent être chauffés. Les courants externes au système qui peuvent servir à fournir ou à extraire de l'énergie du système sont extraits en tant qu'utilités (courants de vapeur, eau de refroidissement, ...). Bien que l'extraction conditionne la qualité du résultat final, aucune méthode n'est présentée dans la littérature. Il s'agit généralement de règles subjectives et basées sur l'expérience.

b) Méthode de ciblage

Contrairement à une méthode par programmation mathématique qui passe en revue un grand nombre de solutions possibles, les techniques de pincement font intervenir des cibles pour simplifier le problème, encadrer la conception et permettre ainsi une certaine interactivité. La détermination des cibles avant conception, ou ciblage s'appuie sur le compromis entre coûts d'investissement et d'exploitation. Dans le contexte d'intégration énergétique, les coûts d'investissement sont principalement liés aux coûts d'aire d'échange nécessaire et les coûts d'exploitation (dits « énergétiques ») sont liés à la consommation d'utilités de chauffage et de refroidissement. Plus on intègre le procédé, c'est-à-dire plus on favorise les échanges internes, plus les coûts d'utilités diminuent et les coûts d'aire d'échange augmentent.

ΔT_{min} est défini comme la différence de température minimum que l'on impose au système pour qu'un échange entre deux courants soit possible. Il permet de représenter le niveau d'intégration : plus ΔT_{min} est faible, plus on favorise les échanges internes et plus il est élevé, plus on favorise le recours à des utilités.

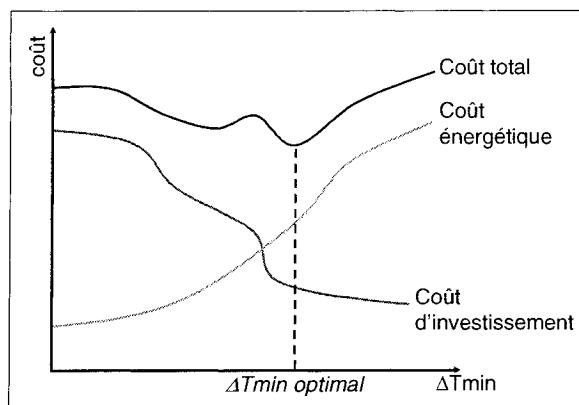


Figure 2.4 : Compromis de coût pour la conception d'un réseau d'échangeurs.

Le niveau d'intégration optimal, ou ΔT_{\min} optimal, correspondant à un coût total minimum (Figure 2.4). Pour déterminer l'optimum, les cibles énergétiques, l'aire minimum (A_{\min}) et la demande en refroidissement Q_c et la demande en chauffage Q_h , sont d'abord calculées pour plusieurs valeurs de ΔT_{\min} (Figure 2.5). À partir de ces cibles, les coûts d'aire d'échange et les coûts énergétiques, et donc le coût total, sont estimés pour chaque valeur de ΔT_{\min} .

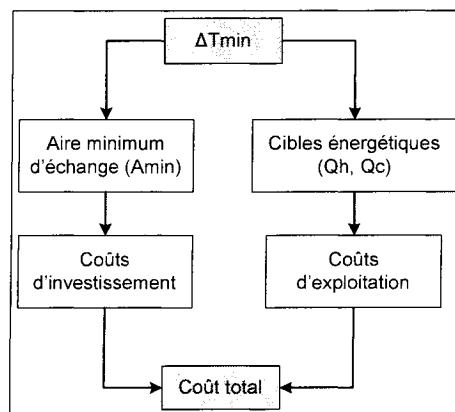


Figure 2.5 : Procédure de ciblage.

c) *Courbes composites*

Les cibles énergétiques peuvent être déterminées graphiquement par construction des courbes composites qui utilisent le concept d'intervalles de température, de courants composites et du ΔT_{\min} . Les échanges de chaleur ne sont plus considérés entre des courants chaud et froid entiers mais entre des portions de courants chauds et froids dans des intervalles de température donnés. Les portions de courants dans un même intervalle forment un courant composite. Le système est ainsi divisé en sous systèmes dans lesquels des échanges entre courants composites sont possibles.

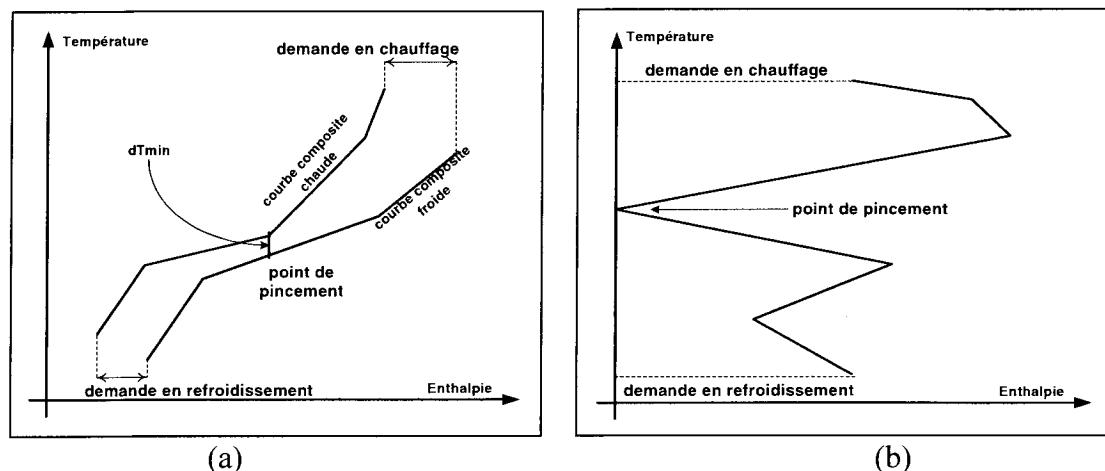


Figure 2.6 : Courbes Composites (a) et Grande Courbe Composite (b).

La courbe composite chaude (respectivement, froide) est une combinaison graphique des courants chauds (respectivement, froids) dans un diagramme enthalpie – température. La courbe chaude représente la quantité d'énergie totale disponible dans le système et la courbe froide représente la quantité d'énergie totale nécessaire dans le système. Le point où les deux courbes ne sont plus espacées que de ΔT_{\min} est le point de pincement et la température associée est appelée température de pincement. Les courbes donnent les cibles énergétiques (Figure 2.6(a)). La grande courbe composite représente la cascade d'énergie à travers les différents intervalles de température. Elle

permet d'optimiser la gestion des utilités aux différents niveaux de température (Figure 2.6(b)). Elle permet, en particulier, de placer de façon appropriée des équipements, comme une pompe à chaleur ou une turbine (Linnhoff et Eastwood, 1987).

d) Règles du pincement

Le point de pincement sépare fondamentalement le système en deux sous systèmes : au-dessus il y'a un déficit d'énergie, au-dessous il y a un excès d'énergie. Ces deux zones définissent trois règles du pincement :

- pas d'extraction d'énergie au-dessus du point de pincement
- pas d'apport d'énergie externe au-dessous du point de pincement
- pas de transfert de chaleur au travers du point de pincement

Toute violation d'une de ces règles entraîne une pénalité au niveau de la récupération d'énergie et éloigne le système de ses cibles énergétiques minimales. Cependant le point de pincement n'est pas une limite thermodynamique en soi mais une limite liée à ΔT_{\min} , c'est-à-dire aux cibles de conception optimales. Ainsi les règles de pincement peuvent être occasionnellement contournées pour des raisons qui ne sont prises en compte dans l'estimation simplifiée des coûts d'investissement ou d'utilités.

e) Construction du réseau

L'étape de conception est la construction d'un réseau d'échangeurs de chaleur qui s'approche le plus des objectifs du réseau idéal. La construction est graphique et interactive. Les échangeurs sont placés un par un dans le réseau de courants par l'application de règles de nature heuristique qui guident l'utilisateur dans ses choix pour respecter au mieux les règles du pincement et les cibles fixées.

Dans un premier temps, le système est séparés en deux sous – systèmes indépendant : au dessus et au dessous du point de pincement. Cette séparation simplifie le problème et le traitement séparé des parties assure le respect de la première règle du pincement.

La conception est réalisée pour chaque sous – système successivement. Les réseaux obtenus pour les deux sous – systèmes sont ensuite réunis pour former le réseau d'échangeurs final.

Pour à la fois minimiser le nombre d'échangeur et maximiser la récupération interne, la conception commence au point de pincement : c'est là que la contrainte sur le ΔT , et donc sur la conception des échangeurs, est la plus grande. Les courants à associer proche du pincement doivent respecter des règles heuristiques qui assurent que l'échange peut être réalisé jusqu'à épuisement d'un des deux courants. À mesure que l'on s'éloigne de point de pincement, les contraintes sont moins fortes. Quand plus aucune association n'est possible, on complète avec des utilités.

2.2.3 Évolution de l'analyse de pincement thermique

a) *Évolution des techniques*

L'évolution majeure de l'analyse de pincement classique est l'introduction d'outils d'optimisation par programmation mathématique pour déterminer A_{\min} en fonction : des coefficients de transfert de chaleur non uniformes (Linnhoff et Ahmad, 1900), des propriétés physiques des courants (Polley et al., 1991) ou des différentes configurations d'échangeurs dans un même réseau (Hall et al. 1990). Une autre approche consiste à prendre en compte ces différentes configurations dans l'équation de calcul du coût d'investissement (Ahmad et al., 1990). Pour ce qui est de la conception du réseau, des règles supplémentaires de conception sont proposées pour atteindre l'aire minimum ciblée (Linnhoff et Hindmarsh, 1983). De nouveaux outils sont développés pour optimiser la structure du réseau et prendre en compte le design détaillé des échangeurs (Roque et al., 2000, Ravagnani et al., 2003).

b) Évolution du champ d'application

L’analyse de pincement thermique a subit une évolution majeure au niveau de son champs d’application. Elle est devenue une méthodologie générale pour la réduction des émissions, des coûts d’investissement et de la consommation énergétique dans le contexte de la conception environnementale et de l’analyse globale d’un site (Linnhoff, 1994). Les courbes composites, sont alors utilisées pour identifier des opportunités d’amélioration énergétique, sans nécessairement aller jusqu’à la conception d’un réseau d’échangeurs de chaleur (Schaareman et al., 2000, American Process, 2003, Dykle et al., 2001).

c) Analyse globale de site

Introduit par Dhole et al. (1993) et Linnhoff et al. (1993), l’analyse globale de site est une méthode qui permet d’identifier les cibles pour le réseau d’utilité, la cogénération, les émissions et la demande en refroidissement pour un site regroupant plusieurs procédés et partageant un même réseau d’utilité. Les grandes courbes composites de chaque procédé sont utilisées pour construire le profil source – puits auquel le réseau d’utilité est surimposé.

d) Application en rétro-installation

En rétro-installation, les contraintes sont plus fortes que pour la conception de nouvelles installations : réseau d’échangeurs existants, contraintes spatiales fixes, conditions d’opération, etc. Les objectifs et les meilleures solutions sont moins évidents à identifier. L’application de l’analyse de pincement en rétro-installation a ainsi donné lieu au développement de méthodologies et de nouveaux outils.

Pour la détermination des cibles, Tjoe et al. (1986) proposent une méthode basée sur les mêmes principes que la méthode classique et Polley et al. (1990) ajoutent une étape qui permet de prendre en compte les pertes de pression dans le nouveau réseau. Carlsson et

al. (1993) proposent une autre approche où l'aire minimum n'est plus le seul paramètre clé : le coût total du réseau devient la cible principale. Nordman et Berntsson (2002) introduisent des nouvelles courbes composites chaudes et froides en remplacement de la grande courbe composite pour la détermination des cibles en rétro-installation en tenant compte du réseau actuel.

Au niveau de l'amélioration du réseau d'échangeurs, Tjoe et al (1986) proposent une procédure en quatre étapes qui consiste à identifier, éliminer et remplacer les échangeurs qui violent les règles du pincement. Carlsson et al. (1993) proposent une méthode matricielle et interactive pour la conception de réseaux d'échangeur en rétro-installation.

La conception du réseau d'échangeur peut parfois n'être qu'une partie d'une approche plus globale en rétro-installation, comme par exemple, pour la cogénération. Axelsson et al. (1999) proposent une méthodologie de réduction des émissions par amélioration du réseau d'échangeurs et intégration d'un système de cogénération qui utilise la méthode matricielle (Carlsson et al., 1993) et les nouvelles courbes composites (Nordman et Berntsson, 2002).

e) Analyse de pincement massique

Le concept de pincement massique découle de l'analogie entre les transferts de chaleur et les transferts de masse. Les courants riches et pauvres en contaminants sont traités de la même façon que les courants chauds et froids du pincement thermique. L'étude des réseaux d'échangeurs de matière a cependant des dimensions plus grandes car les transferts massiques peuvent mettre en jeu plusieurs contaminants. El-Halwagi et al. (1989) proposent la première méthode systématique de conception des réseaux d'échangeurs de masse, appliquée par la suite avec succès à des procédés chimiques traditionnels (El-Halwagi et Spriggs, 1998). À partir de ces travaux, Wang et Smith (1995) développent une méthode basée sur un seul courant pauvre, l'eau fraîche, avec

comme objectifs de minimiser l'utilisation d'eau dans le procédé. Hallale (2002) proposent une méthode pour identifier des échangeurs massiques entre courants d'eau pauvres et riches en contaminants. Ces deux dernières approches ne considèrent qu'un contaminant à la fois.

2.3 Application de l'analyse de pincement en pâtes et papiers

a) Analyse de pincement thermique

L'application de l'analyse de pincement en pâtes et papiers s'est généralisée depuis le milieu des années quatre-vingt (Ashton et al., 1987).

Berntsson et al. (2002) présentent une étude menée dans une usine PCTM-Kraft-Carton. Les nouvelles courbes composites permettent de localiser l'énergie excédentaire, et à partir de cette opportunité, plusieurs scénarios sont envisagés. Une étude du procédé combinée à une méthode de modification du réseau d'échangeur de chaleur permet de rendre l'énergie disponible pour ces scénarios. Axelsson et Berntsson (2005) utilisent des techniques avancées d'analyse de pincement thermique pour accroître la vapeur excédentaire disponible dans une usine de papier magazine.

Cependant, l'analyse de pincement thermique a surtout été appliquée en pâtes et papier par les consultants, que ce soit comme outil de conception de réseaux d'échangeurs de chaleur (Noel et Boisvert, 1998, Noel, 1995, Noel et Connaghan, 2003) ou comme guide pour l'amélioration énergétique (Schaareman et al., 2000, Dykle et al., 2001, American Process, 2004). Dans ce contexte, l'analyse de pincement permet plus d'organiser, hiérarchiser et caractériser des opportunités connues que d'identifier des solutions inédites.

b) *Analyse de pincement massique*

L'analyse de pincement massique a été appliquée à plusieurs reprise en pâtes et papiers (Tripathi, 1996, Jacob et al., 1998, Paris, 2000). Cependant la méthode se limite à l'étude d'un seul contaminant à la fois et l'analyse massique nécessite la caractérisation des cibles pour les niveaux de contaminant acceptables. Le premier problème peut être contourné par l'utilisation de la programmation mathématique. En revanche, il n'existe pas d'outil systématique pour l'identification des cibles massiques. Les interactions entre tous les éléments de la pâte et leurs effets sur la qualité du papier sont mal connus. L'application de l'analyse de pincement massique en pâtes et papiers reste donc limitée.

c) *Analyse simultanée eau – énergie*

Compte tenu de l'interaction très forte entre l'eau et l'énergie thermique, l'analyse de réduction simultanée est incontournable en pâtes et papiers. Des méthodes basées sur l'optimisation ont été développée pour l'analyse simultanée des réseaux d'échanges de chaleur et d'échanges massiques (Papalexandri et Pistikopoulos, 1994), Rossiter, 1995). Cependant, étant données la complexité des interactions entre les contaminants et l'absence de modèles corrects pour les représenter, ces méthodes ne sont pas applicable de façon pratique en pâtes et papiers.

Bien que l'analyse de pincement thermique ne considère que les échangeurs de chaleur indirects et ne prenne pas en compte systématiquement les interactions masse – énergie, elle sert de base à la majeure partie des analyses eau – énergie pour les procédés pâtes et papiers.

Schaareman et al. (2000) présentent une étude où les solutions de réduction d'eau découlent directement des changements proposés par l'analyse de pincement thermique. Cette approche est loin d'être systématique. Savulescu et al. (2005)

proposent une méthodologie où les projets de récupération de chaleur et de réduction d'effluent sont identifiés séparément puis combinés par la suite en plusieurs scénarios. Dans une étude de cas sur une usine virtuelle PTM-papier couché léger, Manninen (dans AIE 2004) réalise une analyse de procédé pour réduire la consommation d'eau. Il utilise ensuite l'analyse de pincement thermique pour identifier les utilisations possibles de l'énergie résiduelle, en particulier, l'évaporation de l'effluent. Dans une étude de cas dans une usine PCTM – Pâte sulfite – Carton, Bengtsson et al. (2002) se proposent, à partir d'une analyse de pincement thermique, d'étudier la faisabilité techno-économique de l'évaporation de l'effluent de l'atelier de pâte. Des scénarios sont mis en place à partir des opportunités de pré-évaporation et une analyse du réseau d'échangeur en rétro-installation est réalisée pour rendre l'énergie disponible. L'étude se conclut par une analyse de faisabilité économique.

Dans ces travaux cependant, la problématique énergie-eau n'est jamais abordé de front : soit les projets de réduction d'eau et d'énergie sont identifiés séparément et organisés ensuite, soit la méthodologie identifie par inspection des opportunités de réduction d'eau et utilise l'analyse de pincement pour rendre l'énergie résiduelle nécessaire à la réalisation des projets de réduction d'eau.

Une méthode pour l'analyse simultanée eau et énergie a été développée à partir de l'analyse de pincement thermique (Savulescu et al. 2005a). Des courbes composites permettent d'identifier un réseau mixte comprenant : des échangeurs de chaleur indirects, des mélanges entre courants froids et des mélanges entre courants chauds. Pour prendre en compte des projets de recirculation, un réseau d'eau optimal peut être défini avant (Savulescu et al., 2005b) en se basant sur des principes de pincement massique (Wang et Smith, 1995) et en considérant des contraintes de température. Il existe certaines limitations à cette méthode. La définition du réseau d'eau optimal ne prend en compte qu'un seul contaminant et aucune règle n'indique comment identifier les limites acceptables en pâtes et papiers. De plus la méthode ne considère pas

l'identification d'échanges de chaleur par mélange entre un courant chaud et un courant froid. La méthode a été appliquée à une usine pâte Kraft – papier carton mais sans étudier la création du réseau d'eau optimal, c'est-à-dire sans étudier les recirculations (Savulescu et al., 2002).

2.4 Conclusions de la recherche bibliographique

2.4.1 Synthèse

Les usines de pâte mécanique-papier journal consomment de grandes quantités d'eau fraîche et d'énergie thermique et électrique. Dans le contexte actuel (augmentation des coûts énergétiques, protocole de Kyoto et règles environnementales toujours plus restrictives), la réduction d'eau et d'énergie est un défi permanent qui doit s'inscrire dans une stratégie à long terme. En particulier, l'opération à effluent – zéro pourrait devenir une solution inévitable pour faire face à de nouvelles lois environnementales.

L'interaction entre l'eau et l'énergie est importante et leurs réductions doivent être étudiées simultanément. Les approches traditionnelles basées sur l'inspection et l'étude du procédé sont limitées pour aborder un tel problème. Un outil systématique et holistique est nécessaire pour identifier les projets avec une vision d'ensemble, contrôler les impacts de chaque projet les uns vis à vis des autres et les organiser en programmes d'implantation cohérents.

La génération simultanée de réseaux d'échanges de chaleur et de masse basée sur la programmation mathématique n'est pas pratique pour les procédés de pâtes et papiers. En effet, elle implique la résolution de problème d'optimisation complexe et peu flexible. De plus, il n'existe pas de modèles mathématiques pour représenter les interactions entre les divers contaminants présents dans les circuits papetiers, leur évolution et la combinaison de leurs effets sur le procédé et la qualité du papier.

L'analyse de pincement thermique est une méthode interactive éprouvée, utilisant des règles heuristiques pour la conception des réseaux d'échangeurs de chaleur. Son champ d'application a évolué pour devenir une méthodologie générale d'amélioration énergétique et de réduction des coûts liés à l'énergie, en particulier en rétro-installation. L'analyse de pincement thermique a fait l'objet d'importantes recherches, cependant peu a été fait pour considérer systématiquement les interactions eau – énergie. Une analyse de pincement massique a été développée par analogie mais il n'y a pas de méthode pratique pour déterminer les cibles massiques ou pour l'intégrer à une analyse thermique.

Dans l'industrie des pâtes et papiers, l'utilisation de l'analyse de pincement thermique s'est généralisée, principalement comme outil de diagnostic et d'amélioration énergétique en rétro-installation : elle sert alors surtout à organiser et à hiérarchiser des projets typiques. L'analyse de pincement a aussi été utilisée comme base de l'analyse simultanée eau – énergie. Cependant ces travaux n'abordent pas systématiquement le problème de réduction simultanée : soit les projets de réduction eau – énergie sont combinés de façon empirique, soit l'analyse énergétique est au service d'opportunités de réduction d'eau prédéfinies. Savulescu et al. (2005a) proposent une méthode pour concevoir un réseau mixte avec échangeurs de chaleur indirects et mélanges entre courants de même nature en ayant préalablement identifiées des projets de recirculation. Cependant, comme la méthode est en partie basée sur l'analyse de pincement massique, son application n'est pas évidente d'un point de vue pratique, en particulier en pâtes et papier.

2.4.2 Lacunes dans le corps de la connaissance

Réduction eau - énergie

Il n'existe pas de méthodologie pour identifier, de façon systématique et pratique, des projets de réduction d'eau et d'énergie en rétro-installation pour des sites industriels ; en particulier pour organiser ces projets en programmes cohérents pour atteindre des objectifs à court et à long terme.

Le potentiel de l'analyse de pincement thermique pour la réduction simultanée eau – énergie est reconnu mais peu exploité. En particulier, il n'existe pas de méthode pour identifier des échanges de chaleur directs entre courants froids et courants chauds à partir des techniques classiques de pincement.

Il n'existe pas de règles de conception, développées spécifiquement pour l'analyse eau – énergie pour une classe de procédé.

Contexte pâtes et papiers

En pâtes et papiers, aucune méthodologie n'a été appliquée pour identifier de façon pratique et simultanée des projets de réduction eau – énergie.

Il n'existe pas de routes technologiques concrètes proposées pour atteindre des niveaux minimum de consommation d'eau et d'énergie dans les usines de papier journal. En particulier, aucun travail n'explorait l'identification systématique de routes technologiques menant à l'opération à l'effluent – zéro.

CHAPITRE 3 : DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE EAU – ÉNERGIE

« Wars may be fought with weapons,

but they are won by men. »

Georges Smith Patton (1885-1945)

3.1 Méthodologie proposée

3.1.1 Étapes

La Figure 3.1 présente la méthodologie proposée pour l'analyse eau – énergie dans les usines de pâtes et papiers, inspirée de travaux exploratoires (Lafourcade, 2001).

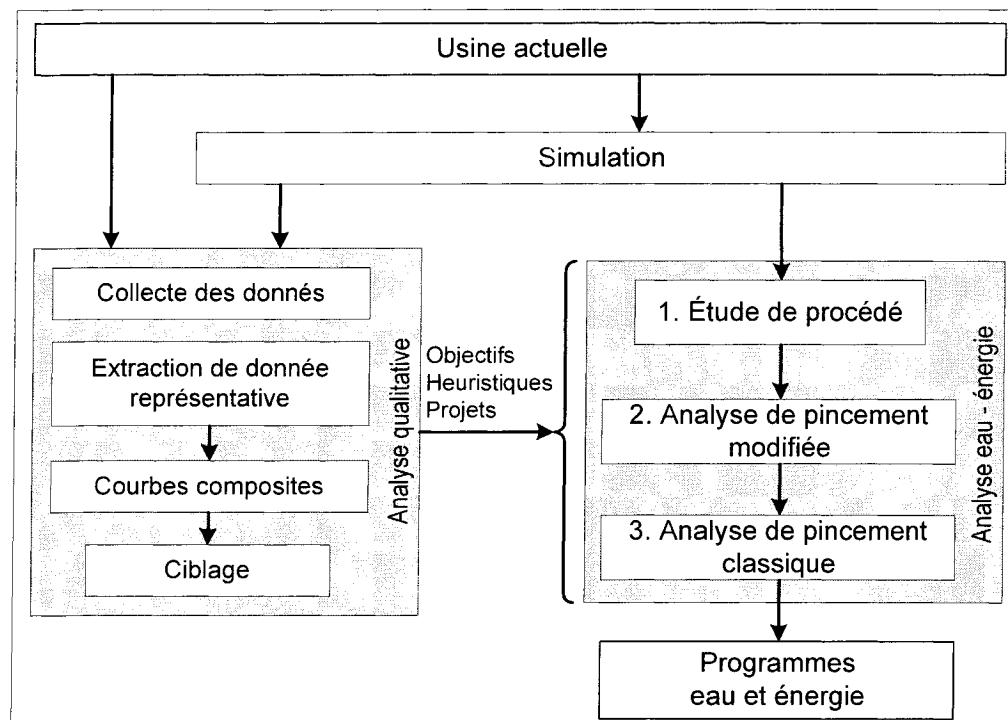


Figure 3.1 : Méthodologie d'analyse eau – énergie.

L'analyse qualitative consiste à collecter toutes les données nécessaires pour fixer les objectifs de l'étude, pour déterminer le profil eau – énergie de l'usine et sa situation vis à vis de l'amélioration de son procédé et enfin pour définir les règles heuristiques spécifiques à utiliser.

L'analyse eau – énergie proprement dite permet d'identifier des programmes de projets. Elle se déroule en trois phases. Une étude de procédé identifie des projets classiques ou des projets qui sortent du cadre du pincement. Ensuite une analyse de pincement thermique modifiée identifie des projets d'échange de chaleur par mélange. Enfin une analyse de pincement thermique classique identifie des projets d'échangeurs de chaleur indirects.

3.1.2 Approche heuristique

Une heuristique est une règle qui permet de réduire la complexité d'un problème et est utilisée plus spécifiquement pour la recherche arborescente. Dans le contexte d'intégration des procédés, les règles heuristiques se basent sur l'expérience de conception pour obtenir solutions de façon pratique (AIE, 1996). Par opposition aux méthodes algorithmiques qui utilisent des modèles mathématiques, les méthodes heuristiques ne garantissent pas l'obtention d'une solution optimale. Cependant si les heuristiques sont développées rigoureusement, elles mènent à des solutions correctes et现实的, d'une façon plus interactive, plus pratique et donc plus simple à mettre en œuvre. De plus elles permettent d'aborder des problèmes pour lesquels des modèles mathématiques précis ne sont pas disponibles.

Dans le contexte de notre méthodologie, les règles de conception heuristiques sont des règles qui facilitent l'application de l'analyse eau et énergie pour les usines intégrées de papier journal et assurent l'obtention de résultats pratiques, c'est à dire de projets réalisables dans la situation de l'usine étudiée.

Dans ce chapitre, les principes théoriques du pincement thermique ont été étudiés pour créer, à chaque étape de la méthodologie, des règles de conception générales. Ensuite, des règles de conception ont été proposées spécifiquement pour les usines de papier journal en se basant :

- sur les règles de conception générales,
- sur les approches traditionnelles de réduction d'eau et d'énergie
- sur la connaissance approfondie du procédé,
- sur des données tirées de l'étude de cas 1
- et sur des analyses de sensibilité.

3.2 Collecte et organisation des données

Le développement de programmes d'efficacité énergétique et de réduction d'eau implique de nombreux éléments d'informations (Connaghan et Wunderlich, 1999, Gagnon et Noel, 1999, Herschmiller et Hastings, 1994) tels que les données d'évaluation comparative (*benchmarking*), un audit eau et énergie incluant les indicateurs clé de performance, la description des réseaux de distribution, de consommation, de rejet et de réutilisation pour l'eau et l'énergie. La connaissance de la gestion actuelle de l'usine et des objectifs énergétiques identifiés et documentés est aussi nécessaire. Ces étapes sont incluses dans la méthodologie, en particulier, un outil de benchmarking est proposé. Un questionnaire a été développé pour guider la collecte des informations nécessaires à l'application de la méthodologie dans une usine de papier journal. Le questionnaire ne dispense pas d'une visite du site et de discussions plus approfondies avec le personnel sur les spécificités de la gestion eau et énergie. D'autre part le développement et la validation des bilans de masse et d'énergie nécessitent une grande quantité de données de conception et d'opération.

La qualité des résultats de la méthodologie dépend intimement de la qualité des données collectées. Celle-ci est liée aux systèmes d'information utilisés par l'usine, en particulier la forme sous laquelle l'information est disponible. La qualité des données mesurées directement dépend de l'emplacement du point de mesure et de la calibration des appareils de mesures. La qualité des données calculées dépend des données mesurées utilisées et des approximations entourant le calcul. Certaines données ne sont disponibles qu'informellement, par exemple les observations quotidiennes des opérateurs ou les études réalisées par des consultants dans le passé. Pour s'assurer une bonne qualité des données collectées, la règle générale est de ne jamais faire confiance a priori à une donnée. Il est important de confronter les sources d'information entre elles pour en augmenter la qualité. Par exemple, il faut autant que possible valider, avec le personnel de l'usine, une donnée mesurée et vérifier qu'une observation est cohérente avec les données mesurées. La qualité des données intervient au moment de l'interprétation des résultats. Si un résultat dépend d'une donnée pour laquelle la confiance est faible, ce résultat doit être présenté avec prudence, en précisant les conditions dans lesquelles ce résultat est valide.

3.3 Extraction représentative

3.3.1 Principes

L'extraction représentative obéit au principe selon lequel les techniques de pincement peuvent être utilisé comme outil général de diagnostic énergétique (Linnhoff, 1994). Elle désigne l'extraction de données destinée à représenter, au travers des courbes composites, la situation et les objectifs énergétiques du procédé. Elle peut aussi être utilisée pour comparer des usines entre elles.

Quand l'analyse de pincement thermique est appliquée pour représenter une usine de papier journal d'un point de vue énergétique, il est possible de développer une liste prédefinie de courants à extraire (« format d'extraction »). L'objectif de ce format

d'extraction est de réaliser une extraction représentative assez détaillée avec un minimum de données de l'usine.

3.3.2 Format d'extraction

Le Tableau 3.1 donne le format d'extraction final pour la représentation d'un point de vue énergétique d'une usine de papier journal.

Tableau 3.1 : Format d'extraction pour les usines intégrées de papier journal.

Courants extraits	
1-Chauffage eau de lavage	14- Machine- Sécherie
2-Chauffage eau d'appoint lavage	15- Machine- Chauffage air des poches
3-Chauffage copeaux (silo et préchauffeurs)	16- Machine- Air évacué sécherie
4-Effluent lavage	17-Chauffage eau des douches
5-Excès eau blanche PTM vers effluent	18-Refroidissement pompes à vide
6-Vapeur récupérée PTM	19-Effluent pompes à vide
7-Effluent désencrage	20-Refroidissement moteurs PTM
8-Chauffage circuit désencrage	21-Effluent moteurs PTM
9-Machine- Chauffage silo hors machine	22-Refroidissement lubrification / climatisation
10-Machine- Appoint EF aux circuits machine	23-Effluent lubrification / climatisation
11-Machine- Effluent des presses	24-Eau NC vers effluent
12-Excès eau blanche machine vers effluent	25-Chauffage bâtiments
13-Boîte à vapeur des machines	

Ce format a été développé à partir d'une liste de courants extraits, utilisée lors de travaux antérieurs. Cette liste préliminaire a été comparée à des travaux publiés dans la littérature et discutée avec des experts en pincement lors des réunions de travail de l'Agence Internationale de L'Énergie (AIE, 2002). Deux paramètres ont été étudiés : le choix et le traitement des courants extraits. Le choix des courants définit les frontières du système que l'on veut représenter et l'emphase que l'on veut mettre sur certaines parties (procédé ou réseau d'utilité). Le traitement des courants est la façon de traduire les courants physiques en données thermodynamiques pertinentes avec les objectifs de l'étude. Des expériences ont ensuite été réalisées pour faire évoluer la liste jusqu'au format d'extraction voulu (annexe A).

3.4 Simulation

La simulation du procédé est un outil essentiel pour la mise en œuvre de programmes d'amélioration. Elle permet de réaliser les bilans de masse et d'énergie pour plusieurs conditions d'opération, d'extraire les données nécessaires à l'analyse et d'estimer les impacts des projets obtenus sur l'ensemble du procédé (Labidi et al., 1999).

La réalisation d'une simulation comprend : la construction, la collecte et la réconciliation de données, la calibration et la validation (Paris, 2000). La validation est une étape critique pour établir la confiance que l'on peut avoir en une simulation car elle assure que la simulation représente de façon fidèle le procédé actuel. Le processus formel est complexe et peut prendre beaucoup de temps (Jacob et al., 2001). Une validation non formelle consiste à vérifier les diagrammes d'écoulement et des modèles avec le personnel de l'usine et valider des résultats clés pour les principales conditions d'opération.

3.5 Ciblage

Les courbes composites avec la demande actuelle en chauffage ($Q_{h\text{actuelle}}$) sont le point de départ du ciblage. La valeur de ΔT_{\min} est alors réduite jusqu'à un niveau donné d'intégration ($\Delta T_{\min}(\text{cible})$) et les courbes donnent la demande en chauffage ciblée ($Q_{h\text{ciblée}}$). La comparaison des deux situations donne trois informations : le point d'engorgement (*bottleneck*), l'inefficacité dans le procédé et le potentiel d'intégration. En générale la valeur choisie pour le $\Delta T_{\min}(\text{cible})$ est 10°C quand on considère des technologies d'échangeurs conservatrices dans l'industrie papetière, 5°C quand on considère les meilleures technologies disponibles.

La Figure 3.2 illustre les courbes composites pour le ciblage de l'étude de cas 1. Les principaux courants froids et chauds sont indiqués.

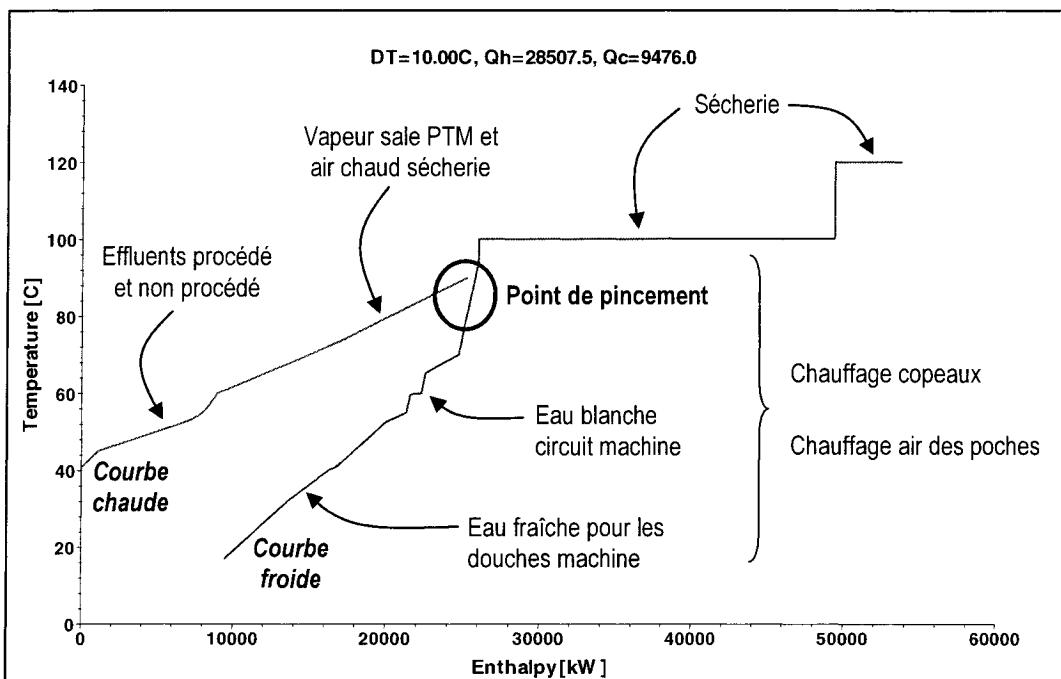


Figure 3.2 : Courbes composite à $\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$ pour l'étude de cas 1.

3.5.1 Goulot d'étranglement (bottleneck)

Le *bottleneck* représente le point du procédé qui limite l'intégration. Il est donné par le point de pincement sur les courbes composites à ΔT_{\min} (cible). Le *bottleneck* fournit deux types d'information pour l'application de l'analyse eau – énergie.

D'abord, des projets d'amélioration énergétique peuvent être identifiés pour éliminer les *bottlenecks*. Par exemple, la production de vapeur propre au PTM permet d'éliminer le *bottleneck* causé par la vapeur sale.

Ensuite, les *bottlenecks* indiquent la flexibilité dont l'utilisateur dispose par rapport à l'intégration du procédé. Pour l'étude de cas 1, le *bottleneck* est la vapeur sale PTM. Il y a alors suffisamment de vapeur sale pour remplir les besoins de chauffage basse température : eau fraîche, eau blanche, une partie de l'air chaud et des copeaux (Figure 3.2). Plus de projets que nécessaire sont possibles pour atteindre la cible : dans

l'éventualité de projets non réalisables, il reste des opportunités pour atteindre la demande ciblée de chauffage. Si le *bottleneck* est $Q_c = 0 \text{ kW}$, il n'y a pas assez d'énergie excédentaire et celle-ci doit être utilisée en totalité pour atteindre la demande ciblée. En conséquence, l'intégration est moins flexible car on ne peut pas se permettre d'avoir des projets non réalisables.

3.5.2 Inefficacités du procédé

Les inefficacités énergétiques du procédé sont données par les violations aux règles du pincement qu'il faut éliminer pour pouvoir atteindre le niveau d'intégration ciblé. À partir des violations observées et en appliquant le principe des échangeurs de chaleur verticaux, il est possible d'identifier des opportunités d'intégration.

Pour l'étude de cas 1, les violations sont le chauffage de l'eau fraîche, de l'eau blanche et de l'air d'alimentation de la sécherie avec de la vapeur vive (courants situés sous le point de pincement). Elles inspirent des projets d'amélioration telle que : l'utilisation de la vapeur sale PTM et de l'air de la sécherie pour chauffer l'eau blanche et l'air d'alimentation de la sécherie, l'utilisation de l'effluent pour chauffer l'eau fraîche.

3.5.3 Potentiel d'intégration

Le potentiel d'intégration est défini par la différence entre $Q_{h\text{actuelle}}$ et $Q_{h\text{ciblée}}$. Il représente la réduction maximale de la demande en chauffage qui peut être atteint dans le procédé par amélioration du réseau d'échangeurs indirects. Pour l'étude de cas 1, le potentiel de réduction de la demande en chauffage est de 19 MW.

Ce potentiel est prévisible à partir des courbes composites car il représente le niveau qui peut être atteint en implantant des projets d'échangeurs de chaleur indirects verticaux. Les projets tels que les mélanges de courants, les recirculations ou la récupération de la vapeur PTM affecte la structure des courbes car il affecte les bilans massiques. A priori le potentiel défini à partir des courbes composites n'est pas valable

pour prévoir l'effet des programmes de réduction d'eau et d'énergie s'ils contiennent d'autres projets que des échangeurs de chaleur indirects.

3.6 Étude de procédé

L'amélioration continue obéit à une loi de Pareto : un bénéfice notable peut être obtenu avec un minimum d'effort. Suivant ce principe, l'étude de procédé permet d'identifier des projets d'amélioration eau – énergie évidents avant d'utiliser un outil d'analyse sophistiqué. Elle s'inspire de l'évaluation comparative, de l'audit, d'études antérieures, de la liste des projets en court ou envisagés par l'usine, de l'orientation technologique et de l'étude des courbes composites.

Les projets se classent en quatre familles :

1. Projets d'origine technique : projets d'amélioration par des actions ponctuelles sur le procédé impliquant de faibles investissements
2. Projets d'origine technologique : projets impliquant un changement de technologie ou une modernisation majeure d'une unité ou d'un procédé
3. Projets énergétiques hors du champ d'application de l'analyse de pincement
4. Projets énergétiques identifiables par analyse de pincement

Les projets identifiables par une analyse de pincement sont mis de côté et serviront d'inspiration pour les analyses de pincement modifiée et classique. Les projets retenus sont organisés en scénarios évalués et sélectionnés dans la simulation. Les scénarios retenus deviennent des cas d'études supplémentaires pour l'application de l'analyse de pincement modifiée puis pour celle de l'analyse de pincement classique (Figure 3.3).

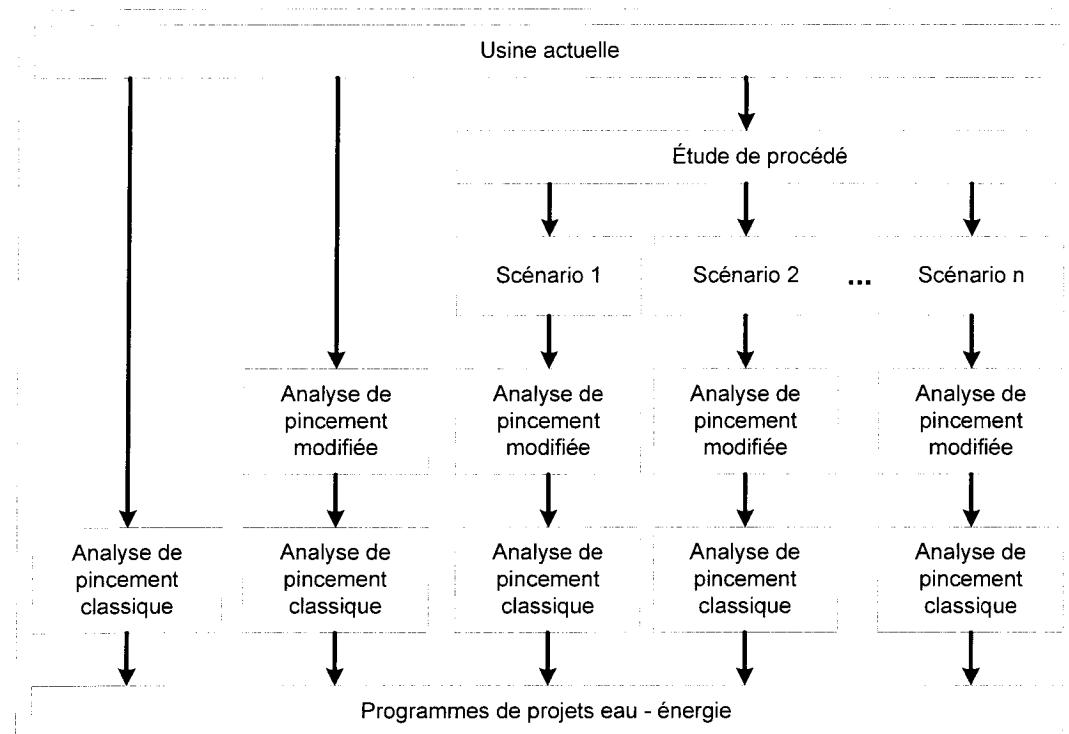


Figure 3.3 : Application de l'analyse eau – énergie à partir de l'étude de procédé.

3.7 Base théorique de l'analyse de pincement modifiée

3.7.1 Objectif

L'objectif est de déterminer dans quelles conditions les règles traditionnelles de l'analyse de pincement thermique peuvent être utilisées pour identifier des échanges directs par mélange à partir d'un réseau d'échangeurs de chaleur indirects.

3.7.2 Ciblage

La détermination des cibles avant conception est un des éléments essentiels qui font de l'analyse de pincement un outil pratique et interactif. Le ciblage se base sur le compromis entre le coût d'investissement (lié à l'aire minimum d'échange) et le coût d'exploitation (lié aux cibles énergétiques). Plus le calcul de l'aire minimum d'échange de chaleur (A_{min}) et des cibles énergétiques (demandes en refroidissement Q_c et en chauffage Q_h) est simple, plus la procédure de ciblage est pratique. Pour cela, l'analyse de pincement thermique fait appel à la notion d'échangeurs verticaux et d'intervalles de température.

3.7.3 Échangeurs verticaux et d'intervalles de température

a) Définitions

Soit un courant chaud et un courant froid tels qu'illustrés par la Figure 3.4.

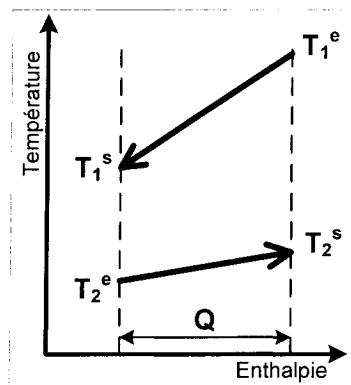


Figure 3.4 : Échange de chaleur indirect à contre courant.

Chaque courant est défini par sa température initiale (T_e), sa température finale ou « ciblée » (T_s), par une variation d'enthalpie Q (en kW) et par la capacité calorifique C_P (kW/ $^{\circ}$ C) (produit de sa chaleur massique et de son débit massique). Si on considère un échangeur à contre courant entre 1 et 2, la quantité de chaleur échangée Q est (Kreith et Black, 1980) :

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{LM} = U \cdot A \cdot \frac{(T_1^s - T_2^s) - (T_1^e - T_2^e)}{\ln \frac{(T_1^s - T_2^s)}{(T_1^e - T_2^e)}} \quad (\text{Équation 3.1})$$

où ΔT_{LM} est la différence de température logarithmique, A est l'aire d'échange nécessaire et U le coefficient d'échange global qui dépend d'une part de la surface d'échange et d'autre part des coefficients de transfert de chaleur h des courants (dépendant eux même de l'hydrodynamique et de la nature des fluides).

La performance d'échange de chaleur est ici définie par la capacité à transférer la quantité exacte d'énergie pour amener les deux courants à leur température cible T^s .

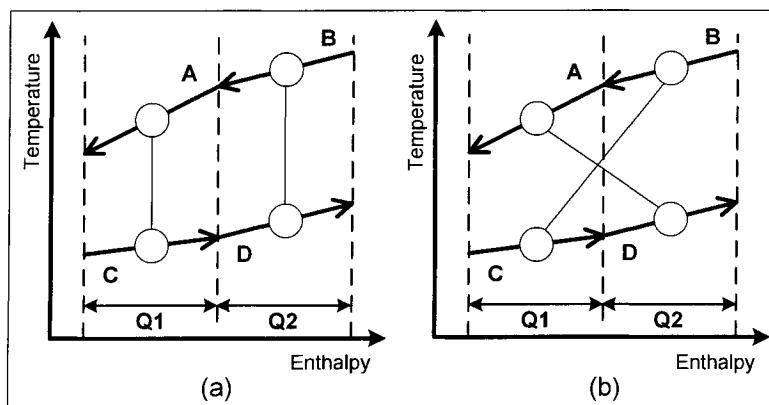


Figure 3.5 : Échanges de chaleur verticaux (a) et croisés (b).

Soient deux courants chauds A et B et deux courants froids C et D (Figure 3.5). Ces courants peuvent être associés de deux façons pour réaliser des échanges de chaleur. Soient avec des échangeurs dit « verticaux » : A//C et B//D (cas a); soit avec des échangeurs dit « croisés » : A//D et B//C (cas b).

b) *Intervalle de température*

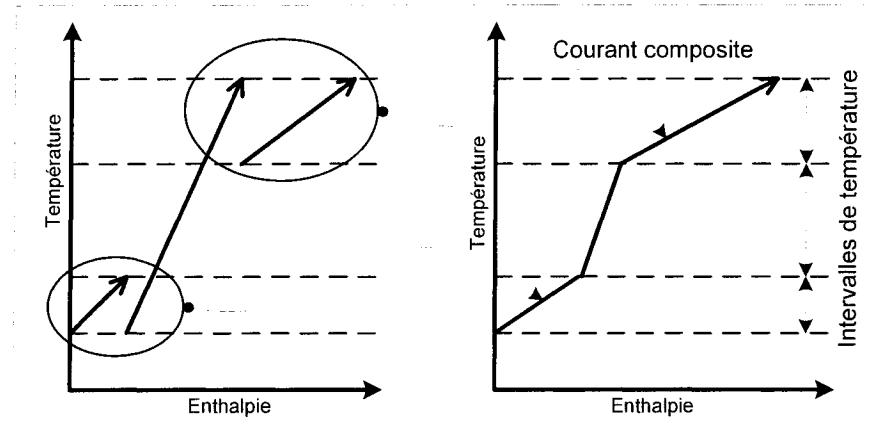


Figure 3.6 : Construction des courants composites.

L'hypothèse principale sur laquelle repose le ciblage est la suivante : les échangeurs verticaux assurent une aire d'échange minimum. Ainsi pour cibler l'aire minimum du réseau à concevoir, il faut se ramener à des intervalles où l'on puisse utiliser des échangeurs verticaux à contre courant, dont l'aire sera facile à estimer avec l'Équation 3.1). C'est l'intérêt des intervalles de température utilisés dans l'analyse de pincement. Pour les courants chauds puis pour les courants froids, la plage de température est divisée en intervalles dans lesquelles on additionne les portions des différents courants pour créer des courants composites (Figure 3.6). Les courants composites chauds (respectivement froids) mis « bout à bout » dans un diagramme enthalpie – température, forment la courbe composite chaude (respectivement froide).

c) *Estimation de Amin et des cibles énergétiques*

À partir des courbes composites à un ΔT_{\min} donné, il est possible de définir des intervalles d'enthalpies dans lesquels des courants composites chauds et froids sont en vis-à-vis (Figure 3.7).

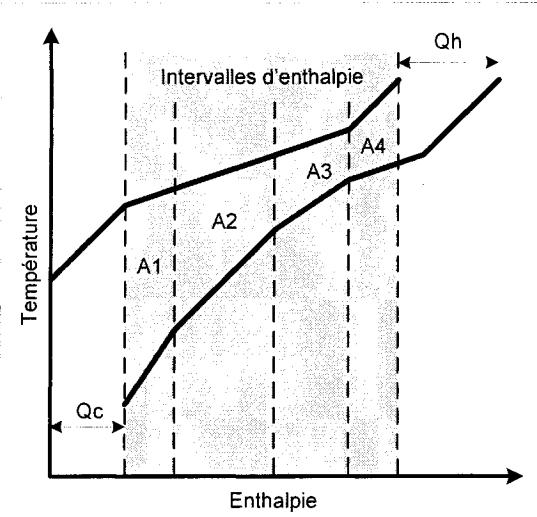


Figure 3.7 : Détermination des cibles à partir des courbes composites.

Chacun de ces intervalles est assimilable à un échangeur à contre courant. L'air minimum est la somme des aires obtenues dans chaque intervalle (Linnhoff et Ahmad 1990) :

$$A_{min} = \sum_i^{interval} A_i = \sum_i^{interval} \frac{I}{\Delta T_{LMi}} \sum_j^{courants} \left(\frac{Q_{ij}}{h_j} \right)$$

Avec : A_i l'aire d'échange total dans l'intervalle i,

$\Delta T_{LM,i}$ la différence de température logarithmique dans l'intervalle i,

Q_{ij} la variation d'enthalpie de la portion du courant j dans l'intervalle i,

h_j le coefficient de transfert de chaleur du courant j.

d) Limite de la notion d'échangeurs verticaux

La méthode de ciblage et en particulier de ciblage de l'aire d'échange est basée sur l'hypothèse que les échanges verticaux assurent l'obtention d'une aire d'échange minimale. Cependant cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée.

Considérons l'exemple illustré par la Figure 3.5 avec $Q_1 = Q_2 = Q_{\text{ech}}$. Théoriquement, pour U constant, en croisant les échangeurs, l'aire d'un échangeur augmente alors que celle de l'autre diminue. En effet :

$$\Delta TLM_{AD} < \Delta TLM_{AC} < \Delta TLM_{BC} \text{ et } \Delta TLM_{AD} < \Delta TLM_{BD} < \Delta TLM_{BC}$$

où ΔTLM_{XY} est la différence de température logarithmique pour un échange entre les courants X et Y.

Tableau 3.2 : Exemple numérique comparant les échangeurs verticaux et croisés

Courant	T ^e (°C)	T ^s (°C)	CP (kW/°C)
A	30	130	$Q_{\text{ech}} / 100$
B	130	230	$Q_{\text{ech}} / 100$
C	20	25	$Q_{\text{ech}} / 5$
D	25	30	$Q_{\text{ech}} / 5$
A.U_(AC+BD) (échangeurs verticaux)			188 kW/°C
A.U_(AD+BC) (échangeurs croisés)			184 kW/°C

Les deux effets se compensent. Un exemple numérique (Tableau 3.2) montre même que dans certaines conditions (h constants), l'aire totale des échangeurs croisés est similaire à celle des échangeurs verticaux : les échangeurs croisées peuvent être une solution au moins aussi bonne.

De la même façon (Linnhoff et Ahmad, 1990) montrent que certaines combinaisons des coefficients de transfert de chaleur des courants peuvent mener à des erreurs de ciblage de l'aire minimum de 10%. Cette erreur peut être éliminée mais avec l'intervention de la programmation mathématique (Ahmad et al., 1990) et l'abandon du ciblage traditionnel.

Ainsi, l'hypothèse relative aux échangeurs verticaux peut parfois amener à des erreurs notables sur l'aire minimum ciblée et mettre de côté de bonnes solutions impliquant des échangeurs croisés. La prise en considération des échangeurs croisés et des coefficients de transfert de chaleur, compliquent cependant le problème et

nécessitent le recours à de la programmation mathématique (Carlsson, 1996). Donc, cette hypothèse est certes simplificatrice, mais elle permet de déterminer relativement simplement des cibles réalistes et pratiques.

3.7.4 Ciblage d'un mélange de courants

a) Bilan massique et thermique d'un mélange

Considérons un mélange de deux courants d'eau contenant une certaine quantité de matières solides (Figure 3.8). Les notations utilisées sont les suivantes : m est le débit massique total, c est la concentration totale en solide, T est la température et Cp est la capacité calorifique.

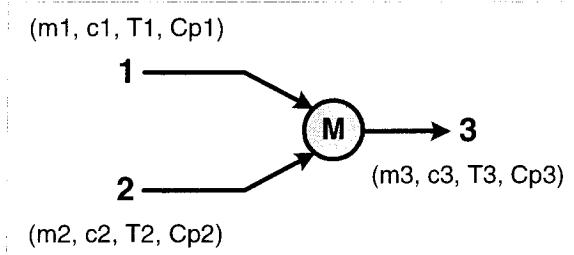


Figure 3.8 : Mélange de deux courants.

Le bilan énergétique, pour un mélange parfait, adiabatique, en l'absence de réaction, est le suivant :

$$m_1 \cdot Cp_1 \cdot (T_1 - T_o) + m_2 \cdot Cp_2 \cdot (T_2 - T_o) = m_3 \cdot Cp_3 \cdot (T_3 - T_o)$$

avec T_o est la température de référence.

La température T_3 du mélange est donc :

$$T_3 = \frac{[(1 - c_1)m_1 T_1 + (1 - c_2)m_2 T_2]Cp_E + (c_1 \cdot m_1 \cdot T_1 + c_2 \cdot m_2 \cdot T_2)Cp_S}{[(1 - c_1)m_1 + (1 - c_2)m_2]Cp_E + (c_1 \cdot m_1 + c_2 \cdot m_2)Cp_S}$$

avec Cp_E et Cp_S les capacités calorifiques moyennes respectives de l'eau et de la matière solide.

Si la concentration en solide est faible ($c \ll 1$) et en introduisant $CP = m.Cp$, T3 devient :

$$T_3 = \frac{CP_1 \cdot T_1 + CP_2 \cdot T_2}{CP_1 + CP_2} \quad (\text{Équation 3.2})$$

b) *Comparaison entre mélange et échangeur indirect*

Soit un courant chaud et un courant froid, illustrés par la Figure 3.4. Soient Q_{ech} l'énergie qui est échangée par un échangeur indirect et Q_m l'énergie qui est échangée par mélange parfait des deux courants. Q_{ech} et Q_m peuvent s'exprimer ainsi :

$$Q_{\text{ech}} = CP_1 \cdot (T_1^e - T_1^s) = CP_2 \cdot (T_2^e - T_2^s) \quad \text{et} \quad Q_m = CP_1 \cdot (T_1^e - T_m) = CP_2 \cdot (T_m - T_2^e)$$

Avec T_m la température finale du mélange.

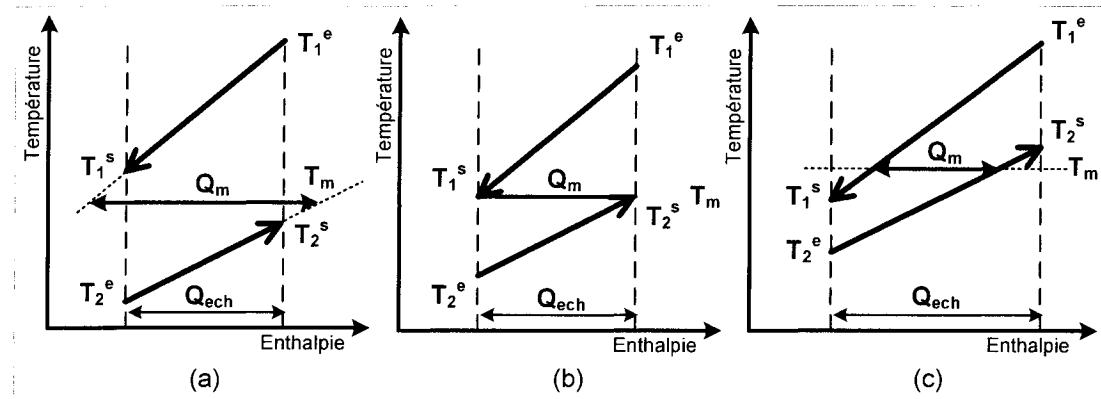


Figure 3.9 : Comparaison échangeur indirect – mélange.

La Figure 3.9 présentent les trois cas qui se présentent quand l'échange indirect entre les deux courants est convertit en échange par mélange. La comparaison entre Q_m et Q_{ech} dépend des valeurs relatives de T_1^s et de T_2^s :

- Si $T_1^s > T_2^s$ alors $T_1^s > T_m > T_2^s$ et $Q_{\text{ech}} < Q_m$ (cas a)
- Si $T_1^s = T_2^s$ alors $T_1^s = T_m = T_2^s$ et $Q_{\text{ech}} = Q_m$ (cas b)
- Si $T_1^s < T_2^s$ alors $T_1^s < T_m < T_2^s$ et $Q_{\text{ech}} > Q_m$ (cas c)

L'objectifs étant d'atteindre les températures cible de chaque courant (T^s), plus les températures ciblées des deux courants sont proche, plus le mélange s'approchera des performances de l'échangeur indirect.

c) *Règles de ciblage pour les mélanges*

Quand on considère un échange de chaleur par mélange de courant, la notion d'aire minimum d'échange et la définition classique du ciblage ne sont plus valable. Les nouveaux objectifs du ciblage peuvent être formulés de la façon suivante : déterminer la valeur optimale du ΔT_{min} pour concevoir un réseau dans lequel la plupart des échangeurs de chaleur indirect peuvent être convertis en mélanges sans affecter la performance de chaque échange.

Un échangeur de chaleur entre deux courants avec $T_1^s = T_2^s$ peut être converti en mélange sans que cela n'affecte sa performance. Dans l'analyse de pincement traditionnelle, des échangeurs de chaleur verticaux sont identifiés pour chaque intervalle d'enthalpie entre deux courants composites. En conséquence, si dans un intervalle d'enthalpie, les courants composites ont la caractéristique $T_1^s = T_2^s$, l'échangeur indirect vertical identifié pour l'intervalle peut être converti en mélange sans affecter sa performance. Ce type de mélange, qui peut être identifié en utilisant le concept d'échangeurs verticaux, est appelé mélange vertical. En changeant la valeur du ΔT_{min} , les bornes de température des intervalles changent. Il est alors possible de déterminer le ΔT_{min} , qui maximise le nombre d'intervalle d'enthalpie dans lesquelles les courants composites ont la caractéristique T_1^s et de T_2^s , c'est-à-dire qui maximise le nombre de mélanges verticaux. La Figure 3.10 illustre le cas idéal pour lequel chaque intervalle de température donne un mélange vertical.

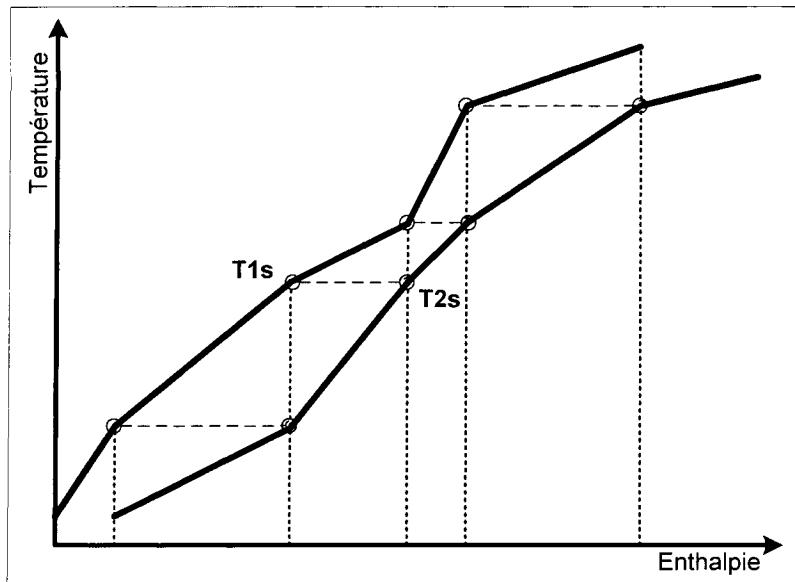


Figure 3.10 : Identification des mélanges verticaux.

d) Faisabilité des mélanges

Jusqu'à présent nous n'avons considéré que des limites thermodynamiques à la faisabilité des mélanges. Les deux courants sont mélangés pour obtenir T_m puis l'hypothèse est faite qu'à partir du mélange, les deux courants sont séparés et redirigés vers leurs applications respectives. Cependant cette redirection n'est pas toujours possible : des contraintes de nature massique interviennent. Un courant peut être trop contaminé ou impossible à traiter pour être mélangé sans compromettre la qualité du mélange et l'utilisation ultérieur pour certaines applications. Ces contraintes ne sont pas applicables de façon simple au moment du ciblage et elles sont à considérer à l'étape de réalisation du réseau. Il peut se révéler que plusieurs mélanges ciblés sont irréalisables et ainsi le réseau d'échange par mélange ne sera probablement pas implanté dans son ensemble.

3.7.5 Ciblage d'un projet de recirculation

a) Projet de recirculation dérivé d'un mélange de courants

Afin de réaliser des réductions de consommation d'eau, une source d'eau peut être recirculer vers la demande d'origine ou vers une autre demande dans le procédé. De ce point de vue, les courants chauds et froids peuvent aussi être des sources et des demandes d'eau.

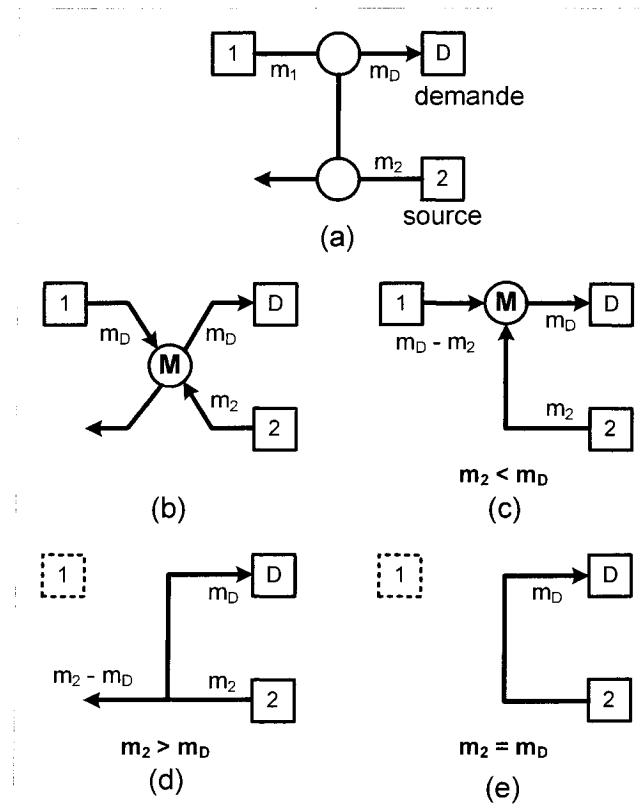


Figure 3.11 : Différentes évolutions d'un mélange à partir d'un échangeur indirect.

Soit un échangeur indirect de chaleur entre deux courants 1 et 2, de débit massique respectif m_1 et m_2 tel qu'illustré par la Figure 3.11 (cas a). Le courant 1 (par ex. : eau fraîche) satisfait la demande D de débit massique m_D . Le courant 2 est une source disponible (par ex. : effluent).

L'échangeur de chaleur indirect est converti en mélange (cas b) qui est redistribué pour satisfaire D. Selon les contraintes massiques et les débits engagés, un mélange peut évoluer en projet de recirculation. Le courant 2 peut en effet remplacer le courant 1 pour satisfaire D selon les trois situations suivantes :

- Si $m_2 < m_D$, le remplacement est partiel (cas c)
- Si $m_2 \geq m_D$, le remplacement est total (cas d et e)

b) Règles de ciblage pour les projets de recirculation

De la même manière que la notion de mélange vertical a été définie, une recirculation vertical peut être définie comme un projet de recirculation identifiée à partir d'un échangeur indirect vertical. L'objectif du ciblage est alors la valeur de ΔT_{\min} qui maximise le nombre de projets de recirculation.

Dans les cas (d) et (e), il y a recirculation totale : $m_1 = 0$ et donc $T_D = T_2^e$. Par définition du problème : $T_D = T_1^s$. La condition pour la conversion d'un échangeur de chaleur indirect vertical en un projet de recirculation verticale est $T_1^s = T_2^e$. Dans le cas (c), la recirculation est partielle. Si les courants 1 et 2 ont une nature similaire ($Cp_1 \approx Cp_2$), T_D est donnée par :

$$T_D = \frac{m_1 T_1^e + m_2 T_2^e}{m_D} = \frac{(m_D - m_2) T_1^e + m_2 T_2^e}{m_D}$$

À l'étape du ciblage, déterminer la valeur de $(m_D - m_2)$ n'est pas possible car les techniques de pincement thermiques ne prennent pas en compte les interactions massiques. Établir des conditions massiques sur les courants 1 et 2 pour identifier une recirculation verticale est loin d'être évident. Ceci étant dit, en pratique, le but est de favoriser les recirculations totale et de les recirculations partielles quand $m_2 \gg m_1$. Avec cette dernière condition, le cas (c) est similaire au cas (e).

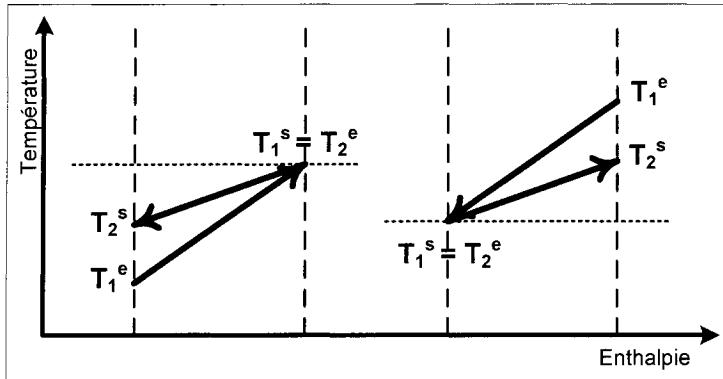


Figure 3.12 : Identification d'une recirculation.

Le ΔT_{\min} optimale maximise le nombre de projets de recirculation verticale, c'est-à-dire la valeur qui maximise le nombre d'intervalles de température dans lesquels les courants composites ont la caractéristique $T_1^s = T_2^e$ et $T_{\text{demande}}^s = T_{\text{source}}^e$ (Figure 3.12). Cette situation se produit surtout quand une faible différence de température est observée dans chaque intervalle, c'est-à-dire quand les courbes composites chaude et froide sont très proche l'une de l'autre.

3.7.6 Exemple

a) Données

Tableau 3.3 : Exemple d'extraction pour l'étude de cas 1

	Courant	T^e (°C)	T^s (°C)	H (kW)
Atelier PTM	1	65.00	70.00	2050
	2	95.00	85.00	8200
	3	74.40	65.00	9330
	4	75.00	84.00	7510
	5	75.00	83.00	730
	6	60.00	75.00	4050
	7	60.00	35.00	1830
Réseau d'eau	8	56.00	21.00	5350
	9	60.00	35.00	1690
	10	55.50	35.00	3680
	11	17.00	55.00	5060
	12	17.00	55.00	3080
	13	17.00	134.00	1440

Les données utilisées pour l'exemple sont tirées de l'étude cas 1 et présentées dans le Tableau 3.3. Les courants 7, 8, 9 et 10 peuvent être considérés comme des sources d'eau et les courants 11, 12 et 13 comme des demandes.

b) Ciblage

La Figure 3.13(a) montre les courbes composites pour l'atelier PTM et le réseau d'eau ensemble.

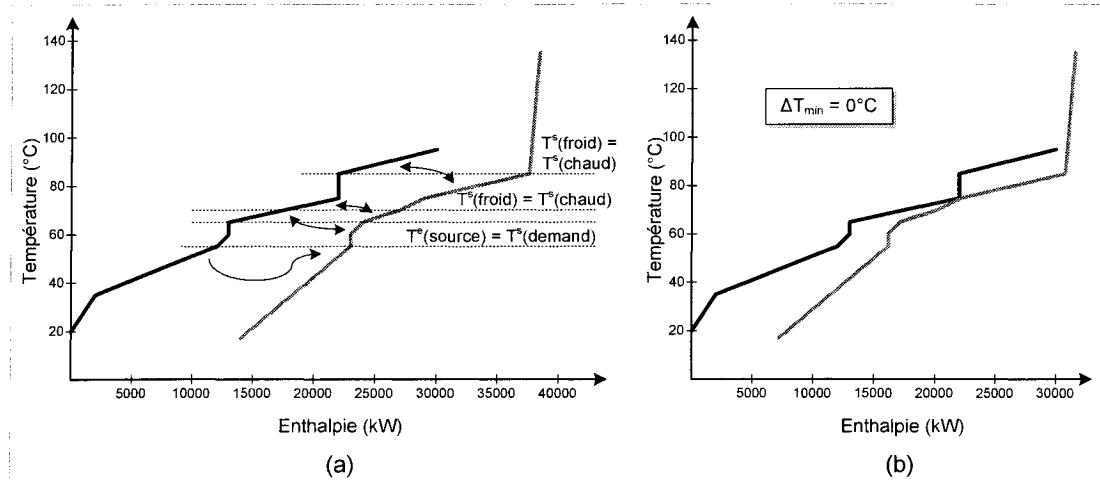


Figure 3.13 : Courbes composites pour l'atelier PTM et le réseau d'eau ensemble.

Les courants composites ayant la caractéristique $T_1^s = T_2^s$ sont identifiés, de même les sources de les demandes d'eau ayant la caractéristique $T_{\text{demande}}^s = T_{\text{source}}^e$. En déplaçant la courbe composite froide par rapport à la courbe chaude, le nombre de mélanges verticaux et de recirculations verticales est maximal pour $\Delta T_{\min} = 0^\circ\text{C}$ (Figure 3.13(b)).

De la même façon, pour l'atelier PTM, $\Delta T_{\min} = 0^\circ\text{C}$ maximise le nombre de mélanges verticaux et de recirculations verticales. Pour le réseau d'eau, les opportunités les plus intéressantes sont des recirculations, étant donné que les courants impliqués sont tous des sources ou des demandes d'eau. Dans ce cas, la valeur optimale de ΔT_{\min} qui maximise le nombre de recirculations verticales est 0°C .

3.8 Analyse de pincement modifiée

3.8.1 Principe

Le procédé de fabrication de papier journal est un terrain favorable pour l'implantation d'échanges de chaleur directs : les courants impliqués ont des natures relativement similaires et une quantité importante de l'énergie est déjà échangée par mélanges de courants ou par boucles de recirculation. Ces échanges directs sont traditionnels dans les procédés papetiers, mêmes si la motivation initiale n'est pas énergétique.

Les échanges de chaleur directs pourraient a priori être identifiés par étude de procédé. On risque cependant de passer à côté d'opportunités non intuitives et de ne pas prendre en compte les possibles interactions entre ces échanges. Des méthodes plus systématiques, comme l'analyse de pincement, doivent être utilisées.

Une approche est proposée dans cette section. Basée sur les règles développées dans la section 3.7, l'analyse modifiée identifie des projets de mélange et de recirculation à partir d'un réseau d'échangeurs de chaleur indirects.

En pratique, plusieurs contraintes restreignent l'utilisation d'un mélange à la place d'un échangeur indirect : courants non miscibles, risque de contamination d'un des courants, exigences qualité pour le produit final,... Ces contraintes massiques sont appliquées à l'étape de la conception.

3.8.2 Paramètres de l'analyse modifiée

a) *Problématique*

Lors de travaux antérieurs, l'analyse de pincement avec mélange se déroulait comme suit (Lafourcade, 2001). Environ 40 courants étaient extraits sur toute l'usine. Un

réseau d'échangeurs de chaleur était ensuite conçu pour le ΔT_{min} choisi, en utilisant la fonction automatique d'un logiciel commercial de pincement thermique. Des échanges de chaleur par mélange ou par recirculation sont identifiés à partir des échangeurs indirects.

En rétro-installation, la conception automatique du réseau d'échangeurs n'est jamais préférable à une conception manuelle pendant laquelle l'utilisateur prend les décisions échangeur par échangeur pour obtenir des résultats pratiques. Cependant, avec 40 courants le problème devient très complexe à résoudre manuellement étant donnée le nombre de combinaisons possibles.

b) Étude de sensibilité

Une étude de sensibilité a été réalisée sur l'extraction et sur les paramètres de l'analyse de pincement modifiée dans le but d'orienter la conception pour obtenir des projets efficaces (qui répondent aux objectifs de réduction d'eau et d'énergie) et pratiques (qui soient réaliste vis à vis des contraintes du procédé existant). Cette étude est basée sur l'étude de cas 1. Les résultats sont résumés dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Analyse de sensibilité sur l'analyse de pincement modifiée.

Paramètre	Effet sur les résultats
Variation d'enthalpie minimum d'un courant pour être extrait	L'effet est imprévisible sur les projets obtenus
Gradient de température minimum d'un courant pour être extrait	L'effet est imprévisible sur les projets obtenus
Choix de ΔT_{min}	La valeur $\Delta T_{min} = 0^{\circ}\text{C}$ donne les meilleurs projets
Séparation en sous – systèmes	L'étude séparée de l'atelier PTM et du réseau d'eau donne de meilleurs résultats
Choix de ΔT_{min} et séparation par département	L'étude séparée de l'atelier PTM et du réseau d'eau donne d'encore meilleurs résultats avec $\Delta T_{min} = 0^{\circ}\text{C}$

L'étude théorique de l'analyse de pincement avec mélange suggère que le choix optimal pour ΔT_{\min} est 0°C pour une usine de papier journal. L'analyse de sensibilité vient confirmer ce résultat.

La séparation du problème en sous – systèmes est l'autre paramètre qui donne de meilleurs projets. En particulier, la séparation en atelier PTM et réseau d'eau est la plus efficace pour l'étude de cas 1. L'avantage principale de la séparation en sous – système est de réduire la taille du problème et ainsi introduire de l'interactivité. La conception des réseaux d'échangeurs indirects peut être faite manuellement. Le principal avantage est de pouvoir anticiper, dès la conception, les contraintes massiques pour la conversion d'échangeurs indirects en échanges directs.

3.8.3 Extraction

Les sous – systèmes identifiés pour l'étude de cas 1 sont l'atelier PTM et le réseau d'eau. Considérant les procédés de fabrication du papier journal, ils peuvent être formulés plus généralement : réseau d'eau blanche et réseau d'eau d'appoint au procédé.

Le réseau d'eau blanche comprend les mélanges et recirculation d'eau blanche dans chaque département et entre département. Il dépend de la spécificité de l'usine pour la gestion des eaux blanches et des objectifs spécifique de l'étude (par ex. : refroidissement des circuits de l'atelier PTM). Le réseau d'eau d'appoint comprend les différents appoints d'eau fraîche aux ateliers de pâte et aux circuits machine, le réseau d'eau tiède (et autre réseaux d'eau chaude) et les effluents procédé et non procédé.

Même si les deux systèmes sont relativement indépendants, un même courant peut être extrait dans les deux pour maximiser les opportunités : c'est le cas par exemple des excès d'eau blanche rejetés. Plusieurs itérations peuvent être alors nécessaires pour éviter des incompatibilités entre les solutions obtenues pour chaque système.

3.8.4 Étapes de l'analyse

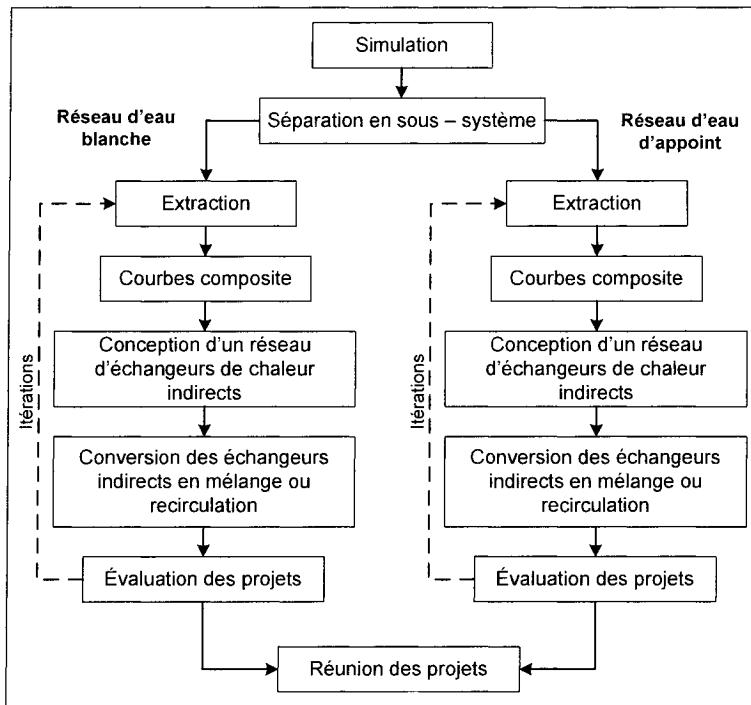


Figure 3.14 : Étapes de l'analyse de pincement modifiée.

L'analyse de pincement modifiée pour une usine de papier journal se compose des étapes suivantes (Figure 3.14) :

1. Séparation du problème en deux sous-systèmes : le réseau d'eau blanche et le réseau d'eau d'appoint. Pour chaque sous-système, réalisation les étapes 2 à 8.
2. Extraction des courants.
3. Construction des courbes composites ; identification des sources et des demandes d'eau.
4. Pour $\Delta T_{min} = 0^\circ\text{C}$, conception manuelle d'un réseau d'échangeurs indirects à l'aide des règles suivantes :
 - a. considérer les objectifs par ordre de priorité,

- b. construire un réseau classique avec des échangeurs verticaux en minimisant le nombre d'unité,
 - c. garder les échangeurs aussi indépendants que possible
 - d. anticiper sur les mélanges et les projets de recirculation qui peuvent être obtenues.
5. Conversion les échangeurs indirects en mélange ou en projet de recirculation en respectant les contraintes massiques du procédé
 6. Évaluation chaque projet dans la simulation
 7. Itération les étapes 2 à 6
 8. Implantation les meilleures combinaisons de projets dans la simulation
 9. Combinaison des solutions pour les deux sous – systèmes

En principe, les sous – systèmes sont indépendants les uns des autres. En pratique, s'il existe des interactions et des incompatibilités, il faut recommencer l'analyse des sous – systèmes.

L'itération de la séquence extraction – conception permet d'améliorer le groupe de projets obtenus : l'analyse commence avec une large gamme d'opportunités qui se raffine par la suite. Les courants qui n'ont pas donné de projets ou qui n'ont pas donné de projets intéressants sont éliminés et l'analyse est refaite à partir de la nouvelle extraction. Cela garantie que toutes les opportunités disponibles ont été explorées et que seules les plus intéressantes ont été sélectionnées.

3.8.5 Intervention de contraintes massiques

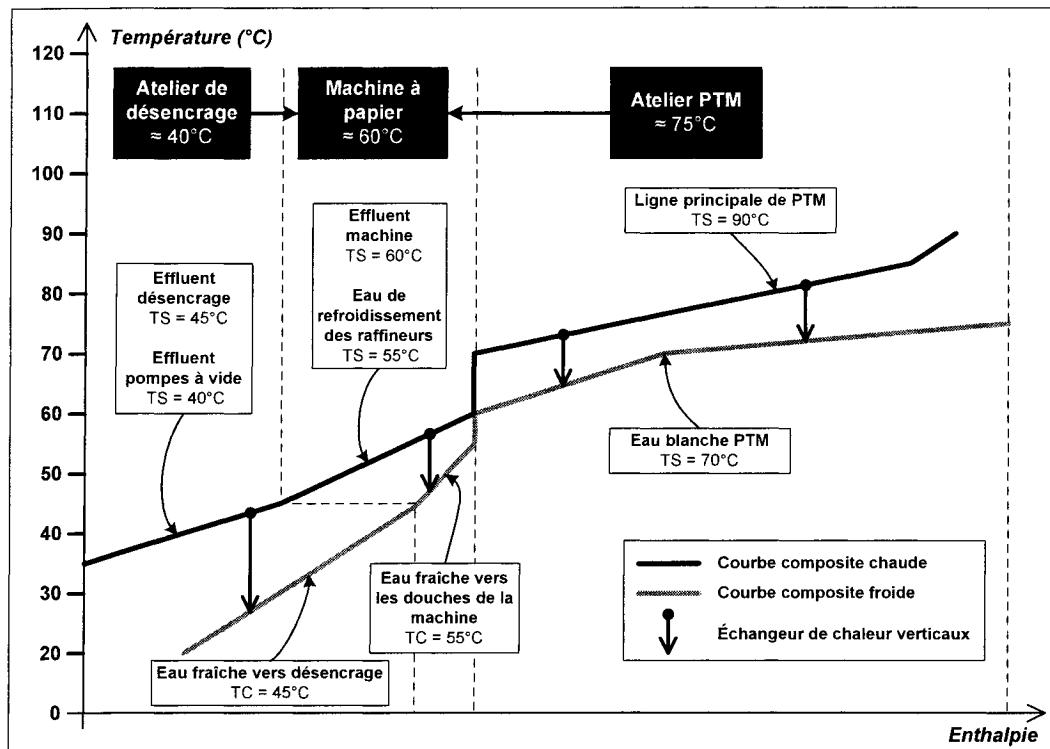
Les projets de mélange sont identifiés d'abord selon des critères énergétiques, comme échangeurs indirects. C'est ensuite seulement que des critères massiques, liées principalement aux contaminants, sont appliqués pour convertir ces échangeurs en mélange. Quand un traitement est inévitable, le mélange potentiel est sélectionné sous

réserve que ce traitement soit techniquement faisable. Les contraintes massiques doivent donc être déterminées à partir de la connaissance du procédé, des pratiques courantes dans l'industrie et de la littérature. Voici quelques exemples pour les usines de papier journal :

- pas de transfert d'eau blanche des ateliers de pâte vers l'atelier de machine.
- pas de transfert d'eau blanche de l'atelier de pâte désencrée vers celui de pâte mécanique.
- pas de mélange qui conduirait à une perte en fibres ou en produit chimiques.
- recirculation au plus proche de la source.
- prise en compte des aspects dynamiques ; en particulier, donner la priorité aux courants constants par rapport aux courants susceptibles de changer avec les régimes d'opération (été, hiver, ratio pâte mécanique/pâte désencrée, nombre de ligne de pâte en fonction, ...).

3.8.6 Obtention de résultats pratiques

Pour l'étude de cas 1, les projets issus de la conversion d'échangeurs indirects ne posent pas d'obstacles techniques majeurs et sont en général réalistes. La conversion des échangeurs indirects en projets de mélanges et de recirculations faisables est un succès car les conditions nécessaires pour respecter les contraintes massiques satisfont aussi les contraintes thermodynamiques.



TS : température de la source; TC : température cible de la demande

Les deux sous-systèmes sont représentés ensemble pour la visualisation

Figure 3.15 : Courbes composites pour l'analyse de pincement modifiée.

D'une part, les contraintes massiques (éviter les transferts d'un contaminant d'un département à un autre, éviter les longues distances entre les courants) mènent à la règle empirique : « recirculer au plus proche de la source ». D'autre part, dans les procédés de fabrication du papier journal, les courants d'un même département ont des températures très similaires. Comme l'analyse modifiée identifie des échangeurs de chaleur verticaux à $\Delta T_{\min} = 0^\circ\text{C}$, le projet de recirculation ou de mélange identifié sera probablement dans un même niveau de température, c'est-à-dire dans un même département et par conséquent proche de la source (Figure 3.15). La règle empirique « recirculer au plus proche de la source » est donc validée d'un point de vue énergétique par le pincement.

3.9 Analyse de pincement classique

3.9.1 Objectifs résiduels

L'analyse de pincement thermique classique vient compléter les deux premières phases. Elle permet d'atteindre les objectifs énergétiques inachevés, d'éliminer les effets secondaires des projets précédents et de considérer les mélanges refusés comme échanges indirects potentiels. L'extraction se concentre donc sur ces objectifs spécifiques qui dépendent directement des résultats des analyses de procédé et de pincement modifiées.

3.9.2 Étape de l'analyse

L'application de l'analyse classique suit le déroulement traditionnel de l'analyse de pincement tel que décrit dans la littérature (Ashton et al., 1987). Elle se compose des étapes suivantes :

1. Identification des objectifs résiduels
2. Extraction de données
3. Détermination de ΔT_{\min} selon des critères technico-économiques de l'usine
4. Conception manuelle, pour le ΔT_{\min} choisi, d'un réseau d'échangeur indirect en suivant les règles suivantes :
 - a. considérer les objectifs par ordre de priorité,
 - b. construire un réseau classique avec des échangeurs verticaux en minimisant le nombre d'unités,
 - c. garder les échangeurs aussi indépendants que possible
5. Évaluation de chaque projet dans la simulation
6. Itération des étapes 2 à 5
7. Implantation des meilleures combinaisons de projets dans la simulation

Si des données techno-économiques ne sont pas disponibles, $\Delta T_{min} = 10^\circ\text{C}$ est une bonne approximation observée couramment dans la littérature. Comme pour l'analyse modifiée, l'étape 6 consiste à améliorer le groupe de projets obtenu en modifiant l'extraction et en itérant la conception.

3.9.3 Lignes directrices de conception

La conception d'un réseau d'échangeur en rétro-installation suit en général les règles classiques, auxquelles s'ajoutent des règles spécifiques. Il faut en particulier maximiser l'utilisation des échangeurs existants et l'indépendance des projets pour assurer un haut taux d'implantation (Noel, 1995). Le choix entre les différentes options doit anticiper l'évolution possible du système.

3.10 Estimation des niveaux atteignables

Les trois étapes de l'analyse eau – énergie (étude de procédé, analyse de pincement modifiée et analyse de pincement classique) ont été appliquées à l'étude de cas 1 en suivant les règles décrites dans les sections précédentes. Le détail des résultats est donné dans l'annexe A.

Le niveau minimum de consommation d'eau qui a été atteint pour l'étude de cas est $21.2 \text{ m}^3/\text{tonne séchée à l'air (tsa)}$. Pour des raisons pratiques, les eaux non procédé de refroidissement n'ont pas été recirculées en boucles fermées. Si ce projet est considéré, une réduction supplémentaire de $4.7 \text{ m}^3/\text{tsa}$ est possible. Le niveau minimum atteignable est donc de $16.5 \text{ m}^3/\text{tsa}$. De même, le niveau minimum de consommation de vapeur atteignable est 5.2 GJ/tsa sans récupération de la vapeur sale PTM et 1.8 GJ/tsa avec récupération.

Considérons la somme D^* des demandes d'eau fraîche pour les applications suivantes : appoint d'eau aux ateliers de pâte, appoint d'eau aux circuits de la machine, appoint

aux douches de la machine, refroidissement non procédé (moteurs PTM, ventilation et lubrification) et étanchéité des pompes à vide. Considérons de même, la somme Q_h^* des demandes de vapeur vive suivantes : chauffage des circuits de désencrage, chauffage des circuits d'eau blanche de la machine, chauffage de l'eau pour les douches de la machine et chauffage de l'air d'alimentation des poches de la sécherie.

Posons les facteurs f_e et f_v tels que :

$$D_{(atteignable)} = D_{(actuelle)} - f_e \cdot D^* \text{ et } Q_{h(atteignable)} = Q_{h(actuelle)} - f_v \cdot Q_h^*$$

avec : D demande en eau fraîche et Q_h demande en chauffage.

Les valeurs de f_e et f_v ont été estimées à partir des niveaux atteints par les programmes eau – énergie pour l'étude de cas 1. Si on considère la recirculation des eaux non procédé de refroidissement en boucles fermées, la valeur de f_e est 0.8. La valeur de f_v obtenue est 0.45 quand la récupération de vapeur sale PTM n'est pas considérée. Prédire le niveau obtenu avec récupération de la vapeur sale est plus difficile car cette dernière s'accompagne d'effets secondaires : refroidissement des circuits de PTM, moins d'énergie excédentaire, ...

Les règles préliminaires proposées pour estimer les niveaux atteignables sont donc :

$$D_{(atteignable)} = D_{(actuelle)} - 0,8 \cdot D^*$$

et

$$Q_{h(atteignable)} = Q_{h(actuelle)} - 0,45 \cdot Q_h^* \text{ (sans récupération de vapeur sale PTM)}$$

3.11 Contexte d'application

3.11.1 Principes

À l'échelle d'une entreprise, une stratégie est un moyen de mettre en œuvre une politique donnée. Par exemple : réduire, d'une quantité donnée, la consommation d'eau et d'énergie dans chaque usine pour réduire l'impact environnemental de l'entreprise.

La stratégie permet de définir des objectifs à long terme. Elle guide le cycle d'amélioration continue : les objectifs à long terme sont alors convertis en actions à court terme. Par exemple, dans les travaux de Axelsson et al., 1999, l'évaporation de l'effluent d'une usine de PCTM – Kraft – carton (objectif stratégique) est soutenue par une analyse de pincement en rétro-installation pour améliorer le réseau d'échangeur de chaleur et libérer l'énergie excédentaire nécessaire pour l'évaporation (réalisation tactique).

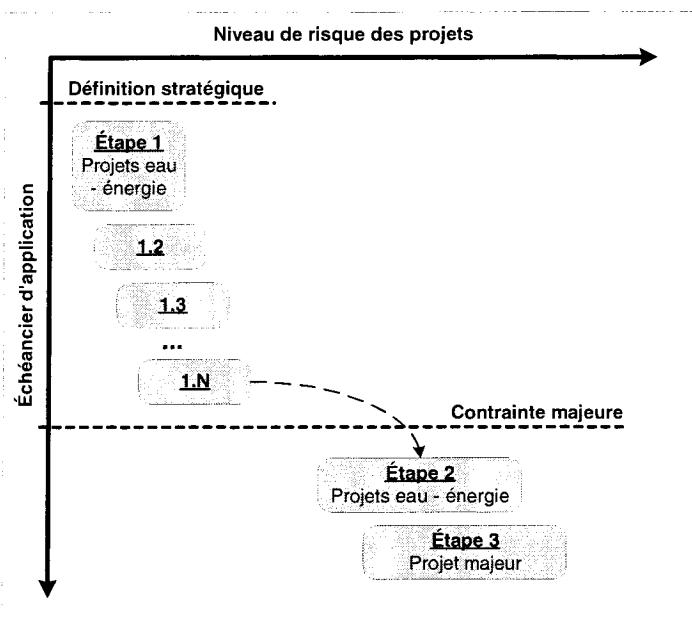


Figure 3.16 : Contexte d'application de la méthodologie eau – énergie.

La Figure 3.16 illustre l'application de la méthodologie dans un contexte de long et de court terme. Le niveau de risque est celui perçu par l'usine : un projet qui sera jugé peu risqué par une usine peut être considéré très risqué par une autre. À partir de la définition d'une stratégie à long terme, la méthodologie est appliquée une première fois (étape 1). Cette étape est itérée, par exemple à chaque cycle d'amélioration continue lors des étapes d'audit et de planification (Figure 2.2). Les projets doivent répondre au critère techno-économique majeur, le retour sur l'investissement, tout en allant dans le

sens de la stratégie. L’itération se poursuit jusqu’à ce qu’une contrainte majeure oblige à redéfinir la stratégie ou à l’appliquer dans une courte échelle de temps. Pour les étapes 2 et 3, le critère clé est le coût minimum des projets car cette fois l’amélioration du procédé est indispensable pour continuer à opérer.

3.11.2 Opération à effluent – zéro

Pour illustrer l’application de la méthodologie eau – énergie dans une perspective de long terme, la réalisation de l’opération à effluent – zéro a été choisie comme objectif à long terme.

Tableau 3.5 : Stratégies pour aller vers l’effluent – zéro.

Stratégie 1 Traitement membranaire	Traitement par des membranes de l’effluent total et recirculation vers le procédé après refroidissement si nécessaire	- effluent total minimum - température basse
Stratégie 2 Pseudo effluent – zéro par traitement membranaire	Traitement par des membranes de l’effluent procédé et recirculation vers le procédé après refroidissement si nécessaire	- ségrégation de l’effluent - effluent procédé minimum - température basse
Stratégie 3 Évaporation	Évaporation de l’effluent total, concentration des contaminants et recirculation du condensat propre	- effluent total minimum - température élevée
Stratégie 4 Pseudo effluent – zéro par évaporation	Évaporation de l’effluent procédé, concentration des contaminants et recirculation du condensat propre	- ségrégation de l’effluent - effluent procédé minimum - température élevée

Le Tableau 3.5 résume les 4 stratégies effluent – zéro considérées. Les stratégies pseudo effluent – zéro consiste à faire la ségrégation de l’effluent et de ne traiter que l’effluent procédé. L’effluent non procédé non contaminée est rejeté. Le traitement membranaire consiste en une étape d’ultrafiltration pour éliminer les matières organiques dissoutes et les matières en suspension fines et en une étape d’osmose inverse pour éliminer les matières inorganiques dissoutes (Gerbasi et al., 1993, Barnes, 1994b). L’évaporation consiste en une étape de pré – traitement (ultrafiltration, tamis ou flottation à air dissous) puis 2 étapes d’évaporation en série (Gerbasi et al., 1993, et

Fromson et Leslie, 1994). L'effluent total traité (stratégie 1 et 3) peut alors soit être refroidis et recirculé au cuvier d'eau de fabrication, soit alimenter un réseau d'eau tiède pour les besoins du procédé, seule une partie étant refroidie pour les applications non procédé critique. Dans le cas où seul l'effluent procédé est traité (stratégie 2 et 4), l'effluent est recirculé vers un réseau d'eau tiède alimentant les besoins d'eau procédé. Quand les besoins procédé sont comblés, l'excès d'eau tiède peut être utilisé dans les applications non procédé pour lesquelles la température d'eau n'est pas critique.

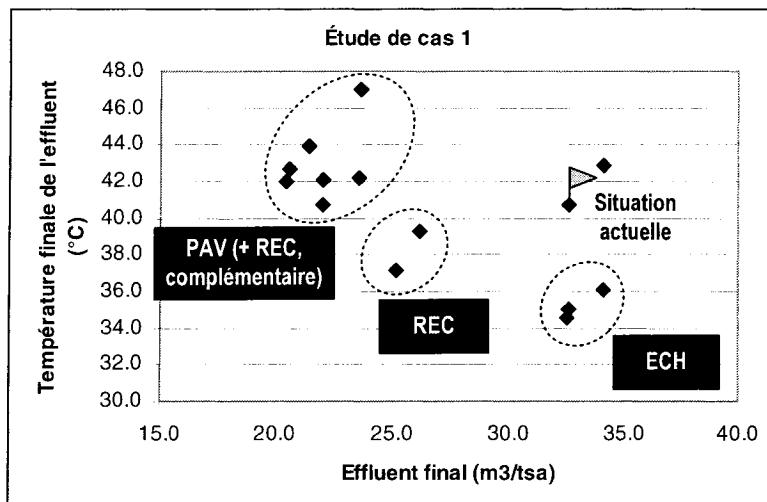
3.11.3 Identification des routes technologiques

Une toute technologique menant à l'opération à effluent – zéro est définie comme étant un programme qui mène à des conditions favorables pour une de ces quatre stratégies. Le choix se fait d'abord en fonction du débit et de la température finale de l'effluent total et de l'effluent procédé. Ces paramètres doivent rencontrer les critères présentés dans le Tableau 3.5. Pour départager deux programmes, il faut faire intervenir la charge de refroidissement nécessaire pour amener la température de l'effluent traité à 20°C. Le dernier critère de sélection est la consommation nette de vapeur.

3.11.4 Température finale de l'effluent

La température finale de l'effluent dépend d'un jeu complexe faisant intervenir la température et le débit de l'effluent procédé, de l'eau non procédé recirculée au cuvier d'eau de fabrication ainsi que de l'effluent non procédé. Il y a trop d'interactions pour que l'effet d'une recirculation d'eau non procédé soit prédit simplement.

La conséquence est que les stratégies pour aller vers l'effluent – zéro doivent être choisies au fil de l'application des résultats et ne peuvent être choisies a priori selon la configuration de l'usine.



PAV : recirculation de l'eau des pompes à vide.

REC : recirculation d'effluent procédé vers les douches.

ECH : réseau d'échangeurs de chaleur indirects.

Figure 3.17 : Effet des programmes sur la température de l'effluent.

Il est cependant possible de faire le lien, pour l'étude de cas 1, entre des projets clés et la température de l'effluent avant le traitement primaire (Figure 3.17). La recirculation de l'effluent procédé aux douches de la machine a pour effet de réduire la température de l'effluent : il y a un transfert d'énergie excédentaire de l'effluent vers les courants d'air chaud. La recirculation de l'eau des pompes à vide augmente la température de l'effluent car l'effluent des pompes à vide est un courant froid dont la température est inférieure à la température de l'effluent total. Le réseau d'échangeur permet une réduction significative de la température de l'effluent sauf quand le besoin d'eau fraîche aux douches est réduit à zéro. Enfin la récupération de la vapeur sale du PTM provoque une augmentation de la température de l'effluent à cause de l'ajout d'un effluent chaud : le condensat sale PTM ou l'excès d'eau blanche machine si le condensat est recirculé.

3.11.5 Routes technologiques

La Figure 3.18 illustre les routes technologiques identifiées pour l'étude de cas 1 pour atteindre l'opération à effluent – zéro.

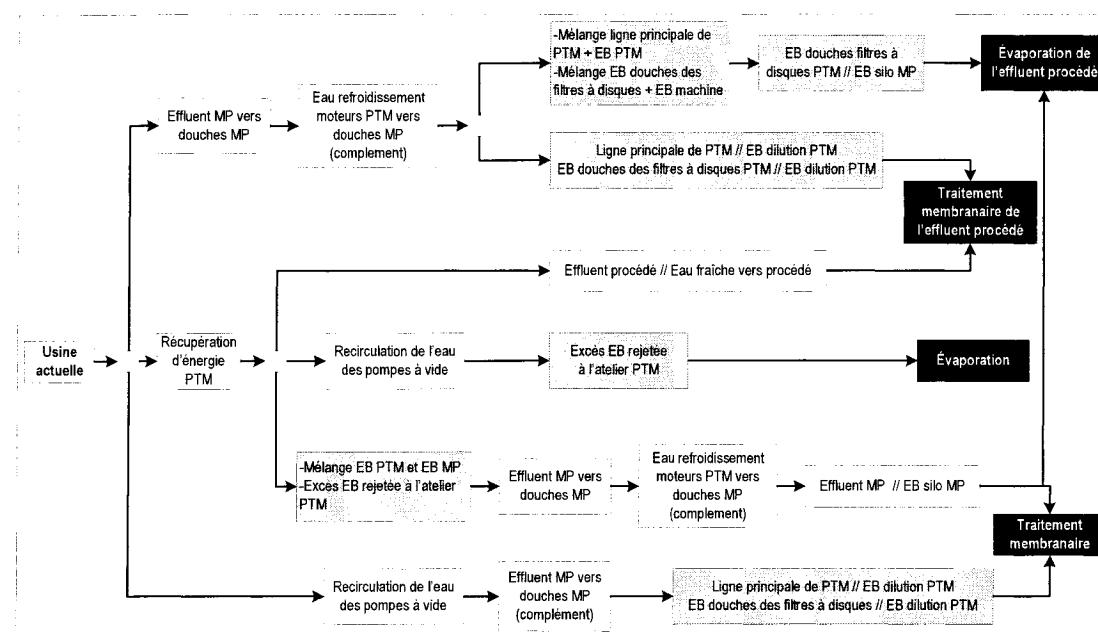


Figure 3.18 : Routes technologiques pour l'étude de cas 1.

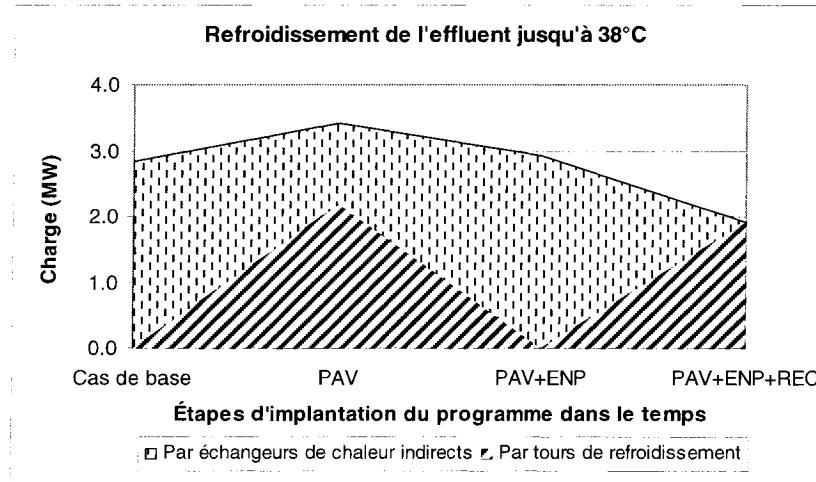
Les programmes basés sur la recirculation de l'eau des pompes à vide aboutissent aux stratégies effluent – zéro et ceux basés sur la recirculation des effluents procédé favorisent les stratégies pseudo effluent – zéro. La seule exception est un programme qui aboutit à la fois aux stratégies traitement par membrane de l'effluent total et traitement par évaporation de l'effluent procédé. Pour ce programme, l'effluent total est assez froid pour favoriser le traitement membranaire même si le débit à traiter n'est pas aussi faible que pour les autres cas. Cependant, le projet de rejet de l'excès d'eau blanche au PTM augmente de façon importante la température de l'effluent procédé et rend attrayante son évaporation.

Le choix entre traitement membranaire et évaporation est guidé par les projets d'échangeurs indirects. Si l'effluent est refroidi pour chauffer l'eau fraîche, la stratégie privilégiée est le traitement membranaire.

3.11.6 Refroidissement de l'effluent

En théorie, un programme donné est implanté dans sa totalité avant de mettre en œuvre une stratégie effluent – zéro. En pratique, pour échelonner les investissements et pour minimiser les perturbations sur la qualité du papier et sur l'opération du procédé, les programmes sont implantés progressivement dans le temps, projet par projet.

Au cours de l'implantation progressive, plusieurs problèmes peuvent se poser, comme en particulier le refroidissement de l'effluent. Pour une bonne opération du traitement secondaire par boue activée, la température cible pour l'effluent est fixée à 38°C. La température finale de l'effluent peut varier avec l'implantation successive des projets et dépasser cette limite. Le refroidissement indispensable de l'effluent peut être réalisé par l'implantation d'échangeurs de chaleur. Ce n'est pas toujours possible à cause de l'élimination de courants froids comme l'eau fraîche pour les douches. La solution ultime est l'utilisation de tours de refroidissement.



PAV : recirculation de l'eau des pompes à vide

REC : recirculation d'effluent procédé vers les douches

ENP : recirculation de l'eau non procédé en boucles fermées

Figure 3.19 : Évolution du refroidissement avec l'implantation d'un programme.

La Figure 3.19 montre, pour un programme donné, l'évolution de la charge de refroidissement avec l'implantation cumulée de 3 projets. L'étape 1 est la situation de départ. L'étape 2 est la recirculation de l'eau d'étanchéité des pompes à vide vers les douches de la machine (PAV) ; l'étape 3 est la recirculation de l'eau de non procédé qui est recirculée en boucle fermée (ENP) ; l'étape 4 est la recirculation d'une partie de l'effluent procédé vers les douches (REC). La charge totale de refroidissement est assurée par des échangeurs indirects et par des tours de refroidissement. Elle est initialement de 3 MW. Elle augmente avec la recirculation de l'eau des pompes à vide et puis diminue avec les autres projets de réduction d'eau pour atteindre 2 MW.

L'application du réseau d'échangeur a des effets variables selon la disponibilité des sources froides dans le système. Au départ, ils couvrent la charge totale en refroidissement. Les courants froids ne suffisent plus avec la première recirculation aux douches, puis suffisent quand le projet ENP est appliqué. Ensuite la seconde recirculation aux douches élimine le principal courant froid restant et la charge est entièrement couverte par les tours de refroidissement.

Au cours de l'implantation du programme, la charge excédentaire change et donc le système de refroidissement, formé d'échangeurs de chaleur indirects et de tours de refroidissement, doit être flexible ou différents équipements doivent être considérés comme provisoire. Les tours de refroidissement ne sont plus utilisée à l'étape « PAV + ENP » mais sont nécessaires avant et après. Au stade final, la charge des tours est réduite de 3 à 2 MW et les échangeurs de chaleur effluent machine // eau fraîche ne sont plus utilisés.

Ces aspects doivent être pris en considération au niveau de la conception, en particulier quand deux solutions équivalentes sont en compétition. Lors de l'application de l'analyse de pincement classique, il faut que la conception du réseau soit cohérente entre les différents cas et anticiper l'évolution possible du procédé. Le passage, par

exemple de PAV à PAV+ENP, doit être le plus simple et le moins coûteux possible du point de vue des réseaux d'échangeurs : il faut que les réseaux pour PAV et pour PAV+ENP soient similaires.

3.12 Conclusions

Pour chaque étape de la méthodologie proposée, des règles de nature heuristiques ont été créées pour l'étude de cas 1 en s'appuyant sur des bases théoriques :

- L'étude de procédé et le questionnaire de collecte de données s'appuient sur l'étude approfondie du procédé de fabrication du papier journal et sur les approches traditionnelles d'analyse eau – énergie, tels que les activités de benchmarking et d'audit.
- le format pour l'extraction représentative a été créé à partir de données de la littérature et d'une analyse de sensibilité. Une analyse de sensibilité a de même permis de définir les paramètres d'extraction pour les analyses de pincement thermique modifiée et classique.
- L'étude des bases théoriques de l'analyse de pincement thermique a permis de développer des règles pour l'identification systématique et pratique, de projets d'échanges de chaleur directs et indirects.
- En particulier, des règles de conception ont été proposées pour identifier des mélanges de courants et des projets de recirculation à partir des techniques classiques d'analyse de pincement thermique.
- Des règles de conception ont été créées pour estimer les niveaux minimum de consommation d'eau et d'énergie atteignables.
- Un contexte d'application est proposée pour développer, à partir de l'application de la méthodologie, des routes technologiques pour atteindre l'opération à effluent – zéro.

CHAPITRE 4 : GÉNÉRALISATION

*« La science est un jeu
dont la règle du jeu consiste à trouver
quelle est la règle du jeu »*

François Cavanna (Né à Nogent-sur-Marne en 1923)

4.1 Application de la méthodologie

La méthodologie a été appliquée aux huit modèles d’usines de références, à savoir : cas de base, PTM 1, PTM 2, PTM 3, PTM 4, DES 20, DES 40 et DES 100. Les règles proposées dans le chapitre 3 ont été utilisées pour les 4 phases principales de l’étude : ciblage, étude de procédé, analyse de pincement modifiée, analyse de pincement classique.

Les projets identifiés par l’analyse de procédé ont été implantés directement dans les modèles Excel, et donc seuls les projets modélisable ont été considérés. L’analyse de pincement modifiée a été réalisée sur le logiciel de pincement Super Target et les projets de mélange et de recirculation ont été implantés directement dans les modèles Excel. Seul le réseau d’eau d’appoint a été étudié comme sous système : le réseau d’eau blanche est trop spécifique à chaque usine pour être généralisé. L’analyse de pincement classique a aussi été réalisée sur Super Target. Les projets d’échangeurs indirects n’ont pas été implantés dans les modèles Excel : les bénéfices des projets ont été estimés à partir des caractéristiques des réseaux obtenus. L’hypothèse a été faite que le réseau obtenu était implanté dans son ensemble. La température finale de l’effluent a été estimée à partir de la charge de refroidissement imposée à l’effluent et la réduction de consommation de vapeur a été estimée à partir de l’énergie fournie sous forme de vapeur vive dans le réseau aux courants consommateurs de vapeur (douches, air des poches, silo). L’aire d’échange nécessaire a été estimée à partir des calculs de Super Target.

4.2 Ciblage

4.2.1 Courbes composites représentatives

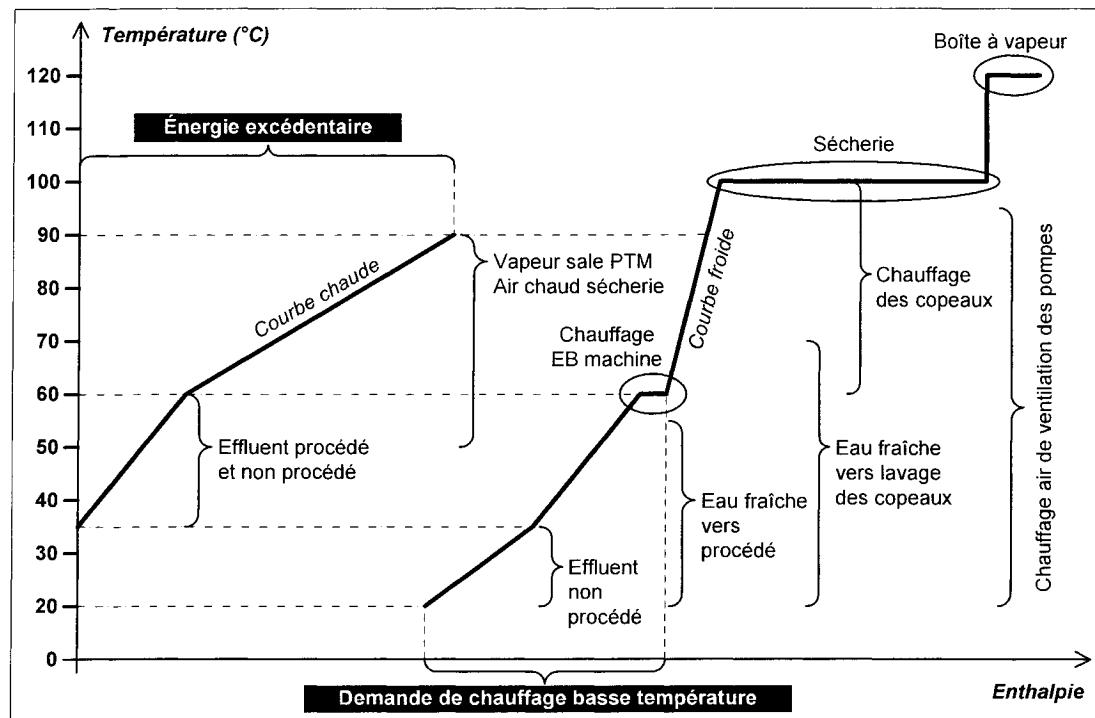


Figure 4.1 : Composition typique des courbes composites.

L'étude des usines de référence montre que les courbes composites, issues de l'extraction représentative, ont la même structure pour toutes configurations étudiées (Figure 4.1). Chaque courbe peut être divisée en une zone de basse température (BT) et une zone de haute température (HT), définies respectivement au dessus et au dessous de la température des circuits de la machine (60°C pour la plupart des usines, 40°C pour DES 100).

La zone BT de la courbe composite chaude comprend des effluents procédé (effluent désencrage, excès d'eau blanche des ateliers de pâte et de la machine, effluent des presses) et d'effluents non procédé (eau de refroidissement des moteurs PTM non recirculée et effluent des pompes à vide). La zone HT comprend l'air chaud évacuée de la sécherie et vapeur sale de l'atelier PTM. Dans les travaux présentés, l'énergie excédentaire est définie comme l'énergie disponible dans le procédé sous 100°C. Dans ce contexte, l'ensemble de la courbe chaude est considéré comme de l'énergie excédentaire. La seule exception est la vapeur propre produite au PTM, dont la qualité avoisine celle de la vapeur basse pression, et qui n'est pas considéré comme de l'énergie excédentaire.

Sur la courbe composite froide, la zone BT comprend des effluents non procédé, l'appoint d'eau fraîche vers le procédé (lavage des copeaux, atelier de désencrage, douches de la machine), l'eau blanche de l'atelier de désencrage et de la machine à papier. Cette zone est appelée demande de chauffage basse température. La zone HT comprend quant à elle la charge de séchage du papier (palier à 100°C) et la demande de la boîte à vapeur (palier à 130°C). Le chauffage des copeaux et le chauffage de l'air des poches de ventilation de la sécherie sont à cheval sur les zones BT et HT. Pour chaque usine de référence, la plupart de ces éléments sont inclus, et ce, à de même niveaux de température.

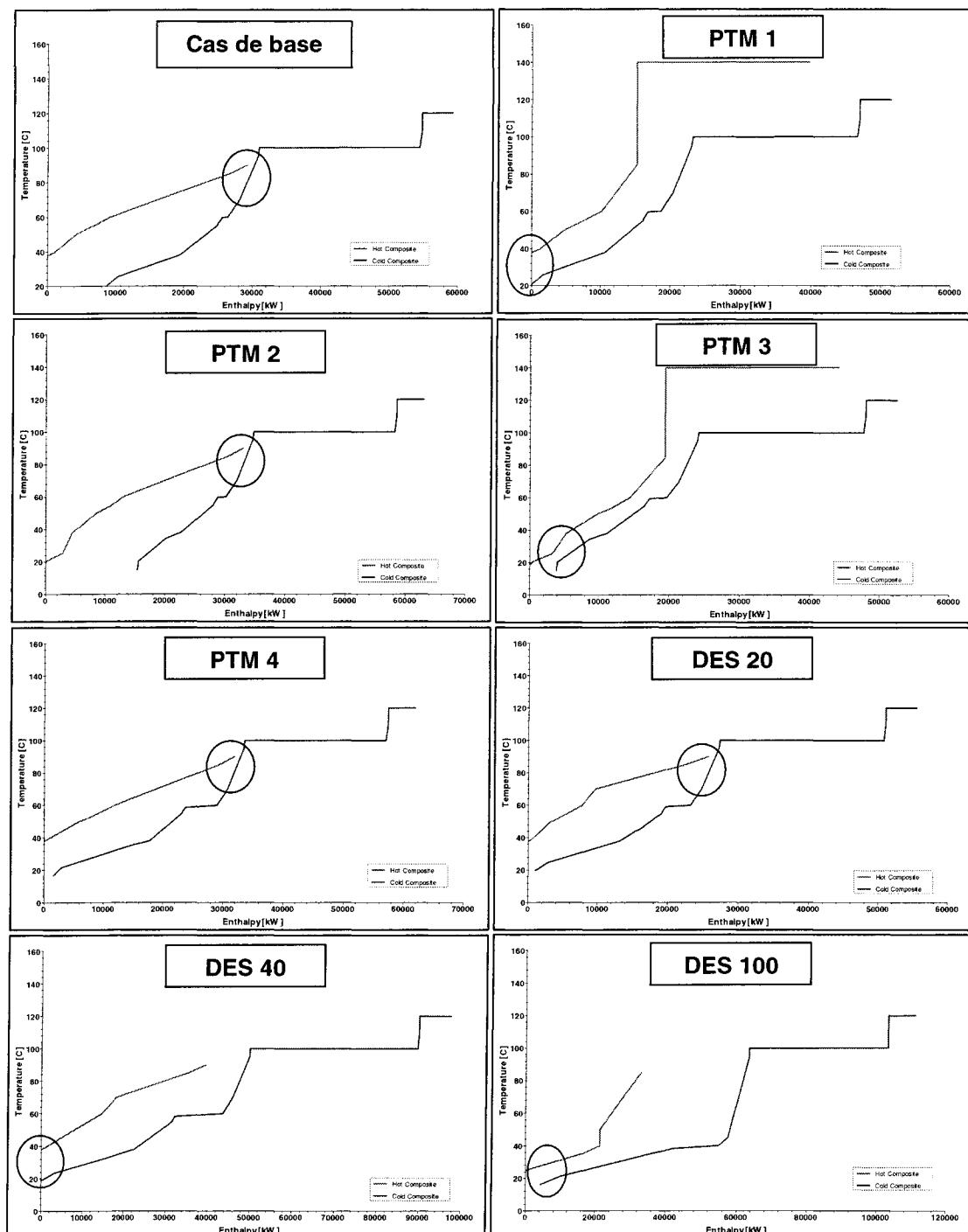
Dans le cas de l'usine DES 100, la même structure est observée : la température des circuits machine est fixée à 40°C et tous les courants correspondants (effluents, eau fraîche et eau blanche à chauffer) se décalent en température. En conséquence, du point de vue de l'analyse de pincement thermique, les usines de référence sont similaires.

À un niveau supérieur de détails, la comparaison des courbes composites obtenues pour les usines de référence montre que les courbes composites peuvent refléter les différentes configurations étudiées ainsi que les effets de changements majeurs au niveau du procédé (annexe C). Or, ces courbes reposent sur le même format d'extraction représentative qui a été implanté dans le modèle général et appliqué de façon identique à toutes les usines de référence. Selon la complexité de l'usine, environ 40 à 70 données clé suffisent pour représenter une usine existante et donc créer les courbes composites représentatives.

Le modèle et le format d'extraction représentative sont des outils efficaces pour réaliser une analyse comparative rapide du profil énergétique entre une usine réelle et les usines de référence ou d'autres usines réelles.

4.2.2 Courbes composites ciblées

La Figure 4.2 présente les courbes composites avec $\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$. Elles ont été utilisées dans les trois activités de ciblage discutées dans les sections suivantes : études du *bottleneck*, des inefficacités énergétiques du procédé et du potentiel d'intégration.



Note : le cercle indique le point de pincement.

Figure 4.2 : Courbes composites pour $\Delta T_{min} = 10^{\circ}\text{C}$

4.2.3 Bottlenecks

a) Usines de référence

Tel qu'il est défini dans ces travaux, le *bottleneck* est donné par le point de pincement à $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$. Trois situations ont pu être observées pour les usines de référence :

- (1) Le *bottleneck* est causé par la vapeur sale PTM (cas de base, PTM 2, PTM 4 et DES 20)
- (2) La situation $Q_c = 0 \text{ kW}$ est atteinte (PTM 1 et DES 40)
- (3) Le *bottleneck* est causé par les zones de très basse température des courbes (PTM 3 et DES 100)

Quand le gradient de température est suffisamment grand dans les zones basses température, c'est-à-dire supérieur à 10°C , les deux premières situations sont en compétition. Si la zone BT de la courbe chaude est plus grande que celle de la courbe froide, autrement dit si l'énergie excédentaire est supérieure à la demande de chauffage basse température, le *bottleneck* est causé par la vapeur sale PTM. Si la zone BT de la courbe chaude est plus petite que celle de la courbe froide, la situation $Q_c = 0 \text{ kW}$ est atteinte avant le *bottleneck* « vapeur sale ». La troisième situation se produit quand le gradient de température est inférieur à 10°C dans les zones basse température.

Dans le cas PTM 1, il y a production de vapeur propre à l'atelier PTM, qui se traduit par une augmentation du niveau de la vapeur sale. Il y a alors déplacement de la courbe froide sous la courbe chaude jusqu'au maximum d'intégration, $Q_c = 0 \text{ kW}$. Pour le cas PTM 3, le refroidissement des boucles de recirculation d'eau non procédé provoque un nouveau *bottleneck* : le courant le plus froid dans le système ne peut refroidir ces boucles jusqu'à 20°C avec $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$. L'augmentation du taux de production de pâte désencrée se traduit, par rapport au cas de base, par une réduction de la courbe chaude et une augmentation de la courbe froide. À 20% de désencrage, il y a encore assez d'énergie excédentaire pour compenser l'augmentation de la demande de

chauffage de l'eau procédé : le *bottleneck* est le même que pour le cas de base. À 40% de désencrage, l'énergie excédentaire ne suffit plus et la situation où $Q_c = 0 \text{ kW}$ est atteinte. À 100%, la tendance est la même. Cependant comme le niveau de température dans les circuits machine est de 40°C, l'effluent est refroidi jusqu'à 25°C contre 38°C pour les autres cas. Cela se traduit sur les courbes par un *bottleneck* au niveau de 25°C, avant d'atteindre $Q_c = 0 \text{ kW}$.

4.2.4 Inefficacités du procédé

Par définition, les inefficacités, données par les violations aux règles du pincement, sont directement liées à la position du point de pincement, c'est-à-dire au *bottleneck*. Quand le *bottleneck* est la vapeur sale de l'atelier de PTM, les inefficacités sont le chauffage avec de la vapeur vive de l'ensemble des courants froids (soit par injection directe soit par échange de chaleur indirect). Dans la situation $Q_c = 0 \text{ kW}$ ou quand le *bottleneck* est dans la zone basse température, le point de pincement est bas, les inefficacités se traduisent par la non utilisation de sources d'énergie excédentaire dans le procédé.

Pour les usines de référence, l'étude des violations aux règles du pincement a permis d'identifier de façon préliminaire, au stade du ciblage, des projets qui ont été par la suite identifiés formellement par les analyses de pincement. Cette étude permet donc de guider l'analyse eau – énergie et en particulier l'extraction des courants pour les deux analyses de pincement.

4.2.5 Potentiel d'intégration

La Figure 4.3et la Figure 4.4 présentent les demandes en chauffage actuelles ($Q_{h\text{actuelle}}$) et la demande ciblée de chauffage à $\Delta T_{min} = 10^\circ\text{C}$ ($Q_{h\text{cible}}$) pour les usines de référence. Est aussi représentée pour chaque cas, la demande de chauffage obtenue par

les meilleurs programmes eau – énergie après application de la méthodologie. Notons que pour les usines de référence 100% PTM, ce sont les demandes obtenues à partir des programmes sans récupération de la vapeur sale (ce projet est déjà couvert par PTM 1). Pour les usines avec désencrage, les demandes obtenues par les programmes avec et sans récupération de la vapeur PTM sont présentés.

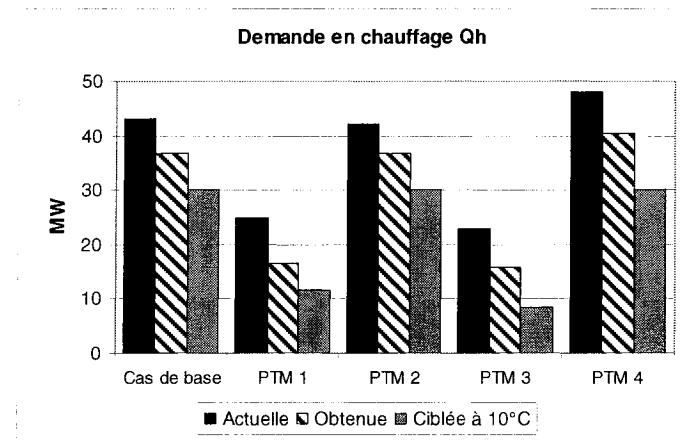


Figure 4.3 : Potentiel d'intégration pour les usines de référence 100% PTM.

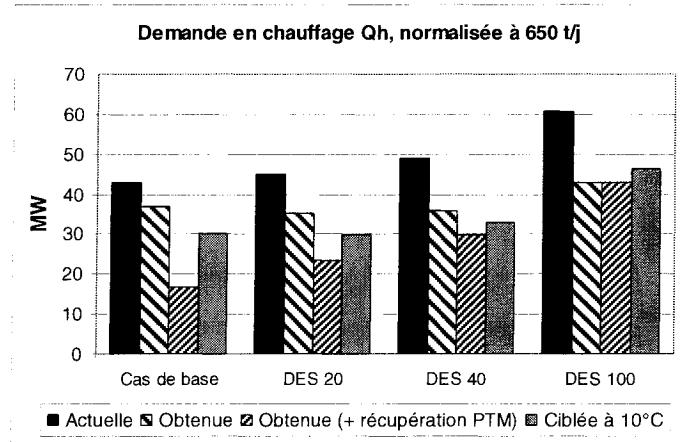


Figure 4.4 : Potentiel d'intégration pour les usines de référence avec désencrage.

a) *Demande ciblée*

Quand le *bottleneck* est provoqué par la vapeur sale de l'atelier PTM, la demande ciblée en chauffage est toujours égale à 30 MW. En effet dans cette situation, $Q_{h\text{cible}}$ correspond au besoin en chauffage des courants froids au dessus de 80°C, en majeure partie les courants de la sécherie. La configuration de la sécherie ne variant pas pour les usines de référence, sa demande en chauffage est constante et égale à 30 MW. Quelque soit le point de départ, la demande ciblée est la même, égale au besoin de chauffage de la sécherie.

Quand la situation est $Q_c = 0$ kW, il n'y pas assez d'énergie excédentaire et donc la demande ciblée comprend la sécherie mais aussi une partie de la demande de chauffage basse température. $Q_{h\text{cible}}$ est alors supérieur à 30 MW. La situation est similaire quand le *bottleneck* est dans la zone de très basse température des courbes. Quand on augmente le taux de désencrage, la demande ciblée pour 20% de désencrage est identique au cas de base, puis augmente avec le taux pour 40% et encore pour 100%.

b) *Potentiel d'intégration*

Dans les cas où le *bottleneck* est causé par la vapeur sale PTM, $Q_{h\text{cible}}$ est égale à 30 MW et le potentiel dépend de la situation actuelle. Plus l'usine est loin de la cible, plus le potentiel est grand. Dans les cas avec $Q_c = 0$ kW ou avec un *bottleneck* dans la zone de très basse température des courbes, la généralisation est plus difficile car $Q_{h\text{cible}}$ évolue aussi selon le procédé.

c) *Prévision de la demande obtenue*

Les résultats pour les usines de référence montrent que dans la plupart des cas, la demande obtenue par les programmes est au dessus de la demande ciblée. La demande ciblée peut donc être utilisée comme borne inférieure du niveau atteignable pour les usines PTM 2 et PTM 4, et dans une certaine mesure pour DES 40 et DES 100. Pour

les autres usines (cas de base, PTM 1, PTM 3 et DES 20), cette règle peut être utilisée seulement si le projet de récupération de la vapeur sale PTM n'est pas considéré.

4.2.6 Conclusions

Le format d'extraction proposé permet, avec un minimum de données, de représenter, via les courbes composites, les principales configurations d'usines de papier journal et de comparer les profils énergétiques.

Le *bottleneck* le plus courant est la vapeur sale PTM : il y a alors suffisamment d'énergie excédentaire ce qui procure une certaine flexibilité pour l'intégration. Les inefficacités énergétiques sont alors toutes les utilisations de vapeur vive pour les demandes en chauffage basse température.

Le second type de *bottleneck* se manifeste quand il n'y a pas assez d'énergie excédentaire, ou quand une partie de cette énergie n'est pas assez chaude pour combler les demandes en chauffage basse température. L'utilisateur dispose alors de peu de flexibilité pour l'intégration. La principale inefficacité est la non utilisation de l'énergie excédentaire. Cependant pour tirer le meilleur profit de cette énergie, il est préférable de réduire la consommation d'eau avant d'envisager l'intégration énergétique.

Le potentiel d'intégration donne un bon ordre de grandeur du niveau atteint en pratique par les programmes eau – énergie, quand le projet de récupération de la vapeur sale PTM n'est pas considéré. Quand ce projet est inclus dans les programmes l'approximation n'est plus bonne. Ce serait également le cas si on considérait d'autres projets qui auraient un impact majeur sur la structure des courbes.

4.3 Structure des programmes eau – énergie

4.3.1 Étude de procédé

Trois projets ont été identifiés pour les usines de référence par l'étude de procédé. Le premier projet est la récupération d'énergie à l'atelier de PTM. Il consiste à produire de la vapeur propre dans une chaudière de récupération à partir de la vapeur sale des raffineurs (Parker et al., 2003). Dans la suite de la thèse, ce projet est appelé « récupération de l'énergie PTM ». Dans le cadre de l'étude, l'énergie récupérée est fixé à 3.5 GJ/t, moyenne observée dans les usines canadiennes (Francis et Towers, 2005). Le second projet est la recirculation de l'eau des pompes à vide. Plusieurs stratégies existent (PAPRICAN, 1994, Houle et al., 1999, Albert et al., 2006). La stratégie choisie est de recirculer l'eau vers les pompes jusqu'à une température maximale de 55°C, et de recirculer l'effluent vers les douches de la machine. Le troisième projet consiste à recirculer l'eau de refroidissement des moteurs des raffineurs, des systèmes de lubrification et de climatisation en boucles fermées refroidies.

4.3.2 Analyse de pincement modifiée

a) *Règles d'application*

Aucunes des règles établies pour l'analyse de pincement modifiée n'a été mise en défaut lors de leur application aux usines de référence. En particulier, $\Delta T_{min} = 0^\circ\text{C}$ est le meilleur choix pour l'ensemble des configurations étudiées (voir les courbes dans l'annexe C). L'étude du sous – système « réseau d'eau d'appoint » a permis de couvrir la plupart des opportunités de mélange et recirculation dans les configurations étudiées. Comme le réseau d'eau blanche n'a pas été étudié pour les usines de référence, la généralisation de la séparation en deux sous – systèmes sera discutée plus tard en s'appuyant sur les études de cas.

b) *Projets identifiées*

Le Tableau 1.1 présente les courants extraits pour le cas de base.

Tableau 4.1 : Extraction pour l'analyse de pincement modifiée du cas de base.

Courant	T initiale (°C)	T ciblée (°C)	Enthalpie (kW)
MP1-Effluent des presses	60.00	38.00	4200.8
Excès EB machine vers effluent	60.00	38.00	1957.5
Chauffage eau des douches	20.73	55.00	8031.3
Effluent pompes à vide	39.74	20.70	6169.2
Effluent moteurs PTM	55.91	20.70	707.4
Effluent lub/clim	25.70	20.70	852.6
Eau NC vers effluent	25.73	20.70	1197.6
Eau étanchéité	20.70	40.00	3860.0

Pour PTM 1 et PTM 3, la récupération de l'énergie PTM n'a pas d'impact sur les courants extraits lors des analyses de pincement modifiée et classique et donc n'a pas d'impact sur les projets identifiées et la structure des programmes. Pour PTM 2 et PTM 3, les boucles fermées d'eau non procédé n'a pas d'impact sur les courants extraits. La recirculation d'effluent vers les douches de la machine ne change pas les niveaux de température sur courbes composites et donc la nature des projets identifiés. Le seul impact est la réduction de l'enthalpie des courants chauds d'effluents disponibles et des courants froids d'eau fraîche. Cependant, cela n'affecte que la taille des projets identifiés et non leur nature. Pour PTM 4, l'ouverture des circuits procédé et non procédé ne change pas fondamentalement la structure des courbes. Les mêmes projets sont identifiés avec de nouvelles opportunités comme la recirculation d'eau blanche ou d'effluent non procédé vers l'atelier PTM. La production de pâte désencrée introduit deux nouveaux courants et offre de nouvelles opportunités.

L'analyse modifiée aboutit donc à des projets de mélange et de recirculation similaire pour chaque configuration d'usine papier journal étudiée. Certains de ces projets sont des recirculations d'eau non procédé vers le procédé. Les autres, la majorité, sont des projets de recirculation d'un effluent vers son département (ou son procédé) d'origine

(par ex. : effluent des presses recirculé vers les douches de la machine à papier). La même chose a été observée pour le réseau d'eau blanche dans l'étude de cas 1. Grâce à l'étape d'itération, les projets obtenus pour les réseaux d'eau d'appoint des usines de référence peuvent être considérés comme des projets clés pour les usines de papier journal. En revanche, les études de cas montrent que les projets identifiés pour le réseau d'eau blanche sont eux plutôt spécifiques à chaque usine.

4.3.3 Analyse de pincement classique

a) Règles d'application

Aucune des règles établies pour l'analyse de pincement classique n'a été mise en défaut lors de leur application aux usines de référence, y compris le choix $\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$. Les courbes pour l'analyse classique permettent la même flexibilité que pour l'analyse modifiée. Les contraintes, telles que les distances physiques entre les courants ont pu être prises en compte pendant la conception. Une gamme plus large de projet peut alors être proposée à une usine, augmentant ainsi la possibilité que des projets soient implantés.

b) Projets identifiés

Le Tableau 4.2 présente les courants extraits pour le cas de base.

Tableau 4.2 : Extraction pour l'analyse de pincement classique du cas de base.

Courant	T initiale (°C)	T ciblée (°C)	Enthalpie (kW)
Chauffage eau de lavage	56.00	70.00	694.7
Chauffage eau d'appoint lavage	20.73	70.00	905.3
Vapeur récupérée	90.00	70.00	6000.0
MP1-Chauffage silo hors machine	59.81	60.00	733.5
MP1-Effluent des presses	60.00	38.00	4200.8
Excès EB machine vers effluent	60.00	38.00	1957.5
MP1 Chauffage air des poches	20.00	95.00	5211.2
MP1 Air évacué sécherie	85.00	50.00	6835.6
Chauffage eau des douches	20.73	55.00	8031.3

Comme pour l'analyse modifiée, la plupart des configurations étudiées ont peu d'impact sur cette extraction et sur la structure des courbes composites. Pour toutes les usines de référence, des projets similaires sont obtenus, l'augmentation du taux de désencrage est le changement de configuration qui a le plus d'impact sur l'analyse : la réduction de l'énergie excédentaire se traduit par l'élimination progressive des projets impliquant la vapeur sale PTM et l'excès d'eau blanche.

Deux familles de projets sont identifiées, selon le type d'énergie excédentaire utilisée : effluent ou air chaud. Sous 50-60°C, on trouve des échangeurs de chaleur entre les effluents procédé et l'eau fraîche destinée aux apponts dans le procédé. Au-dessus de 50-60°C, l'air chaud de la machine à papier et la vapeur sale PTM sont utilisés pour compléter le chauffage de courants déjà chauds comme l'eau blanche de la machine ou pour préchauffer de l'eau fraîche destinée au procédé. L'air évacué de la sécherie est aussi utilisé pour préchauffer l'air de ventilation des poches.

L'étude des courbes composites montre de plus qu'il y a des opportunités pour des échanges croisés qui respectent les contraintes thermodynamiques. Cet élément de flexibilité accroît la possibilité pour l'utilisateur d'obtenir des projets faisables. L'itération de la séquence extraction – conception garantit que toutes les opportunités disponibles ont été explorées et que seules les plus intéressantes ont été sélectionnées. Les projets obtenus peuvent être considérés comme des projets clés.

4.3.4 Aspects pratiques

Une association entre un courant chaud et un courant froid obtenue dans un réseau d'échangeur peut mener à plusieurs interprétations pour l'indentification d'un projet de mélange, de recirculation ou d'échangeur indirect. De même plusieurs combinaisons de projets sont possibles. En pratique, le choix entre deux interprétations ou deux combinaisons possibles est guidé par des spécificités du procédé et les objectifs propres

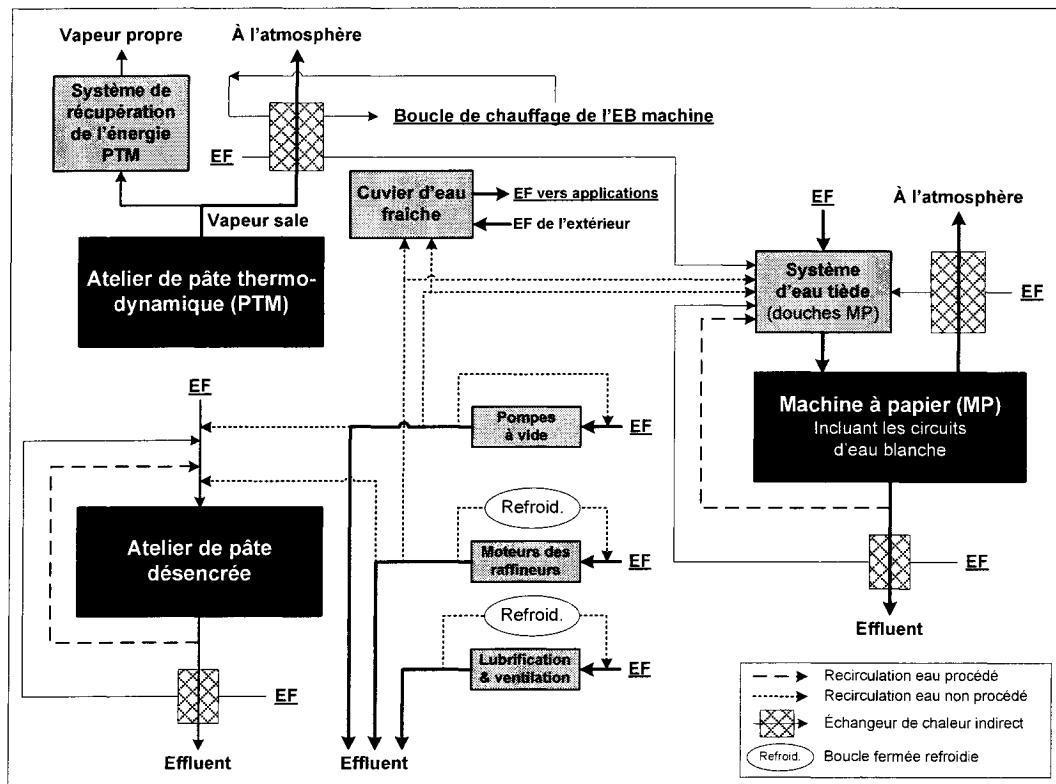
à l'usine. Pour les besoins de la généralisation, le choix a été fait selon des aspects pratiques relatifs aux projets envisagés, présentés dans l'annexe C.

4.3.5 Efficacité de chaque phase d'analyse

Pour toutes les usines de référence étudiées, les trois phases de l'analyse eau – énergie ont une même efficacité, dans le sens où elles apportent chacune au moins un projet clé aux programmes finaux. Le taux de désencrage n'affecte pas l'efficacité des phases même si le potentiel de certains projets diminue, comme celui de la récupération d'énergie au PTM.

En revanche le niveau d'intégration a plus d'impact comme le montre l'étude des usines 100% PTM. Si des projets classiques sont déjà en place comme la récupération de l'énergie au PTM et la recirculation d'eau non procédé, les analyses de pincement prennent plus d'importance que l'étude de procédé. Si l'usine est déjà bien intégrée du point de vue de la consommation d'eau, la participation de l'analyse de pincement modifiée aux programmes finaux sera plus faible. De même, pour une usine déjà bien intégrée énergétiquement, la participation de l'analyse de pincement classique sera relativement limitée.

4.3.6 Conclusions



Seuls les courants impliqués dans les projets sont représentés.

EF : eau fraîche ; EB : eau blanche

Figure 4.5 : Projets clés pour les usines de papier journal.

La Figure 4.5 résume les projets clés obtenus pour les usines de papier journal de référence. Les règles utilisées pour les analyses de pincement modifiée et classique associées aux caractéristiques du procédé conduisent à l'obtention de projets pratiques. L'itération assure que toutes les opportunités ont été systématiquement considérées.

Comme les caractéristiques des extractions pour ces deux analyses varient peu avec les différentes configurations étudiées, les mêmes types de projets sont obtenus pour toutes les usines de référence. De plus, une certaine flexibilité au niveau des courbes composites permet d'appliquer les mêmes critères subjectifs et d'identifier des projets

similaires d'une usine de référence à l'autre, tout en respectant les contraintes thermodynamiques. L'étude de procédé donne un nombre limité de projets classiques car dans le contexte de la généralisation, les spécificités des usines ne sont pas représentées.

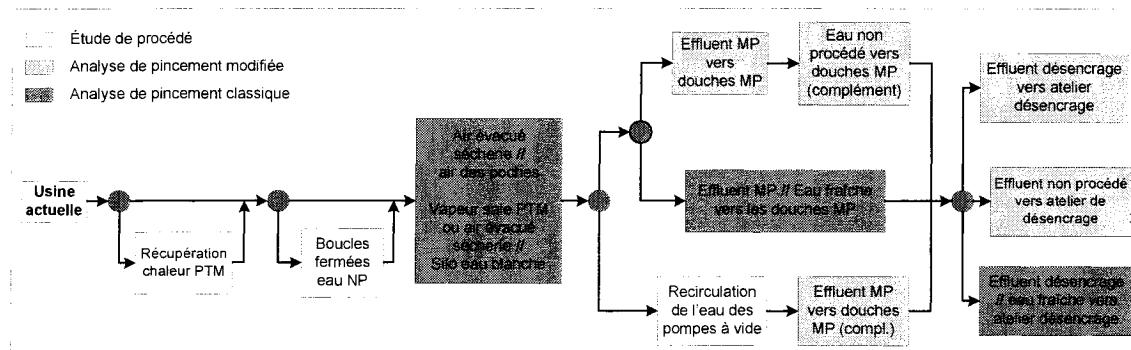


Figure 4.6 : Programmes eau – énergie pour les usines de référence.

Ces projets sont organisés en programme eau – énergie. Les programmes obtenus pour les usines de référence présentent tous la même structure générale (Figure 4.6).

La structure n'impose pas un ordre d'application particulier car la plupart des projets sont indépendants. Cependant la méthodologie permet d'organiser les projets de façon logique, en tenant compte des interactions du procédé. Il est alors préférable de suivre la séquence : opportunités classiques, projets de mélange et de recirculation et projets d'échangeur de chaleur indirect ; en particulier quand des projets majeurs comme la récupération de l'énergie au PTM sont identifiés.

Chaque phase l'analyse eau – énergie participe de façon différente aux programmes. L'analyse de pincement modifiée aboutit indirectement à la réduction d'énergie par le biais de projets qui réorganisent les circuits d'eau (mélanges) et réduisent la consommation d'eau (recirculations). Les coûts d'investissement sont a priori plus faibles mais le risque est plus grand car la modification des réseaux d'eau peut affecter

le procédé et à terme la qualité du papier. L'analyse classique aborde uniquement la réduction d'énergie. Les échangeurs de chaleur indirects représentent un risque plus faible car ils n'affectent pas les bilans massiques mais peuvent représenter un coût d'investissement et de maintenance élevé.

Alors que le chauffage de l'eau blanche machine ne peut être réalisé que par échange indirect, certains objectifs énergétiques peuvent être atteints par différents moyens. Trois alternatives s'offrent pour le chauffage de l'appoint à l'atelier de désencrage et au système des douches de la machine : recirculation d'un effluent procédé, recirculation d'une eau non procédé ou échangeur de chaleur indirect. Ces solutions en compétition peuvent aussi être combinées : par exemple une recirculation partielle accompagnée d'un échangeur indirect.

Le choix entre alternatives ne dépend pas de la configuration de l'usine papier journal mais plutôt des objectifs spécifiques et de la culture de l'usine. L'analyse eau – énergie a l'avantage de donner des programmes mixtes combinant ainsi les avantages respectifs des analyses de pincement modifiée et classique. À partir de la structure de programme obtenue, l'usine est à même de sélectionner une route technologique qui prend en compte ses spécificités et ses limitations.

4.4 Résultats : performance des programmes

4.4.1 Nomenclature

Dans cette partie, la nomenclature suivante est utilisée pour les projets identifiés :

- PTM* : récupération de l'énergie au PTM par production de vapeur propre à partir de la vapeur sale PTM
- PAV : recirculation interne de l'eau des pompes à vide jusqu'à 55°C et recirculation de l'effluent chaud vers les douches de la machine.
- REC : recirculation d'effluent procédé traité (eau blanche et filtrats des presses) vers les douches de la machine à papier.
- ENP : recirculation en boucles fermées d'eau non procédé de refroidissement des moteurs PTM et des systèmes de lubrification et de ventilation.
- ECH : réseau d'échangeurs de chaleur indirects.

4.4.2 Consommation de vapeur

La Figure 4.7 présente les réductions eau – énergie obtenues avec les programmes de projets pour le cas de base et la participation des projets clés qui composent les programmes. Les résultats sont exprimés en GJ par tonne séchée à l'air (tsa). Pour les autres usines de référence 100% PTM, étant des variations du niveau d'intégration du cas de base, les programmes ont le même effet que pour le cas de base. Seul le point de départ change. La Figure 4.8 présente de façon schématique les résultats pour les usines avec désencrage (tous les résultats sont ramenés à une base de production de 650 t/j).

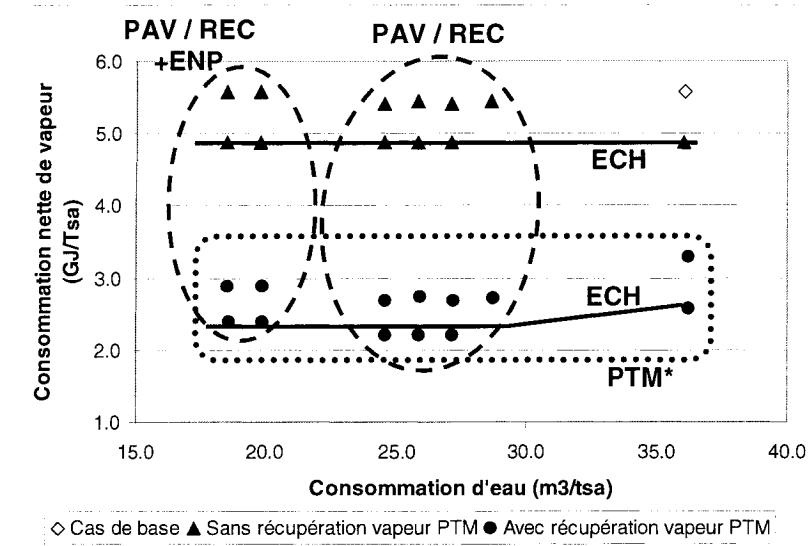


Figure 4.7 : Résultats des programmes eau et énergie pour le cas de base.

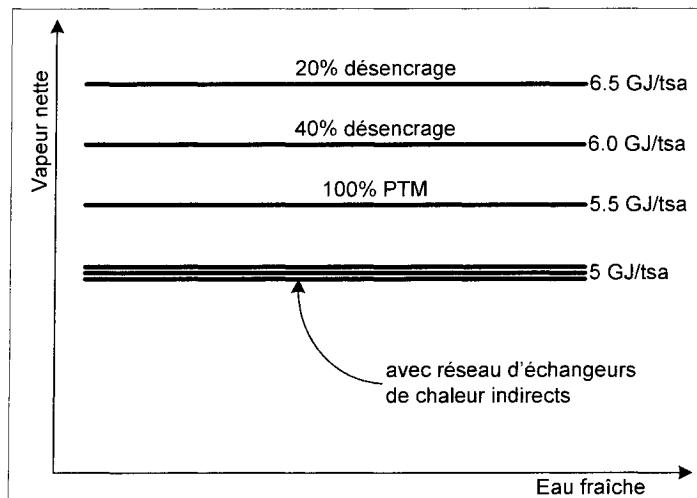


Figure 4.8 : Résultats pour les usines avec désenclage sans projet PTM.

Pour toutes les usines de référence, les projets de recirculation aux douches de la machine aboutissent à une faible réduction de la consommation de vapeur. En effet dans les modèles, l'énergie excédentaire (air sécherie et vapeur sale PTM) est déjà largement utilisée pour chauffer l'eau fraîche des douches. La recirculation d'eau a surtout pour impact d'augmenter l'énergie excédentaire disponible. La recirculation de

l'eau non procédé en boucle fermée a un impact faiblement négatif car elle provoque une baisse de la température d'eau de fabrication. Le réseau d'échangeurs de chaleur indirects permet quant à lui une réduction de 0.5 à 0.75 GJ/t.

Pour les usines avec désencrage, même si les niveaux de départ sont différents, l'application de l'analyse de pincement classique les ramène tous autour de 5 GJ/t. Cela s'explique par l'introduction de nouveaux courants comme l'effluent de désencrage, par le plus grand potentiel de réduction de vapeur au silo hors machine et par l'utilisation extensive de l'énergie excédentaire.

La meilleure opportunité de réduction de vapeur est la récupération de l'énergie PTM pour produire de la vapeur propre. La consommation nette de vapeur est réduite de moitié. Ce projet a deux effets secondaires. D'abord la température dans les circuits de l'atelier PTM diminue, ce qui se traduit par une augmentation de la consommation de vapeur au silo hors machine. Ensuite, la vapeur sale n'est plus disponible pour préchauffer une partie des douches de la machine, ce qui se traduit par une augmentation de la consommation de vapeur au cuvier d'eau tiède. La consommation brute de vapeur est plus élevée et les projets de recirculation aux douches aboutissent à des réductions de vapeur plus significatives de l'ordre de 0.5 GJ/t.

Le potentiel de production de vapeur propre diminue avec l'augmentation du taux de désencrage : 3.5 GJ/t papier pour 100% PTM, 2.8 GJ/t pour 20% désencrage, 2.1 GJ/t pour 40% de désencrage et 0 GJ/t pour 100% désencrage. Ainsi, quand on considère la récupération de la vapeur PTM, l'écart se creuse et on retrouve les différences initiales entre les usines (Figure 4.9).

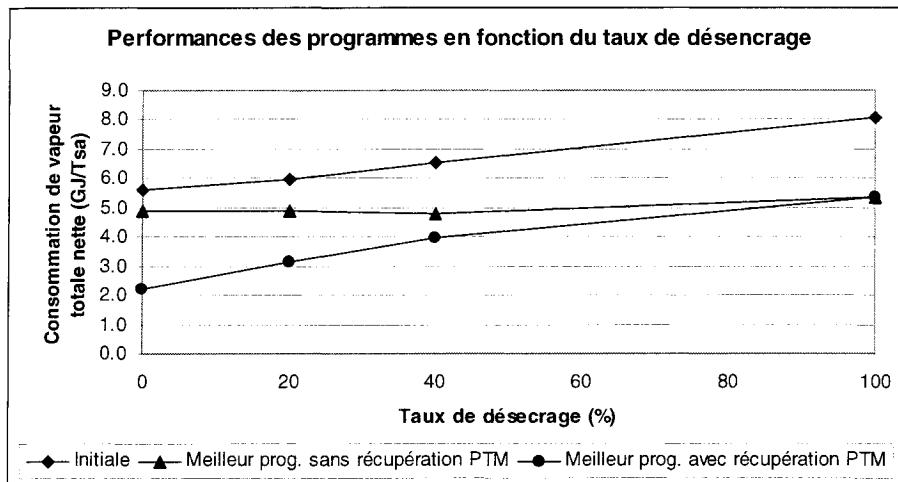


Figure 4.9 : Impact du projet PTM sur les usines avec désencrage.

4.4.3 Consommation d'eau fraîche

Pour le cas de base, la réduction présente en deux étapes : la recirculation d'effluents procédé et/ou non procédé aux douches de la machine, puis les boucles fermées d'eau non procédé. On observe par ailleurs que la récupération de l'énergie au PTM n'a pas d'impact significatif sur la consommation d'eau fraîche.

Pour les autres usines 100% PTM, les programmes ont le même effet que pour le cas de base, et seul le point de départ change. Pour les usines avec désencrage, les mêmes tendances sont observées, avec en plus le projet de recirculation de l'effluent de désencrage vers l'atelier de désencrage.

4.4.4 Utilisation de ressources

Dans le contexte de cette thèse, le terme de ressources comprend : l'énergie excédentaire (effluent, air chaud et vapeur sale PTM), l'aire d'échange indirect supplémentaire à installer et les unités de traitement nécessaire par filtration et ultrafiltration (représentées par le débit à traiter). L'énergie excédentaire de l'effluent

est défini comme l'énergie que l'on peut en extraire en le refroidissant jusqu'à 30°C. L'énergie excédentaire de l'air chaud est défini comme l'énergie que l'on peut extraire de la vapeur sale et de l'air extrait de la sécherie en les refroidissant jusqu'à 50°C. D'autre part on considère que seuls les effluents procédé doivent être traités pour être recirculés.

Dans les modèles, une très large partie de l'eau des douches est chauffée en utilisant la vapeur sale PTM et l'air extrait de la sécherie. L'énergie excédentaire qui sort avec l'air chaud augmente avec les projets de recirculation d'eau procédé et non procédé aux douches. Elle diminue avec les projets de boucles fermées d'eau non procédé : le refroidissement de l'eau de fabrication se traduit par une consommation plus importante d'énergie excédentaire. Elle diminue aussi avec la récupération de la vapeur sale PTM à cause de l'élimination de la vapeur sale PTM.

L'énergie excédentaire sortant avec l'effluent diminue avec tous les projets réduisant la consommation d'eau fraîche. En particulier, quand l'effluent procédé est réduit, il y a un transfert d'énergie excédentaire de l'effluent vers l'air chaud. Elle diminue aussi avec les projets d'échangeurs indirects de chaleur sauf quand le besoin d'eau fraîche aux douches est réduit à zéro : il n'y alors plus assez de courant froid disponible pour refroidir l'effluent.

Avec la réduction d'eau, il y a donc un transfert d'énergie excédentaire de l'effluent vers l'air chaud. Il y a même une augmentation de l'énergie excédentaire disponible totale. En effet, selon nos conventions, quand un débit donné d'effluent à 60°C est rejetée, il fourni un montant d'énergie excédentaire correspondant à son refroidissement de 60 à 30°C ($\Delta T = 30^\circ\text{C}$). Quand le même débit d'effluent est recirculé, la quantité d'énergie excédentaire déplacée vers l'air chaud correspond environ à un débit d'eau des douches à chauffer de 20 à 60°C ($\Delta T = 40^\circ\text{C}$).

Pour une réduction finale de vapeur identique, l'aire supplémentaire est plus faible quand il y a recirculation d'effluent vers les douches de la machine : une plus grande partie de l'énergie est transférée directement et moins d'eau fraîche doit être préchauffée. L'aire d'échange nécessaire augmente pour les projets de boucles fermées d'eau non procédé à cause du refroidissement de l'eau de fabrication : il faut plus d'aire pour amener l'eau à une même température cible. La récupération de la vapeur sale n'a pas d'impact sur l'aire d'échange sauf dans les cas où l'air chaud PTM était utilisé de façon importante.

La recirculation de l'effluent procédé vers les douches nécessite le traitement de plus de 3500 m³/j. Quand ce projet est en complément de la recirculation de l'eau des pompes à vide, le débit à traité est quatre fois moins important.

4.4.5 Niveaux atteignables

a) Résultats

Quand il n'y a pas de récupération de l'énergie au PTM, le même niveau minimum de consommation nette de vapeur est atteint pour toutes les usines de référence, soit environ 5 GJ/Tsa (Figure 4.10).

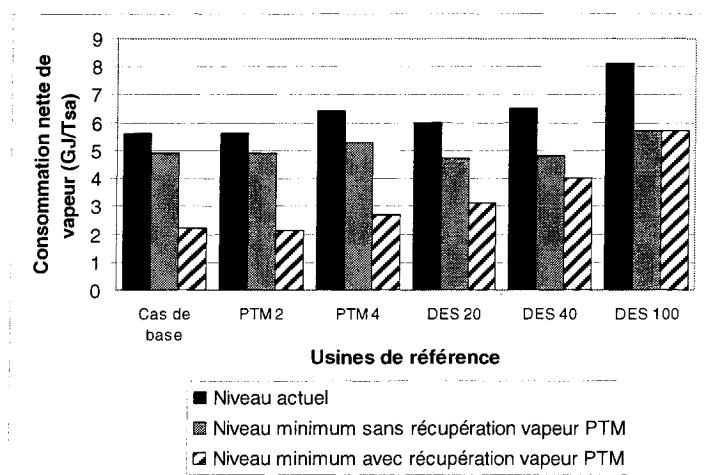


Figure 4.10 : Niveaux minimums de consommation de vapeur atteignables.

La fraction de pâte désencrée produite n'a pas un grand impact sur ce niveau, même à 100% désencrage. Cependant, la situation change quand la récupération de l'énergie PTM est considérée. Pour les usines 100% PTM, le niveau atteignable est alors 2 GJ/Tsa. À mesure que la fraction de pâte désencrée produite augmente, le niveau atteignable devient moins attrayant.

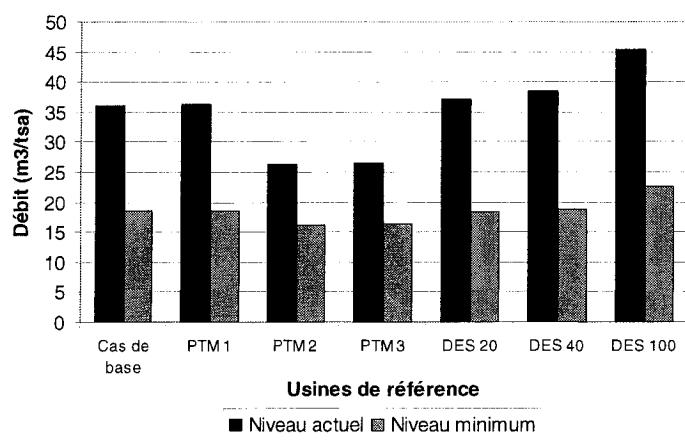


Figure 4.11 : Niveaux minimums de consommation d'eau atteignables.

Les niveaux minimums de consommation d'eau fraîche atteint pour toutes les usines de référence sont similaires, mis à part pour DIP 100 : entre 16 et 18 m³/Tsa (Figure 4.11). Le niveau minimum pour l'usine de référence 100% désencrage est 22.5 Tsa/m³.

Les niveaux minimum atteints pour les consommations d'eau et d'énergie sont similaires pour deux raisons. D'abord les projets identifiés et la structure des programmes eau – énergie sont similaires. Ensuite la consommation spécifique totale en eau de certains équipements clés (pompes à vide, douches, ...) est la même pour toute les usines de référence. Enfin, les projets atteignent dans tous les cas, les mêmes niveaux de performance : seule l'utilisation de ressources varie. Par exemple, le projet de recirculation de l'effluent de désencrage vers l'atelier de désencrage est défini de façon à aboutir, quelque soit le point de départ (20%, 40% ou 100% de désencrage), à une valeur donnée pour l'effluent de désencrage, fixée à 10 m³/tsa.

b) Estimation du niveau minimum atteignable

Pour toutes les usines de référence sauf DES 100, la valeur de f_e obtenue est entre 0,75 et 0,80. Ce sont des valeurs similaires ou égales à celle observée pour l'étude de cas 1. Les 20% résiduels de D^* correspondent dans chaque cas à l'eau fraîche encore utilisée aux pompes à vide. Pour l'usine 100% désencrage, $f_e = 0,67$. En effet pour cette usine, le total des sources disponibles est largement inférieur aux besoins de l'atelier de pâte. Même si on maximise la recirculation vers l'atelier de désencrage, la consommation d'eau fraîche reste élevée par rapport à ce qui peut être atteint pour DES 20 et DES 40.

Ainsi, la règle $D_{atteignable} = D_{actuelle} - 0,80.D^*$ peut être considérée comme valide jusqu'à 40% de désencrage. Elle ne garantit cependant pas qu'en pratique la réduction maximale puisse être effectivement atteinte par les projets. Des obstacles spécifiques à chaque usine peuvent survenir, en particulier pour la fermeture des circuits d'eau blanche.

Pour le niveau de consommation de vapeur, la valeur de f_v obtenue pour l'étude de cas 1 n'est pas généralisable. En effet, quand il n'y a pas de récupération de l'énergie au PTM, f_v est égale à 0.8 pour les usines 100% PTM et pour DES 100, et égale à 1 pour DES 20 et DES 40. La formule $Qh_{atteignable} = Qh_{actuelle} - 0,80.Qh^*$ ne peut donc pas être utilisée avec un degré de confiance suffisant pour prédire le niveau minimum atteignable.

Le niveau minimum de consommation de vapeur atteignable peut quand même être estimé qualitativement pour une usine réelle. Il faut procéder par comparaison avec les usines de référence, du point de vue de la configuration et des technologies utilisées.

4.4.6 Conclusions

Les programmes identifiés par l'application de la méthodologie aux différentes configurations d'usine papier journal permettent d'atteindre des réductions significatives des consommations d'eau et d'énergie.

Les niveaux minimum de consommation de vapeur et d'eau fraîche atteignables avec ces programmes ont été identifiés. Une procédure est proposée pour estimer les niveaux minimums atteignables pour une usine réelle :

- dresser le profil de l'usine, grâce à la procédure de ciblage,
- identifier l'usine de référence dont elle se rapproche le plus,
- réaliser une analyse comparative entre l'usine réelle et l'usine de référence,
- estimer le niveau d'eau atteignable en utilisant la formule proposée :

$$D_{(atteignable)} = D_{(actuelle)} - 0,8.D^*$$

- estimer le niveau qualitatif de vapeur atteignable à partir des valeurs obtenues pour l'usine de référence.

4.5 Aspect effluent zéro

4.5.1 Température de l'effluent

On observe pour les usines de référence les mêmes tendances que celle obtenues pour l'étude de cas 1. La différence essentielle entre les usines 100% PTM et les usines avec désencrage est la suivante. Plus la fraction de pâte désencrée produite est grande, plus l'effluent final est froid car moins d'énergie est introduite dans le système via la production de PTM. Ainsi les niveaux de température atteints sont généralement inférieurs pour les usines avec désencrage, en particulier pour DIP 100 (température finales entre 27 et 33°C).

4.5.2 Routes technologiques vers effluent – zéro

Pour toutes les usines de référence, les routes technologiques identifiées sont les mêmes. Elles sont illustrées par la Figure 4.12.

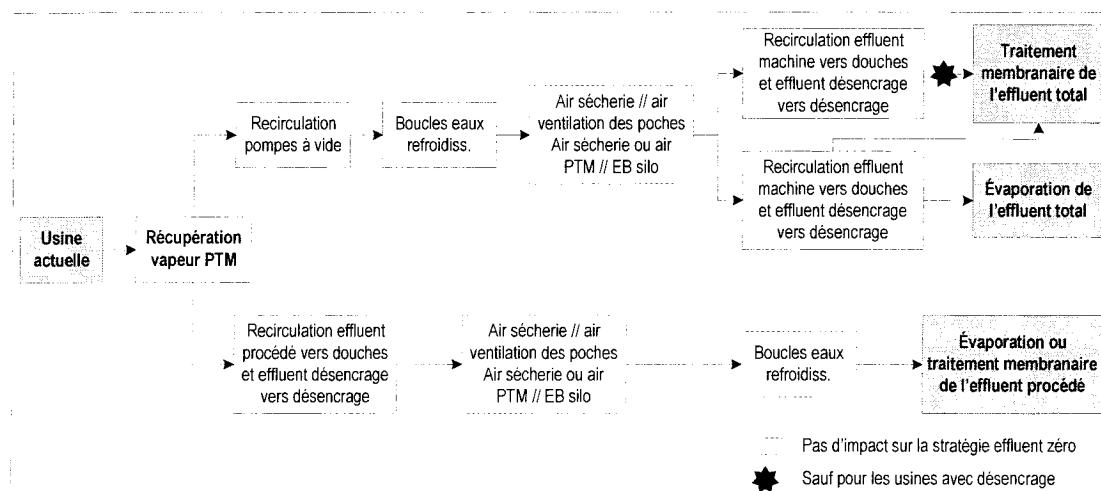


Figure 4.12 : Routes technologiques générales pour aller vers effluent – zéro.

Quelque soit le traitement choisi, les programmes basés sur les projets de recirculation des eaux non procédé favorisent le traitement de l'effluent total, alors que ceux basés sur la recirculation d'effluent procédé favorisent les stratégies dites pseudo effluent –

zéro L'ajout d'un réseau d'échangeurs indirects n'a pas d'impact sur la stratégie effluent – zéro tant que la température de l'effluent n'est pas affectée. Sinon, cela ne favorise que les stratégies de traitement membranaire. Ces résultats concordent avec ceux observés pour l'étude de cas 1.

Plus l'usine a un réseau d'eau intégrée, plus elle est dans une situation favorable. Si elle est déjà engagée dans une des routes technologiques, le choix de la stratégie est déjà en partie fait. Par ailleurs, plus la fraction de la pâte désencrée produite augmente, plus la stratégie de recirculation après traitement membranaire est privilégiée.

La récupération de l'énergie au PTM n'est pas indispensable à la réalisation des stratégies effluent – zéro. Comme elle s'accompagne de l'ajout d'un effluent chaud, elle favorise les stratégies d'évaporation et augmente le débit d'effluent à traiter. L'impact est important pour les stratégies pseudo effluent : l'effluent procédé à traiter peut augmenter de 40%.

4.5.3 Implantation des stratégies

Comme il a été vu dans le chapitre 3, il va être nécessaire de refroidir l'effluent tout au long de l'implantation du programme jusqu'aux stratégies effluent – zéro. C'est le cas pour les usines 100% PTM, pour les usines avec 20% et 40% de désencrage. En revanche pour le cas 100% désencrage le problème ne se pose pas car la température de l'effluent est toujours sous 35°C.

La Figure 4.13 montre le débit d'effluent total et d'effluent procédé à traiter pour les stratégies effluent – zéro dans les usines de référence.

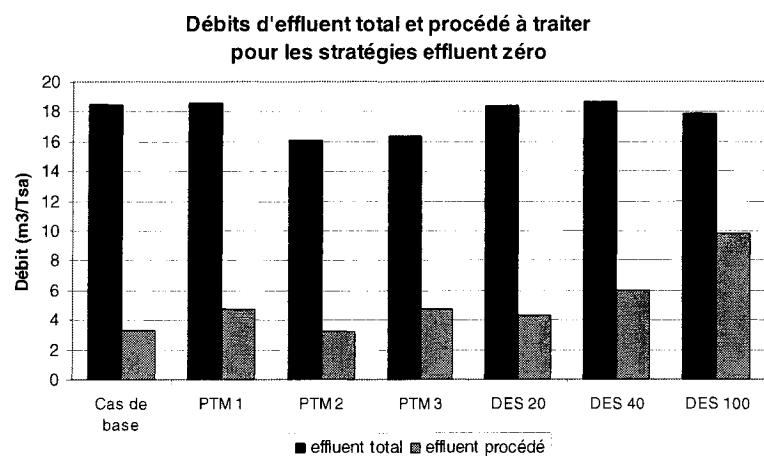


Figure 4.13 : Débit à traiter pour les stratégies effluent – zéro.

Pour toutes les usines de référence, le débit d'effluent total à traiter est sensiblement le même, entre 16 et 18 m³/tsa. Au niveau de l'effluent procédé, la récupération de la vapeur PTM introduit un condensat sale qui se traduit par une augmentation de l'effluent à traiter de près de 40% (PTM 1 et PTM 3). L'effluent procédé augmente aussi avec le désencrage malgré les projets de recirculation de l'effluent de désencrage. Ainsi l'effluent à traiter pour 100% désencrage est près de 3 fois plus grand que celui pour le cas de base.

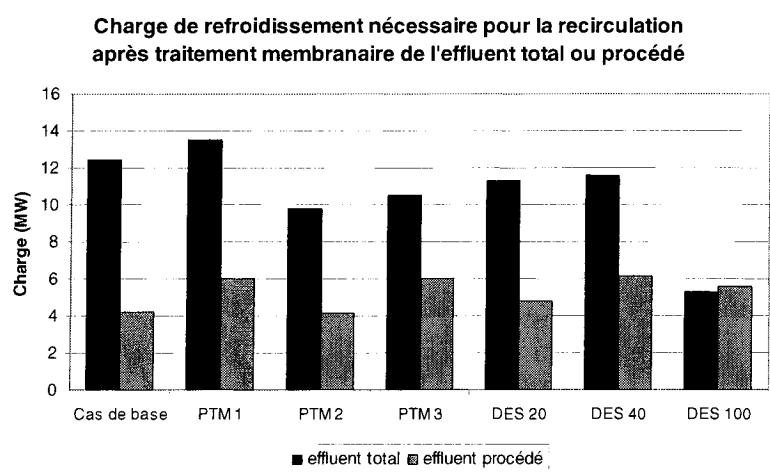


Figure 4.14 : Charge de refroidissement finale pour les stratégies effluent – zéro.

La Figure 4.14 présente la charge en refroidissement nécessaire pour amener l'effluent traité par membrane à la température de 20°C. Par rapport au cas de base, la charge pour l'effluent total est supérieure quand il y a récupération de la vapeur PTM (PTM 1 et PTM 3) : le condensat sale augmente le contenu énergétique de l'effluent. La même chose est observée pour la charge de l'effluent procédé.

Pour les usines avec désencrage la charge de refroidissement est un peu plus faible que pour le cas de base (DES 20 et DES 40), voire réduite de près de la moitié (DES 100). Quant à l'effluent procédé seul, sa charge est plus grande à cause du débit plus important.

Pour l'évaporation, l'hypothèse est faite que l'effluent traité sort à la même température, autour de 100°C. La charge de refroidissement dépend alors du débit traité.

En pratique, pour minimiser la charge de refroidissement, il est plus efficace d'un point de vue thermodynamique et économique de ségréguer l'effluent traité selon les différents niveaux de température des applications à combler et de ne refroidir que la portion nécessaire (e.g. le débit nécessaire pour les pompes à vide). Il en est de même pour l'effluent traité par évaporation. Les températures acceptables pour chaque application, et l'estimation de la charge optimale en refroidissement dépendent beaucoup de la configuration propre à chaque usine.

4.5.4 Conclusions

L’application de la méthodologie aux usines de référence a permis d’identifier des routes technologiques pour atteindre l’opération à effluent – zéro. Les stratégies effluent – zéro à mettre en œuvre ne dépendent pas de la configuration de l’usine mais de la nature de l’effluent recirculé (procédé ou non procédé) et de l’intensité du refroidissement de l’effluent.

L’augmentation de la fraction de pâte désencrée produite favorise les stratégies de traitement membranaire, car l’effluent procédé est plus froid. Cependant cela implique aussi un volume d’effluent procédé plus important à traiter.

Plusieurs aspects pratiques sont à considérer pour développer ces stratégies. La charge de refroidissement de l’effluent évolue tout au long de la route technologique, de la situation actuelle à l’implantation de la stratégie effluent – zéro. La quantité totale d’effluent à traiter et la charge finale de refroidissement dépendent de la configuration de l’usine et en particulier du taux de désencrage.

4.6 Discussion

Les effets de plusieurs configurations et de modifications de procédé sur le profil énergétique et sur le potentiel l'intégration ont été étudiés. Pour cela, des expériences complémentaires ont été réalisées à partir des huit usines de référence et des cas spéciaux (LAV, MIN et AGE). Les courbes composites ont été construites à partir des modèles Excel simplifiés et de l'extraction représentative. Elles donnent le profil énergétique et permettent d'extrapoler les résultats des usines de référence.

4.6.1 Bottlenecks

Nous avons vu deux types *bottlenecks* avec l'étude des usines de référence. Quand le *bottleneck* est la vapeur sale PTM, il a assez d'énergie excédentaire pour remplir les besoins de chauffage basse température. La production de vapeur propre au PTM permet son élimination. Quand le *bottleneck* est $Q_c = 0 \text{ kW}$ ou dans la zone très basse température des courbes, il n'y a pas assez d'énergie excédentaire, et donc moins de flexibilité pour l'intégration. L'élimination de ce *bottleneck* passe dans la plupart des cas par la réduction de la consommation d'eau.

Deux autres types de *bottlenecks* peuvent être atteints. Le premier est provoqué par l'air chaud évacué de la sécherie : la situation est similaire à celle créée par la vapeur sale PTM. La température à laquelle l'air chaud évacué est disponible peut alors être augmentée par optimisation de la sécherie. Cela aura pour effet de relaxer le *bottleneck* et de rapprocher les courbes.

Le second type est la demande en chauffage des circuits d'eau blanche de la machine à 60°C. Dans cette situation il y a assez d'énergie excédentaire pour combler la demande en chauffage sous 60°C mais il y a un manque au-dessus, en particulier pour chauffer les circuits d'eau blanche. Notons que ce *bottleneck* peut se produire, soit à cause de la

température à laquelle l'air chaud est disponible, soit à cause d'une trop grande demande de chauffage des circuits machine. Dans ce dernier cas il faut fermer les circuits d'eau procédé avant d'envisager des échanges de chaleur indirects.

4.6.2 Consommation d'eau fraîche

Par rapport au cas de base, l'ouverture des circuits d'eau procédé et non procédé a pour conséquence d'augmenter des débits d'effluent procédé et non procédé à refroidir (courbe chaude et froide), des débits d'eau fraîche à préchauffer (courbe froide) et de la demande de chauffage au silo d'eau blanche machine (courbe froide). Elle se traduit donc par une augmentation simultanée des courbes froide et chaude.

Une analyse de sensibilité a été réalisée sur le niveau de fermeture des circuits d'eau à partir du cas de base (annexe C). Les résultats montrent clairement qu'au-dessus d'une consommation d'eau fraîche de $48 \text{ m}^3/\text{tsa}$, la situation $Q_c = 0 \text{ kW}$ est atteinte. Sous ce niveau et jusqu'à une limite pratique ($10 \text{ m}^3/\text{tsa}$), le *bottleneck* est causé par la vapeur sale PTM. Donc, il faut réduire la consommation d'eau à un niveau inférieur à $48 \text{ m}^3/\text{tsa}$, avant d'envisager l'implantation de projets d'échangeurs indirects de chaleur.

La réduction de la consommation d'eau fraîche par recirculation d'effluent vers le procédé a pour effet de transférer une partie de l'énergie excédentaire de l'effluent vers l'air chaud rejeté à l'atmosphère. Ce transfert peut permettre d'éviter l'utilisation de tours de refroidissement pour l'effluent. L'énergie excédentaire est ainsi disponible à une température supérieure, et peut être utilisée pour le chauffage d'eau du procédé (eau blanche du silo hors machine), ou pour des applications externes (serres, évaporation, ...).

L'ouverture des circuits d'eau procédé se traduit par l'augmentation de la demande en chauffage à 60°C des circuits de la machine et devient un *bottleneck* potentiel. Les expériences sur le cas de base montrent que, même si la demande en dilution de l'atelier PTM est assurée entièrement par de l'eau fraîche, le *bottleneck* à 60°C n'est pas atteint ; il y a toujours assez d'énergie excédentaire pour les besoins de chauffage basse température. Cependant, si on ajoute l'ouverture des circuits de la machine, ce *bottleneck* finit par être atteint.

4.6.3 Récupération de chaleur

a) *Récupération de l'énergie au PTM*

La récupération de l'énergie au PTM élimine le *bottleneck* causé par la vapeur sale PTM. Le *bottleneck* suivant dépend du réseau d'eau procédé et non procédé. Pour le niveau de fermeture des circuits du cas de base, le *bottleneck* est à $Q_c = 0$ kW (cas PTM1).

Si l'eau de refroidissement est recirculée en boucles fermées, le *bottleneck* est le refroidissement de ces boucles (cas PTM 3). Si l'eau des pompes à vide est recirculée, le *bottleneck* est le chauffage de l'eau blanche des circuits machine, à 60°C et, en vis-à-vis, la température de l'air chaud extrait de la sécherie. La même situation est observée pour la combinaison des deux types de recirculation (cas MIN avec récupération PTM). Dans les deux derniers cas, le *bottleneck* peut être éliminé en augmentant la température à laquelle l'air chaud est disponible. Cependant, l'impact est marginal pour MIN : avec la récupération de l'énergie au PTM, ce cas est déjà proche de son maximum d'intégration.

Si les besoins en dilution de l'atelier PTM ne sont pas entièrement comblés par l'eau blanche machine, deux cas de figure se posent. Si les circuits d'eau non procédé ont le même niveau d'ouverture que cas de base, le *bottleneck* reste $Q_c = 0$ kW. Si l'eau de

refroidissement est recirculée en boucles fermées et l'eau des pompes à vide est recirculée vers les douches, le *bottleneck* est le chauffage de l'eau blanche des circuits machine à 60°C.

L'ouverture des circuits procédé affecte aussi la récupération de vapeur sale. Si moins d'eau blanche machine est utilisée pour la dilution du PTM, l'appoint est fait avec de l'eau fraîche. Cela se traduit par le refroidissement des circuits de PTM. Moins de vapeur sale est générée dans les raffineurs et en conséquence moins de vapeur propre est produite.

b) Récupération d'énergie à la sécherie

Une meilleure opération et de meilleurs équipements à la sécherie augmentent la quantité d'énergie récupérable dans l'air chaud évacué et donc l'énergie excédentaire. Pour les usines de référence, l'hypothèse a été faite que seuls 20.6 % de l'énergie totale de la sécherie étaient récupérables. Ce chiffre, inspiré par l'étude de cas 1, est cohérent avec la valeur moyenne observée dans l'industrie canadienne (16%). Il correspond à une opération typique de la sécherie et à des équipements de récupération standard.

Selon la littérature, jusqu'à 60% de l'énergie de la sécherie peut être récupérée. Il y a alors assez d'énergie excédentaire pour les demandes de chauffage basse température. En effet, le *bottleneck* devient l'air chaud pour toutes les usines 100% PTM y compris PTM1, PTM3, et avec circuits d'eau ouvert jusqu'à 60 m³/t. Atteindre 60% de récupération implique un contrôle optimal de la sécherie et l'utilisation de la meilleure technologie disponible pour les équipements d'échange de chaleur.

c) Réseaux d'échangeurs indirects de chaleur

Si l'usine a déjà un niveau important de récupération de chaleur par échanges indirects, seul le point de départ est différent et les conclusions sur les *bottlenecks* restent valables. Le réseau d'échangeurs indirects existant a surtout un impact sur

l'implantation des projets. De nouveaux projets peuvent affecter ce réseau et entraîner des effets économiques négatifs. Par exemple, un projet de recirculation d'eau peut aboutir à mettre de côté un échangeur indirect, auquel est encore associé un retour sur investissement. Dans ce contexte, les incitations économiques pour modifier le procédé sont faibles. Cependant, selon les programmes eau et énergie, ces équipements peuvent être réutilisés pour d'autres projets et ainsi éviter des investissements substantiels.

4.6.4 Réseau d'eau blanche

Même si des tendances générales sont observées ou recommandés, le réseau d'eau blanche peut varier beaucoup d'une usine à l'autre, en particulier : la recirculation de l'eau blanche de la machine vers les ateliers de pâte, les stratégies de contrôle, la taille des réservoirs de stockage, la conception du système des cassés.

a) *Application de la méthodologie*

Une description simplifiée du réseau d'eau blanche suffit pour le ciblage et la définition du profil énergétique de l'usine. L'analyse eau – énergie requiert quand à elle beaucoup plus de détails. Des objectifs spécifiques peuvent de plus être liés à la gestion des circuits d'eau blanche. C'est pour cela que l'étude à part entière du réseau d'eau blanche a été exclue de la généralisation.

L'étude de cas 1 et des considérations générales permettent cependant de tirer quelques conclusions. L'étude de procédé aboutit à des projets inspirés généralement des pratiques courantes de gestion d'eau blanche. Comme les circuits papetiers comportent de nombreuses boucles et de nombreux points de mélange, l'étude de pincement modifiée est l'étape *a priori* la mieux disposée à identifier des projets pour le réseau d'eau blanche. Le réseau d'eau blanche est étudié comme un sous – système à part entière. Pour l'étude de cas 1, des mélanges entre courants de pâte et d'eau blanche sont les plus efficaces pour atteindre les objectifs liés aux circuits procédé, à savoir,

réduire la température dans les circuits de l'atelier PTM. Les échangeurs de chaleur indirects ne sont pas les solutions les plus attrayants : à cause de sa concentration en solide en suspension, l'eau blanche (ou une ligne principale de pâte) requiert des échangeurs plus coûteux que les échangeurs couramment rencontrés dans les procédés papetiers.

b) Lavage intermédiaire de la pâte

Quand la PTM est épaissie jusqu'à 30% de consistance (LAV 1), l'eau blanche de l'atelier PTM a besoin d'être refroidie et la demande de chauffage des eaux blanches machine augmentent par rapport au cas de base. Même si le palier à 60°C augmente, le *bottleneck* reste $Q_c = 0 \text{ kW}$. La solution la plus efficace a priori est l'utilisation d'un échangeur indirect de chaleur entre l'eau blanche PTM et l'eau blanche machine. Elle est prédictive par l'étude des violations aux règles du pincement, ce qui n'exclut pas que d'autres solutions soient possibles pour une usine donnée. L'échangeur direct par mélange de courant n'est pas intéressant dans ce cas, car il annulerait l'effet du lavage de la PTM.

Quand la pâte désencrée est épaissie jusqu'à 30% de consistance (LAV 2), une partie de la demande de chauffage des eaux blanches machine est transférée à la demande de chauffage des circuits de l'atelier de désencrage. Sur la courbe froide, cela se traduit par une diminution du plateau à 60°C et une augmentation équivalente de la portion 35-45°C. Ainsi, comme une partie de l'énergie doit être fournie à une plus basse température, il y a plus d'opportunité d'intégration car le gradient de température disponible entre les courants froid et chaud augmente. Cependant, comme pour LAV 1, le *bottleneck* reste $Q_c = 0 \text{ kW}$.

4.6.5 Usine ultramoderne

Une usine 100% PTM – papier journal ultramoderne mettant en œuvre les meilleures technologies disponibles peut être autosuffisante pour sa demande en vapeur (Axelsson et Berntsson, 2005) et consommer environ $10 \text{ m}^3/\text{tsa}$ (Manninen dans AIE, 2002). Pour les usines de référence, les niveaux minimums atteignables eau – énergie sont respectivement de 16 à $18 \text{ m}^3/\text{tsa}$ et de $2 \text{ GJ}/\text{tsa}$. Des niveaux similaires à ceux d'une usine ultramoderne peuvent être atteints en considérant l'amélioration de certains équipements par rapport au cas de base : optimisation de la production de vapeur propre, de la sécherie, des douches de la machine, des circuits de refroidissement, et utilisation de pompes à vide sans eau.

4.6.6 Vieilles machines

Le ciblage pour le cas AGE montre que le *bottleneck* est la situation $Q_c = 0 \text{ kW}$, et ce, même si la consommation d'eau fraîche ($45 \text{ m}^3/\text{tsa}$) est au-dessous du seuil observé pour le cas de base ($48 \text{ m}^3/\text{tsa}$). Ceci est du à l'augmentation de la demande de chauffage de l'eau blanche machine, à cause de pertes de chaleur supérieures à la partie humide.

Opérer avec de vieilles machines a de multiples conséquences sur la définition des projets. La consommation d'eau au niveau des machines est plus importante et implique un effluent machine plus grand. Les projets en rapport avec les douches de la machine seront les mêmes que pour le cas de base, mais implique de plus gros débits et donc de plus grands investissements pour le traitement. D'un point de vue technico-économique, il est sûrement plus pertinent de remettre à neuf le système des douches pour réduire sa consommation d'eau totale avant d'implanter des projets de recirculation. D'un point de vue énergétique, la partie humide et la sécherie de la machine requièrent des projets d'amélioration majeurs, comme un meilleur contrôle de la hotte, avant l'implantation d'échangeurs de chaleur.

Des usines avec plusieurs machines peuvent avoir un système d'eau blanche commun, comme cela a été observé dans de vieilles usines. L'application de l'analyse d'eau et d'énergie va aboutir aux mêmes types de projets de recirculation. Cependant, d'un point de vue pratique, l'implantation des projets est plus risquée à cause des interactions entre les composés des différentes eaux blanches provenant de chaque machine. C'est en particulier le cas dans des usines produisant plusieurs sortes de papier sur différentes machines.

Dans le cas AGE, l'étude de procédé est une étape primordiale avant d'utiliser des outils plus sophistiqués comme l'analyse de pincement.

4.6.7 Augmentation de la fraction de pâte désencrée produite

Comme cela a déjà été vu, à partir de 30-40% de désencrage, la situation $Q_c = 0 \text{ kW}$ est atteinte et il y a de moins en moins de flexibilité pour l'analyse eau – énergie. Pour contrer cette situation, il faut réduire la consommation d'eau ou utiliser de façon plus extensive l'énergie excédentaire.

Pour le cas 100% désencrage, la réduction de moitié de la consommation d'eau fraîche améliore la situation mais le *bottleneck* est encore $Q_c = 0 \text{ kW}$. Si l'effluent est refroidi jusqu'à 30°C et si 60% de l'énergie de la sécherie est récupérée, il n'y a toujours pas assez d'énergie excédentaire. En combinant la réduction d'eau et la maximisation de l'énergie excédentaire, le *bottleneck* devient l'air chaud de la machine ; il y a alors assez d'énergie excédentaire pour les demandes de chauffage basse température.

Pour les usines 20% et 40%, la récupération de la vapeur sale réduit la demande en vapeur vive. Cependant la flexibilité d'intégration s'en trouve diminuée. La réduction de la consommation d'eau et la maximisation de l'utilisation de l'énergie excédentaire sont alors critiques pour une réduction énergétique additionnelle.

4.6.8 Énergie électrique

a) Taux de désencrage

La consommation d'énergie thermique s'accroît avec l'augmentation de la fraction de pâte désencrée produite. La consommation d'énergie électrique de l'atelier de désencrage (environ 340 kWh/tsf) est très inférieure à celle de l'atelier PTM (environ 2700 kWh/tsf). La consommation d'énergie électrique diminue donc avec l'augmentation de la fraction de pâte désencrée produite. Au final, la consommation totale d'énergie diminue avec la fraction de pâte désencrée (Figure 4.15). Elle est d'environ un tiers plus faible pour DIP 100 que pour le cas de base.

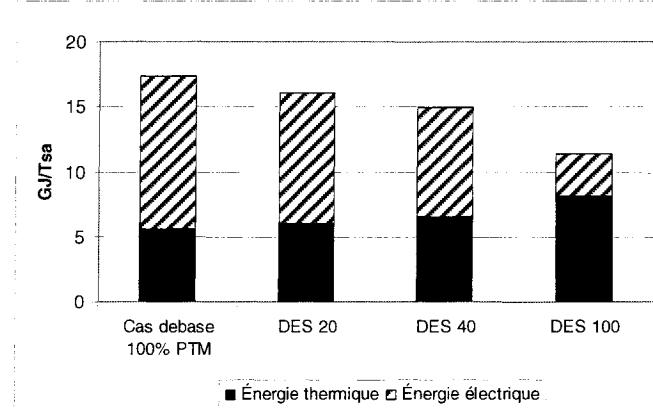


Figure 4.15 : Répartition de l'énergie totale pour les usines de papier journal.

b) Cogénération

Les systèmes de cogénération utilisant des turbines à condensation ne dépendent pas de la consommation de vapeur dans le procédé, et ne dépendent donc pas des programmes eau – énergie. Pour les systèmes de cogénération mettant en œuvre des turbines à contre-pression, le potentiel de production d'électricité diminue quand la consommation de vapeur dans le procédé diminue. L'impact peut être significatif si des réductions d'eau sont nécessaires et aboutissent à des réductions de vapeur.

CHAPITRE 5 : APPLICATIONS

« Quand l'homme s'applique, même les pierres flambent. »

Daniel Pennac (Né en 1944 à Casablanca)

5.1 Application à une usine de papier journal réelle

La méthodologie a été appliquée à une seconde usine en suivant strictement toutes les étapes telles que décrites dans le chapitre 3. Le but de cette seconde étude de cas est d'illustrer les règles heuristiques préliminaires et de vérifier que leur mise en œuvre est pratique. Les résultats détaillés sont donnés dans l'annexe D.

5.1.1 Collecte des données et simulation

La majorité des données nécessaires a été collectée à l'occasion d'une activité d'amélioration continue (un « blitz Kaizen ») menée à l'usine pour réduire les coûts énergétiques. Le questionnaire proposé a été très efficace pour guider l'acquisition et l'organisation de ces données.

Une simulation en régime permanent a été réalisée avec le logiciel WinGEMS. Ces bilans de masse et d'énergie comprennent l'ensemble des activités pertinentes de l'usine pour les conditions hivernales. Ils ont permis d'estimer les données manquantes et d'évaluer l'impact des projets identifiés sur le procédé.

5.1.2 Benchmarking

Cette usine fait partie de la classe d'usine de référence 20% désencrage – 1 machine. Le niveau d'intégration énergétique est cependant plus élevé que DES 20 : 5.6 GJ par tonne de pâte est récupérée à l'atelier PTM pour produire de la vapeur propre et un réseau d'échangeurs de chaleur assure une grande partie du chauffage de l'eau tiède. La consommation d'eau non procédé est similaire à celle de MIN. Cependant, la

consommation d'eau procédé étant relativement élevée, les consommations d'eau et de vapeur sont loin des niveaux d'une usine ultra – moderne.

5.1.3 Ciblage

L'extraction représentative a été réalisée à partir de la simulation WinGEMS complète et le ciblage a été réalisé pour $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$.

a) *Bottleneck*

Le *bottleneck* du procédé est la demande en chauffage dans les circuits d'eau blanche de la machine à 60°C . L'énergie excédentaire est suffisante pour les besoins procédé sous 60°C mais ne permet pas de combler les besoins de chauffage des circuits d'eau blanche de la machine.

b) *Inefficacités du procédé*

Les principales inefficacités du procédé sont :

- la non – utilisation de l'air chaud de la sécherie,
- la mauvaise ou la non – utilisation d'effluent très chaud,
- le chauffage d'eau fraîche pour le procédé et d'air froid pour la sécherie avec de la vapeur vive sous le point de pincement.

c) *Potentiel d'intégration*

La demande ciblée est de 14.7 MW. La Figure 5.1 montre que la demande obtenue avec les programmes eau – énergie est bien en dessous de la demande ciblée. La récupération de la vapeur PTM n'est pas en cause, car ce projet est déjà en place dans l'usine actuelle. En fait, les programmes comprennent un grand nombre de projets de recirculation d'eau blanche. Ceux-ci ont un gros impact sur les courbes composites et donc sur la prédition du potentiel. Dans ce cas, le potentiel ciblé n'est pas un bon indicateur.

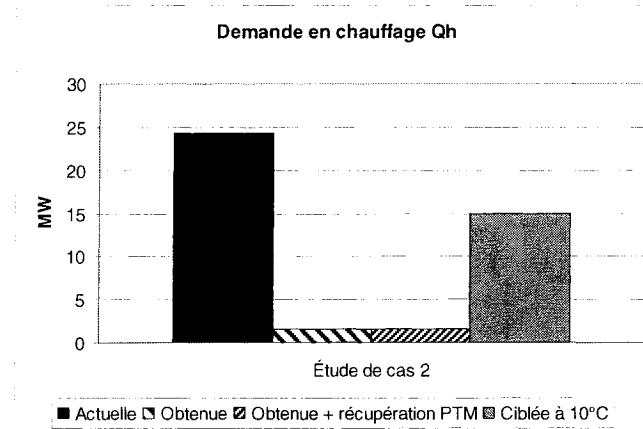


Figure 5.1 : Potentiel d'intégration pour l'étude de cas 2.

d) Procédure simplifiée de ciblage

Un second modèle de l'usine a été réalisé à partir du modèle général sur Excel. 55 données clé de l'usine ont été nécessaires. Le format d'extraction proposée dans la section 3.3 a été utilisé et les données ont été calculées dans le modèle général Excel.

Au niveau de la liste des courants extraits, cette extraction contient moins de détails que celle réalisée à partir du modèle WinGEMS. La comparaison des courbes montre cependant que les différences de formes sont relativement limitées. Pour une même demande en chauffage, on obtient sensiblement la même demande en refroidissement Q_c (33475 kW et 33650 kW) et le même ΔT_{min} ($38^{\circ}C$ et $40^{\circ}C$).

Le format d'extraction associé au modèle général sur Excel est donc une bonne représentation simplifiée d'une extraction rigoureuse et détaillée.

5.1.4 Analyse eau – énergie

a) *Étude de procédé*

La plupart des projets sont des opportunités identifiées lors du Blitz. Les autres projets ont été inspirés par étude comparative avec les pratiques courante dans les procédés similaires et à partir d'études antérieures. Neuf scénarios ont ainsi été identifiés dont deux ont été sélectionnés pour des études ultérieures.

b) *Analyse de pincement modifiée*

Pour l'analyse modifiée, les deux sous – systèmes proposés (réseau d'eau blanche et réseau d'eau d'appoint) permettent de couvrir l'ensemble des opportunités de réduction d'eau. Elle permet en particulier d'atteindre les objectifs de réorganisation et de fermeture des circuits d'eau blanche. Après au moins 2 itérations, 10 projets ont été identifiés pour les différents scénarios et combinés en options pour l'analyse de pincement classique.

c) *Analyse de pincement classique*

L'analyse de pincement classique a identifié deux familles selon l'énergie excédentaire utilisée : soit la priorité était donnée à l'air chaud évacué de la sécherie, soit elle était donnée au refroidissement de l'effluent.

d) *Efficacité de l'analyse*

Les deux phases basées sur l'analyse de pincement permettent de plus de hiérarchiser les opportunités, d'organiser les projets et de quantifier partiellement les projets. L'analyse de pincement modifiée a permis en particulier de réorganiser certaines des opportunités issues du Blitz, de s'assurer que les projets identifiés individuellement n'annulaient pas leurs bénéfices entre eux.

Notons que les opportunités ne sont pas toujours aussi évidentes. Pour l'étude de cas 1, la réorganisation et le refroidissement des circuits de l'atelier de PTM ont été obtenus avec l'application de l'analyse modifiée. Cette solution non – intuitive aurait été difficilement identifiable par inspection.

5.1.5 Résultats

a) Programmes eau et énergie

La Figure 5.2 illustre les routes technologiques obtenues pour l'étude de cas 2.

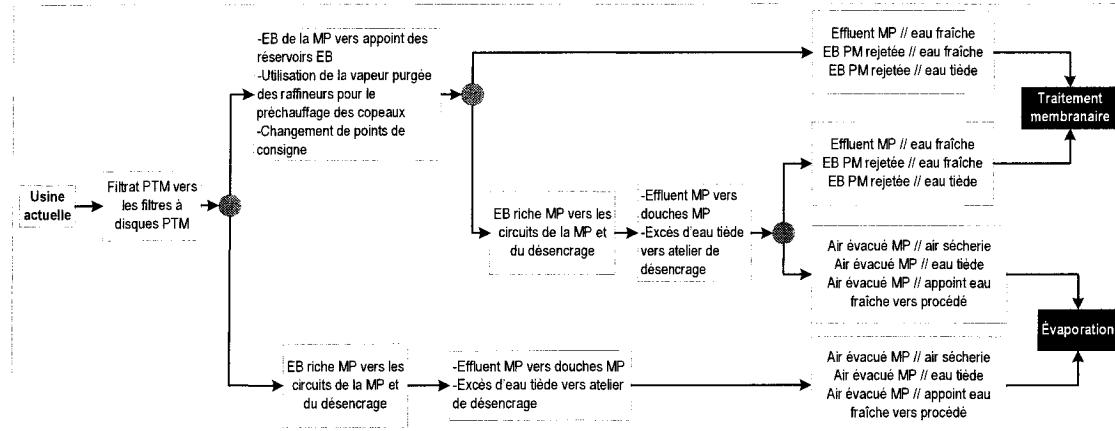


Figure 5.2 : Routes technologiques pour l'étude de cas 2.

Par rapport aux usines de référence ou à l'étude de cas 1, l'effluent non procédé est faible : les pompes à vide fonctionnent sans eau d'étanchéité et les eaux de refroidissement non procédé sont déjà en boucles fermées. Le traitement de l'effluent total se ramène donc au traitement de l'effluent procédé. Considérant cela, la structure de programme et les routes technologiques sont similaires à celles obtenues pour les usines de référence. L'étude du réseau d'eau blanche s'intègre simplement, étant donné qu'il s'agit dans la plupart des cas de la recirculation d'un effluent vers son atelier d'origine. Comme pour les usines de référence, le choix entre traitement membranaire et évaporation dépend des projets de refroidissement de l'effluent.

b) Réduction d'eau et d'énergie

La Figure 5.3 illustre les résultats des programmes dans un diagramme de consommation nette de vapeur par rapport à la consommation d'eau fraîche.

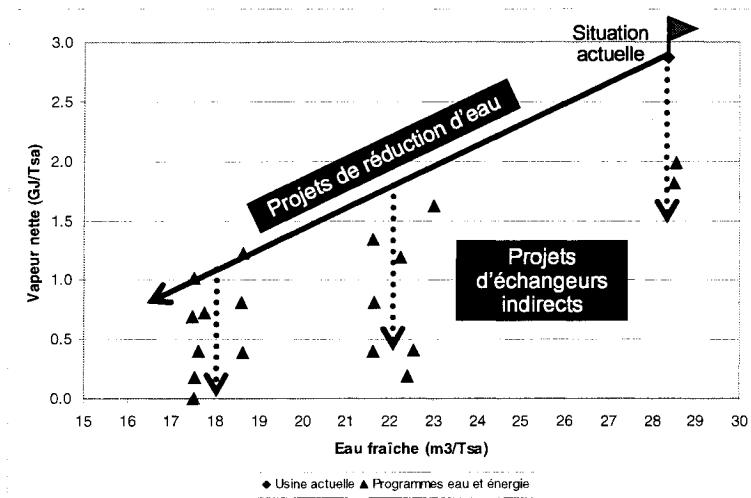


Figure 5.3 : Résultats des programmes eau – énergie pour l'étude de cas 2.

La méthodologie aboutit à une réduction très importante des consommations d'eau et d'énergie. Il apparaît clairement que la réduction de la consommation d'eau a un impact très important sur la consommation d'énergie. 20% de la consommation brute de vapeur peut-être réduite en réduisant la consommation d'eau fraîche, ce qui représente 75% de la consommation nette de vapeur. En implantant de nouveaux échangeurs de chaleur indirects, la consommation brute de vapeur est réduite de 30%, la consommation nette de 100%. Théoriquement, l'usine peut donc être autosuffisante en vapeur.

La consommation d'eau est, quant à elle, réduite de près de 40%, jusqu'à 17.5 m³ par tonne de papier. Ces réductions peuvent être obtenues par implantation progressive des projets, en suivant les routes technologiques données par la Figure 5.2.

c) Niveaux atteignables

Le niveau minimum atteignable de consommation de vapeur est 0 GJ/tsa : l'usine peut être autosuffisante en vapeur. Cela représente une différence de 3 GJ/tsa avec le niveau atteignable pour l'usine de référence correspondante, DES 20. La différence s'explique en grande partie par le fait que le système de récupération de la vapeur est plus efficace (5.6 GJ/t de pâte) qu'un système typique considéré pour les expériences sur les usines de référence (3.5 GJ/t de pâte).

Le niveau minimum de consommation d'eau fraîche atteint est $17.5 \text{ m}^3/\text{tsa}$. La formule proposée indique que le niveau minimum de consommation d'eau fraîche atteignable est $14.9 \text{ m}^3/\text{tsa}$. La différence s'explique par le fait que, pour des raisons pratiques, le projet de recirculation de l'effluent de désencrage vers l'atelier de désencrage n'a pas été considéré. Ce projet implique une réduction supplémentaire de $2.3 \text{ m}^3/\text{tsa}$, soit un niveau atteint de $15.2 \text{ m}^3/\text{tsa}$. La formule proposée est donc valide pour l'étude de cas 2.

d) Perspective effluent – zéro

Les routes technologiques identifiées mènent à deux stratégies : l'évaporation ou le traitement membranaire de l'effluent procédé. Le choix de la stratégie intervient à la fin des routes technologiques, quand les projets d'échangeurs indirects sont implantés. Si on favorise le refroidissement de l'effluent, on s'oriente vers le traitement membranaire. Sinon, on s'oriente vers l'évaporation.

5.1.6 Conclusion de l'étude de cas

Une partie des projets proposés par la méthodologie avait déjà été identifiée lors du Blitz d'énergie. Cependant les projets avaient été identifiés indépendamment les uns des autres et sans plan précis d'application.

La méthodologie d'analyse eau – énergie a permis :

- de hiérarchiser et d'organiser les projets en programmes cohérents,
- de prendre en compte les interactions entre les projets et en particulier de vérifier qu'aucun projet n'avait d'effet négatif sur un autre,
- de vérifier qu'aucune opportunité n'a été oubliée,
- de déterminer les niveaux de consommation d'eau et d'énergie atteignables,
- d'identifier des routes technologiques pour atteindre ces niveaux et ultimement l'opération à effluent – zéro.

L'étude de cas 2 a confirmé l'efficacité des règles heuristiques proposées. Les résultats obtenus sont pratiques. La procédure de ciblage et l'analyse eau – énergie s'est bien adaptée au procédé et à des objectifs relativement différents de la première étude de cas. Chaque phase a joué son rôle. L'ordre analyse modifiée – analyse classique est justifiés : l'aire d'échange obtenue à partir du niveau minimum d'utilisation d'eau (600 m^2) est jusqu'à deux fois inférieur à celle obtenue à partir de l'utilisation d'eau actuelle (1200 m^2).

5.2 Application aux autres classes d'usine de papier

La méthodologie et les règles de conception ont été proposées et généralisées pour les principales configurations d'usine intégrée de papier journal. La Figure 5.4 illustre le potentiel d'application dans les autres classes d'usines de pâtes et papiers.

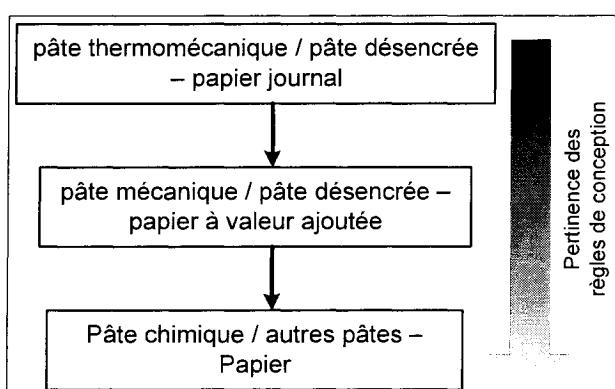


Figure 5.4 : Généralisation des règles de conception.

Si la méthodologie est appliquée à d'autres classes d'usine, les étapes de base resteront les mêmes. L'analyse qualitative et l'étude de procédé sont des étapes logiques du cycle d'amélioration continue pour n'importe quel type de procédé. La séquence des phases de l'analyse eau et énergie (étude de procédé, analyse de pincement modifiée, analyse de pincement classique) est valide : d'abord appliquer les projets simples et classiques, ensuite privilégier les échanges de chaleur directs et réduire la consommation d'eau, enfin, identifier des opportunités d'échangeurs indirects.

Concernant les règles de conception proposées, leur pertinence devrait diminuer de façon conséquente avec la généralisation vers d'autres classes d'usine de pâtes et papiers. Le format d'extraction représentative devra être adapté. L'indentification des projets va aussi être affectée. Les projets autour de la machine à papier seront similaires. Plus de contraintes seront cependant imposées pour les sortes de papier dont la qualité est plus sensible.

Si l'on considère des papiers à valeur ajoutée, comme les papiers couchés légers fabriqués à partir de pâte mécanique et de pâte désencrée, les différences sont les suivantes. Plus de produits chimiques et de charge sont utilisés au niveau de la machine à papier : les projets de recirculation sont plus risqués ou vont demander un traitement plus poussé. Avec le blanchiment et le recours à des additifs (charge, sauce de couchage), plus de contraintes relatives aux contaminants seront considérées. Cependant, des études de pincement réalisées dans les usines PTM – papier couchés légers ont montré des résultats similaires que dans un contexte papier journal (Manninen dans AIE, 2004, Axelsson et Berntsson 2005). Il y a de bonnes raisons de penser que les règles de conception seront incomplètes mais encore valides.

Dans certains cas, les papiers spéciaux sont produits à partir de pâte mécanique autre que de la PTM (pâte de meule en particulier). Le potentiel de récupération de chaleur est plus faible car les procédés sont moins énergétivores que les raffineurs. À part cela, le procédé de pâte de meule comprend les mêmes éléments de base que le procédé de PTM et les règles de conception devraient être similaires.

Ce n'est plus le cas quand on considère une usine avec production de pâte chimique. Le procédé est plus complexe et le profil énergétique est totalement différent (Wising, 2003, Savulescu et al., 2005). Les phases de l'analyse eau – énergie pourront être appliquées mais les règles de conception devront être adaptées et améliorées.

CHAPITRE 6 : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

*« Dans quelques décennies, nous ne serons plus,
mais nos atomes existeront toujours,
poursuivant ailleurs l'élaboration du monde. »*

Hubert Reeves (Né à Montréal en 1932)

« La science consiste à passer d'un étonnement à un autre. »

Aristote (384 av. J.-C.-322 av. J.-C.)

6.1 Contributions

1) Méthodologie, basée sur l'analyse de pincement, pour l'analyse eau – énergie en rétro-installation :

- L'utilisation des techniques de l'analyse de pincement assure l'identification de façon systématique d'opportunités pratiques.
- L'application séquentielle des trois phases (étude de procédé, analyse de pincement modifiée et analyse de pincement classique) permet d'organiser les projets identifiés en programmes de réduction simultanée de la consommation d'eau et d'énergie.
- L'approche interactive permet de considérer les objectifs spécifiques à court terme d'une usine en toute cohérence avec ses choix stratégiques à long terme, comme l'opération à effluent – zéro.

- 2) Méthode d'analyse de pincement modifiée pour l'identification de projets de mélange et de recirculation.
 - Les techniques classiques d'analyse de pincement thermique sont utilisées pour identifier des projets d'échangeurs indirects qui peuvent être convertis en projets de mélange et de recirculation en conservant au maximum les mêmes performances énergétiques.
 - Des règles de conception permettent de déterminer la valeur de ΔT_{min} qui maximise l'efficacité de la conversion des échangeurs indirects en échangeurs directs.
 - Pour les procédés de fabrication du papier journal, la valeur optimale de ΔT_{min} est 0°C.
- 3) Règles de conception de nature heuristique pour l'application pratique de la méthodologie dans les usines de papier journal.
 - Un format d'extraction représentative, associé à un modèle général sur Excel, permet de définir à partir d'un nombre minimal de données, le profil énergétique d'une usine : point d'engorgement (*bottleneck*), inefficacités énergétiques et potentiel d'intégration.
 - Les courbes composites, basée sur cette extraction représentative, permettent l'analyse comparative d'une usine avec une autre usine réelle ou avec les usines modèles de référence.
 - Des règles de conception guident l'application des analyses de pincement thermique (modifiée et classique), en particulier : extraction de données, déroulement des étapes d'analyse, choix des valeurs optimales de ΔT_{min} , et contraintes massiques pour la conversion d'échangeurs indirects en projets de mélange et de recirculation.

- 4) Niveaux minimums de consommation d'eau et d'énergie pour les usines de papier journal.
 - Les niveaux minimums de consommation d'eau, atteints par l'application de la méthodologie, sont entre 16 et 18 m³/tsa. Pour une usine donnée, le niveau atteignable peut être estimé à partir de consommations nominales de certaines applications.
 - Les niveaux minimums de consommation de vapeur, atteints par l'application de la méthodologie, sont entre 2 GJ/tsa et 5,5 GJ/tsa selon le taux de désencrage. Pour une usine donnée, le niveau atteignable peut être estimé par analyse comparative avec les usines de référence.
 - Après application de la méthodologie, la consommation nette de vapeur est réduite de 70% pour l'étude de cas 1 et de près de 100% pour l'étude de cas 2. La réduction de la consommation d'eau fraîche est de 40% dans les deux cas.
- 5) Routes technologiques qui permettent d'atteindre ces niveaux.
 - Des projets clé de réduction d'eau et d'énergie ont été identifiés pour les différentes configurations d'usines de papier journal.
 - Ces projets sont organisés en programmes eau – énergie à long terme, appelée routes technologiques. Leur structure est similaire pour les différentes configurations des usines de papiers journal.
 - Pour une usine étudiée, les projets clé et les programmes de réduction eau – énergie servent de base pour l'analyse comparative, en particulier pour estimer son niveau d'intégration, et guident l'application de la méthodologie.

- 6) Routes technologiques pour atteindre l'opération à effluent – zéro pour les usines de papier journal.
- Les programmes eau – énergie identifiés par la méthodologie donnent des routes technologiques pour atteindre des stratégies effluent – zéro. Elles sont similaires pour les différentes configurations des usines de papier journal.
 - Ces routes technologiques permettent d'atteindre les objectifs à court terme d'une usine, sans compromettre le potentiel d'implantation à long terme de stratégies pour l'opération à effluent – zéro.
 - Le choix de la stratégie effluent – zéro peut se faire en cours d'implantation des programmes et dépend essentiellement du type d'effluent qui est privilégié pour la fermeture des circuits (procédé ou non procédé).

6.2 Conclusions

En rétro-installation, les approches traditionnelles, pour la réduction de consommation d'eau et d'énergie, se basent sur des études de procédé et les opportunités sont identifiées individuellement par inspection. Elles aboutissent à des listes de projets qui ne tiennent pas compte des interactions possibles entre les projets. C'est en particulier le cas quand on considère simultanément l'eau et l'énergie. La méthodologie que nous avons développée dans cette thèse propose une alternative efficace à ces approches traditionnelles. Elle permet d'identifier des opportunités de réduction de façon systématique, d'organiser les projets obtenus en programmes cohérents et de déterminer les niveaux atteignables correspondant.

Des méthodes systématiques et simultanées ont été développées pour l'analyse eau – énergie. Elles consistent à concevoir des réseaux mixtes d'échange de chaleur et de masse : soit le problème est abordé par programmation mathématique, soit une approche heuristique est mise en œuvre. La première approche ne donne pas de résultats pratiques, en particulier pour les procédés de pâtes et papiers. Elle est limitée par le manque de modèles précis pour décrire les interactions et l'évolution des composants présents dans la pâte. La seconde approche est plus pratique mais elle est basée sur l'analyse de pincement massique dont l'application est limitée à un seul contaminant. Notre méthodologie propose une résolution pratique du problème en utilisant des techniques de pincement modifiées. Ces techniques permettent de considérer simultanément la réduction d'eau et d'énergie en identifiant de façon pratique des mélanges entre courants froids et courants chauds. En particulier, elles contournent les limitations de l'analyse de pincement massique : les contraintes massiques sont considérées au stade de la conception plutôt qu'au moment du ciblage.

D'autres méthodes plus pratique d'analyse eau – énergie basée sur l'analyse de pincement ont été mises en œuvre en pâtes et papiers. Cependant, soit les objectifs de réduction d'eau et d'énergie sont considérés indépendamment, soit la réduction d'énergie est au service d'un objectif de réduction d'eau prédéfini. À la différence de ces méthodes, notre méthodologie identifie les opportunités de réduction en prenant en compte de façon systématique et simultanée des interactions entre les objectifs de réduction d'eau et d'énergie.

Ainsi la méthodologie présentée dans ce mémoire de thèse constitue une approche originale et efficace pour la réduction simultanée de la consommation d'eau et d'énergie.

6.3 Travaux futurs

6.3.1 Application à une vieille usine

Les deux usines existantes de papier journal auxquelles la méthodologie a été appliquée sont des usines relativement modernes et bien intégrées, qui n'ont pas beaucoup évolué depuis leur mise en service. Le cas des usines plus vieilles n'a été étudié que partiellement avec le modèle « AGE ».

Or les vieilles usines imposent des défis pratiques supplémentaires : plusieurs machines aux âges technologiques différents, des circuits d'eau blanche plus complexes, un agencement des équipements plus contraignant, etc. Il serait donc intéressant d'appliquer la méthodologie d'analyse eau – énergie à une usine plus ancienne, ayant subi plusieurs modifications au cours de son histoire et vérifier ainsi la validité des règles heuristiques pour ce type d'usine.

6.3.2 Développement de règles heuristiques pour les usines de pâte Kraft

La méthodologie d'analyse eau – énergie et les règles heuristiques ont été développées pour les usines de papier journal. Il existe de bonnes raisons de penser que la méthodologie est valide pour d'autres classes d'usines et que les règles heuristiques peuvent être adaptées en conséquence.

Il serait donc intéressant de mener des recherches similaires pour développer des règles heuristiques pour l'application de la méthodologie dans des usines de pâte Kraft – papier fin.

6.3.3 Analyse technico-économique

Pour les deux études de cas, les projets ont été quantifiés (débit à traiter et à recirculer, aire d'échange de chaleur) et organisés en routes technologiques. Ces routes guident l'implantation des projets de réduction dans le temps, pour atteindre à long terme des niveaux minimums de consommation d'eau et d'énergie.

Au final, l'implantation des projets dépend de critères économiques. Une analyse technico-économique appliquée aux études de cas permettrait de développer un outil pour le choix des meilleurs programmes et pour la planification de leur implantation.

6.3.4 Évaluation environnementale des différentes routes technologiques

Différentes routes technologiques peuvent mener à un même résultat à long terme. Outre les critères économiques, les aspects environnementaux sont importants pour départager les différentes solutions.

Les routes technologiques, développées pour les deux études de cas, constituent une bonne base pour l'application de l'analyse de cycle de vie en vue d'évaluer les impacts globaux des projets et de choisir des meilleurs programmes de réduction eau – énergie d'un point de vue environnemental.

6.3.5 Études des routes technologiques pour atteindre l'effluent – zéro

Dans le prolongement des deux dernières sections, les opportunités pour atteindre l'opération à effluent – zéro pourraient être évaluées, en considérant à la fois les aspects économiques et les aspects environnementaux. Une approche multi – disciplinaire ferait appel à des outils tels que l'analyse technico-économique, l'analyse de cycle de vie et l'analyse de décision multi-critère.

RÉFÉRENCES

- AHMAD, S., LINNHOFF, B., SMITH, R. 1990. « Cost optimum heat exchanger networks. 2. Targets and design for detailed capital cost models ». *Computers & Chemical Engineering*. 14:7. 751-767.
- AIE. 1996. *IEA Implementation agreement on process integration*. IEA Catalogue on process integration. Telemark Institute of Technology.
- AIE. 2002. Troisième réunion de l'Annexe III. *Process Integration Technologies Implementing Agreement - Process Integration in the Pulp and Paper Industry*. 27 et 28 Février 2002, Göteborg, Suède.
- AIE, 2004. *Process Integration Technologies Implementing Agreement - Process Integration in the Pulp and Paper Industry, Annex III - Final Report*. En cours de publication.
- ALBERT, M., BEAUDET, J.-F., HURLEY, R. 2006. « Recycling vacuum seal water using the actiflo process for reduction of water consumption and for improvement of energy recovery ». *92nd Annual meeting - Pulp and Paper Technical Association of Canada (PAPTAC), Preprint, Feb 7-9 2006*. Montreal, Que., Canada : Pulp and Paper Technical Association of Canada. A.
- AMERICAN PROCESS. 2005. [En ligne]. www.americanprocess.com (Page consultée en 2005)
- ASHTON, G.J., CRIPPS, H.R., SPRIGGS, H.D. 1987. « Application of "pinch" technology to the pulp and paper industry ». *TAPPI*. August. 81-85.

- ASSELMAN, T. 1995. *Fermeture des circuits d'eau dans les usines intégrées de papier journal : problématique et étude de cas.* 217p. Mémoire de maîtrise en génie chimique. École Polytechnique de Montréal.
- AXELSSON, E., BERNTSSON, T. 2005. « Pinch analysis of a model mill: Economic and environmental gains from thermal process-integration in a state-of-the-art magazine paper mill ». *Nordic Pulp and Paper Research Journal*. 20:3. 308-315.
- AXELSSON, H., ASBLAD, A., BERNTSSON, T. 1999. « New methodology for greenhouse gas reduction in industry through improved heat exchanging and/or integration of combined heat and power ». *Applied Thermal Engineering*. 19:7. 707-731.
- BARNES, E.T. 1994a. « Chapter 1. Water quality requirements for pulp and paper processes ». *Water Use Reduction in the Pulp and Paper Industry 1994*. Vancouver, BC, Canada : CPPA. P. 1-10.
- BARNES, E. T. 1994b. « Chapter 3. Unit processes for water purification and reuse ». *Water Use Reduction in the Pulp and Paper Industry 1994*. Vancouver, BC, Canada : CPPA. P. 29-51.
- BARTON, D.A., STUART, P.R., LAGACE, P., MINER, R. 1996. « Experience with water system closure at recycled paperboard mills ». *TAPPI Journal*. 79:3. 191-197.
- BENGTSSON C. 2004. *Novel process integration opportunities in existing Kraft pulp mills with low water consumption.* 75p. Thèse de doctorat en génie chimique. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

- BENGSSON, C., KARLSSON, M., BERNTSSON, T., SODERSTROM, M. 2002. « Co-ordination of pinch technology and the MIND method - Applied to a Swedish board mill ». *Applied Thermal Engineering*. 22:2. 133-144.
- BERNTSSON, T., BENGSSON, C., NORDMAN, R. 2002. « Utilization of excess heat in the pulp and paper industry - A case study of technical and economic opportunities ». *Applied Thermal Engineering*. 22:9. 1069-1081.
- CARLSSON, A. 1996. *Optimum Design of Heat Exchanger Networks in Retrofit Situations*. 60p. Thèse de doctorat en génie chimique. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden
- CARLSSON, A., FRANCK, P.-A., BERNTSSON, T. 1993. « Design better heat exchanger network retrofits ». *Chemical Engineering Progress*. 89:3. 87-96.
- CERDA, J., WESTERBERQ, A.W., MASON, D., LINNHOFF, B. 1983. « Minimum utility usage in heat exchanger network synthesis: a transportation problem ». *Chemical Engineering Science*. 38:3. 373-387.
- CONNAGHAN, C., WUNDERLICH, R. 1999. « Chapter 2. Developing, implementing and maintaining an energy efficiency program ». *Energy cost reduction in the pulp and paper industry*. Pointe Claire, QC, Canada : Pulp and Paper Research Institute of Canada. P. 7-24.
- COSTA, A., NEUHANN, V., VAILLANCOURT, J., PARIS, J. 2004. « Applications of absorption heat pumps in the pulp and paper industry for increased efficiency and reduction of greenhouse gas emissions ». *90th Annual meeting - Pulp and Paper Technical Association of Canada (PAPTAC), Preprint, Jan 27-29 2004*. Montreal, Que., Canada : Pulp and Paper Technical Association of Canada. B, 191-195.

CPPA. 1998. Canadian Pulp and Paper Association, maintenant Forest Product Association of Canada. Tables to energy monitoring report.

DAS, T.K. 2005. *Toward zero discharge : innovative methodology and technologies for process pollution prevention*. Hoboken, New Jersey : J. Wiley.

DHOLE, V.R., LINNHOFF, B. 1993. « Total site targets for fuel co-generation, emissions, and cooling ». *Computers & Chemical Engineering: 24th Symposium of the Working Party on Computer Aided Process Engineering - ESCAPE-2, Oct 5-7 1992*. 17:Suppl. 101-109.

DYLKE, E., FOLKESTAD, C., RETSINA, T., SAVVAKIS, I. 2001. "Thermal optimization study at Prince George". *87th Annual meeting - Pulp and Paper Technical Association of Canada (PAPTAC), Preprint, Feb 1 2001*. Montreal, Que., Canada : Pulp and Paper Technical Association of Canada. C, 149-151.

EL-HALWAGI, M.M., MANOUSIOUTHAKIS, V. 1989. « Synthesis of mass exchange networks ». *AICHE Journal*. 35:8. 1233-1244.

EL-HALWAGI, M.M., SPRIGGS, H.D. 1998. « Solve design puzzles with mass integration ». *Chemical Engineering Progress*. 94:8. 25-44.

Environnement Canada. 2003. Changement climatique. In *Site d'Environnement Canada*. [en ligne]. <http://www.ec.gc.ca/climate/> (Page consultée en 2003)

EPA, 2004. <http://www.epa.gov/> (Page consultée en 2004)

FLOUDAS, C.A., CIRIC, A.R. 1989. « Strategies for overcoming uncertainties in heat exchanger network synthesis ». *Computers & Chemical Engineering*. 13:10. 1133-1152.

- FLOUDAS, C.A., CIRIC, A.R., GROSSMANN, I.E. 1986. « Automatic synthesis of optimum heat exchanger network configurations ». *AICHE Journal*. 32:2. 276-290.
- FLOUDAS, C.A., GROSSMANN, I.E. 1986. « Synthesis of flexible heat exchanger networks for multiperiod operation ». *Computers & Chemical Engineering*. 10:2. 153-168.
- FLOWER, J.R., LINNHOFF, B. 1978. "Synthesis of heat exchanger networks. – 2. Evolutionary generation of networks with various criteria of optimality ». *AICHE Journal*. 24:4. Jul. 642-654.
- FRANCIS, B., TOWERS, M. 2005. *Benchmarking Energy Use in Pulp and Paper Operations*. Pointe Claire, Que, Can : Paprican. Paprican Research Report 1762.
- FRANCIS, D.W., OUCHI, M.D. 2001. « Effect of dissolved and colloidal solids on newsprint properties ». *Journal of Pulp and Paper Science*. 27:9. 289-295.
- FROMSON, D.A., LESLIE, B. 1994. « Implementation of new technology at meadow lake: a successful case study ». *Pulp & Paper Canada*. 95:1. 45-47.
- FURMAN, K.C., SAHINIDIS, N.V. 2002. « A critical review and annotated bibliography for heat exchanger network synthesis in the 20th century ». *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 41:10. 2335-2370.
- GAGNON, F., NOEL, G. 1999. « Chapter 11. Project identification and selection ». *Energy cost reduction in the pulp and paper industry*. Pointe Claire, QC, Canada : Pulp and Paper Research Institute of Canada. P. 207-215.

- GERBASI, B., STUART, P.R., ZALOUM, R., ARSENAULT, F. 1993. « Techno-economic assessment of several closed cycle technology alternatives for an existing TMP- newsprint mill ». *79th Annual Meeting of the Canadian Pulp and Paper Association, Jan 26-27 1993*. Montreal, Que, Can : Canadian Pulp & Paper Association, A. 197-205.
- GOTTSCHING, L. 2000. *Papermaking Science and Technology - Recycled fiber and deinking*. Helsinki, Finland : Fapet Oy.
- HALL, S.G., AHMAD, S., SMITH, R. 1990. « Capital cost targets for heat exchanger networks comprising mixed materials of construction, pressure ratings and exchanger types ». *Computers & Chemical Engineering*. 14:3. 319-335.
- HALLALE, N. 2002. « A new graphical targeting method for water minimisation ». *Advances in Environmental Research*. 6:3. 377-390.
- HERSCHMILLER D.W., HASTINGS C.R. 1994. « Chapter 2. Elements of water conservation program". *Water Use Reduction in the Pulp and Paper Industry 1994*. Vancouver, BC, Canada : CPPA. P. 13-27.
- HOULE, J.F., BROUSSEAU, Y., DORICA, J., PARIS, J. 1999. « Reduction of fresh water consumption for process and non-process uses in an integrated newsprint mill ». *Pulp and Paper Canada*. 100:3. 50-53.
- HYNNINEN, P. 2000. *Papermaking Science and Technology - Environmental control*. Helsinki, Finland : Fapet Oy.
- JACOB, J., HEMPHALA, H., PARIS, J. 2001. « Cueillette et reconciliation des donnees pour la simulation de procedes en operation: Picking and reconciliaton of data for simulation processes ». *Pulp and Paper Canada*. 102:5. 53-56.

- JACOB, J., VIVIANT, C., HOULE, J.F., PARIS, J. 1998. « Analyse et optimisation des reseaux d'eau des procedes papetiers: Analysis and optimization of water research on papermaking processes ». *Proceedings of the 1998 84th Annual Meeting of the Technical Section of Canadian Pulp and Paper Association*. Montreal, Can : CPPA, B. 315-318.
- JANSSEN M., CORNEJO F., RIEMER K., LAVALLÉE H.-C., STUART P.R. 2005. « Techno-economic considerations for DIP production increase and implementation of cogeneration at an integrated newsprint mill ». *91st Annual meeting - Pulp and Paper Technical Association of Canada (PAPTAC), Preprint*. Montreal, Que, Can : Pulp and Paper Technical Association of Canada.
- KARLSSON, M. 2000. *Papermaking Science and Technology - Papermaking Part2 Drying*. Helsinki, Finland : Fapet Oy.
- KLINKER, R.T. 1996. « Successful implementation of a zero discharge program ». *TAPPI Journal*. 79:1. 97.
- KREITH, F., BLACK, W.Z. 1980. *Basic Heat Transfert*. New York, NY, USA : Harper & Row.
- LABIDI, J., NOEL, G., PERRIER, M., PARIS, J. 1999. « Chapter 3. Process analysis and energy optimization ». *Energy cost reduction in the pulp and paper industry*. Pointe Claire, QC, Canada : Pulp and Paper Research Institute of Canada. P. 25-56.
- LAFOURCADE, S. 2001. *Analyse avec contraintes de réseaux d'échangeurs de chaleur pour l'optimisation énergétique d'une usine intégrée PTM-papier journal*. 212p. Mémoire de maîtrise en génie chimique. École Polytechnique de Montréal.

- LAGACE, P., STUART, P.R., MINER, R.A., BARTON, D.A. 2000. « Costs associated with implementation of zero effluent discharge at recycled fibre paperboard mills ». *Pulp and Paper Canada*. 101:7. Jul. 43-47.
- LAGACE, P., ANDERSON, N., PRUSZYNSKI, P.E., WARRICK, S.B., STUART, P.R. 1997. « Impact of zero-discharge implementation on wet-end retention at recycled fiber board mills ». *Proceedings of the 1997 Environmental Conference & Exhibit. Part 2 ,May 5-7 1997*. Minneapolis, MN, USA : TAPPI Press. 2, 679-686.
- LAGACE, P., KUBES, G.J., STUART, P.R. 1995. "Development of a physical chemical zero discharge process for a TMP-newsprint mill". Proceedings of the 1995 Environment Conference, Oct 23-26 1995. Halifax, NS, Can : CPPA, Montreal, Can. 117-122.
- LEASK, R.A. 1987. *Pulp and Paper Manufacture - volume 2 - Mechanical Pulping*. Atlanta, GA, USA : The joint textbook committee of the paper industry.
- LINNHOFF, B. 1994. « Use pinch analysis to knock down capital costs and emissions ». *Chemical Engineering Progress*. August 1994. 32-57.
- LINNHOFF, B., AHMAD, S. 1990. "Cost optimum heat exchanger networks. 1. Minimum energy and capital using simple models for capital cost". *Computers & Chemical Engineering*. 14:7. Jul. 729-750.
- LINNHOFF, B., EASTWOOD, A.R. 1987. « Overall site optimisation by pinch technology ». *Chemical Engineering Research & Design*. 65:5. 408-414.
- LINNHOFF, B., HINDMARSH, E. 1983. "Pinch design method for heat exchanger networks ». *Chemical Engineering Science*. 38:5. 745-763.

- LINNHOFF, B., TOWNSEND, D.W., BOLAND, D., HEWITT, G.F., THOMAS, B.E.A., GUY, A.R. et MARSLAND R.H. 1982. *User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*. Rugby, U.K : The Institution of Chemical Engineers.
- LINNHOFF, B., DROLE, V.R. 1993. « Targeting for CO₂ emissions for total sites ». *Chemical Engineering & Technology*. 16:4. 252-259.
- LINNHOFF, B., FLOWER, J.R. 1978. « Synthesis of heat exchanger networks : 1. Systematic generation of energy optimal networks ». *AIChE Journal*. 24:4. 633-642.
- MANNINEN, J., PUUMALAINEN, T., TALJA, R., PETTERSSON, H. 2002. « Energy aspects in paper mills utilising future technology ». *Applied Thermal Engineering*. 22:8. 929-937.
- NOEL, G. 1995. « Pinch technology study at the Donohue Clermont newsprint mill ». *Pulp & Paper Canada*. 96:7. 38-41.
- NOEL, G., BOISVERT, G. 1998. « Project design in energy efficiency using Pinch analysis ». *Pulp & Paper Canada*. 99:12. 103-105.
- NOEL, G., CONNAGHAN, C. 2003. "Application of pinch technology from studies to projects implementation in fast changing environment at the QRP mill (BC)". *89th Annual meeting - Pulp and Paper Technical Association of Canada (PAPTAC), Preprint*. Montreal, Que, Can : Pulp and Paper Technical Association of Canada.

- NORDMAN, R., BERNTSSON, T. 2002. « New pinch technology based HEN analysis methodologies for cost-effective retrofitting ». *Canadian Journal of Chemical Engineering.* 79:4. 655-662.
- PAPALEXANDRI, K.P., PISTIKOPOULOS, E.N. 1994. « Multiperiod MINLP model for the synthesis of flexible heat and mass exchange networks ». *Computers & Chemical Engineering: Proceedings of the European Symposium on Computer Aided Process Engineering - 2, Oct 5-7 1992.* 18:11-12. 1125-1139.
- PAPOULIAS, S.A., GROSSMANN, I.E. 1983. "Structural optimization approach in process synthesis – II ». *Computers & Chemical Engineering.* 7:6. 707-721.
- PAPRICAN. 1994. *Water use reduction in the pulp and paper industry, 1994.* Canadian Pulp and Paper Association.
- PAPRICAN. 1999. *Energy cost reduction in the pulp and paper industry.* Pointe Claire, QC, Canada : Pulp and Paper Research Institute of Canada.
- PARIS, J. 2000. « Systems approach to system closure in integrated newsprint mills ». *Pulp and Paper Canada.* 101:5. 34-42.
- PARKER, S.M., IONIDES, G.N., JOHNSTON, C., ORR, A., MACKIE, D.M. 2003. « Heat recovery for TMP - the forgotten energy source ». *89th Annual meeting - Pulp and Paper Technical Association of Canada (PAPTAC), Preprint.* Montreal, Que, Can : Pulp and Paper Technical Association of Canada.
- PAULAPURO, H. 2000. *Papermaking Science and Technology - Papermaking Part1, Stock preparation and wet end.* Helsinki, Finland : Fapet Oy.

- PETTERSSON F., SODERMAN J. 2003. « Synthesis of heat recovery systems in paper machines with varying design parameters ». *European symposium on computer aided process engineering - 13. Lappeeranta, Finland : Lappeenranta University of Technology.* 1043-1048.
- POLLEY, G.T., PANJEH SHAHI, M.H., JEGEDE, F.O. 1990. « Pressure drop considerations in the retrofit of heat exchanger networks ». *Chemical Engineering Research & Design.* 68:3. 211-220.
- POLLEY, G.T., SHAHI, M.H.P. 1991. « Interfacing heat exchanger network synthesis and detailed heat exchanger design ». *Chemical Engineering Research & Design.* 69:6. 445-457.
- RAVAGNANI, M.A.S.S., DA SILVA, A.P., ANDRADE, A.L. 2003. « Detailed equipment design in heat exchanger networks synthesis and optimisation ». *Applied Thermal Engineering.* 23:2. 141-151.
- ROQUE, M.C., LONA, L.M.F. 2000. « Economics of the detailed design of heat exchanger networks using the Bell Delaware method ». *Computers and Chemical Engineering: 7th International Symposium on Process Systems Engineering, Jul 16-Jul 21 2000.* 24:2. 1349-1353.
- ROSSITER, A.P. 1995. *Waste minimization through process design.* New York : McGraw-Hill.
- SAVOIE, A., STUART, P.R., VAN HAM, D. 2001. « Ultrafiltration of biologically-treated effluent from a TMP-newsprint mill ». *Pulp and Paper Canada.* 102:2. 39-43.

- SAVULESCU, L., POULIN, B., HAMMACHE, A., BEDARD, S., GENNAOUI, S. 2005. « Water and energy savings at a kraft paperboard mill using process integration ». *Pulp and Paper Canada*. 106:9. 29-31.
- SAVULESCU, L.E., SORIN, M., SMITH, R. 2002. « Direct and indirect heat transfer in water network systems ». *Applied Thermal Engineering*. 22:8. 981-988.
- SAVULESCU, L., KIM, J.-K., SMITH, R. 2005a. « Studies on simultaneous energy and water minimisation - Part I: Systems with no water re-use ». *Chemical Engineering Science*. 60:12. 3279-3290.
- SAVULESCU, L., KIM, J.-K., SMITH, R. 2005b. « Studies on simultaneous energy and water minimisation - Part II: Systems with maximum re-use of water ». *Chemical Engineering Science*. 60:12. 3291-3308.
- SCHAAREMAN, M., VERSTRAETEN, E., BLAAK, R., HOOIMEIJER, A., CHESTER, I. 2000. « Energy and water pinch study at the Parenco paper mill ». *Paper Technology*. 41:1. 47-52.
- SHAFIEI, S., DOMENECH, S., KOTELES, R., PARIS, J. 2002. "System closure in an integrated newsprint mill, practical application of the genetic algorithm". *88th Annual Meeting, Pulp and Paper Technical Association of Canada, Jan 29 2002*. Montreal, Que, Can : Pulp and Paper Technical Association of Canada. A, 183-187.
- SMOOK, G.A. 1992. *Handbook for pulp and paper technologists*. Vancouver, BC, Canada : Angus Wilde Publications.

SMURFIT STONE. 2005. Environmental Stewardship Report. In *Site de Smurfit Stone*. [En ligne] http://www.fppaea.org/files/Environmental_Report_2003.pdf (Page consultée en 2005).

STUART, P.R., BLENKHORN, D.A., TYLER, M.A., MARTIN, R.E. 1994. « A review of closed cycle technology and its implementation in the pulp & paper industry ». *VII Latin American Pulp & Paper Association Conference*. November 1994.

STUART, P.R., SAVOIE, A., MURRAY, R. 1999a. « Environmental permit system in Quebec precipitates consideration of advanced environmental technologies, Part I: Benchmarking of proposed effluent limits ». *Pulp and Paper Canada*. 100:11. Nov. 33-37.

STUART, P.R., SAVOIE, A., MURRAY, R. 1999b. « Environmental permit system in Quebec precipitates consideration of advanced environmental technologies, Part II: Technology requirements to meet proposed effluent limits ». *Pulp and Paper Canada*. 100:12. 143-146.

SUNDHOLM, J. 2000. *Papermaking Science and Technology - Mechanical Pulping*. Helsinki, Finland : Fapet Oy.

TIZON, B., BOIVIN, P., BAYLE, S., PRADELLE, H., BLOCH, J.-F. 2005. « Ultrafiltration treatment of coating effluents from paper machine ». *91st Annual Meeting, Pulp and Paper Technical Association of Canada*. Montreal, Que, Can : Pulp and Paper Technical Association of Canada.

TJOE, T.N., LINNHOFF, B. 1986. "Using pinch technology for process retrofit ». *Chemical Engineering (New York)*. 93:8. 47-60.

- TRIPATHI, P. 1996. « Pinch technology reduces wastewater ». *Chemical Engineering (New York)*. 103:11. 87-90.
- WANG, Y.P., SMITH, R. 1995. « Wastewater minimization with flowrate constraints ». *Chemical Engineering Research & Design, Transactions of the Institute of Chemical Engineers, Part A*. 73:A8. 889-904.
- WEARING, J.T., BARBE, M.C., OUCHI, M.D. 1985. « EFFECT OF WHITE-WATER CONTAMINATION ON NEWSPRINT PROPERTIES. ». *Journal of Pulp and Paper Science*. 11:4. 113-121.
- WEARING, J., PIERSON, K. 2006. "White-water strategies for integrated TMP newsprint mills - Implementation of a comprehensive system for energy and water reduction at Alberta Newsprint". *92nd Annual Meeting, Pulp and Paper Technical Association of Canada, Feb 7 2006*. Montreal, Que., Canada : Pulp and Paper Technical Association of Canada. A.
- WISING, U. 2003. *Process Integration in Model Kraft Pulp Mills : Technical, Economic and Environmental Implications*. 80 p. Thèse de doctorat en génie chimique. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

ANNEXES

ANNEXE A : DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODOLOGIE

A.1 Étude de l'extraction représentative

A.1.1 Extraction initiale

Tableau- A.1 : Extraction initiale pour l'étude de cas 1 (Partie 1).

Courants extraits	T _e (°C)	T _s (°C)	H (kW)
1-Chauffage copeaux silo	20.0	31.2	347
2m-Copeaux – unité de lavage	31.2	66.4	1658
3m-Eau – unité de lavage	70.0	66.4	1658
4-Chauffage eau d'appoint de lavage	65.2	70.0	1950
5-Préchauffage copeaux 1	61.4	110.0	1137
6-Préchauffage copeaux 2	61.4	110.0	1179
7m-Pâte - dilution après raffinage	100.0	84.8	1075
8m-Eau blanche – dilution après raffinage	83.5	84.8	911
9m-Pâte - dilution après latence	95.0	93.9	1125
10m-Eau blanche – dilution après latence	83.5	93.9	935
11m-Eau blanche des filtres à disque PTM	84.6	82.5	6312
12m-Eau blanche machine vers PTM	60.0	82.5	6055
13m-Pâte – dilution sortie HD	84.6	72.0	4292
14m-EB – dilution sortie HD	59.6	72.0	4164
15-Machine – chauffage silo hors machine	59.9	60.0	496
16-Machine – chauffage cuvier des surplus	59.5	60.0	216
17-Condensats dans condenseur sécherie	130.5	72.0	534
18-Eau dans condenseur sécherie	21.0	85.3	534
19m-Condensats du circuit 1 sécherie	99.5	103.4	108
20m-Condensats du circuit 2 sécherie	72.0	103.4	285
21m-Condensats du chauffage d'air	157.0	103.4	398
22-Machine – Chauffage air sécherie 1	18.0	82.2	616
23-Machine – Chauffage air sécherie 2	77.7	95.6	236
24-Machine – Chauffage air sécherie 3	18.0	93.9	1274
25-Machine – Chauffage air sécherie 4	18.0	93.9	1621

Tableau- A.2 : Extraction initiale pour l'étude de cas 1 (Partie 2).

Courants extraits	Te (°C)	Ts (°C)	H (kW)
26-Refroidissement moteurs PTM	56.0	21.0	5351
27-Effluent lavage	70.0	40.7	248
28-Excès EB vers effluent	60.0	40.7	1301
29-Machine – Effluent des presses	55.5	40.7	2656
30-Eau non contaminée vers effluent	32.1	40.7	539
31-Eau recirculée des pompes à vide	40.0	21.0	0
32-Effluent pompes à vide	40.0	40.7	193
33-Chauffage eau tiède – récupérateurs PTM	21.0	48.5	2491
34-Vapeur récupérée PTM	87.2	46.0	2491
33-Chauffage eau tiède – récupérateurs machine	21.0	53.2	4478
36-Machine – Air évacué sécherie 1	87.7	49.9	1899
37- Machine – Air évacué sécherie 2	82.0	52.6	1875
38- Machine – Air évacué sécherie 3	77.7	47.8	1727
39- Machine – Air évacué sécherie 4	73.8	50.6	528
40-Chauffage final eau tiède	52.5	55.0	643
41-Système de chauffage eau/glycol PTM	68.5	72.0	473
42-Système de chauffage eau/glycol machine	53.5	56.8	1551

A.1.2 Choix des courants

Tableau- A.3 : Comparaison du choix de courants extraits avec d'autres études.

Référence	Procédé / utilisation	Différence avec l'extraction proposée
Retsina (AIE, 2002)	Général / représentation	<ul style="list-style-type: none"> Plus d'emphase sur le système de production d'énergie (chaudières, turbines, condensats) : extraction de courants en plus. Pour le reste de l'extraction : mêmes types de courants extraits
Manninen (AIE, 2002)	PTM – papier couché léger / représentation	<ul style="list-style-type: none"> Extraction très similaire Plus d'emphase sur le système d'énergie (sécheurs, boîte à vapeur, ...) : extraction de courants en plus Autres différences expliquées par la différence de procédé
Noël (Noel, 1995)	PTM – papier journal / conception	<ul style="list-style-type: none"> Extraction plus ciblé sur des objectifs énergétiques précis et donc moins complète. Tous courants extraits par Noël compris dans notre liste
PAPRICAN (Francis et Browne, 2002)	PTM + pâte désencrée – papier journal / conception	<ul style="list-style-type: none"> Extraction plus générale avec agrégation des courants. Courants extraits non compris dans notre liste à cause de différence de procédé
Savulescu (AIE, 2002)	Kraft – carton / conception	<ul style="list-style-type: none"> Au niveau des parties communes du procédé (machine, filtre à disques), mêmes types de courants extraits par Savulescu

Le Tableau- A.3 présente les différences au niveau du choix des courants entre l'extraction proposée (Tableau- A.1 et Tableau- A.2) et des extractions réalisées par des experts en analyse de pincement appliquée aux procédés papetiers. Mise à part Retsina et Manninen, l'extraction proposée couvre les mêmes courants et même plus. Retsina extrait en plus des courants relatifs à la production d'énergie qui ne sont pas pertinent pour la méthodologie eau et énergie. En revanche Manninen inclut les demandes en vapeur autour de la sécherie qu'il est très intéressant de considérer pour la représentation du procédé. Par ailleurs, aucune extraction ne considère des mélanges de courants.

A.1.3 Traitement des courants

Les données extraites sont la température initiale, la température finale (ou ciblée) et soit la variation d'enthalpie, soit le débit massique et la capacité calorifique. La façon d'extraire les courants, ou des groupes de courants varient suivant les objectifs de l'étude et suivant la représentation du procédé.

Tableau- A.4 : Comparaison du traitement des courants extraits avec d'autres études.

Référence	Procédé / utilisation	Déférence avec l'extraction proposée
Retsina (AIE, 2002)	Général / représentation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Extraction des courants d'air chaud en deux segments : refroidissement puis refroidissement avec condensation
Manninen (AIE, 2002)	PTM – papier couché léger / représentation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Agrégation de l'air évacué de la sécherie en un seul courant ▪ Agrégation du besoin de chauffage dans les cuviers d'eau blanche machine en un seul courant ▪ Agrégation du besoin de chauffage d'eau tiède en un seul courant ▪ Refroidissement : vraie charge et non le potentiel disponible ▪ Température cible pour l'effluent et non température réelle dans le procédé
PAPRICAN (Francis et Browne, 2002)	PTM + pâte désencrée – papier journal / conception	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Température cible pour l'effluent et non température réelle dans le procédé
Savulescu (AIE, 2002)	Kraft – carton / conception	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Température cible pour l'effluent et non température réelle dans le procédé

Le Tableau- A.4 présente les différences au niveau du choix des courants entre l'extraction proposée et des extractions réalisées par les experts. La principale différence est le traitement de l'effluent et l'utilisation d'une température ciblée plus basse que la température réelle. Cela correspond soit à un objectif de l'usine pour une bonne opération du système de traitement, soit au désir d'augmenter le potentiel d'intégration par l'augmentation artificielle de l'énergie excédentaire. Manninen dont l'objectif est la représentation du procédé agrége plusieurs courants ce qui a l'avantage de simplifier la recherche d'information puisque moins de données intermédiaire sont nécessaire.

A.1.4 Amélioration de l'extraction représentative

Plusieurs expériences ont été réalisées sur l'extraction proposée. Elles ont été inspirées par les analyses comparatives sur le choix et le traitement des courants. Les sujets étudiés sont :

- Extraction étendue à la sécherie
- Application stricte du principe accepter / extraire
- Extraction de l'objectif « refroidissement des circuits PTM »
- Extraction du chauffage des circuits d'eau blanche
- Combinaison des extractions circuits du PTM et circuits machine
- Extraction de la vapeur sale PTM
- Extraction de l'air chaud de la machine

L'extraction finale obtenue pour l'extraction représentative est donnée par le Tableau-A.5.

Tableau- A.5 : Format d'extraction pour l'étude de cas No.1.

Courants extraits	Te (°C)	Ts (°C)	H (kW)
1-Chauffage eau de lavage	65.2	70	1950
2-Chauffage eau d'appoint lavage	-	-	-
3-Chauffage copeaux (silo et préchauffeurs)	31.2	110	3974
4-Effluent lavage	initiale	38	271
5-Excès eau blanche PTM vers effluent	-	-	-
6-Vapeur récupérée PTM	87	50	22220
7-Effluent désencrage	-	-	-
8-Chauffage circuit désencrage	-	-	-
9-Machine- Chauffage silo hors machine	59.3	60	3582
10-Machine- Appoint EF aux circuits machine	-	-	-
11-Machine- Effluent des presses	55.5	35	3678
12-Excès eau blanche machine vers effluent	60	35	1686
13-Boîte à vapeur des machines	120	120.1	4300
14- Machine- Sécherie	100	100.1	22108
15- Machine- Chauffage air des poches	18	90	3747
16- Machine- Air évacué sécherie	75	45	6030
17-Chauffage eau des douches	17	55	8728
18-Refroidissement pompes à vide	-	-	-
19-Effluent pompes à vide	40	35	1381
20-Refroidissement moteurs PTM	-	-	-
21-Effluent moteurs PTM	-	-	-
22-Refroidissement lubrification / climatisation	-	-	-
23-Effluent lubrification / climatisation	-	-	-
24-Eau NC vers effluent	33	35	1340
25-Chauffage bâtiments	-	-	-

A.1.5 Références

AIE, 2002. *Process Integration Technologies Implementing Agreement - Process Integration in the Pulp and Paper Industry, Annex III - Third meeting*. 2002.

FRANCIS, B., BROWNE, T. 2002. *Paprican Research Report 1617 - Heat Recovery and System Closure in a Newsprint Mill*. Paprican.

NOEL, G. 1995. "Pinch technology study at the Donohue Clermont newsprint mill". *Pulp & Paper Canada*. 96:7. Jul. 38-41.

A.2 Exemple de la méthode de ciblage pour les mélanges et recirculation

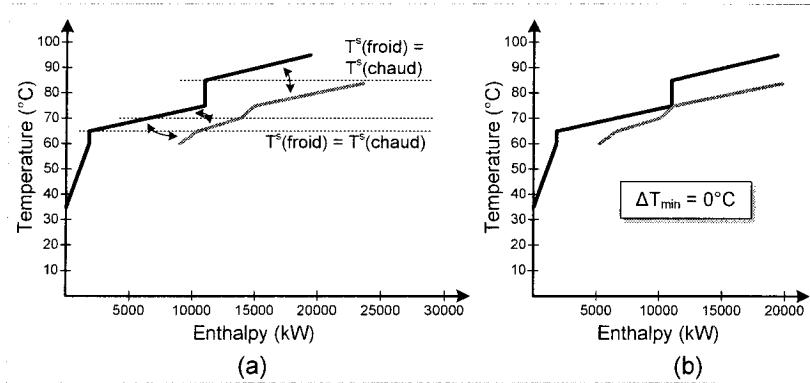


Figure- A.1 : Courbes composites pour l'atelier PTM seul .

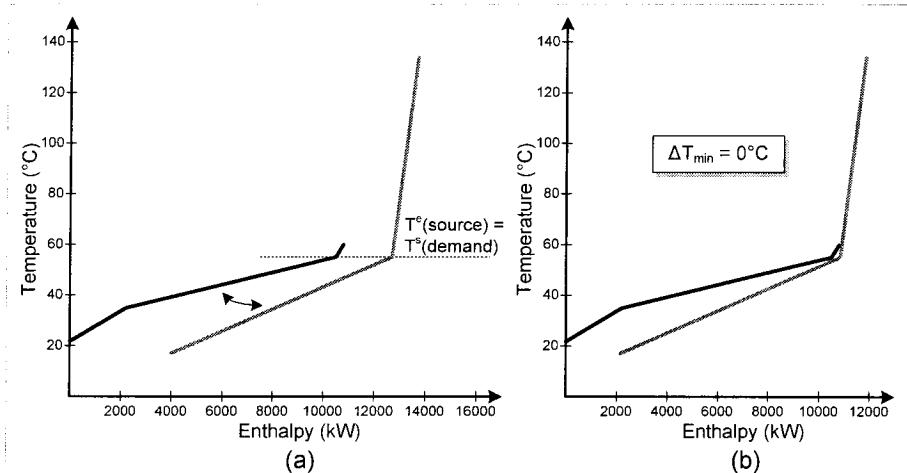


Figure- A.2 : Courbes composites pour le réseau d'eau seul.

A.3 Résultats étude de cas 1

Tableau- A.6 : Programmes eau – énergie, l'étude de cas 1.

Programme	Étude de procédé	Projets de mélange	Échangeurs indirects
CB	x	x	x
P11	x	x	-ligne de PTM // EB -douches FAD // EB -effluent / EF
P12	x	PTM 3	-EB // EF -EB // EB -effluent // EF
P13	x	PTM 3 RE 1	-EB // EB
P14	x	RE 1	-ligne de PTM // EB -douches FAD // EB
P21	Récupération de la vapeur PTM	x	x
P22	Récupération de la vapeur PTM	x	-effluent // EF
P23	Récupération de la vapeur PTM	PTM 4 RE 1	-effluent // EB silo
P41	recirculation de l'eau des PAV	x	x
P42	recirculation de l'eau des PAV	x	-ligne de PTM // EB -douches FAD // EB -effluent / EF
P43	recirculation de l'eau des PAV	PTM 3 RE 4	-effluent // EB silo
P44	recirculation de l'eau des PAV	RE 4	-ligne de PTM // EB -douches FAD // EB
P51	-Récupération de la vapeur PTM -recirculation de l'eau des PAV -rejet de l'excès d'EB au PTM	x	x
P52	- Récupération de la vapeur PTM -recirculation de l'eau des PAV -rejet de l'excès d'EB au PTM	x	-effluent // EB silo -effluent // EF
P53	- Récupération de la vapeur PTM -recirculation de l'eau des PAV -rejet de l'excès d'EB au PTM	PTM 4 RE 4	- EB silo // effluent

Avec :

- **APM 3** : 2 mélanges/séparations [pâte latence – EBB et EBC] et 1 mélange [EBC douches filtres à disques – EBS d'appoint].
- **APM 4** : 1 mélange [EBC douches filtres à disques – EBS d'appoint] et rejets de l'excès d'EB à l'atelier PTM.
- **RE 1** : recirculation de l'effluent des presses traité vers les douches de la zone de formation et recirculation de l'eau de refroidissement des moteurs PTM vers les douches des presses.
- **RE 4** : recirculation de l'effluent des presses traité vers les douches de la machine à hauteur du manque à combler

Tableau- A.7 : Résultats des programmes, étude de cas 1.

Programmes		CB	P11	P12	P13	P14	P21	P22	P23
Eau fraîche	m3/j	21361	21309	20945	16519	16922	20731	20642	15769
Effluent total	m3/j	19529	19544	19525	15082	15113	20462	20458	15717
Effluent spécifique	m3/t	32.5	32.6	32.5	25.1	25.2	34.1	34.1	26.2
T(eff)	°C	40.7	35.0	34.5	37.2	37.1	42.9	36.1	39.3
T(eau proc.)	°C	21.0	19.8	19.4	19.7	19.6	21.1	18.5	19.8
Vapeur totale	t/h	52.1	50.3	53.0	51.9	50.7	24.9	21.7	19.8
Vap. eau tiède	t/h	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	0.8	0.0
Vap. Silo EB	t/h	0.6	0.0	2.2	1.0	0.0	3.2	3.3	1.8
EF douches	m3/j	4750	4750	4752	0	0	4752	4752	0
T(fad)	°C	85	77	75	77	76	78	78	77
aire d'échange	m2	0	5090	3350	600	4400	0	1800	360
nombre d'unités	unité	0	9	5	1	4	0	3	2

Programmes		CB	P41	P42	P43	P44	P51	P52	P53
Eau fraîche	m3/j	21361	15057	15027	13699	14048	14366	14308	12905
Effluent total	m3/j	19529	13233	13229	12349	12241	14177	14117	12843
Effluent spécifique	m3/t	32.5	22.1	22.0	20.6	20.4	23.6	23.5	21.4
T(eff)	°C	40.7	42.1	40.7	42.7	42.0	47.1	42.2	44.0
T(eau proc.)	°C	21.0	22.9	22.9	23.5	23.3	23.2	23.2	23.9
Vapeur totale	t/h	52.1	51.1	50.1	53.0	50.1	21.4	19.0	19.1
Vap. eau tiède	t/h	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Vap. Silo EB	t/h	0.6	0.5	0.0	2.2	0.0	3.3	1.1	1.6
EF douches	m3/j	4750	980	980	0	0	980	980	0
T(fad)	°C	85	85	79	78	79	78	78	77
aire d'échange	m2	0	0	4100	200	3450	0	1110	370
nombre d'unités	unité	0	0	7	1	5	0	4	2

ANNEXE B : USINES PAPIER JOURNAL DE RÉFÉRENCE

B.1 Étapes de développement des usines de référence

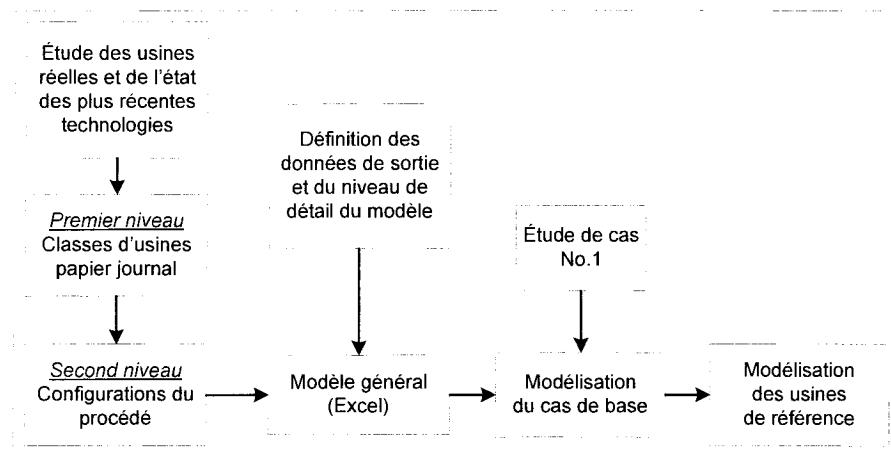


Figure- B.1 : Étapes de création des usines de papier journal de référence.

B.2 Définitions des usines de référence

B.2.1 Sources

La définition des usines de référence est basée sur une recherche bibliographique approfondie (Smook, 1992, PAPRICAN, 1994, PAPRICAN, 1999, Leask, 1987, Sundholm, 2000, Parker et al., 2003, Rauscher, 2002, Gottsching, 2000, Paulapuro, 2000, Karlsson, 2000, Hynninen, 2000, IPPC, 2001), sur des sondages réalisés dans l'industrie mis à jour à l'aide des sites Internet de compagnie papetière (CPPA, 1998, FPAC, 2001, Francis et Towers, 2005) et sur les visites d'usines réelles.

B.2.2 Classes d'usine

Les critères de base choisis pour différencier les classes d'usine sont : la pâte utilisée, la production totale de papier et le nombre de machine. 15 usines canadiennes ont été étudiées. Les papiers spéciaux à base de pâte mécaniques, qui peuvent représenter jusqu'à 45% des sortes produites dans une usine, sont assimilés au papier journal. Les usines qui produisent sur site de la pâte chimique sont exclues. La pâte mécanique

utilisée est toujours de la pâte thermomécanique et aucune pâte de meule n'est utilisée dans une usine sans production de pâte chimique. Le taux de production de pâte désencrée peut se ramener à trois valeurs : 20%, 40% et 100%. Deux tendances se distinguent au niveau de la production par machine : 200-300 t papier/machine ou 500-700 t papier/machine.

Tableau- B.1 : Classes d'usines papier journal de référence.

Taux de PTM (%)	Taux de pâte désencrée (%)	Production de papier* (t/j)	Nombre de machines	Usines existantes**
100	0	650 t/j	1	3
100	0	650 t/j	2	3
100	0	1100 t/j	2	2
80	20	650 t/j	1	1
80	20	1100 t/j	2	0
80	20	1100 t/j	4	4
60	40	1100 t/j	2	1
60	40	1100 t/j	4	0
0	100	1100 t/j	2	1

* : Production moyenne dans une fenêtre de plus ou moins 100 t/j

** : Sur 15 usines étudiées

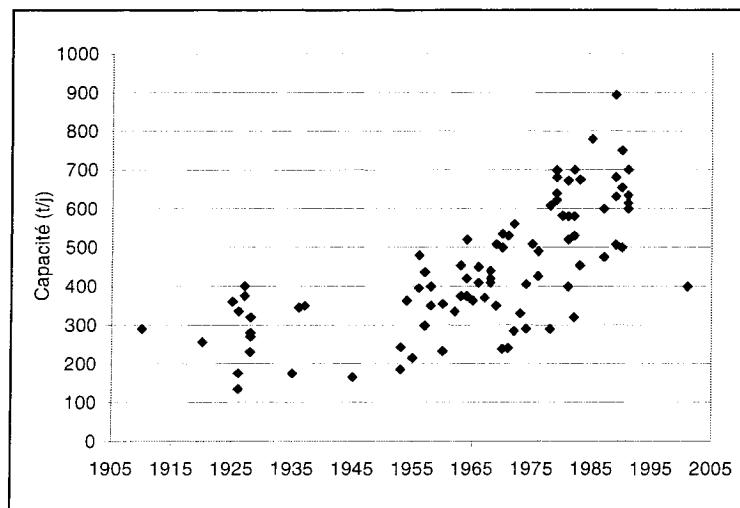


Figure- B.2 : Capacité de production de machines de papier journal en Amérique du Nord en fonction de leur année de mise en service.

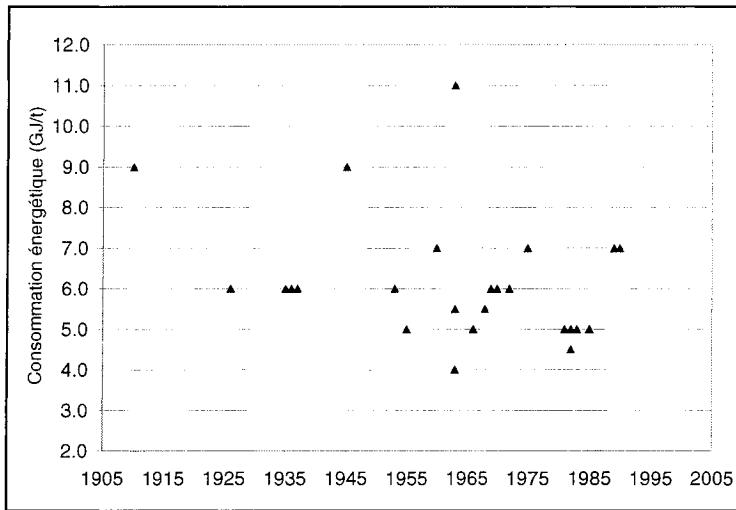


Figure- B.3 : Consommation de vapeur de machines de papier journal en fonction de leur année de mise en service.

Deux usines peuvent produire une même quantité de papier avec un nombre différent de machines. Il est possible de faire un lien entre le nombre de tonnes de papier produit par une machine et son âge (Figure- B.2). Une capacité de 600-700 t/j représente le standard pour une machine moderne alors qu'une capacité de 200-400 t/j représente une génération plus ancienne de machine, des équipements plus âgés et a priori moins efficace en terme de consommation d'eau et d'énergie qu'une machine moderne. Cependant la Figure- B.3 montre qu'il n'y a pas de corrélation directe entre l'âge des machines et leur efficacité énergétique. En fait il est possible qu'une vieille machine ai subit des améliorations et ne consomme pas plus d'énergie qu'un machine plus moderne qui aurait négligée. De plus aucune donnée ne permet de faire le lien entre l'âge de la machine et sa consommation d'eau.

B.2.3 Configurations possibles

Pour chaque classe d'usine identifiée, plusieurs configurations sont possibles au niveau des procédés de fabrication de pâte et du papier. Par exemple, à l'atelier de PTM, la vapeur sale peut être soit utilisée pour produire de la vapeur propre soit purgée à l'atmosphère. Seul sont considérées les configurations susceptibles d'avoir un impact

sur les performances eau et énergie d'une usine. Le Tableau- B.2 résume les principaux paramètres qui définissent ces configurations.

Tableau- B.2 : Paramètres du procédé définissant les principales configurations.

Paramètre de configuration	Valeurs typiques			
	Moins intégré		Plus intégré	
Récupération de vapeur PTM	Aucune	Chauffage d'eau fraîche et courant procédé	Production de vapeur propre, 3.5GJ/t	Production de vapeur propre, 6 GJ/t
Recirculation du condensat sale PTM	Non	Oui		
Lavage des copeaux : effluent (et nature de l'appoint d'eau)	2.0 m3/t de pâte (eau fraîche)	2.0 m3/t de pâte (eau blanche)	0.3 m3/t de pâte (eau fraîche)	0.3 m3/t de pâte (eau blanche)
Effluent spécifique atelier désencrage	20 m3/t	15 m3/t	10 m3/t	
Utilisation de vapeur à l'atelier de désenrage	0.5 GJ/t	0 GJ/t		
Recirculation d'eau vers les douches de la machine	0%	50%, eau blanche traitée	50%. eau non contaminées	100%, eau blanche traitée + eau NC
Préchauffage eau des douches	50%	100%		
Perte de chaleur à la partie humide	- 1.25°C	- 1.14°C	- 1°C	
Efficacité de la sécherie	6 GJ/t eau évaporée	4.5 GJ/t eau évaporée	3.7 GJ/t eau évaporée	3 GJ/t eau évaporée
Recirculation eau non procédé	0%	30%	50%	Boucles internes refroidies
Excès d'eau blanche machine vers les ateliers de PTM et de désenrage	Non	50% des besoins du PTM comblés, rien vers désenrage	besoins du PTM comblés, rien vers désenrage	100% besoins du PTM comblés, maximum vers désenrage

B.3 Crédit des modèles pour les usines de référence

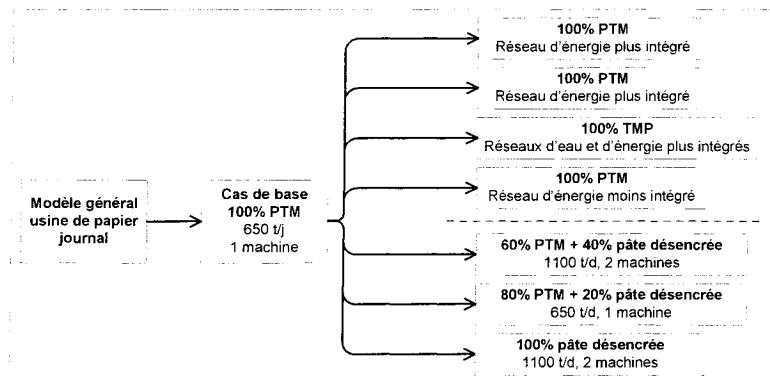


Figure- B.4 : Développement des usines de papier journal de référence

B.3.1 Modèle général

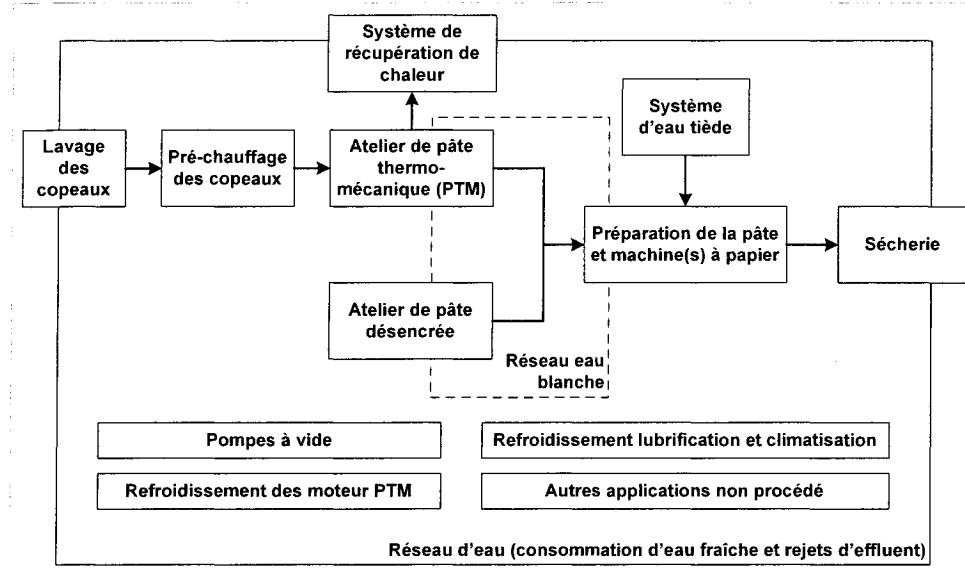


Figure- B.5 : Blocs élémentaires dans le modèle général.

Le modèle général, développé sur une feuille de calcul Excel, permet de représenter les différentes configurations des usines de référence. Les bilans de masse et d'énergie sont réalisés pour chaque bloc (Figure- B.5). Le niveau de détail dépend des besoins de l'étude et du nombre limité de données disponibles pour un modèle général. Le modèle est assez précis pour calculer les indicateurs clés de performance liée à l'utilisation d'eau et d'énergie, extraire les données pertinentes à l'application de la méthodologie et estimer les effets de projets d'amélioration sur les performances de l'usine modélisée. Le format d'extraction représentative a aussi été implanté dans le modèle. Il est d'autre part assez général pour qu'il puisse représenter une large gamme d'usine avec un minimum de données.

B.3.2 Cas de base

Afin de donner des fondations solides aux usines de référence, l'usine utilisée dans l'étude de cas 1 a été choisie comme cas de base. C'est une usine intégrée 100% PTM papier journal avec une seule machine qui produit 610 de papier par jour. Elle fait donc partie de la première classe d'usines de référence.

Tableau- B.3 : Configuration du cas de base.

Paramètre de configuration	Valeur
Récupération de vapeur PTM	chauffage d'eau fraîche
Lavage des copeaux : effluent spécifique (et nature de l'appoint d'eau)	0.3 m ³ /t (eau fraîche)
Recirculation d'eau vers les douches de la machine	0%
Préchauffage eau des douches	90/100%
Perte de chaleur à la partie humide	- 1.14°C
Efficacité de la sécherie	3.7 GJ/T
Recirculation eau non procédé	30%, vers cuvier d'eau de fabrication
Réseau eau blanche	besoins PTM comblés, excès d'eau blanche rejeté au niveau de la machine

Tableau- B.4 : Performances eau et énergie pour le cas de base.

	Base case	Usine de papier journal canadienne	Usine de papier journal canadienne 100% PTM
Énergie thermique nette (GJ/t)	5.6	8.0*	5.3 [†]
Production de vapeur propre à l'atelier PTM (GJ/t)	0	0 pour une moitié, 3.5 pour l'autre [†]	
Énergie électrique (GJ/t)	11.8	10.1*	10.4 [†]
Effluent total (m ³ /t)	33.3	51.7*	50.5*

*: moyenne, (CPPA (MAINTENANT FPAC) 1998) et (FPAC 2001)

[†]: moyenne, (FRANCIS et TOWERS 2005)

Le Tableau- B.3 donne les éléments de configuration du cas de base. Du point de vue énergétique, il n'y a pas de production de vapeur propre à partir de la vapeur sale de l'atelier PTM mais quasiment la totalité de la demande de chauffage de l'eau des douches est assurée par de l'énergie excédentaire (vapeur sale de l'atelier PTM et air chaud de la sécherie). Du point de vue eau, la totalité du besoin d'eau de l'atelier PTM est comblée par l'excès d'eau blanche de la machine et aucune eau procédé ou non

procédé n'est recirculée vers les douches de la machine. Enfin, un tiers des eaux non procédé (eaux de refroidissement des moteurs des raffineurs, des systèmes de lubrification et de ventilation) est recirculé vers le cuvier d'eau de fabrication. Du point de vue des performances énergétique, l'usine est dans la moyenne canadienne alors que la consommation d'eau est largement sous la moyenne (Tableau- B.4).

La saison choisie pour le modèle est l'été pour plusieurs raisons : la consommation d'eau non procédé est maximum et la consommation de vapeur dans le procédé reste significative, la température de l'effluent est critique (en particulier si des tours de refroidissement sont nécessaires), l'énergie résiduelle est maximale.

B.3.3 Réseau d'eau blanche

Le modèle général comprend les bilans de masse et d'énergie autour des recirculations d'eau blanche entre les principaux départements. Cependant la gestion des eaux blanches est spécifique à chaque usine de papier journal : attribution de l'excès d'eau blanche entre l'atelier PTM et l'atelier de désencrage, la stratégie de contrôle, la dimension des réservoirs, le système des cassés, etc. Pour cette raison, la complexité du réseau d'eau blanche et les différentes possibilités de gestion ne sont pas prise en compte dans la création des usines de référence.

B.3.4 Usines de référence 100% PTM

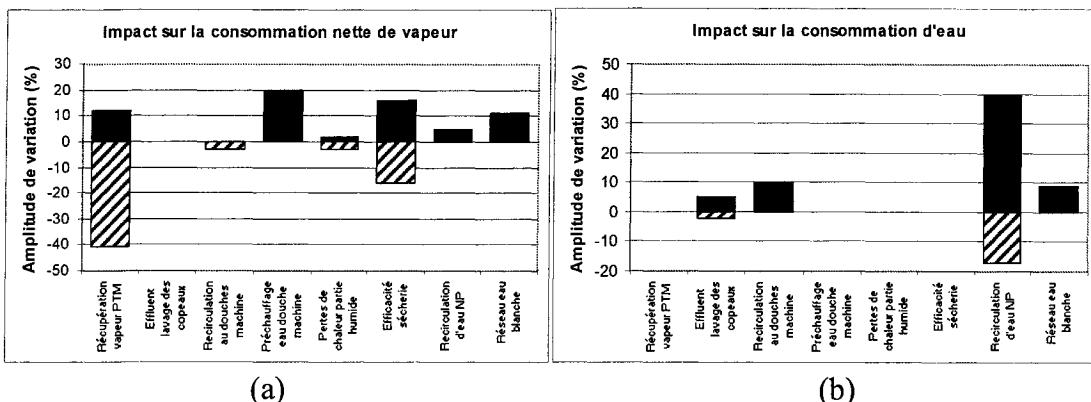


Figure- B.6 : Analyse de sensibilité pour les consommations (a) de vapeur et (b) d'eau.

Les usines de référence 100% PTM ont été définies en faisant varier le niveau d'intégration des réseaux d'eau et d'énergie du cas de base. Une analyse de sensibilité a d'abord été réalisée pour établir le lien entre les éléments de configuration et la consommation d'eau et d'énergie. Elle se base sur les valeurs minimum et maximum prises par les paramètres du Tableau- B.2. La Figure- B.6 présente les taux de variation de des consommations d'eau et d'énergie en pourcentage de leur valeur initiale. Cinq paramètres clé ont été identifiés : la récupération de la vapeur sale PTM, la recirculation d'eau au niveau des douches de la machine, le préchauffage de l'eau des douches de la machine, la recirculation de l'eau non procédé et la gestion de l'excès d'eau blanche machine. L'efficacité de la sécherie de la machine sera étudiée à part car elle peut être reliée à l'âge des machines. Douze usines 100% PTM ont alors été créées par combinaison de ces cinq paramètres. Parmi ces douze modèle, quatre cas remarquables ont été choisis (Figure- B.7) : réseau d'énergie plus intégré, réseau d'eau plus intégré, réseaux d'énergie et d'eau plus intégrés et réseau d'eau moins intégré. Le détail des configurations des quatre modèles par rapport au cas de base sont données dans le Tableau- B.5.

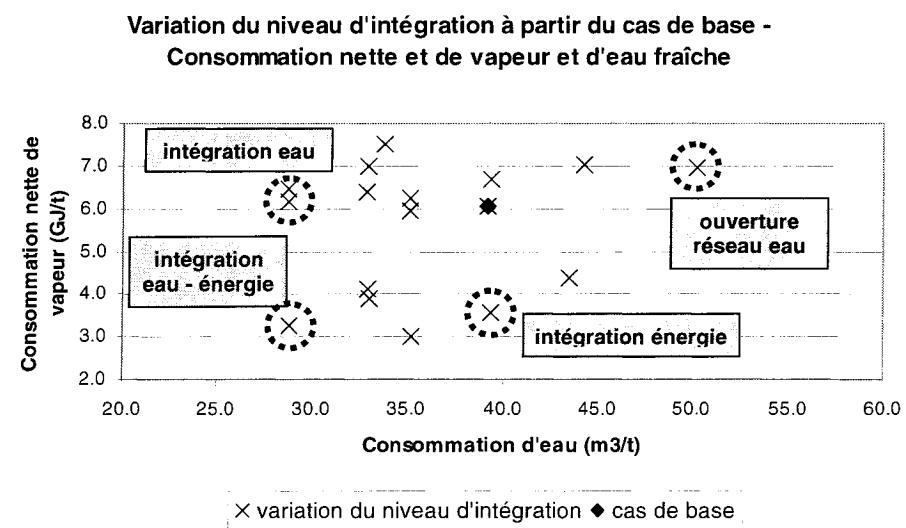


Figure- B.7 : Identification des usines de référence 100% PTM.

Tableau- B.5 : Configuration des usines de référence 100% PTM.

Modèle	Différence de configuration par rapport au cas de base
Réseau d'énergie plus intégré	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Production de vapeur propre (3.5 GJ/t) ▪ Recirculation du condensat sale vers l'atelier PTM
Réseau d'eau plus intégré	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Taux de recirculation de 50% vers les douches de la machine à papier ▪ Recirculation en boucle interne refroidie des eaux de refroidissement des moteurs des raffineurs, de refroidissement de lubrification, du système de climatisation
Réseaux d'énergie et d'eau plus intégrés	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Combinaison des modèles «réseau d'eau plus intégré» et «réseau d'énergie plus intégré»
Réseau d'eau moins intégré	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 75% des besoins d'eau du PTM comblés par l'eau blanche machine ▪ Recirculation de 15% de l'eau non procédé vers le cuvier d'eau de fabrication

B.3.5 Usines de référence avec atelier de désencrage

Les modèles pour les usines avec désencrage ont été développées à partir du cas de base 100% PTM par augmentation progressive du taux de désencrage : de 0 à 20% de pâte désencrée, puis de 20 à 40%, enfin de 40 à 100%. Le saut de 20% à 40% s'accompagne d'une augmentation de production de 650 t/j à 1100 t/j et un passage de 1 à 2 machines. La création des modèles suit les règles suivantes. La demande de dilution de l'atelier PTM est toujours comblée par l'excès d'eau blanche de la machine à papier. Le reste de l'eau blanche machine est envoyé à l'atelier de désencrage. Cet appoint a pour conséquence d'augmenter la température des circuits de désencrage. Or la température de la pâte désencrée est limitée à 45-50°C pour éviter que les *stickies* ne se ramollissent, passent à travers les tamis et crée des problèmes sur la machine à papier. Cette restriction de température limite l'utilisation d'eau blanche machine à l'atelier de désencrage. Dans le cas 100% pâte désencrée, la température des circuits de désencrage et de la machine à papier a été fixée à 40°C comme il a été observé dans une usine canadienne de la même classe. L'usine veut ainsi éviter limiter l'utilisation de vapeur vive pour le chauffage d'eau blanche.

B.4 Cas spéciaux

D'autres éléments de configuration peuvent avoir un impact sur la consommation d'eau et d'énergie. Trois cas ont été étudiés en particulier : l'âge des machines à papier, la

consistance de la pâte à la sortie des ateliers PTM et de désencrage, l'utilisation minimale d'eau.

B.4.1 Machine à papier plus vielle

Pour étudier l'impact de l'âge des machines à papier, une usine 100% PTM produisant 1100 t/j avec 4 vieilles machines a été considérée. L'hypothèse est faite que ces machines sont moins efficaces que le cas de base, ainsi qu'il a été observé dans des usines existantes. La consommation d'eau fraîche pour les douches est plus élevée ($17 \text{ m}^3/\text{t sèche}$ contre 8 pour le cas de base), et donc les rejets d'effluent des presses aussi ($10 \text{ m}^3/\text{t sèche}$ contre 6.6). Les pertes de chaleur à la partie humide de la machine sont plus importantes (-1.25°C). La sécherie est moins efficace ($4.5 \text{ GJ/t d'eau évaporée}$) et moins d'énergie est récupérée de l'air chaud évacué (30% de moins que pour cas de base).

B.4.2 Lavage intermédiaire de la pâte

Pour le cas de base, la consistance de sortie de la PTM est 8%. Dans les usines de référence avec atelier de désencrage, la pâte désencrée sort à 10%. Des valeurs de consistance plus élevées peuvent être appliquées pour garder encore plus de contaminants comme les solides dissous, à l'intérieur des ateliers de pâte. Cet épaississement est appelé lavage intermédiaire de la pâte car il permet de débarrasser la pâte d'une grande partie de ses contaminants avant son utilisation à la machine. Il est courant de stocker la pâte désencrée à une consistance de 30%. C'est plus rarement le cas pour la PTM quand elle sert à produire du papier journal. Cependant le lavage de la PTM est de plus en plus considéré dans les conceptions d'usines modernes et il peut être une solution attrayante aux problèmes de solides dissous (Sundholm, 2000). Le lavage de la pâte se traduit par une augmentation de la consommation de vapeur à l'atelier de désencrage et dans les circuits de la machine et par une augmentation de la température dans les circuits PTM. Plusieurs combinaisons ont été envisagées et les plus représentatives sont : usine 40% désencrée, 1100 t/j, 1 machine avec lavage

intermédiaire de la PTM jusqu'à 30% ou de la pâte désencrée jusqu'à 30%, ou des deux.

B.4.3 Utilisation minimum d'eau

Une usine 100% PTM avec une utilisation minimum d'eau de 10% peut être définie comme le nec plus ultra observé ou recommandé dans l'industrie (Manninen dans AIE, 2002) et qui fait appel aux meilleures technologies disponibles (IPPC, 2001). Une telle usine inclut les éléments suivants. La demande totale en eau des douches est minimale ($6 \text{ m}^3/\text{t}$ sèche contre 10 pour le cas de base) ainsi que l'appoint d'eau fraîche aux douches ($1.5 \text{ m}^3/\text{t}$ sèche contre 10). L'eau non procédé est recirculée en boucles fermées refroidies. De plus, l'utilisation de pompes à vide sans eau (Paulapuro, 2000), l'utilisation de joints d'étanchéité mécaniques et une bonne gestion de l'eau en général permettent une réduction supplémentaire de la consommation d'eau non procédé. Finalement le retour de condensat au système de production de vapeur est maximal.

B.5 Représentation d'une usine réelle

Le modèle général a été utilisé pour créer les usines de référence mais il peut aussi être utilisé pour représenter une usine réelle. 77 paramètres d'ajustement sont utilisés dans le modèle général. Le nombre minimum de données nécessaires varie de 40 (usine 100% PTM et 1 machine) à 70 données clé (usine avec désenclage et 4 machines).

Les données nécessaires peuvent être classées dans trois catégories : conception, opération, non disponible. Les données de conception concernent les équipements et les configurations en place dans l'usine. Ces informations sont faciles à obtenir. Les données d'opération sont en général des points de consignes relativement facile à obtenir via le système d'information de l'usine. Des données historiques sont même parfois disponibles. La catégorie des variables non disponibles regroupent les données qui ne sont généralement pas mesurée ni contrôlé ou qui concerne des équipements secondaires. La plupart des données nécessaires non disponible concerne ainsi les

systèmes de récupération de l'énergie et les réseaux d'eau tiède et d'eau non procédé. Selon le système d'information de l'usine étudiée, l'acquisition ou l'estimation de ces données nécessite plus d'effort. Un peu plus de la moitié des données nécessaires sont des données de conception ou d'opération et sont donc relativement facile à obtenir.

B.6 Références

- CPPA (MAINTENANT FPAC) 1998. *Tables to energy monitoring report*.
- FPAC 2001. *Report on environmental conditions of the pulp and paper mills in Canada for the year 1999*.
- FRANCIS, B., TOWERS, M. 2005. *Paprican Research Report 1762 - Benchmarking Energy Use in Pulp and Paper Operations*. Paprican.
- GOTTSCHING, L. 2000. *Papermaking Science and Technology - Recycled fiber and deinking*. Helsinki, Finland : Fapet Oy.
- HYNNINEN, P. 2000. *Papermaking Science and Technology - Environmental control*. Helsinki, Finland : Fapet Oy.
- IPPC, I.P.P.A.C. 2001. Reference document on best available techniques in the pulp and paper industry. <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm> (Page consultée le 2003)
- KARLSSON, M. 2000. *Papermaking Science and Technology - Papermaking Part2 Drying*. Helsinki, Finland : Fapet Oy.
- KRUGER. www.kruger.com (Page consultée le 2004)
- LEASK, R.A. 1987. *Pulp and Paper Manufacture - volume 2 - Mechanical Pulping*. Atlanta, GA, USA : The joint textbook committee of the paper industry.
- PAPRICAN 1994. *Water use reduction in the pulp and paper industry, 1994*. Canadian Pulp and Paper Association.
- PAPRICAN 1999. *Energy cost reduction in the pulp and paper industry*. Pointe Claire, QC, Canada : Pulp and Paper Research Institute of Canada.
- PARKER, S.M., IONIDES, G.N., JOHNSTON, C., ORR, A., MACKIE, D.M. 2003. "Heat recovery for TMP - the forgotten energy source". Montreal, Que., Canada : Pulp and Paper Technical Association of Canada.
- PAULAPURO, H. 2000. *Papermaking Science and Technology - Papermaking Part1, Stock preparation and wet end*. Helsinki, Finland : Fapet Oy.
- RAUSCHER, J.W. 2002. "Modern TMP heat and turpentine recovery". *88th Annual Meeting, Jan 29 2002*. Montreal, Que. Pulp and Paper Technical Association of Canada. A, A91-A94.
- SMOOK, G.A. 1992. *Handbook for pulp and paper technologists* . Vancouver, BC, Canada : Angus Wilde Publications.
- SUNDHOLM, J. 2000. *Papermaking Science and Technology - Mechanical Pulping*. Helsinki, Finland : Fapet Oy.

ANNEXE C : GÉNÉRALISATION

C.1 Comparaison des courbes pour les usines de référence

Tableau- C.1 : Impact des éléments de configuration sur les courbes composites.

Élément de procédé	Modification des courbes composites par rapport au cas de base	
	Chaud	Froide
Production de vapeur propre au PTM	Remplacement de la la vapeur sale par un plus long palier à 140°C (vapeur propre)	Augmentation de la demande de chauffage de l'eau blanche
Recirculation d'effluent procédé vers le procédé	Réduction du débit de l'effluent procédé	Réduction de la demande de chauffage d'eau fraîche
Ouverture des circuits d'eau procédé	Augmentation de l'effluent procédé	Augmentation de la demande de chauffage d'eau fraîche
Recirculation d'eau non procédé en boucle fermée	Augmentation de la demande en refroidissement des boucles d'eau non procédé	Réduction des effluents non procédé
Ouverture des circuits d'eau non procédé	Augmentation de l'effluent non procédé « chaud »	Augmentation de l'effluent non procédé « froid »
Ajout d'échangeurs de chaleur indirects	Pas de changement (les courbes ne font que se rapprocher)	Pas de changement
Taux de production de pâte désencrée de 20% et 40%	Réduction des courants PTM, en particulier la vapeur sale, et de l'excès d'eau blanche machine non compensé par l'augmentation de l'effluent du désencrage	Augmentation des besoins de chauffage du procédé (désencrage et circuit eau blanche non compensé par la réduction des courants froids PTM)
Taux de production de pâte désencrée de 100%	Élimination des courants PTM et de l'excès d'eau blanche machine augmentation de l'effluent de désencrage	Augmentation des besoins de chauffage du procédé (désencrage et circuit eau blanche non compensé par l'élimination des courants froids PTM)

C.2 Étude de l'ouverture des circuits

Tableau- C.2 : *Bottleneck* pour plusieurs niveaux de fermeture des circuits d'eau.

Eau procédé	Eau non procédé	Consommation d'eau fraîche (m ³ /t)	Bottleneck à ΔTmin = 10°C
Part de la demande en eau de l'atelier PTM comblé par de l'eau blanche de la machine	Part de recirculation de l'eau non procédé vers le cuvier d'eau de fabrication	36.1*	Vapeur sale de l'atelier PTM*
		38.4	Vapeur sale de l'atelier PTM
		40.7	Vapeur sale de l'atelier PTM
		43	Vapeur sale de l'atelier PTM
		45.3	Vapeur sale de l'atelier PTM
		40.6	Vapeur sale de l'atelier PTM
		42.5	Vapeur sale de l'atelier PTM
		45.8	Vapeur sale de l'atelier PTM
		48	Qc=0 kW
		50.3	Qc=0 kW
0%	0%	59.5	Qc=0 kW

* : cas de base

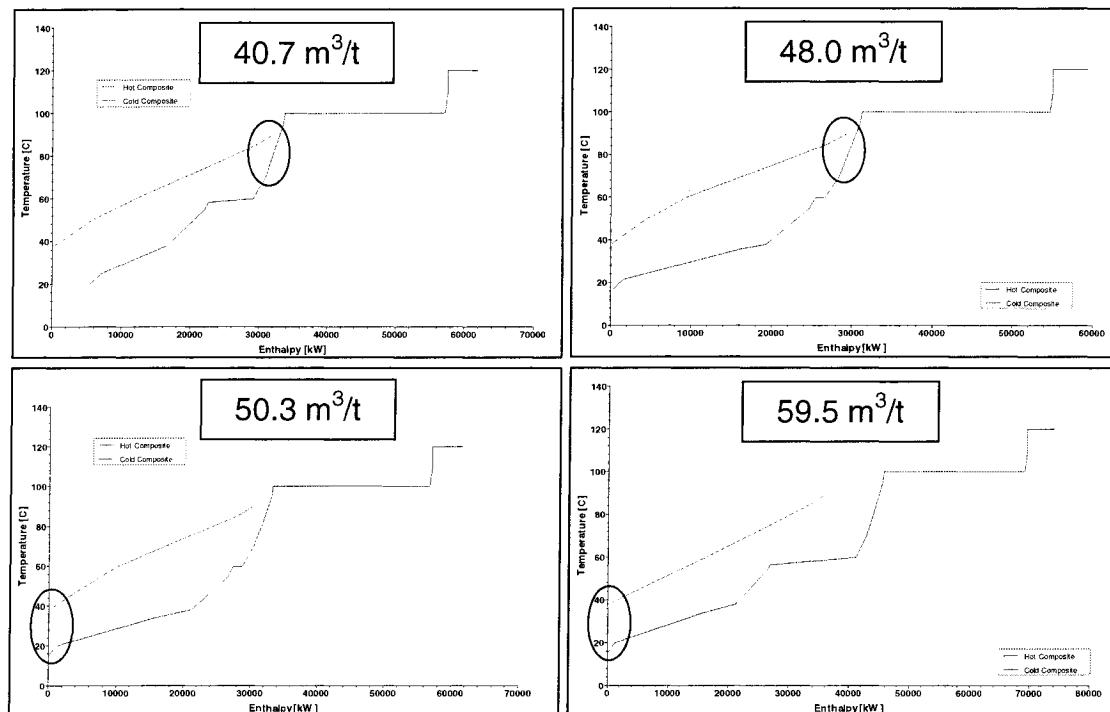


Figure- C.1 : Ciblage pour plusieurs niveaux de fermeture des circuits d'eau.

C.3 Courbes composites pour l'analyse modifiée

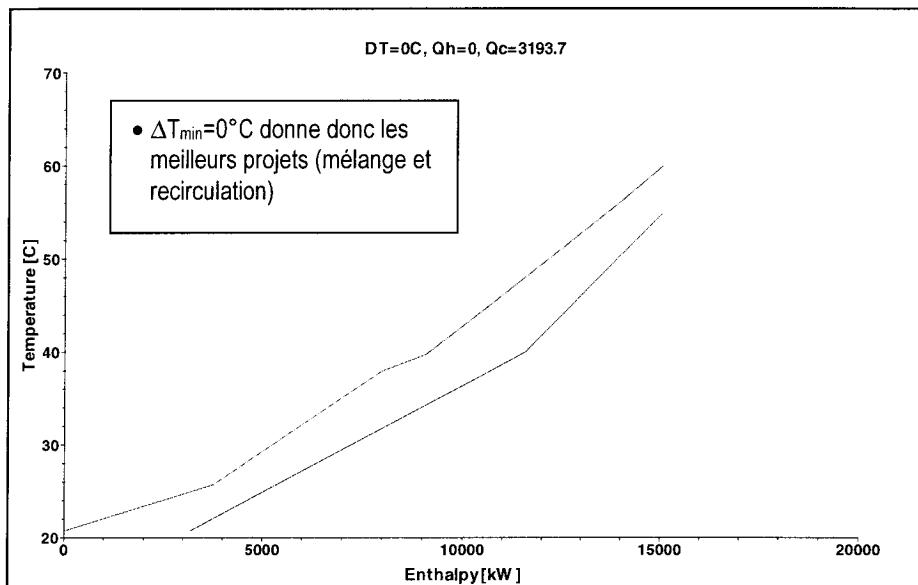


Figure- C.2 : Courbes pour l'analyse de pincement modifiée, cas de base.

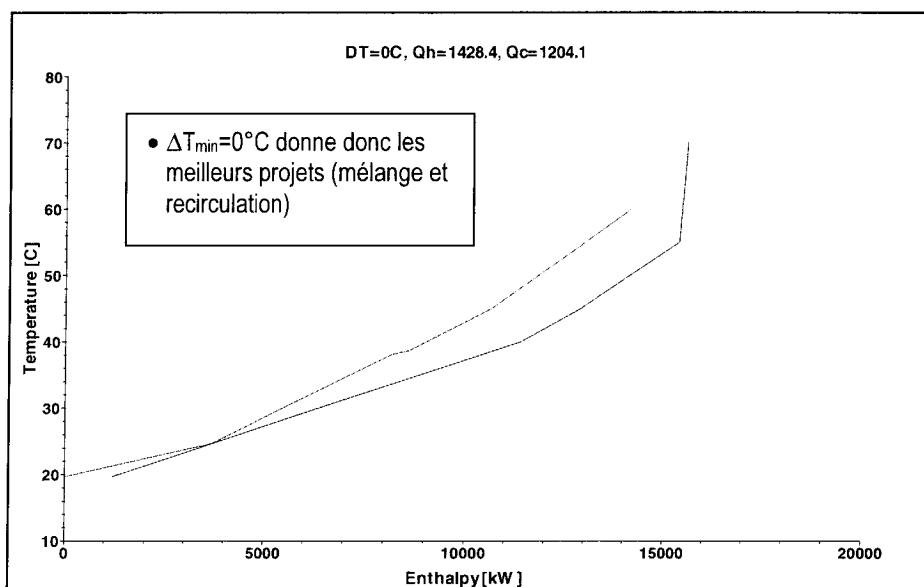


Figure- C.3 : Courbes pour l'analyse de pincement modifiée, DES 20.

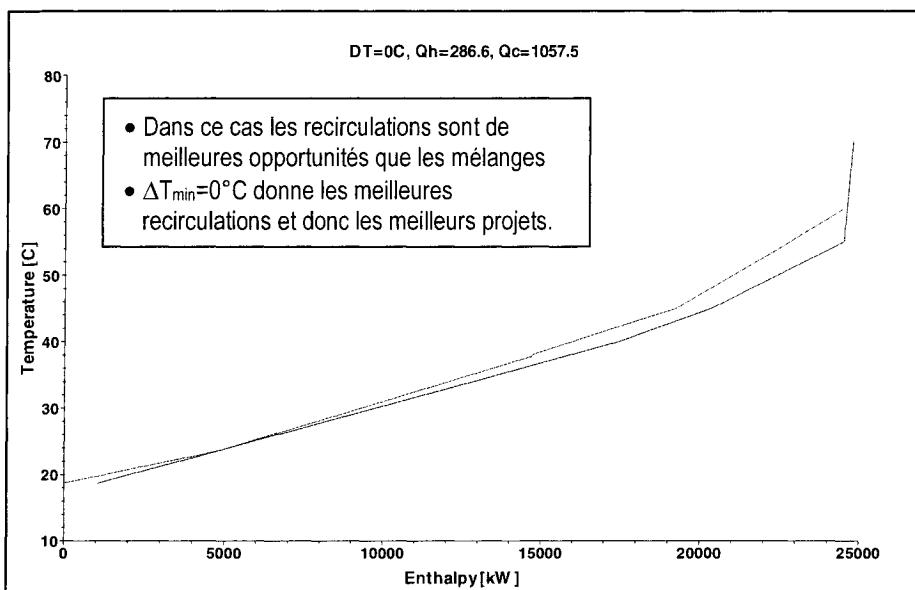


Figure- C.4 : Courbes pour l'analyse de pincement modifiée, DES 40.

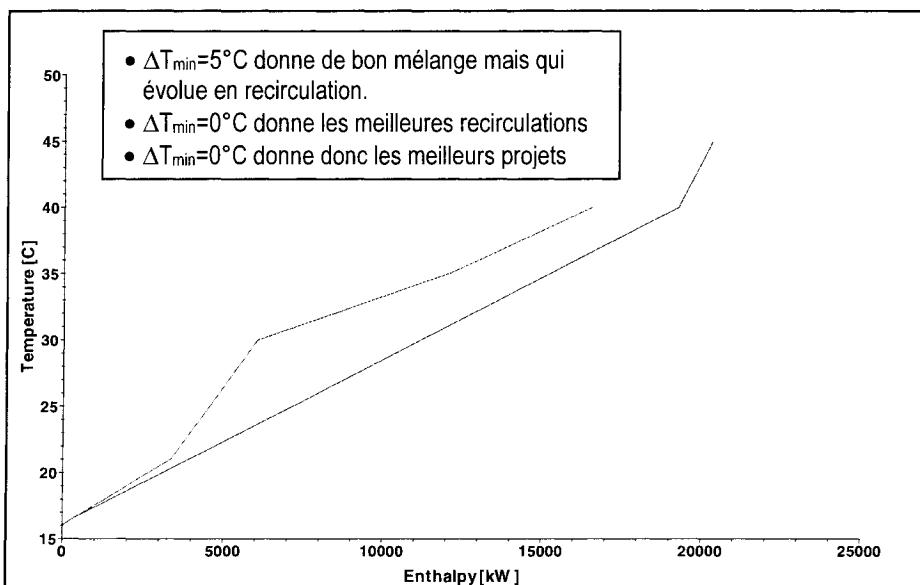


Figure- C.5 : Courbes pour l'analyse de pincement modifiée, DES 100.

C.4 Aspects pratiques

C.4.1 Eau des douches

La recirculation d'eau vers les douches de la machine à papier dépend en grande partie de la configuration du système et de la limite de contaminants acceptables à chaque application. Une partie des douches de la zone de formation et des presses requièrent une qualité d'eau équivalente à celle de l'eau fraîche et seule la recirculation d'eau non procédé non contaminée est envisageable. D'autres douches peuvent accepter de l'eau blanche filtrée. Le choix des projets de recirculation va donc dépendre de la qualité requise aux douches, de la demande minimale en eau fraîche ou non contaminée, du niveau de risque qu'est prête à assumer l'usine, des équipements de traitement nécessaires (membranes pour l'effluent des presses, simple filtration pour l'eau blanche). Pour cette étude, il a été considéré que 1/4 des besoins des douches de la zone de formation doivent impérativement être comblés par de l'eau non contaminée.

C.4.2 Eaux non contaminées

En ce qui concerne les projets impliquant des eaux non procédé non contaminées (NC), deux éléments interviennent : les contraintes physiques et la nature des courants d'eau NC. Les contraintes physiques sont spécifiques à chaque usine et peuvent rendre techniquement impossible l'implantation de certains projets. Ces contraintes peuvent être par exemple : eaux de refroidissement de lubrification / climatisation très difficile à collecter, risque de contamination (en particulier par de l'huile) existe, impossibilité physique de recirculer une eau NC vers les applications d'étanchéité (manque d'espace, pas de centralisation). Les trois natures que peut prendre un courant d'eau NC et qui peuvent co-exister sont : rejeté vers l'effluent, recirculé vers le cuvier d'eau de fabrication et recirculé dans en boucle fermée. Dans chaque cas, les projets n'ont pas nécessairement un impact positif.

D'autres aspects observés lors des deux études de cas peuvent être discutés.

- Il est préférable d'un point de vue eau et énergie d'utiliser l'excès d'eau blanche machine pour l'appoint d'eau à l'atelier PTM plutôt que de l'eau NC. Si des raisons spécifiques à une usine l'empêchent de recirculer toute l'eau blanche machine, l'eau NC est préférable à de l'eau fraîche.
- Le choix de recirculer vers une application procédé un effluent procédé ou une eau NC rejeté à l'effluent dépend de la température de l'eau NC. À 50-60°C, il vaut mieux recirculer l'effluent NC. Inférieure à 40°C, il vaut mieux recirculer l'effluent procédé même si il est nécessaire de le traiter.
- Le choix de recirculer vers une application procédé un effluent procédé ou un courant d'eau NC déjà recirculée vers le cuvier d'eau de fabrication dépend du compromis économique. L'effluent permet de récupérer plus d'énergie et de réduire l'effluent final mais nécessite un traitement. L'eau NC aboutit à une réduction d'énergie modeste mais ne nécessite qu'un faible investissement. Comme il s'agit d'étude de préfaisabilité, le choix doit cependant vers l'option la plus ambitieuse, la recirculation de l'effluent.
- Quand on a le choix entre recirculer vers une application procédé (douches machine, appoint d'eau) un effluent procédé ou un courant d'eau NC d'une boucle interne, la décision se porte vers l'effluent. En effet il vaut mieux recirculer un effluent chaud et refroidir un effluent NC tiède que le contraire. D'autant plus si le système de refroidissement est déjà en place.

La recirculation d'eau NC vers une application procédé n'est donc à considérer qu'en dernier recours, en particulier quand le réseau d'eau NC est déjà bien intégré. Les seules exceptions sont les effluent NC chauds tels que l'eau de refroidissement des moteurs PTM et l'eau d'étanchéité des pompes à vide quand il y a déjà une recirculation interne jusqu'à une température limite.

C.5 Utilisation des ressources

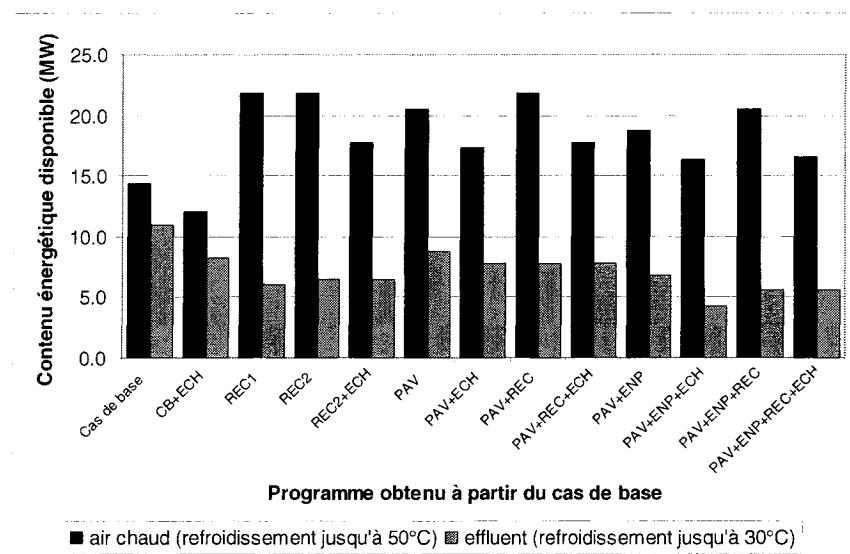


Figure- C.6 : Énergie excédentaire disponible après l'application des programmes.

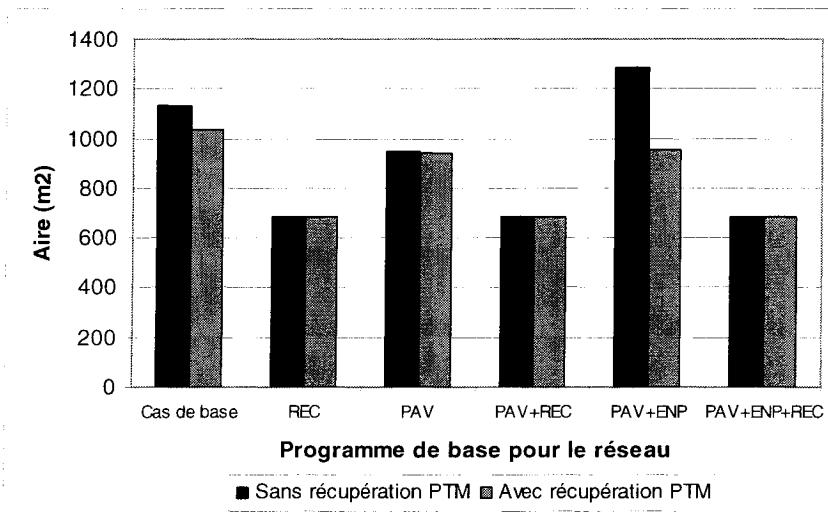


Figure- C.7 : Aire d'échange supplémentaire pour les usines de référence 100% PTM.

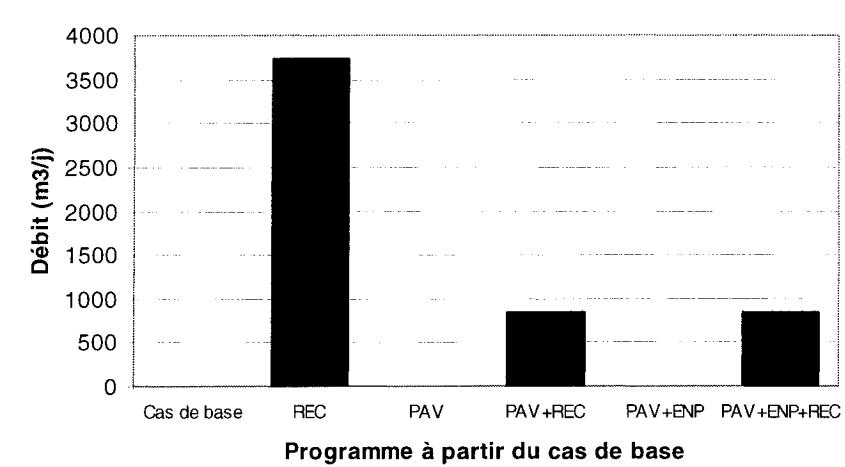


Figure- C.8 : Débit d’effluent à traiter pour recirculation interne.

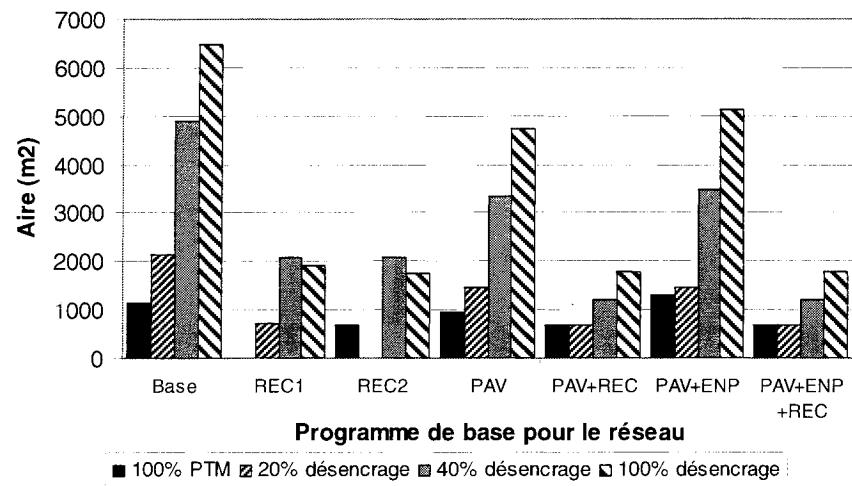


Figure- C.9 : Aire d’échange supplémentaire pour les usines avec désencrage.

C.6 Projets clé

Tableau- C.3 : Projets clés pour les usines de référence.

Usines de référence	Projets clés
Cas de base	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Récupération vapeur PTM ▪ Recirculation eau PAV ▪ Recirculation presses ▪ Boucles ENP ▪ Air sécherie // air des poches ▪ Air sécherie // EB silo hors machine
Usine avec réseau d'énergie plus intégré	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Recirculation eau des PAV ▪ Boucles ENP ▪ Air sécherie // air des poches ▪ Air sécherie // EB silo hors machine ▪ Recirculation presses
Usine avec réseau d'eau plus intégré	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Recirculation eau des PAV ▪ Recirculation presses ▪ Air sécherie // air des poches ▪ Air sécherie // EB silo hors machine
Usine avec réseaux d'énergie et d'eau plus intégrés	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Récupération vapeur PTM ▪ Recirculation eau des PAV ▪ Recirculation presses ▪ Air sécherie // air des poches ▪ Air sécherie // EB silo hors machine
Usine avec réseau d'eau moins intégré	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Récupération vapeur PTM ▪ Recirculation presses et EB vers douches ▪ Recirculation eau PAV vers ENP ▪ Recirculation excès EB vers PTM ▪ Air sécherie // air des poches ▪ Air sécherie // EB silo hors machine
20% désencrage	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Récupération vapeur PTM ▪ Recirculation eau des PAV ▪ Recirculation presses ▪ Recirculation désencrage ▪ Boucles ENP
40% désencrage	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Air sécherie // air des poches ▪ Air sécherie // EB silo hors machine
100% désencrage	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Recirculation eau des PAV ▪ Boucles ENP ▪ Recirculation presses ▪ Recirculation désencrage ▪ Air sécherie // air des poches ▪ Air sécherie // EB silo hors machine

C.7 Courbes composites pour les cas spéciaux

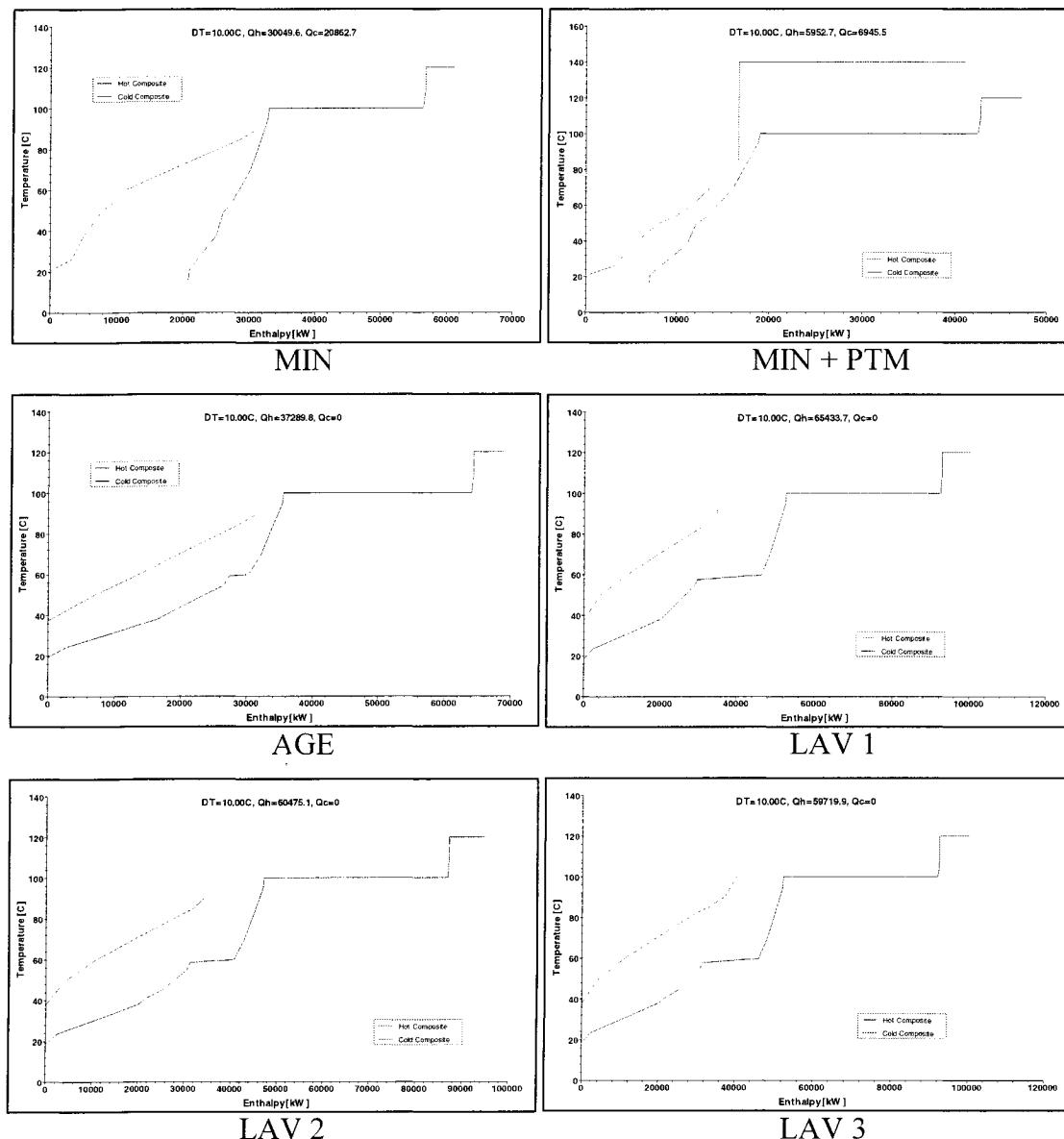


Figure- C.10 : Courbes composites à $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$ pour les cas spéciaux.

ANNEXE D : ÉTUDE DE CAS 2

D.1 Ciblage

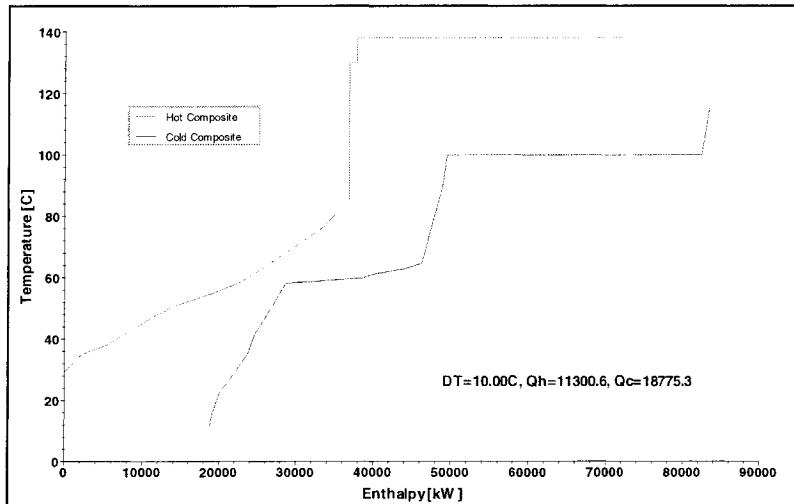


Figure- D.1 : Courbes composites représentatives – Ciblage à $\Delta T_{\min} = 10^\circ C$.

D.2 Procédure de ciblage simplifié

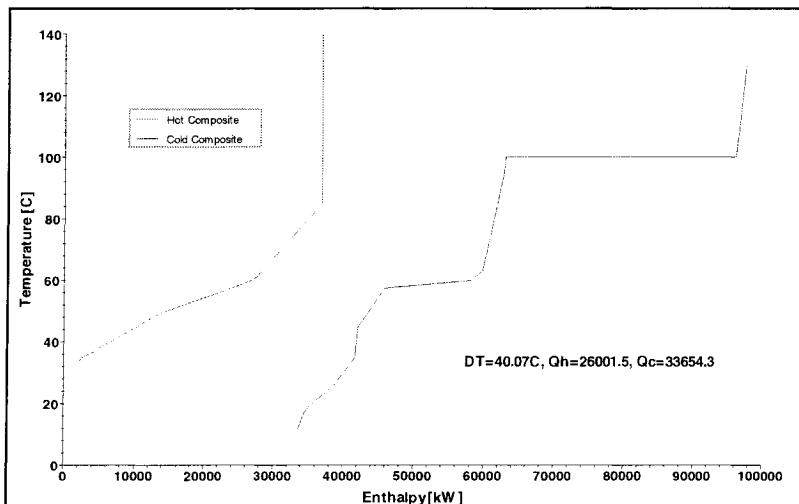


Figure- D.2 : Courbes composites représentatives – Format d'extraction.

D.3 Programmes eau – énergie

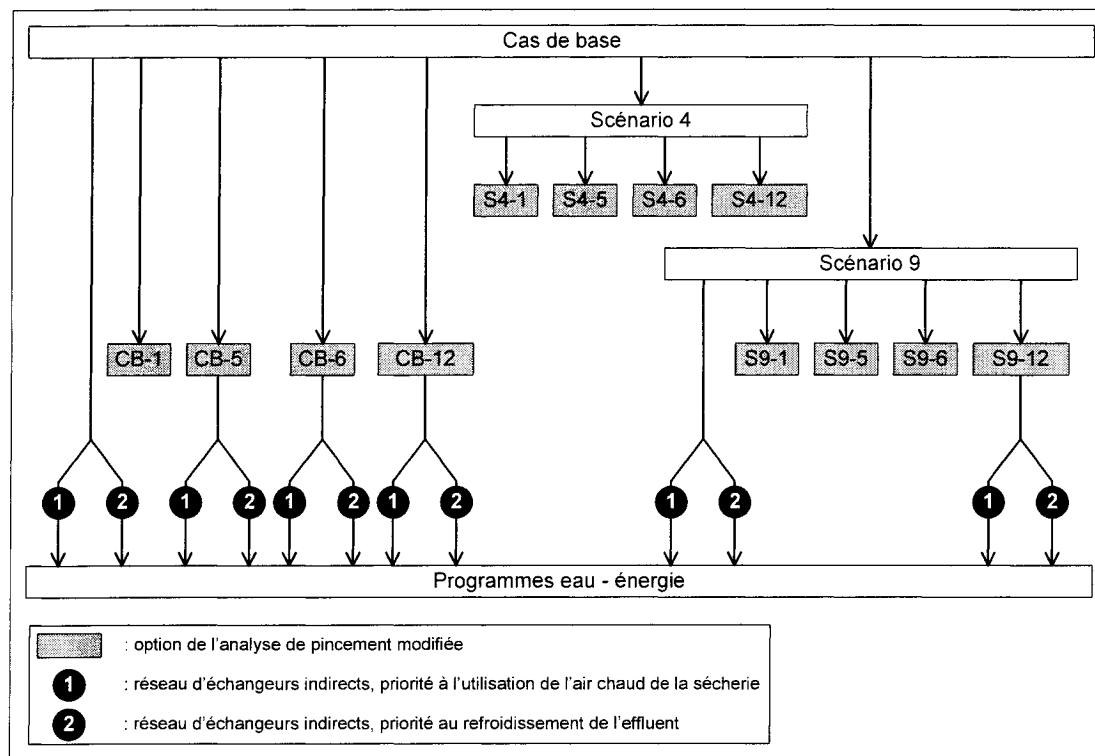


Figure- D.3 : Programmes eau – énergie, l'étude de cas 2.

Tableau- D.1 : Description des projets, étude de cas 2.

Scénario 4	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation des filtrats PTM vers les filtres à disques PTM
Scénario 9	<ul style="list-style-type: none"> Vapeur purgée des raffineurs vers préchauffage des copeaux Utilisation des filtrats PTM vers les filtres à disques PTM Réorganisation de la dilution des cuviers haute densité Modification de point de consigne de chauffage
Option 1	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation des filtrats PTM vers les filtres à disques PTM Mélange des filtrats PTM avec l'EB PTM à chauffer
Option 5	<ul style="list-style-type: none"> Option 1 Recirculation d'excès d'eau blanche vers les circuits machine
Option 6	<ul style="list-style-type: none"> Option 5 Recirculation d'excès d'eau blanche vers l'atelier de désencrage
Option 12	<ul style="list-style-type: none"> Option 6 Recirculation de l'effluent des presses vers les douches machine Recirculation d'excès d'eau chaude vers l'atelier de désencrage

Tableau- D.2 : Résultats des programmes eau – énergie, étude de cas 2.

		Usine actuelle	S0 HEN1	S0 HEN2	S0 Opt.1	S0 Opt.5
Consommation brute de vapeur	GJ/j	5311	4599	4732	4604	4395
	t/tsa	7.3	6.3	6.5	6.3	6.0
Consommation de vapeur nette	GJ/tsa	2.9	1.8	2.0	1.6	1.3
Consommation d'eau fraîche	m3/tsa	28.4	28.5	28.5	23.0	21.6
	m3/d	21241	21211	21151	16991	15908
Rejet d'effluent	m3/tsa	29.1	29.1	29.0	23.3	21.8
Température finale de l'effluent	°C	49.5	48.0	43.0	45.6	44.9
Charge de refroid. effluent	MW	14.7	13.1	8.1	8.6	7.5
Aire d'échange supplémentaire	m2	0.0	1207.7	1393.5	0.0	0.0

		Usine actuelle	S05 HEN1	S05 HEN2	S0 Opt.6	S06 HEN1	S06 HEN2
Consommation brute de vapeur	GJ/j	5311	3714	4031	4307	3711	3778
	t/tsa	7.3	5.1	5.5	5.9	5.1	5.2
Consommation de vapeur nette	GJ/tsa	2.9	0.4	0.8	1.2	0.4	0.8
Consommation d'eau fraîche	m3/tsa	28.4	21.6	21.6	18.6	18.6	18.6
	m3/d	21241	15916	15876	13687	13711	13707
Rejet d'effluent	m3/tsa	29.1	21.8	21.8	18.8	18.8	18.8
Température finale de l'effluent	°C	49.5	47.0	39.5	48.2	48.7	48.6
Charge de refroid. effluent	MW	14.7	9.1	3.4	8.6	8.9	5.7
Aire d'échange supplémentaire	m2	0.0	1068.4	650.3	0.0	622.4	371.6

		Usine actuelle	S0 Opt.12	S012 HEN1	S012 HEN2	S9
Consommation brute de vapeur	GJ/j	5311	4151	3560	3939	4545
	t/tsa	7.3	5.7	4.9	5.4	6.2
Consommation de vapeur nette	GJ/tsa	2.9	1.0	0.2	0.7	1.2
Consommation d'eau fraîche	m3/tsa	28.4	17.5	17.5	17.5	22.3
	m3/d	21241	12854	12880	12850	16612
Rejet d'effluent	m3/tsa	29.1	17.6	17.7	17.6	22.8
Température finale de l'effluent	°C	49.5	48.2	48.4	44.4	45.4
Charge de refroid. effluent	MW	14.7	8.1	8.2	5.7	8.2
Aire d'échange supplémentaire	m2	0.0	0.0	613.1	278.7	0.0

		Usine actuelle	S9 HEN1	S9 HEN2	S9 Opt.12	S912 HEN1	S912 HEN2
Consommation brute de vapeur	GJ/j	5311	3847	3994	4167	3371	3945
	t/tsa	7.3	5.3	5.5	5.7	4.6	5.4
Consommation de vapeur nette	GJ/tsa	2.9	0.2	0.4	0.7	0.0	0.4
Consommation d'eau fraîche	m3/tsa	28.4	22.4	22.5	17.7	17.5	17.6
	m3/d	21241	16653	16571	13211	12882	13047
Rejet d'effluent	m3/tsa	29.1	22.8	22.7	18.1	17.7	17.9
Température finale de l'effluent	°C	49.5	47.5	37.1	48.2	48.9	44.4
Charge de refroid. effluent	MW	14.7	9.9	1.7	8.3	8.5	5.8
Aire d'échange supplémentaire	m2	0.0	1374.9	1114.8	0.0	1189.1	185.8

ANNEXE E : PUBLICATIONS

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse ont donné lieu à six articles, publiés ou en voie de publication, dans des journaux avec comité de lectures.

Article 1 : Thermal Pinch Analysis with Process Stream Mixing at a TMP-Newsprint Mill

Cet article décrit l'étude de cas 1, c'est-à-dire l'application de la méthodologie préliminaire à une usine PTM – papier journal. Les résultats obtenus ont montré un bon potentiel pour le développement d'heuristiques pour les usines de papier journal.
(publié dans Pulp and Paper Canada)

Article 2 : Novel Design Approach for Simultaneous Energy and Flow Reduction based on Pinch Analysis with Stream Mixing

L'article 2 présente plus en détail la méthodologie d'analyse eau – énergie sous sa forme préliminaire et donne des pistes pour le développement de règles heuristiques. L'article est illustré par l'étude de cas 1.

(en cours de publication dans Journal of Engineering Design and Innovation)

Article 3 : New Targeting Rules for Thermal Pinch Analysis with Stream Mixing Points

L'article 4 présente les bases théoriques et le développement de l'analyse de pincement modifiée, tels que présentés dans le chapitre 3.

(en préparation pour soumission à Applied Thermal Engineering)

Article 4 : Roadmap to minimum energy and water use for integrated newsprint mills

Cet article se concentre sur les résultats de la généralisation qui ont trait directement aux usines de papiers journal : programmes et projets typiques, niveaux atteignables, aspects pratiques et aspects effluent zéro.

(soumis à Pulp and Paper Canada)

Article 5 : Retrofit design rules for water and energy analysis in integrated newsprint mills. Part 1: Reference newsprint mills

L'article 5 est la première partie de la publication qui présente les résultats méthodologiques de la généralisation. Cette première partie se concentre sur le développement des usines de référence, sur lesquelles est basée la généralisation.
(en préparation pour soumission à TAPPI Journal)

Article 6 : Retrofit design rules for water and energy analysis in integrated newsprint mills. Part 2: Results and discussion

L'article 6 est la seconde partie de la publication qui présente les résultats méthodologiques de la généralisation. Il se concentre sur la généralisation des règles heuristiques préliminaires, sur la description de la méthodologie sous sa forme finale et sur les aspects pratiques de l'application de la méthodologie
(en préparation pour soumission à TAPPI Journal)

Tableau- E.1 : Équivalence des terminologies entre la thèse et les articles

Thèse	Articles (4, 5, et 6)
Étude de cas 1	Usine A
Étude de cas 2	Usine B
PTM 1, 2, 3, 4	TMP 1, 2, 3, 4
DES 20, 40, 100	DIP 20, 40, 100
AGE	OLD
LAV 1, 2, 3	ISW 1, 2, 3
MIN	MIN

ARTICLE 1**THERMAL PINCH ANALYSIS WITH PROCESS STREAMS MIXING
AT A TMP-NEWSPRINT MILL**

Sébastien Lafourcade¹, Jalel Labidi², Rudy Koteles³, Christian Gélinas⁴, & Paul Stuart¹

1. École Polytechnique de Montréal,
Département de Génie Chimique, C.P.6079,
succ. Centre Ville, Montréal (QC), Canada, H3C 3A7
Contact : paul.stuart@polymtl.ca
2. Université de Perpignan, Perpignan, France
3. Abitibi-Consolidated Inc., Montréal, Québec
4. Abitibi-Consolidated Inc., Amos, Québec

ABSTRACT

Thermal pinch is a well-known energy conservation analysis technique which has been applied at pulp and paper mills typically for uncontaminated water and steam systems. In this paper, it is systematically applied for energy optimization which also involves the mixing of (contaminated or uncontaminated) process water streams. We propose design heuristics for conducting pinch analyses with mixing, and these are applied to address specific energy-related project objectives sought at a well-integrated TMP-newsprint mill.

INTRODUCTION

Based on the principles of thermodynamics, energy recovery concepts and design heuristics, thermal pinch analysis can be an effective tool for the design of heat exchange networks and optimal use of the mill's energy utilities (steam and cooling water). Pinch analysis involves two major steps: definition of energy targets, and heat exchanger network design. The general approach and the major steps are well-described in literature (Linnhoff, 1978). First, "warm streams" (that need cooling) and "cold streams" (that need heating) are identified from the mass and energy balance process simulation. The heat-carrying streams (steam and cooling water), called utilities, are listed. The minimum temperature difference required in the process heat exchangers, ΔT_{min} , must be defined, and depends on several factors including the cost of utilities, the installation cost of the heat exchangers, and the total heat exchange area (Noël, 1995). Composite curves and energy targets are the first and the most used tools for interpreting pinch analysis results (see example in Figure 1). The amount of available heat (the "hot composite curve") and the amount of required heat (the "cold composite curve") are represented on an enthalpy-temperature diagram. The layout of the curves provides the energy objectives of the process, namely the minimal required heating and the minimal required cooling. The final step of thermal pinch analysis is the design of the heat exchange network. Design rules are considered to reach the minimal energy targets.

The use of pinch analysis in pulp and paper mills has been generalized (Noël, 1998). The technique is typically used to analyze steam generation systems and hot water networks, both for new installations and in the context of retrofit. There are examples in literature of the simultaneous application of thermal pinch analysis and mass optimization, particularly in the case of the Parenco newsprint mill in the Netherlands (Schaareman et al., 2000) and the Smurfit Stone mill in La Tuque (Leroy et al., 2000). Although the results of these studies are convincing and the analysis methods employed are efficient, the analyses are not truly simultaneous since mass and energy interactions were not systematically analyzed.

A TMP-newsprint mill was considered in this study. Canadian TMP-newsprint mills consume an average of 18.3 GJ/t, of which 8 GJ/t is thermal energy and 10.1 GJ/t is electrical energy [FPAC (formerly CPPA), 1998]. This represents between 25% and 50% of the total production cost (Jackson and Wild, 1999). The energy supplied to the refiners and the steam used for paper drying, are the two main consumers of energy in the process. Neither the refining nor the drying process is simple to optimize due to their influence on product quality. The electricity consumption can, however, be reduced by controlling and reusing the main energy discharge streams such as the steam produced in refining, the exhaust from leaving the dryer section, and the different effluents.

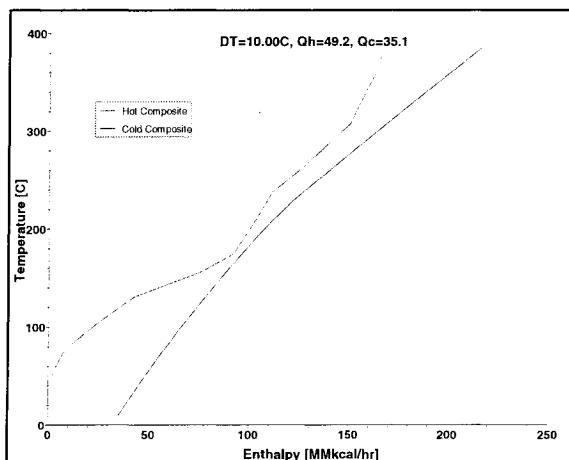


Figure 1: Example of Composite Curves

Situated in northwestern Québec, the TMP-newsprint mill studied produces 560 tonnes of newsprint per day and consists of four refiner lines and one double-wire machine. The mill consumes 22.7 GJ/t of energy, of which thermal energy constitutes 11.6 GJ/t. This level of energy consumption is high relative to the average and can be explained by the absence of sophisticated methods of recovering steam from the refiners. Meanwhile, a large part of the energy contained in the air leaving the dryers and the TMP shop is efficiently recovered and used for heating buildings and process water.

PROBLEM STATEMENT

Pulp and paper processes, and in particular integrated newsprint mills, involve a great deal of heat transfer by mixing. Classical thermal pinch analysis is not obvious to apply for stream mixing since the technique does not take into account mass – energy interactions. The mill participating in this study sought to reduce the effluent temperature during the summer (from 41°C), reduce steam consumption during the winter (from 60.5 t/h) and lower the temperature in the TMP circuits. These objectives are difficult to achieve simultaneously, and cannot be considered separately. The two objectives of this research were to develop heuristics for pinch analysis including stream mixing at a TMP-newsprint mill, and to propose projects which achieve the mill's objectives.

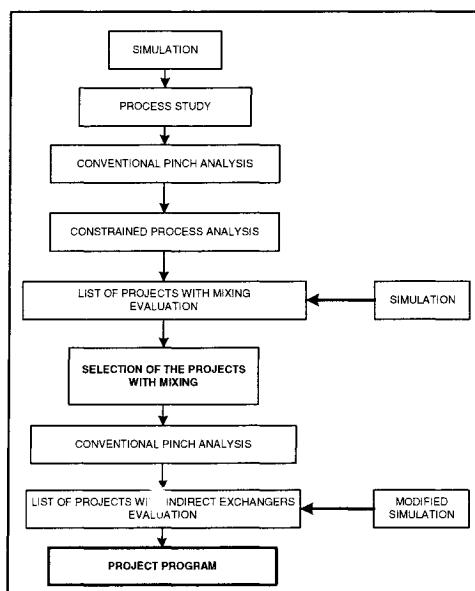


Figure 2: Methodology for pinch analysis under constraints.

METHODOLOGY FOR PINCH ANALYSIS INCLUDING STREAM MIXING

A methodology and related heuristics have been developed to perform thermal pinch analysis under constraints and to introduce mixing points in the heat exchange networks (summarized in Figure 2).

SIMULATION

First, a steady-state simulation of the mill was developed using WinGEMS version 4.5. The simulation includes process and non-process water flows and utility networks. The main operating conditions were simulated, namely summer and winter operation, 3 and 4 refiner lines. The simulation validation was done with the mill personnel and included several sampling campaigns.

PROCESS STUDY

A process study was completed to identify typical energy-saving projects solutions which have been implemented at other integrated newsprint mills (summarized in Table 1). The objective of this study component was to assess the impact of these projects on the pinch methodology.

These projects were implemented in the simulation for the summertime 4-TMP line operating condition, and the results are presented in Table 2. The recovery of dirty steam from the refiners (scenario 1) considerably reduced steam consumption, but was not kept in the context of this study since it requires extensive process modifications and high capital investment. Vacuum pump seal water recirculation (scenario 2) reduced steam consumption, but caused a rise in the summertime effluent temperature. The recirculation of the press section effluent (scenario 3) requires purification (using UF technology or similar), but meets the mill's objectives. These two scenarios were maintained for the pinch study. The indirect heating of shower water using the press section effluent modestly meets the objectives, but infringes upon classical pinch heuristics and was not kept.

Base Case	Summer, 4 refining lines
Scenario 1	-pressurization of secondary refiners -recovery of dirty refiner steam -production of clean steam from dirty steam and use to heat papermachine shower water
Scenario 2	-recirculation of vacuum pump seal water to 55°C -recovery of excess seal water machine shower warm water tank
Scenario 3	-press section effluent treatment -recirculation of press section effluent to warm water tank
Scenario 4	-heating of machine shower fresh water by cooling press section effluent (by indirect heat exchange)

TABLE 1: PROCESS STUDY SCENARIOS

	Scenar. 1	Scenar. 2	Scenar. 3	Scenar. 4
Summertime effluent temperature (°C)	+1.5 °C	+1.5°C	-3°C	-3.6°C
Wintertime steam consumption (t/h)	-15 t/h	-2.7 t/h	-5.5 t/h	-1.9 t/h
Summertime fresh water consumption (l/min)	+0.4 %	-35 %	-16 %	0 %
Summertime effluent flow (m ³ /d)	+3.6 %	-31 %	-17 %	0 %

TABLE 2: RESULTS OF SCENARIOS WITH RESPECT TO BASE CASE (WITH 4 LINES)

CLASSICAL PINCH ANALYSIS

Stream extraction for pinch analysis was done starting from the base case simulation, and then from the two process study scenarios considered. Pinch analysis was then performed for each case to construct the composite curves, determine the energy targets and design the indirect heat exchanger network

(Figure 3). For further insight into pinch heuristics, sensitivity analysis was carried out to determine the variation of the energy targets and heat exchanger networks with pinch technique parameters (number of streams extracted, ΔT_{min}) and process parameters (operating conditions, process modification). This analysis provided the value of ΔT_{min} that was used for the rest of the study. Note that ΔT_{min} does not apply in the case of direct heat exchange by mixing.

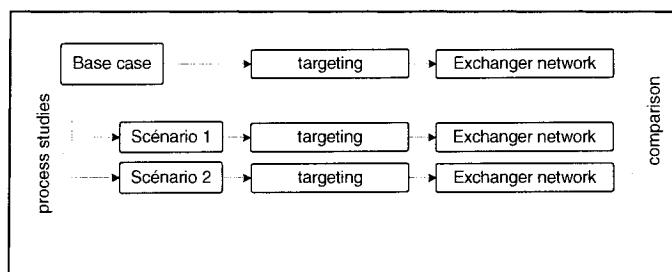


Figure 3: Study plan used for pinch analysis

APPLICATION OF CONSTRAINTS FOR THE DESIGN OF HEAT EXCHANGER NETWORKS

The next step in the proposed methodology was to replace indirect heat exchangers by direct ones (i.e. mixing) within the heat exchanger network obtained from the pinch analysis (Figure 4). Direct heat exchangers are less expensive and more efficient from a heat exchange perspective when compared to indirect heat exchangers. Conventional pinch analysis proposes a heat exchanger network that respects the rules of pinch and assures highest energy recovery. In the context of this study the heat exchanger network obtained serves as a guide to introduce potential mixing points that reliably lead to energy savings.

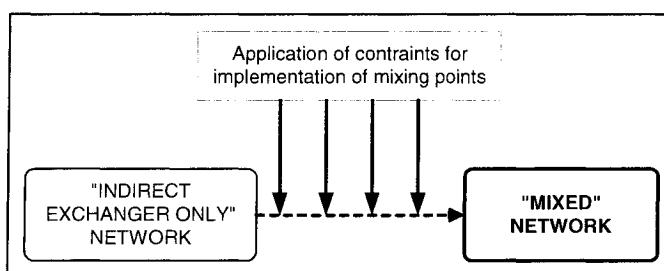


Figure 4: Application of constraints for the introduction of mixing points in the indirect heat exchanger network.

The process employed was as follows:

- 1) Based on the network proposed by conventional pinch study, a process evaluation was made to identify feasible mixing points (called "constraints").
- 2) Mixing point schemes that met the constraints were further evaluated using the simulation and retained.
- 3) Conventional pinch analysis was performed again on the modified process.

- 4) Based on the network proposed by the pinch study, indirect exchanger schemes were identified and evaluated in the simulation.
- 5) Indirect exchanger schemes that met the process objectives set by the mill were retained.

The final recommended programs were a combination of mixing and indirect heat exchanger projects.

RESULTS

The overall methodology was applied to four cases (Table 3) to address the impact of changes and assist in developing pinch heuristics. Four programs (P) were defined as a consequence (Table 4), and their impact was evaluated by simulation with respect to the mill's objectives (summarized in Table 5). The simulation results were examined also for the two seasons and 3 refiner lines. Project program P2 fully achieved the mill's objectives: lower summertime effluent temperature (reduced by 4.1°C), lower wintertime steam consumption (reduced by 4.4 t/h) and lower TMP white water temperature (reduced by 2.3°C). Program P3 appears promising but resulted in an increased summertime effluent temperature (+2°C). It reduced fresh water consumption by 35% by recirculation of vacuum pump seal water. The results from programs P1 and P4 were interesting but offered less potential than P2 and P3. Project program P1 required two indirect exchangers with a ΔT_{min} of 15 °C, which is probably not feasible at the mill. Program P4 yielded less interesting results than P1 for comparable equipment (press section water treatment).

Case		Description
1	Summer, 4 lines	Extraction of 23 streams with $\Delta T_{min} = 15^{\circ}\text{C}$
2	Winter, 4 lines	Extraction of 23 streams with $\Delta T_{min} = 20^{\circ}\text{C}$
3	Summer, 4 lines, with vacuum pump seal water recirculation	Extraction of 23 streams with $\Delta T_{min} = 20^{\circ}\text{C}$
4	Summer, 4 lines, with recovery of treated press section water	Extraction of 23 streams with $\Delta T_{min} = 20^{\circ}\text{C}$

TABLE 3: CASE DESCRIPTION FOR THE APPLICATION OF THE METHODOLOGY.

Mixing projects (•) and indirect heat exchangers (◆)	P1	P2	P3	P4
• Direct dilution of latency chest outlet stream with surplus tank white-water.	X	X	X	X
• Direct dilution of secondary refiner outlet stream with surplus tank white-water.		X		X
• Replacement of fresh water for the TMP heat recovery units with cooling water from refiner motors.	X			
• Replacement of fresh water for the economizers with cooling water from refiner motors.		X		
• Replacement of fresh water for the TMP heat recovery units with press section treated water.		X		
◆ Heating of high-density tank dilution water with clear white-water from disk filters.	X			
◆ Heating of wash water with pulp leaving the latency chest.	X		X	
◆ Heating of high-density tank dilution water with cloudy white-water from disk filters.			X	

TABLE 4: DESCRIPTION OF PROGRAMS (P1,P2...) OBTAINED FOR EACH CASE

Simulation results : reduction with respect to base case	P1	P2	P3	P4
Summertime effluent temperature	-1.3 °C	-4.1°C	+2°C	-1.8°C
Wintertime steam consumption	-1.8 t/h	-4.4t/h	-2t/h	-2.1t/h
Latency chest outlet temperature	-3.9°C	-2.3°C	-3.7°C	-3.7°C
Summertime fresh water consumption change	-4.5%	-13.5%	-35%	-16%
Summertime effluent flow rate change	-4.6%	-14%	-31%	-17%

TABLE 5: IMPACT OF EACH PROGRAM

Finally, two programs were recommended for a detailed design study to determine their economic feasibility (summarized in Figures 5 and 6).

CONCLUSIONS

Design heuristics have been developed for incorporating mixing projects into thermal pinch analysis techniques for a TMP-newsprint mill, making it possible to conceive heat exchanger networks including mixing of process streams.

Pinch analysis, including the design heuristics, was applied and two programs were recommended to the mill. If implemented, either of the two programs would attain the mill process objectives, i.e. improve the energy efficiency of the mill such that the effluent temperature in summertime would be reduced (from 41.1 °C to 37 °C), the steam consumption in wintertime would be reduced (from 60.5 t/h to 56.1 t/h), and the TMP process circuits would operate at a lower temperature (from 93.9 °C to 91.6 °C). The projects contained in the programs include a combination of those from process studies, and those deduced from pinch analysis. A significant finding of this work was to confirm that a process study is an important first step before pinch analysis. The constrained pinch analysis is appropriate when obvious and traditional solutions have been applied.

Program P2

- a. Direct dilution of secondary refiners outlet pulp and latency chest outlet pulp with surplus white-water chest.
- b. Treatment of press section water (filtrate and shower) to make it usable in paper machine showers; subsequent recirculation of the treated water directly to the warm water tank.
- c. Recirculation of economizer refiners motor cooling water, later to be sent to the warm water tank that feeds the machine showers.
- d. Valorization of excess energy from the heat recovery units following the reduction in their duty.

Figure 5: First recommended program.**Program P3**

- a. Direct dilution of latency chest outlet pulp with surplus tank white-water.
- b. Direct recirculation of some seal water to vacuum pumps until a temperature of 55°C is achieved
- c. Reusing excess seal water as heated fresh water in the TMP heat recovery units and the economizers. As this warm water is used in the showers, a separate study should determine if the vacuum pump water can be used as it is or whether a purification stop is required.
- d. Using some of the water saved by recirculation to cool the effluent stream during the summer down to a value acceptable by the treatment unit. This cooling is not necessary during the winter.
- e. Indirect heat exchanger to heat the high density chest dilution water with cloudy white-water from the disk filters.

Figure 6: Second recommended program.**REFERENCES**

- JACKSON M., WILD N.W. (1999). Fabrication de la pâte mécanique. Réduction des coûts énergétiques dans l'industrie des pâtes et papiers, chapitre 6. PAPRICAN, 113-137.
- FPAC, Forest Products Association of Canada, (1998): Tables to energy monitoring report.
- LEROY, C., POULAIN, B., BÉDARD, S., LEGAULT, A. (2000). Étude d'intégration des procédés réalisée à l'usine de Smurfit-Stone à La Tuque. Presented at Colloque Énergie de l'AIFQ by CANMET (LRDEC) Ressources Naturelles Canada, November 2nd 2000, Québec, Canada.
- LINNHOFF, B. (1978). Synthesis of heat exchanger networks : II. Evolutionary generation of networks with various criteria of optimality. AIChE Journal, 24, (4), 642-654.
- NOËL, G. (1995). Pinch Technology Study at the Donohue Clermont Newsprint Mill. Pulp and Paper Canada, 96, (7), 38-41.
- NOËL, G. (1998). Project Design in Energy Efficiency Using Pinch Analysis, Pulp and Paper Canada, 99, (12), 103-105.
- SCHAAREMAN, M., VERSTAETEN, E., BLAAK, R., HOOIMEIJER, A., CHESTER, I. (2000). Energy and water pinch study at the Parenco paper mill. Paper Technology, February 2000, 47-52.

ARTICLE 2

Novel Design Approach for Simultaneous Energy and Flow Reduction Based on Pinch Analysis with Stream Mixing

Sébastien Lafourcade and Paul Stuart

Abstract

Capital intensive industries such as pulp and paper must be committed to improving their operations over the long-term, in a manner leading to minimum environmental impact. Consistent with this goal, a design methodology is proposed here based on thermal pinch analysis which allows for stream mixing, for identifying long-term programs which achieve simultaneous flow and energy reduction. The overall framework for the design methodology takes into account current techno-economic objectives, their variation over time, and eventual opportunities for the implementation of zero effluent operation. The methodology is illustrated by application at a TMP-newsprint mill.

1. Introduction

Each year the pulp and paper industry faces increasingly stringent environmental regulations and permit requirements. It is critical that mills design process changes for simultaneous reduction of water and energy consumption over the long-term, in order to meet these environmental requirements at minimum cost.

The Kyoto protocol, ratified in Canada but not yet manifested in regulation, will undoubtedly influence mill planning activities in the coming years. Attempts by mills to reduce energy consumption have historically been motivated by the desire to achieve energy cost reductions in the short term, but now these measures are becoming part of the industry's longer-term strategic planning. Reducing water consumption in process operations is also an important strategic objective which will allow mills to meet longer-term effluent objectives cost-effectively. In the case of integrated newsprint mills, the ultimate goal of zero effluent treatment operation is technically feasible, and should be considered an important ultimate objective. By considering these important goals, the pulp and paper industry is demonstrating a sustained commitment to minimum environmental impact manufacturing.

Thermal pinch analysis has become an indispensable method to tackle industrial energy issues [8]. Originally employed as a method for the design of heat exchange circuits, it has evolved into a more generalized methodology for the energy-efficient design of new facilities and for retrofitting existing systems [7]. One of the main shortcomings with the thermal pinch technique is that it only considers non-contact heat exchange, and does not take heat exchange by stream mixing into consideration. Heat and mass transfer interactions for a given process are not systematically taken into account in the technique. Thus in its classical form, thermal pinch analysis is not well-suited for the identification of opportunities for simultaneous reductions in water and energy consumption.

Thermal pinch analysis has been used for several industrial applications, in particular with respect to energy targeting [5], the design of heat exchange networks [10], overall site analysis including reductions in greenhouse gas emissions [1], and for retro-fitting existing energy networks [3][9]. An analogous mass pinch analysis has been developed [4], however few studies have focused on the simultaneous reduction of energy and flow using pinch analysis. Savulescu et al. [12] suggested a method to improve flow networks that is based on composite curves and the mixing of similar streams, but the method excludes exchanges due to the mixing of hot and cold streams. Savulescu et al. [11] proposed a methodology whereby heat and mass analyses are performed separately, and then combined afterwards. Berntsson et al. [2] used thermal pinch analysis to extract surplus energy in order to carry out effluent reduction scenarios. However, in none of these cases was a simultaneous analysis carried out. In each case, pinch analysis was used in its classical form with its inherent limitations.

In this article, we present a novel approach based on thermal pinch analysis which allows for heat exchange by stream mixing, in a practical framework to address short-term flow and energy reduction goals from a long-term perspective. This new methodology is applied for the case of eventual zero effluent operation in a newsprint mill.

2. Summary of Overall Framework

In order to achieve minimal energy consumption and eventually zero effluent operation, the proposed design approach involves the application of a simultaneous flow and energy analysis. The framework also considers short-term objectives based on long-term planning, as well as the variation of techno-economic constraints and environmental regulations over time. This approach would be implemented in 3 steps as illustrated in Figure 1a:

- Step 1: The implementation of in-plant improvement projects and technologies that have already been proven in industry. The technological risk of these projects is low.
- Step 2: The implementation of in-plant improvement projects and technologies that may or may not have been widely implemented in industry, and that are associated with innovative procedures or technologies. This approach typically considers projects having some level of risk.
- Step 3: The implementation of projects necessary for zero effluent and minimal energy consumption. The risk is higher in this case.

The key criterion for establishing the capital sending program resulting from Step 1 is the return on investment (ROI), which depends on the company's investment priorities, project capital costs, and the economic context including energy costs. The technical program associated with the ROI criterion is based on factors which change over time, including the real or perceived risks associated with nearly-proven flow and energy saving technologies. Mills should execute Step 1 every few years and re-establish their energy and flow reduction program.

Figure 1b indicates a point in time where major environmental constraints become the driving force for energy and flow reduction. This refers to the situation where a mill requirement contained in a regulation or permit makes it more cost-effective to achieve zero effluent operation rather than to treat effluent for discharge into receiving waters.

For Steps 2 and 3, the key criterion for the capital spending program is minimum project cost, since at this point, process changes are essential for continued operation (meeting environmental regulations is “the cost of doing business”). Thus a mill is more likely to accept risk in order to reduce the overall cost of the environmental project.

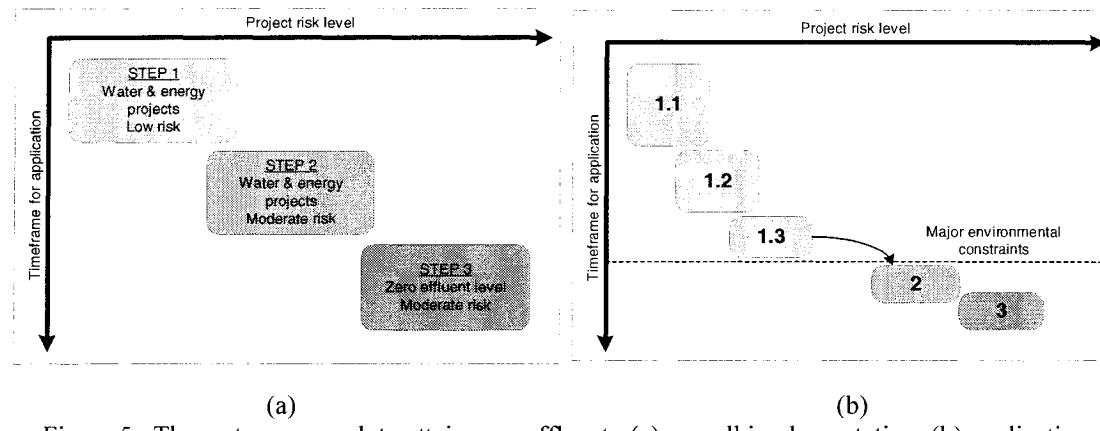


Figure 5 : Three-step approach to attain zero effluent ; (a) overall implementation, (b) application.

3. Study Objectives

The objective of this work was to develop a design methodology for the simultaneous analysis of water and energy, involving a novel application of thermal pinch analysis. The application of this methodology should lead to improvement programs aimed at achieving minimum energy consumption, and zero effluent operation for the case of integrated newsprint mills. The framework should allow an industrial site to meet specific short-term goals using a long-term perspective. The technological solutions, associated costs, implementation of projects over time, and techno-economic constraints facing the mill should be considered within the framework.

In this article, the development of the methodology is presented. This includes the 4 steps as summarized in Figure 2: 1) formulation of the thermal pinch based methodology for identifying process strategies for energy and flow reduction, 2) case study in a TMP newsprint mill, including 3) a sensitivity analysis and 4) application for the goal of zero effluent operation. Techno-economic analysis, generalization to newsprint processes and qualitative study of zero effluent problem will be addressed in future work.

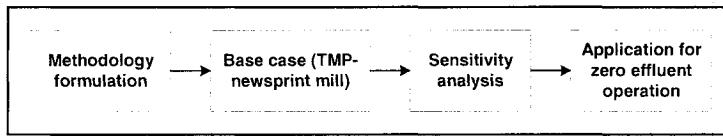


Figure 6 : Summary of methodology development.

4. Formulation of the methodology

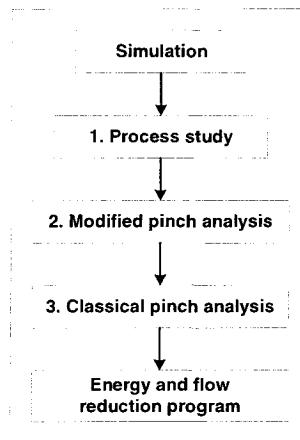


Figure 7 : The 3 phases of the flow and energy analysis methodology.

The 3 phases of the methodology for the flow and energy analysis are summarized in Figure 3. First, an open-ended process study identifies conventional projects and takes the process specifics into account. Next, a modified pinch analysis identifies stream mixing opportunities for flow and energy reduction. Finally, a classical pinch analysis identifies indirect heat exchange projects.

Thermal pinch techniques

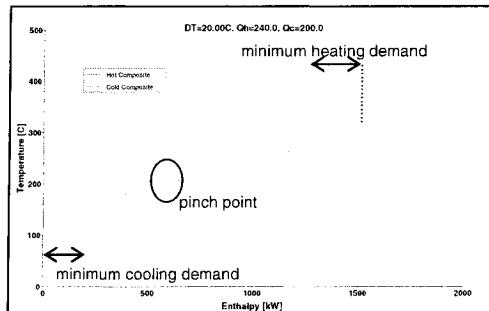


Figure 8 : Example of composite curves.

Figure 4 shows the typical results of the pinch analysis. In enthalpy-temperature diagram, the hot composite curve represents the amount of available heat and the cold one represents the amount of required heat. At the pinch point, the two curves are separate by the minimum temperature difference required in the process heat exchangers, ΔT_{\min} . The layout of the curves provides the energy targets of the process, namely the minimal required heating and the minimal required cooling.

Process Simulation

The process simulation comprises mill-wide steady state heat and mass balances under various process operating scenarios, which are necessary for data extraction in the thermal pinch analysis, and which is useful to later assist in the evaluation of mill-wide impacts due to proposed energy and flow reduction projects. The simulation must be validated, either formally through data processing and reconciliation techniques, or at least by consultation with mill personnel.

Phase 1: Process Study

The process study allows for the identification, by inspection or by benchmarking, of specific projects within a process that may fall outside the pinch analysis domain. Three major types of improvement projects are considered:

- proven technology projects (e.g., installation of a more energy-efficient piece of equipment),
- energy and flow reduction projects that cannot be identified by pinch analysis (e.g., potential to use the excess energy dissipated by certain types of equipment such as vacuum pumps), and
- advanced modernization projects (e.g., emerging or risky technologies that have not yet been widely implemented such as ultrafiltration membranes)

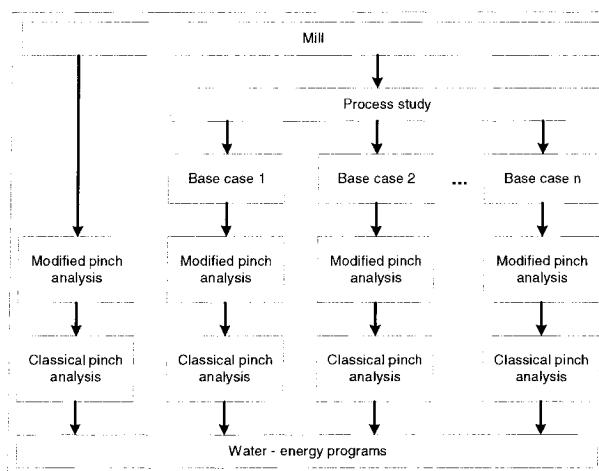


Figure 9 : Development of water-energy improvement projects.

Those projects or combinations of projects that are retained become “Base Cases” for the subsequent phases summarized in Figure 5.

Data Extraction

Data extraction must be performed for both the thermal pinch analysis with stream mixing, and the classical pinch analysis. Few guidelines exist for data extraction, and good process knowledge is critical in order to address this step appropriately. The hot and cold streams involved in heat exchange processes are extracted, along with mixing streams. The two sets of extracted streams must meet requirements which may be different for the two phases. Considerations for data extraction include threshold values for potential energy transfer and temperature gradients (below which streams are not extracted), number of streams extracted, separation according to processes or departments, etc.

Phase 2: Thermal pinch analysis with stream mixing

The modified thermal pinch analysis consists of 5 steps as follows:

1. extraction of streams from the process simulation, which has been modified by the implementation of projects used to create the different base cases,
2. generation of a classical heat exchange network using $\Delta T_{min} = 0^{\circ}\text{C}$,
3. application of design rules related to process and to techno-economic factors, in order to identify heat exchange opportunities that can involve stream mixing,
4. process evaluation of the selected mixing projects, including by their implementation in the process simulation,
5. identification of possible stream mixing projects to be considered in subsequent steps.

Phase 3: Classical pinch analysis

The classical thermal pinch analysis also consists of 5 steps as follows:

1. extraction based on the simulation, which has been modified by the implementation of the process study projects and the retained mixing projects,
2. generation of a classical heat exchange network for a value of ΔT_{min} to be determined based on the process,
3. application of design rules related to the process and to techno-economic factors in order to select the indirect exchangers of interest,
4. evaluation of the selected indirect heat exchange projects,
5. implementation of the retained indirect heat exchange projects in the process simulation to evaluate potential mill-wide impacts.

Flow and Energy Reduction Projects

Energy and flow reduction programs thus include the following projects: those derived from process analysis, stream mixing projects, and indirect heat exchange projects. Several programs may be obtained for the same case study, depending on the results of the classical and modified analyses. These must each be analyzed holistically to establish their combination that best meets the mill’s ROI objective.

5. Case Study

The methodology was applied at an integrated thermo-mechanical pulp (TMP) newsprint mill, located in northern Québec (Canada), which produces 550 tons/day of newsprint [6]. In addition to the objectives related to demonstrating the proposed methodology, the case study mill had 3 process objectives: to reduce the temperature of the mill effluent in summer, to reduce the steam consumption in winter, and to reduce the overall temperature of the TMP process streams.

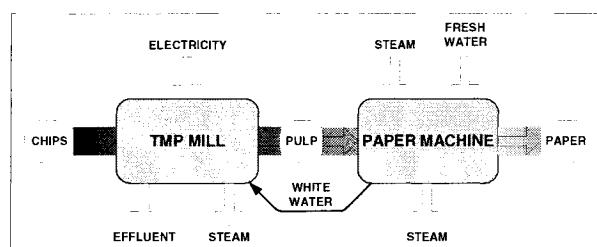


Figure 10 : Simplified diagram of an integrated TMP newsprint mill.

Figure 6 presents a schematic of a generic TMP newsprint mill, which is characterized by high water usage, high electrical energy and steam consumption levels, as well as by high quantities of low grade residual energy in the process. Due to the high level of integration of these processes, the flow and energy interactions at the mill are significant, and heat transfer by stream mixing is a common practice.

Following the process study portion of the methodology, two additional base case were identified. One was based on a project involving steam recovery system at the TMP plant, and the other project involved vacuum pump seal water recirculation. The two next phases in the methodology were therefore applied to four case studies: two scenarios based on the initial mill configuration (summer and winter), plus two base case identified by the process study. The parameters used for the classical and modified pinch analyses are displayed in Table 1. The threshold values for transferred energy (Q_{min}) and temperature gradient (ΔT^*) were selected based on a compromise between the number of extracted streams and recuperation potential. The analysis encompassed most of the mill, including the process as well as the water, heating, and condensate networks. The value of ΔT_{min} for the modified analysis was based on the principle of direct exchange, and that for the classical analysis was determined from the difference in average temperatures observed in the process exchangers. The software program *Super Target 5* from the company Linnhoff March was used to generate the heat exchange networks for both phases.

Table 3 : Parameters used for phases 2 and 3 of the methodology (modified and classical pinch analyses).

Parameters	Modified Analysis	Classical Analysis
Q_{\min}	900 kW	900 kW
ΔT^*	none	none
scope	entire mill	entire mill
ΔT_{\min}	0°C	20°C

Figure 7 illustrates 3 mixing configurations that can be considered to replace an indirect exchanger (Figure 7a). 1 and 3 are sources (ex.: fresh water intake, effluent), 2 and 4 are applications (ex.: warm water use, effluent treatment) and “M” is a mixing point.

- mixing with reallocation (Figure 7b) : after mixing, the flow is redirected towards the initial applications.
- mixing without reallocation (Figure 7c) : the total mixed volume is sent towards a single application. This option may require a complementary mixing system to meet the needs of the remaining application.
- recirculation (Figure 7d) : this is a specific case of mixing without reallocation, whereby the source of one stream and the application of the other stream are eliminated. Typically, recirculation would occur between an effluent stream and a fresh water stream that needs to be preheated.

Table 4 : Design Considerations for mixed stream exchangers (modified pinch analysis) and for indirect heat exchangers (classical pinch analysis).

Modified Analysis	Classical Analysis
The heat exchanger with stream mixing does not breach pinch guidelines.	The indirect heat exchanger does not breach pinch guidelines.
Mixing does not excessively contaminate (dissolved solids, suspended solids, temperature) either stream in its final application.	Heat exchange is technically feasible and practical (e.g. accessibility of the streams)
When the mixed streams are recycled, the quality of the recycled stream must be acceptable for the application. If treatment is required, then this must be considered and technically feasible.	The mixing of streams is feasible from a geographical point of view.
Fresh water is not used for an application that requires lower quality water.	
The mixing of streams does not result in loss of fibers or chemical products.	
The mixing of streams is feasible from a geographical point of view.	

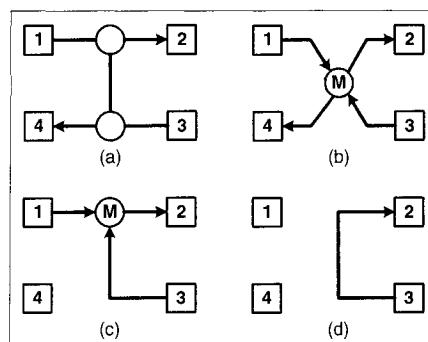


Figure 11 : Process alternatives for converting an indirect exchanger in a stream mixing.

For these three types of mixing, the quality of water required for each receiving application must be evaluated based on process knowledge, industry practice, and the process fundamentals. When stream treatment was necessary, the potential mixing scenario can be selected only if the treatment is technically feasible. A set of rules developed for the selection of mixed streams is summarized in Table 2. The selection of indirect heat exchange projects was subject to fewer constraints (table 2). One critical factor is the use of heat exchangers for streams containing a high concentration of fibers.

Out of the 4 energy and flow reduction programs obtained in the case of the TMP-newsprint case study mill, 2 programs met all 3 specific mill objectives and furthermore, they identified flow and energy reduction projects that are compatible with the long-term goals of the mill. At this stage of the work, costs were not estimated. Instead, hypotheses were made based on process knowledge and available technologies. For example, stream mixing is considered less expensive than a corresponding indirect heat exchanger. Another important economic consideration was the eventual cost of water treatment. The techno-economic elements brought to light in this study component will be systematically addressed in future work.

Comparison with the classical application of thermal pinch analysis

A classical pinch analysis was applied at the case study mill, and the results were compared to those obtained from the application of the modified methodology. The parameters used for the analysis are presented in Table 3. The application of a classical pinch analysis obviously leads to a program involving indirect heat exchangers, does not yield any opportunities for effluent reduction, and does not consider the potential to recuperate energy from certain pieces of equipment.

Table 5 : Parameters used for the application of a classical pinch analysis alone.

Parameters	Classical analysis alone
Q_{\min}	900 kW
ΔT^*	none
Extracted streams	Warm water network and streams related to specific mill objectives
ΔT_{\min}	5 and 28°C

6. Sensitivity analysis

The objective of the sensitivity analysis was to vary critical study parameters in order to observe in a qualitative way, their impact on the results, and gain a better understanding as the first step towards generalization of the methodology.

The parameters that were manipulated for the modified and classical pinch analyses are summarized in Table 4: threshold values of transferred energy (Q_{\min}) and temperature (ΔT^*) for an extracted stream, the imposed temperature differences within the network (ΔT_{\min}), the scope of the study, and the extraction of « non-conventional » streams (chip flow, warm air streams, etc.). The results from the pinch technique, including the composite curves and the types of projects obtained, were evaluated.

Table 6 : Parameters manipulated for the sensitivity analysis

Parameters	Values
Q_{\min} (kW)	0, 900, 1500 (kW)
ΔT^* (°C)	0, 10, 20 (°C)
ΔT_{\min} (°C)	0, 15, 20, 25 (°C)
Scope of the study	entire mill, TMP plant, paper machine, water network, warm water network
« Non-conventional » streams	yes, no

Relationship between the resulting projects and the composite curves

In order to understand the sensitivity analysis results, the structure of the composite curves has first to be studied. Figure 8 shows the composite curves obtained for the base case. The pinch point results from the TMP plant streams. Above the pinch point, there are machine condensates, and below, there are residual energy streams (warm air and effluent), fresh water streams, and other streams from the water network.

Whether for the modified or the classical analysis, vertical heat exchanges are favored during network construction. Therefore, the identified exchanges are closely linked to the shape of the composite curves. Four large project groupings were identified based on the experimental results. They correspond to the zones indicated in Figure 8, summarized as follows:

- (1) *direct or indirect exchanges between condensates (above the pinch)*: typically already existing in the mill.
- (2) *direct exchanges between TMP plant streams (around the pinch zone)*: the resulting mixing projects are not new, but rather confirm the current mill configuration.
- (3) *direct or indirect exchanges between warm air and fresh water/water-glycol (below the pinch)*: mixing is not possible due to the nature of the streams, and indirect exchanges between these streams already exist at the mill.
- (4) *direct or indirect exchanges between the effluent and fresh water (below the pinch)*: these are the most promising opportunities like effluent stream to the machine's warm water loop.

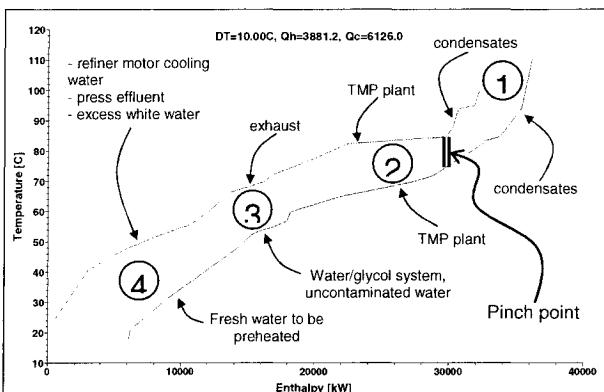


Figure 12 : Composite curves for the base case

In each of these groupings, three or four projects are predominant, and they meet the study objectives. The remaining projects are marginal with respect to energy exchanged and based on a preliminary process evaluation, may have process impacts.

Relationship between identified energy and flow reduction projects, and study parameters

The detailed results of the sensitivity analysis are not given here. The conclusions are the following:

- The variation of Q_{min} and ΔT^* result in some arbitrary gains or losses of opportunities, depending on the location of eliminate streams on the curves. The values $Q_{min} = 900 \text{ kW}$ and $\Delta T^* = 0^\circ\text{C}$ are the best compromise between keeping opportunities and reducing the problem size (i.e. number of streams to be extracted).
- Regarding the modified analysis, $\Delta T_{min} = 0^\circ\text{C}$ insure the best opportunities and the best programs. Regarding the classical analysis, the sensitivity analysis alone does not allow us to conclude and other criteria, like techno-economic inputs, must be used.
- Regarding the modified analysis, the elimination of « non-conventional » streams results in more opportunities. Indeed these streams, which finally are not giving valuable projects, hide better opportunities.
- The breakdown of the analysis according to department is valuable for both modified and classical analysis. Better programs are obtained by performing the analysis in TMP plant and in water network in parallel.

Parameters for the application of the Phase 2 of the methodology

Table 5 gives the parameters for the modified pinch analysis for best projects programs.

Table 7 : Final parameters for modified pinch analysis

Parameters	Values
Qmin (kW)	900 (kW)
ΔT^* (°C)	0 (°C)
ΔT_{\min} (°C)	0 (°C)
Scope of the study	TMP plant and warm water network
« Non-conventional » streams	no

Modification of the application of Phase 3 of the methodology

Phase 3 of the methodology (“classical analysis”) is applied to the entire mill in order to generate a network from which indirect heat exchange projects can be selected to meet the flow and energy objectives. The sensitivity analysis showed that the projects identified by the process study and the modified pinch analysis meet, for the most part, these objectives. Therefore the classical analysis, applied in the framework described above, is not effective in this context.

However, after the modified analysis step was completed, either the energy goals were not entirely met (e.g., insufficient reduction of steam in winter), or undesirable side effects occurred (e.g., new heating demands). It would therefore be more advantageous to design a network to meet those demands specifically.

7. Long-term water-energy reduction program

The methodology for flow and energy reduction has been developed for a TMP newsprint mill. It will be now apply in the perspective of achieving zero effluent operation.

Zero effluent operation

The long-term objective of integrated newsprint mills should be to implement zero effluent operation over the long-term, in the most cost-effective manner. The chemical load added to mechanical pulping and newsprint processes is relatively small, and thus the build-up of chemicals can be controlled at a reasonable cost. Thus in the longer-term, it may likely be less costly to treat-and-recycle effluent than to treat-and-discharge effluent in the case where a low concentration of a single parameter can be difficult and expensive to achieve. The Phase 3 methodology was thus considered for identifying strategies to obtain zero effluent operation, however have yet to be quantitatively addressed.

Two process strategies were selected to examine this possibility: 1) effluent segregation, ultrafiltration membrane treatment, and effluent recirculation back to process, and 2) effluent evaporation. Membrane treatment is a flexible option that permits treatment of a wide range of process streams. This technology is currently being employed in a small number of applications in the pulp and

paper industry. On the other hand, evaporation is commonly used at chemical pulp mills. Two Canadian market mechanical pulp mills currently employ evaporator technology to operate with zero effluent.

Table 6 lists the ideal conditions for the mill to reach to consider either of the two strategies. In both cases, the total effluent flowrate should be minimized in order to reduce the size, and hence the cost, of the equipment required for zero effluent operation. For evaporation, the final effluent temperature should be maximized for the best efficiency. For treatment and recirculation using membranes, there must be segregation according to contamination levels, as well as thermal segregation.

Table 8 : Target conditions for considering the implementation of zero effluent operation

Options	Effluent flow	Effluent temperature
Effluent evaporation	Minimum	Maximum
Treatment and recirculation	Minimum	Thermal segregation

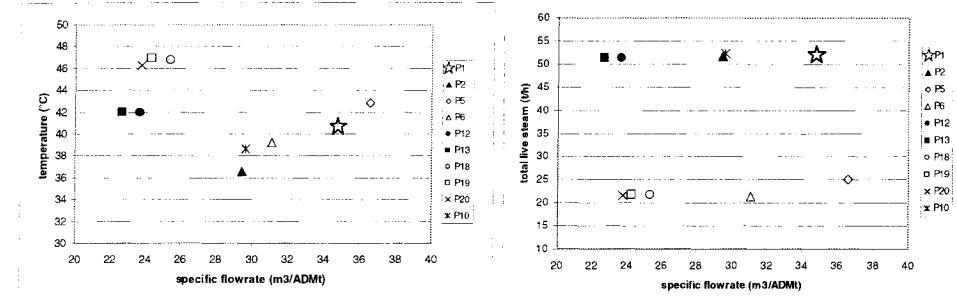
Application of the process study and modified pinch analysis (Phase 1 and Phase 2)

The overall methodology was applied to a TMP-newsprint mill. The process study yielded 8 base cases, and the application of the modified thermal pinch analysis resulted in a total of 26 possible improvement programs. An initial screening reduced this number to 10, summarized in Table 7. The results from these 10 programs, before the classical pinch analysis step, are presented in Figures 9 (summer) and 10 (winter).

Table 9 : Description of the 10 selected programs

Projects	P1	P2	P5	P6	P1	P1	P1	P1	P1	P2
TMP steam recuperation ¹		X	X					X	X	X
Vacuum pump seal water recirculation ¹					X	X	X	X	X	X
Excess white water purged at TMP plant ¹				X			X	X	X	X
Recirculation of cooling water from the TMP motors ²	X		X	X		X		X	X	X
Recirculation of the treated pressate ²	X		X	X						
White water chip washing ²										X

¹ : projects derived from the process study / ² : mixing projects derived from the modified analysis



(a)

(b)

Figure 13 : Impacts of the improvement programs before the classical pinch analysis step (summer); (a) effluent temperature and (b) steam consumption

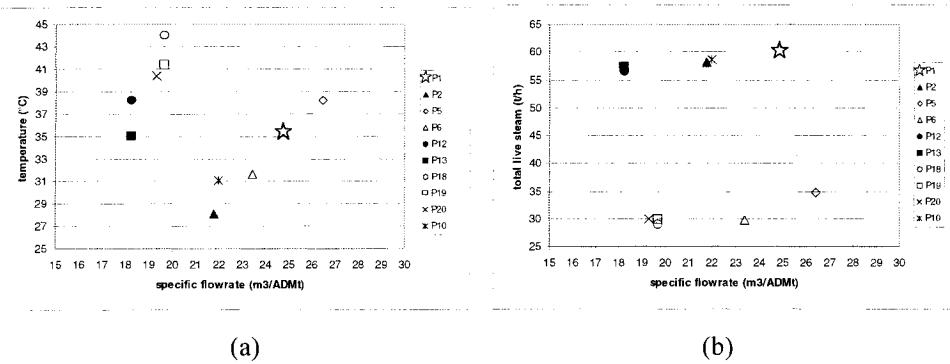


Figure 14 : Results of the improvement programs before the classical analysis step (winter); (a) effluent temperature and (b) steam consumption

The P1 program represents the current mill configuration. All programs, except P5, result in a significant reduction in the effluent flowrate. There are two reduction levels: the first level, around 15% (P2, P6, P10), results mainly from recirculation projects derived from the modified analysis, and the second level, around 30% (P12, P13, P18, P19, P20), results mainly from the recirculation of vacuum pumps sealing water, a project identified during the process study. For practical reasons, this last project could not have been identified by pinch analysis, which illustrates the benefit of performing a preliminary process analysis. Two levels can also be noted with respect to effluent temperature, for similar reasons. The recirculation projects derived from the modified analysis result in a reduction in effluent temperature, while the vacuum pumps water recirculation increases it. There is a complementary aspect to these two analyses, which provide two different alternatives for the application of zero effluent strategies: one involving recirculation, the other evaporation. From a steam consumption perspective, there are also two reduction levels. The first corresponds to the current consumption level for the mill (P1, P2, P12, P3, P10), and the second corresponds to a reduction of around 50% (P5, P6, P18, P19, P20). The difference between these two groups is due to the TMP plant steam recovery project, which has a major impact on the consumption of live steam. In comparison, the other projects only result in marginal reductions. If a comparison is made between two programs that only differ with respect to the steam recovery project (i.e., P2 and P6, P12 and P18), it is clear that steam recovery results in a significant increase in the flowrate and temperature of the effluent, due to the reject of a TMP condensate. The trends in the winter results are approximately the same as those observed in summer. However, in winter, the recirculation projects have a greater impact on the energy consumption, since more steam is required to preheat fresh water than in summer.

Application of the classical pinch analysis (Phase 3)

The projects obtained allow reaching target conditions for the implementation of zero effluent operation. As mentioned earlier, the classical pinch analysis must then be applied to address the energy goals that were not entirely met or undesirable side effects occurred. A third type of objectives occurs

when zero effluent strategy is not to be implemented right after the water and energy program. For example, for P20, effluent must be cooled to continue to operate, waiting for the evaporation project to be implemented. Table 8 summarizes the resulting design objectives for the network. Since the application of the classical analysis requires technical and economic parameters, this last phase of program construction will occur during the techno-economic analysis.

Table 10 : Objectives of the classical thermal pinch analysis for each selected program

Projects	P1	P2	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
Effluent cooling	X		X	X		X	X	X	X	X	X	X
TMP loop cooling	X	X			X	X	X					
Heating of fresh water for showers	X		X									
Heating of machine white water			X	X					X	X	X	
Heating of TMP facility (winter)			X	X					X	X	X	
Heating of drying air	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Potential for zero effluent implementation

In addition to the potential reduction in energy consumption, two groupings of selected programs also facilitate the implementation of zero effluent strategies, which involve a significant reduction in effluent, an increase in the effluent temperature for evaporation (P12, P13, P18, P19, P20), or a decrease for thermal segregation (P2, P6 et P10). Although the differences between the programs within a single grouping can be subtle, they become more apparent in the techno-economic study.

8. Conclusions

A practical design methodology based on thermal pinch analysis allowing for stream mixing has been proposed to identify simultaneous, long-term flow and energy reduction projects. There are three phases involved in the methodology: an open-ended process study, a modified pinch analysis to identify heat exchange projects by stream mixing, and a classical pinch analysis to identify indirect heat exchange projects. The framework for the application of the methodology was defined, which takes into account current techno-economics, their variation with time, and possible future environmental requirements.

In this article, the first part of the development of the methodology is presented via its application to a TMP newsprint mill. The results of the study are as follows:

- design rules specific to this type of mill were developed to support the methodology,
- a sensitivity analysis helped to highlight the important parameters in the methodology and to generalize certain results,
- flow and energy reduction programs were developed which were consistent with eventually achieving zero effluent operation in the long term.

9. Acknowledgements

This work was supported by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) Environmental Design Engineering Chair at École Polytechnique. We would like to thank the mill and corporate personnel of Abitibi-Consolidated Inc. for their close collaboration during all phases of this work.

10. References

- [1]. H. Axelsson, A. Asblad, and T. Berntsson. “*New methodology for greenhouse gas reduction in industry through improved heat exchanging and/or integration of combined heat and power*”. Applied Thermal Engineering, 19, 1999, pp. 707-731.
- [2]. T. Berntsson, C. Bengtsson, and R. Nordman. “*Utilization of excess heat in the pulp and paper industry - A case study of technical and economic opportunities*”. Applied Thermal Engineering, 22, 2002, pp. 1069-1081.
- [3]. A. Carlsson, P.-A. Franck, and T. Berntsson. “*Design better heat exchanger network retrofits*”. Chemical Engineering Progress 89, 1993, pp. 87-96.
- [4]. M.M. El-Halwagi and V. Manousiouthakis. “*Synthesis of mass exchange networks*”. AIChE Journal, 35, 1989, pp. 1233-1244.
- [5]. S.G. Hall, S. Ahmad, and R. Smith. “*Capital cost targets for heat exchanger networks comprising mixed materials of construction, pressure ratings and exchanger types*”. Computers & Chemical Engineering, 14, 1990, pp. 319-335.
- [6]. S. Lafourcade, J. Labidi, R. Koteles, C. Gélinas, P.R. Stuart. “*Thermal pinch analysis with process streams mixing at a TMP-newsprint mill*”. Pulp and Paper Canada, 104 (12), 2003, pp. 74-77.
- [7]. B. Linnhoff. “*Use pinch analysis to knock down capital costs and emissions*”. Chemical Engineering Progress, August 1994, pp. 32-57.
- [8]. B. Linnhoff, D.W. Townsend, D. Boland, G.F. Hewitt, B.E.A. Thomas, A.R. Guy, and R.H. Marsland. User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy. The Institution of Chemical Engineers, Rugby, U.K., 1982.
- [9]. R. Nordman and T. Berntsson. “*New pinch technology based HEN analysis methodologies for cost-effective retrofitting*”. Canadian Journal of Chemical Engineering, 79, 2002, pp. 655-662.
- [10]. M.A.S.S. Ravagnani, A.P. Da Silva, and A.L. Andrade. “*Detailed equipment design in heat exchanger networks synthesis and optimisation*”. Applied Thermal Engineering 23, 2003, pp. 141-151.
- [11]. L. Savulescu, B. Poulin, A. Hammache, and S. Bedard. “*Water and energy savings at a kraft paperboard mill using process integration*”. Annual Meeting - Technical Section, Canadian Pulp and Paper Association, Preprints, Pulp and Paper Technical Association of Canada, Montreal, Que., Canada, 2001. pp. 183-186.
- [12]. L.E. Savulescu, M. Sorin, and R. Smith. “*Direct and indirect heat transfer in water network systems*”. Applied Thermal Engineering 22, 2002, pp. 981-988.

ARTICLE 3

NEW TARGETING RULES FOR THERMAL PINCH ANALYSIS WITH STREAM MIXING POINTS

S. Lafourcade, U. Wising, P.R. Stuart

Abstract

This paper presents a method to identify opportunities for stream mixing projects using classical thermal pinch concepts. Normally, classical targeting principles are only valid when considering indirect heat exchangers. New targeting heuristics have been developed to ensure that an indirect heat exchanger can be converted into a stream mixing point or a recirculation of similar performance. These new heuristics have been verified in a case study at an integrated newsprint facility, and it was confirmed that $\Delta T_{\min} = 0^\circ\text{C}$ is the targeting value that gives the best opportunities for stream mixing and recirculation.

Notations

A_{\min}	: minimum exchange area
CP	: grand calorific capacity in $\text{kW}/^\circ\text{C}$
D	: water demand
H	: enthalpy flow in kW
HEN	: heat exchanger network
M	: mass flow in kg/s
Q_c	: cooling demand
Q_{design}	: cooling or heating demand for preliminary network
Q_{hex}	: heat flow exchanged through indirect exchanger
Q_{final}	: cooling or heating demand for the network with mixing points
Q_h	: heating demand
Q_m	: heat flow exchanged through stream mixing
T^{in}	: inlet temperature
T^{out}	: target temperature
T_{cold}	: temperature that refers to a cold stream
T_{hot}	: temperature that refers to a hot stream
T_m	: final mixing temperature
ΔT_{\min}	: minimum allowed temperature difference in the network

Introduction

Background

At a high level of integration, process interactions between water and energy networks increase dramatically, especially in water-based industries. In that context, two approaches can be considered for simultaneous water and energy analysis: automatic or sequential interactions. Automatic methods aim to solve the problem of water and energy reduction using optimization [1]. Sequential interactive methods allow for a more practical approach by introducing hypotheses that simplify the problem and by

involving the user's knowledge at each step of the study. Sequential interactive methods are based on thermal pinch analysis, a proven tool used for heat exchanger network design [2] [3] [4] [5] [6] [7] and energy conservation [9] for greenfield design and retrofitting [9] [10] [11]. Several mass pinch techniques have been developed based on the analogy between energy transfer and mass transfer: mass exchange network design [12], optimal design of washing networks [13], or the association of water sources and water demands [14] [15]. However, these methods face two limitations; first, when there is more than one chemical species, sophisticated optimization tools must be used [16][17], and second, in practice, there is often a lack of models that appropriately describe complex interactions between species.

Several studies for water and energy reduction have been conducted in the pulp and paper industry. Thermal pinch analysis has been used as a basis for water – energy analysis in order to identify and support water reduction projects [18] [19] [20] or to organize water networks [21]. In these studies, water and energy are considered in a cause and effect relation, rather than simultaneously. Savulescu et al. [22] proposed a preliminary methodology to combine thermal and mass pinch. This methodology has not yet been applied, mainly because mass pinch is difficult to apply to a water-based process such as the pulp and paper process. Lafourcade [23] developed a sequential interactive methodology based on pinch analysis, successfully applied in a newsprint mill [24]. This methodology consists of three steps. First, an open-ended process study identifies projects that are recognized as classical opportunities and are applied in similar types of processes. The next step is a modified pinch analysis that identifies stream mixing opportunities for flow and energy reduction. Finally, a classical pinch analysis identifies indirect heat exchanger projects. This methodology provides a mill with a set of project programs to reach its short and long term objectives related to water and energy consumption. The project programs are defined at a pre-feasibility level and more detailed studies are required for the most attractive opportunities. In particular, flow reduction opportunities are identified based on good process knowledge and engineering judgment, but further studies should include an evaluation of contaminant build-ups and their possible effect on the process.

Modified pinch analysis with stream mixing

When the nature of the streams and the process make it possible, stream mixing points can be the most efficient and inexpensive heat exchangers. Moreover, in an industry like pulp and paper, where the streams have a similar nature, there is a favorable environment for heat exchange through stream mixing. The identification of stream mixing points can be accomplished by matching and mixing individual streams based on good engineering knowledge. There is, however, the risk of missing non-intuitive

opportunities, and thus a more rigorous method, based on pinch analysis, should be used to identify all possible options. In practice, an indirect heat exchanger cannot always be converted into a stream mixing point because of certain mass transfer or process constraints such as: immiscibility of streams, risk of contamination, product quality requirements, equipment specification, or material losses. In mass pinch, these constraints are applied at the targeting stage and the problem can become very complex to solve. A less complex option is to apply mass constraints at the design stage.

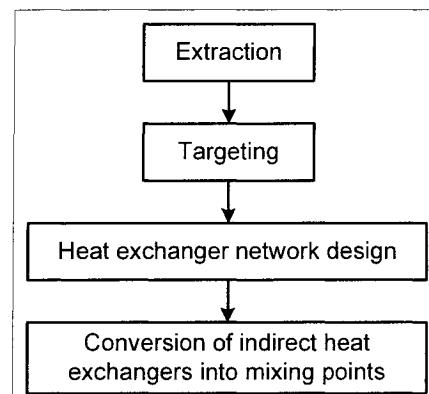


Figure 1: Modified pinch analysis with stream mixing.

A method for pinch analysis allowing for stream mixing, developed by Lafourcade [23], is illustrated in Figure 1. The first three steps are the typical pinch steps of an analysis: data extraction, targeting, and finally, design of the indirect heat exchanger network (HEN). When designing the HEN, the mass constraints are taken into account when choosing between options that have the same thermodynamic benefit. The resulting HEN can be then more “mixing-oriented”. The fourth step is the identification of projects by converting indirect exchangers into stream mixing points. Here mass constraints intervene when an indirect heat exchanger is to be converted into a stream mixing point. If the mixing is not feasible, the heat exchanger remains indirect or is eliminated from the list of possible projects.

Objective

In classical pinch, targeting results from the trade-off between area cost and utility cost. When considering heat exchange by stream mixing, this trade-off is not valid anymore. In a previous case study at a newsprint paper mill, a sensitivity analysis showed that the choice of $\Delta T_{\min} = 0^\circ\text{C}$ yielded the optimal opportunities [24]. In this paper we propose to show that this ΔT_{\min} value is an appropriate targeting heuristic for thermal pinch analysis with stream mixing at newsprint mill.

Basic concepts of targeting

Targeting structures the heat exchanger network design and limits the study to the most cost effective options. It consists of the trade-off between the investment cost related to total heat exchanger area and the energy cost related to utility consumption. First, for a given ΔT_{\min} , hot and cold streams are organized into composite streams in temperature intervals. Next, to simplify the problem, only vertical heat exchangers are considered between composite streams within resulting enthalpy intervals. The total minimum heat exchanger area A_{\min} is estimated from these heat exchangers for the given ΔT_{\min} . Minimum heating and cooling demands are estimated using an energy cascade through temperature intervals. Composite curves and the grand composite curve are the graphical representation of these concepts. The total cost is calculated for several values of ΔT_{\min} , and the optimal ΔT_{\min} corresponds to the minimum cost. Pinch rules and heuristics provide guidance for HEN design to maximize heat recovery, minimize the heat exchanger area, and minimize the number of units.

When considering stream mixing, the notion of minimum area and the classical targeting definition no longer apply, and new targeting rules are needed. The new objective of targeting can be formulated as follows: to set the optimal value of ΔT_{\min} in order to design a HEN where most of the indirect heat exchangers can be converted into stream mixing points without reducing performance. Heat exchanger performance is here defined as the ability to transfer the right amount of heat to attain each stream's target temperature (T^{out}).

Targeting to identify stream mixing

The conversion of an indirect heat exchanger into a stream mixing point has an impact on both the heat exchanger performance and on the targeting rules. There is also an impact related to mass transfer, but for now only the thermodynamic limitations are considered for the feasibility of mixing.

Indirect exchanger vs. mixing point

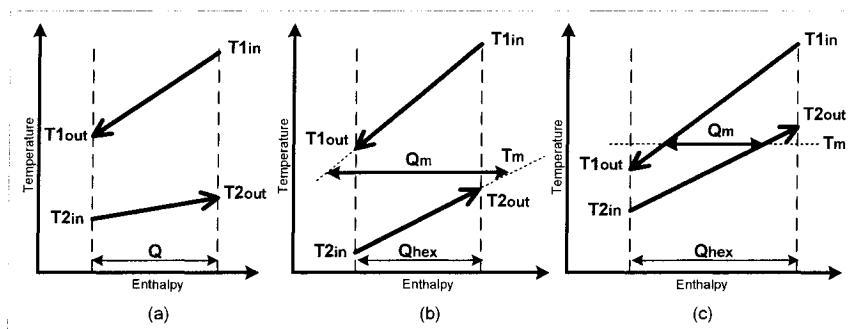


Figure 2: Thermodynamic consideration for an indirect exchanger and a mixing point

Consider an exchange between a hot stream and a cold stream (Figure 2a). Figures 2b and 2c show two different situations when considering stream mixing. Q_{hex} is the energy exchanged with the indirect exchanger and Q_m is the energy exchanged by ideal mixing of the two streams. Q_{hex} and Q_m can be expressed like this:

$$Q_{\text{hex}} = CP_1 \cdot (T_1^{\text{in}} - T_1^{\text{out}}) = CP_2 \cdot (T_2^{\text{out}} - T_2^{\text{in}}) \text{ and } Q_m = CP_1 \cdot (T_1^{\text{in}} - T_m) = CP_2 \cdot (T_m - T_2^{\text{in}})$$

with CP , the stream grand calorific capacity in $\text{kW}/^\circ\text{C}$, T^{in} , the stream inlet temperature, T^{out} , the stream target temperature, T_m , the final mixing temperature given by $T_m = \frac{CP_1 \cdot T_1^{\text{in}} + CP_2 \cdot T_2^{\text{in}}}{CP_1 + CP_2}$.

The relative values of the target temperatures T_1^{out} and T_2^{out} provide the comparison between Q_m and Q_{hex} :

- if $T_1^{\text{out}} > T_2^{\text{out}}$ then $T_1^{\text{out}} > T_m > T_2^{\text{out}}$ and $Q_{\text{hex}} < Q_m$
- if $T_1^{\text{out}} = T_2^{\text{out}}$ then $T_1^{\text{out}} = T_m = T_2^{\text{out}}$ and $Q_{\text{hex}} = Q_m$
- if $T_1^{\text{out}} < T_2^{\text{out}}$ then $T_1^{\text{out}} < T_m < T_2^{\text{out}}$ and $Q_{\text{hex}} > Q_m$

In this context, replacing an indirect heat exchanger by a mixing point is not always of benefit (Figure 2c). The closer the target temperatures T_1^{out} and T_2^{out} , the closer the performance of the stream mixing point will be to the replaced indirect heat exchanger.

Targeting rules for stream mixing

For pinch analysis with stream mixings, the targeting consists of setting the optimal value for ΔT_{\min} in order to design a HEN which can be converted into a stream mixing network by maintaining a similar performance for the individual heat exchangers.

A heat exchanger between two streams with $T_1^{\text{out}} = T_2^{\text{out}}$ can be converted into a stream mixing point without a reduction in performance. In a traditional pinch analysis, vertical heat exchangers are identified for each enthalpy interval between two composite streams. Consequently, if in an enthalpy interval, composite streams have the characteristics $T_1^{\text{out}} = T_2^{\text{out}}$, then the resulting vertical indirect heat exchanger can be converted into a stream mixing point without jeopardizing the performance. This type of stream mixing, which can be identified through the vertical heat exchanger concept, is referred to as vertical mixing. By changing the value of ΔT_{\min} , the temperature boundaries of the enthalpy intervals change. This enables us to find the optimal ΔT_{\min} that maximizes the number of enthalpy intervals in which

composite streams have the characteristics $T_1^{\text{out}} = T_2^{\text{out}}$, i.e., that maximizes the number of vertical mixing opportunities.

Targeting for identifying recirculation

Recirculation derived from stream mixing

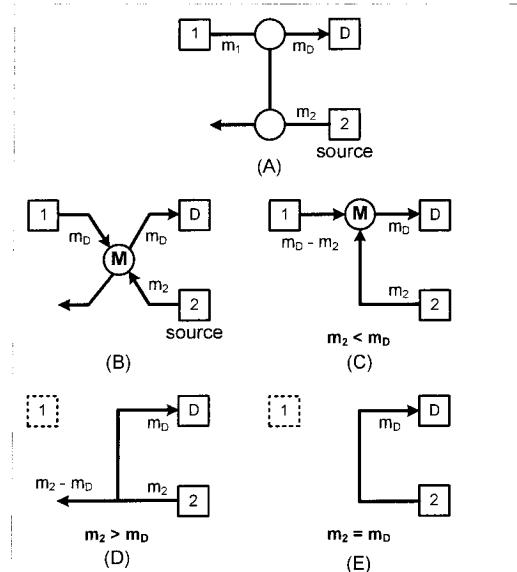


Figure 3: Options to convert indirect exchangers

In order to achieve water flow reduction, a water source can be redirected, partially or totally, to the original application or to a water demand somewhere else in the process. In this paper, these opportunities are referred to as recirculations. From this point of view, cold and hot streams can both be considered as sources and demands. Figure 3 shows an indirect heat exchanger between stream 1 and stream 2 with mass flows m_1 and m_2 , respectively (case A). Stream 1 (e.g., fresh water) satisfies a demand D with a mass flow m_D . Stream 2 is an available source (e.g., effluent). The heat exchanger is converted into a stream mixing point (case B) and the mixing of stream 1 and stream 2 is redistributed to satisfy D. Stream 2 can then replace stream 1 to satisfy D in three different ways:

- If $m_2 < m_D$, stream 2 can partly replace stream 1 (case C)
- If $m_2 \geq m_D$, stream 2 can replace stream 1 (cases D and E)

Depending on mass constraints and stream flows, a stream mixing project can then evolve into a recirculation project.

Targeting rules for recirculation

In the same way as we defined vertical mixing, vertical recirculation can be defined as a recirculation that can be identified through a vertical heat exchanger. The targeting objective is the value of ΔT_{\min} that maximizes the number of vertical recirculation opportunities.

In cases D and E, there is total recirculation, and as a result of $m_1 = 0$, $T_D = T_2^{\text{in}}$. By definition, $T_D = T_1^{\text{out}}$. The condition for converting a vertical indirect heat exchanger into a recirculation with a similar performance is then $T_2^{\text{in}} = T_1^{\text{out}}$. In case C, there is a partial recirculation; only a part of stream 1 is replaced. If streams 1 and 2 have a similar nature ($Cp_1 \approx Cp_2$), T_D is given by:

$$T_D = \frac{m_1 \cdot T_1^{\text{in}} + m_2 \cdot T_2^{\text{in}}}{m_D} = \frac{(m_D - m_2) \cdot T_1^{\text{in}} + m_2 \cdot T_2^{\text{in}}}{m_D}$$

At the targeting step, establishing the value of $(m_D - m_2)$ is impractical because thermal pinch concepts do not deal with mass interactions. Setting up conditions for streams 1 and 2 in order to identify vertical partial recirculation is not an obvious task. Nevertheless, in practice, we want to maximize total recirculation and to favor partial recirculation when $m_2 \gg m_1$. In that situation, case C can be approximated by case E.

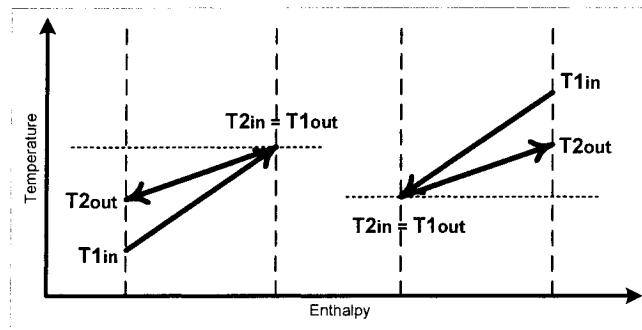


Figure 4: The two thermodynamic situations when vertical recirculation is considered

The optimal ΔT_{\min} is the value that maximizes the number of vertical recirculations, i.e., the value that maximizes the number of enthalpy intervals in which composite streams have the characteristics $T_1^{\text{out}}=T_2^{\text{in}}$ and $T_{\text{demand}}^{\text{out}}=T_{\text{source}}^{\text{in}}$ (Figure 4). This situation arises when the smaller temperature difference occurs in each enthalpy interval, i.e., when the cold composite curve is closest to the hot composite curve.

Application

Real case study

	Streams	Tin (°C)	Tout (°C)	H (kW)
TMP plant	1	65.00	70.00	2050
	2	95.00	85.00	8200
	3	74.40	65.00	9330
	4	75.00	84.00	7510
	5	75.00	83.00	730
	6	60.00	75.00	4050
	7	60.00	35.00	1830
Water network	8	56.00	21.00	5350
	9	60.00	35.00	1690
	10	55.50	35.00	3680
	11	17.00	55.00	5060
	12	17.00	55.00	3080
	13	17.00	134.00	1440

Table 1: Data extraction for the case study

The case study involves an integrated thermo-mechanical pulp (TMP) newsprint mill, located in northern Québec, Canada, which produces 550 tons/day of newsprint. The objectives for this mill were to reduce steam consumption, the temperature and flow of effluent, and the overall temperature of the circuit in one section of the mill. The data extraction focused on two process areas: the TMP plant and the water network (Table 1). Streams 7, 8, 9, and 10 can be considered as water sources and streams 11, 12, and 13 are fresh water demands.

Objectives

The modified pinch analysis with stream mixing was applied as shown in Figure 1. A previous sensitivity analysis showed that the targeting value of $\Delta T_{min} = 0^{\circ}\text{C}$ gave the best results. The goal here is to verify that this assumption is consistent with the theory. The theoretical targeting step is based on the rules presented in the two preceding sections: the optimal ΔT_{min} is the value that maximizes the number of vertical mixings and vertical recirculations. The targeting rules were first applied to the TMP plant and the water network together, and then to the TMP plant alone and to the water network alone.

Targeting results

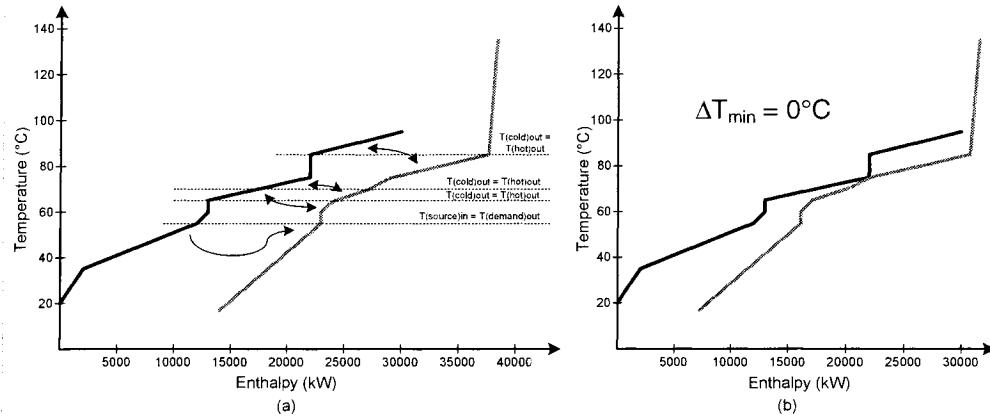


Figure 5: Composite curves (a) and optimal ΔT_{min} identification (b) for the TMP plant and the water network together

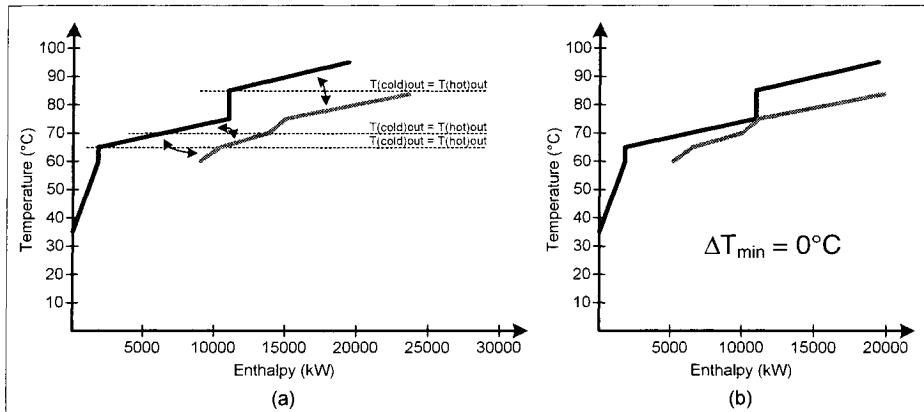


Figure 6: Composite curves (a) and optimal ΔT_{min} identification (b) for the TMP plant

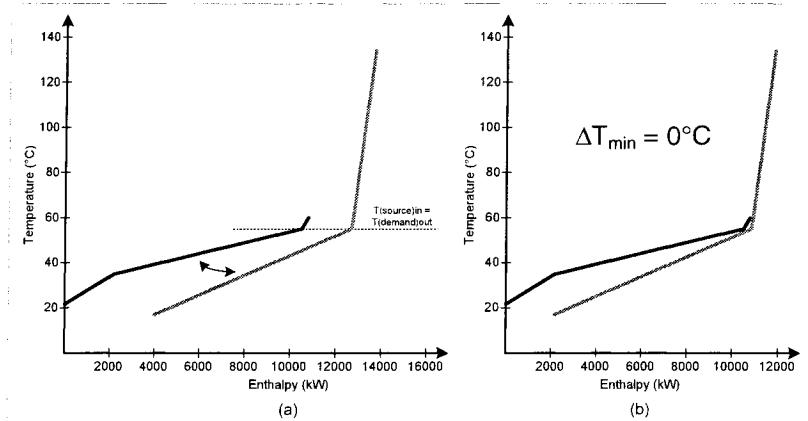


Figure 7: Composite curves (a) and optimal ΔT_{min} identification (b) for the water network

Figure 5a shows the composite curves for the TMP plant and the water network together. The composite streams with the characteristic $T_1^{\text{out}}=T_2^{\text{out}}$ are identified, as are the hot and cold composite streams that have been categorized as sources and demands with the characteristics $T_{\text{demand}}^{\text{out}}=T_{\text{source}}^{\text{in}}$. The cold composite stream is moved relative to the hot composite curve to maximize both the number of vertical mixings and the number of vertical recirculations. This result is obtained for $\Delta T_{\min} = 0^\circ\text{C}$, as shown in Figure 5b. In the same way, Figure 6a shows the composite curves and the composite streams with $T_1^{\text{out}}=T_2^{\text{out}}$ for the TMP plant. In this case as well, the value of ΔT_{\min} that maximizes the number of vertical mixings is 0°C (Figure 6b). Figure 7a shows the composite curves and the composite streams with $T_{\text{demand}}^{\text{out}}=T_{\text{source}}^{\text{in}}$ for the water network. Because this system is composed of only water sources and water demands, the most promising opportunities are recirculation projects. Here the optimal ΔT_{\min} for the water network is the value that maximizes vertical recirculation, that is to say 0°C (Figure 7b).

Discussion

Even though each mill is unique and has specific demands, there are many similarities in both unit operations and process arrangements between newsprint facilities. In a pulp plant, the process entails important recirculation loops resulting in streams having almost the same nature and temperature, such as paper machine circuits in which the temperature level is maintained around 60°C . There are good opportunities for recirculation within the water network since effluents are often emitted at the temperature at which the fresh water make-up is needed. Considering these facts, the streams extracted for the case study are to some extent representative of newsprint process specificities. Moreover, $\Delta T_{\min} = 0^\circ\text{C}$ is always the optimal value to identify vertical recirculation, because of the rule $T_{\text{demand}}^{\text{out}}=T_{\text{source}}^{\text{in}}$. When data extraction is properly done, the heuristic $\Delta T_{\min} = 0^\circ\text{C}$ appears to be valid for pinch analysis with stream mixing in a newsprint mill, although more work is needed to confirm this generalization.

Conclusion

In this paper, it has been shown that classical thermal pinch concepts can be used to identify direct heat exchanger opportunities, i.e., stream mixing points and recirculation points. A new targeting approach, the so-called modified pinch analysis, is proposed to set the optimal ΔT_{\min} that allows the designed heat exchanger network to be converted into stream mixing projects and recirculation projects.

The modified thermal pinch analysis has been applied to a newsprint mill. For the two subsystems studied, the water network and the pulp plant, the optimal value of ΔT_{\min} was found to be 0°C . Thus, in the context of this case study, the targeting assumption that $\Delta T_{\min} = 0^\circ\text{C}$ is justified by theory. Since the extracted streams for the case study may not vary significantly from one mill to another, $\Delta T_{\min} = 0^\circ\text{C}$ is

seen as a proper targeting heuristic for the application of modified pinch analysis in newsprint mills. However, more work is needed to confirm this for every possible configuration of newsprint mill.

References

- [1] PAPALEXANDRI, K.P., PISTIKOPOULOS, E.N. 1994. "Multiperiod MINLP model for the synthesis of flexible heat and mass exchange networks". *Computers & Chemical Engineering: Proceedings of the European Symposium on Computer Aided Process Engineering - 2, Oct 5-7 1992.* 18:11-12. 1125-1139.
- [2] LINNHOFF, B., FLOWER, J.R. 1978. "Synthesis of heat exchanger networks : 1. Systematic of energy optimal networks". 24:4. Jul. 633-642.
- [3] LINNHOFF, B., AHMAD, S. 1990. "Cost optimum heat exchanger networks. 1. Minimum energy and capital using simple models for capital cost". *Computers & Chemical Engineering.* 14:7. Jul. 729-750.
- [4] AHMAD, S., LINNHOFF, B., SMITH, R. 1990. "Cost optimum heat exchanger networks. 2. Targets and design for detailed capital cost models". *Computers & Chemical Engineering.* 14:7. Jul. 751-767.
- [5] POLLEY, G.T., SHAHI, M.H.P. 1991. "Interfacing heat exchanger network synthesis and detailed heat exchanger design". *Chemical Engineering Research & Design.* 69:6. Nov. 445-457.
- [6] ROQUE, M.C., LONA, L.M.F. 2000. "Economics of the detailed design of heat exchanger networks using the Bell Delaware method". *Computers and Chemical Engineering: 7th International Symposium on Process Systems Engineering, Jul 16-Jul 21 2000.* 24:2. Jul. 1349-1353.
- [7] RAVAGNANI, M.A.S.S., DA SILVA, A.P., ANDRADE, A.L. 2003. "Detailed equipment design in heat exchanger networks synthesis and optimisation". *Applied Thermal Engineering.* 23:2. February 2003. 141-151.
- [8] LINNHOFF, B. 1994. *Use pinch analysis to knock down capital costs and emissions. Chemical Engineering Progress.* August 1994. 32-57.
- [9] TJOE, T.N., LINNHOFF, B. 1986. "Using pinch technology for process retrofit". *Chemical Engineering (New York).* 93:8. 47-60.
- [10] CARLSSON, A., FRANCK, P.-A., BERNTSSON, T. 1993. "Design better heat exchanger network retrofits". *Chemical Engineering Progress.* 89:3. 87-96.
- [11] NORDMAN, R., BERNTSSON, T. 2002. "New pinch technology based HEN analysis methodologies for cost-effective retrofitting". *Canadian Journal of Chemical Engineering.* 79:4. 655-662.
- [12] EL-HALWAGI, M.M., MANOUSIOUTHAKIS, V. 1989. "Synthesis of mass exchange networks". *AIChE Journal.* 35:8. 1233-1244.
- [13] WANG, Y.P., SMITH, R. 1995. "Wastewater minimization with flowrate constraints". *Chemical Engineering Research & Design, Transactions of the Institute of Chemical Engineers, Part A.* 73:A8. 889-904 .
- [14] LINNHOFFMARCH. Water pinch.
<http://www.linnhoffmarch.com/software/watertarget/waterpinch.html> (2005)
- [15] HALLALE, N. 2002. "A new graphical targeting method for water minimisation". *Advances in Environmental Research.* 6:3. 377-390.
- [16] PARIS, J. 2000. "Systems approach to system closure in integrated newsprint mills". *Pulp and Paper Canada.* 101:5. May. 34-42.
- [17] SHAFIEI, S., DOMENECH, S., KOTELES, R., PARIS, J. 2002. "System closure in an integrated newsprint mill, practical application of the genetic algorithm". *88th Annual Meeting, Jan 29 2002.* Montreal, Que. Pulp and Paper Technical Association of Canada. A, 183-187.

- [18] BERNTSSON, T., BENGTSSON, C., NORDMAN, R. 2002. "Utilization of excess heat in the pulp and paper industry - A case study of technical and economic opportunities". *Applied Thermal Engineering*. 22:9. June. 1069-1081.
- [19] AIE, 2004. *Process Integration Technologies Implementing Agreement - Process Integration in the Pulp and Paper Industry, Annex III - Final Report*.
- [20] SCHAAREMAN, M., VERSTRAETEN, E., BLAAK, R., HOOIMEIJER, A., CHESTER, I. 2000. "Energy and water pinch study at the Parenco paper mill". *Paper Technology*. 41:1. Feb. 47-52.
- [21] SAVULESCU, L.E., SORIN, M., SMITH, R. 2002. "Direct and indirect heat transfer in water network systems". *Applied Thermal Engineering*. 22:8. June. 981-988.
- [22] SAVULESCU, L., POULIN, B., HAMMACHE, A., BEDARD, S. 2001. "Water and energy savings at a kraft paperboard mill using process integration". *87th Annual Meeting, Feb 1 2001*. Montreal, Que., Canada : Pulp and Paper Technical Association of Canada. C, 183-186.
- [23] LAFOURCADE, S. 2001. *Analyse avec contraintes de réseaux d'échangeurs de chaleur pour l'optimisation énergétique d'une usine intégrée PTM-papier journal, Thèse de Maîtrise en Sciences Appliquées*. Montréal, Québec, Canada : École Polytechnique de Montréal.
- [24] LAFOURCADE, S., LABIDI, J., KOTELES, R., GELINAS, C., STUART, P. 2003. "Thermal pinch analysis with process streams mixing at a TMP-newsprint mill". *Pulp and Paper Canada*. 104:12. 74-77.

ARTICLE 4

ROADMAP TO MINIMUM ENERGY AND WATER USE FOR INTEGRATED NEWSPRINT MILLS

Sébastien Lafourcade¹, Martin Fairbank², Paul Stuart¹

1. NSERC Environmental Design Engineering Chair
in Process Integration, Department of Chemical Engineering, École Polytechnique - Montréal

Contact : paul.stuart@polymtl.ca

2. Abitibi-Consolidated Inc., Montréal, Québec

ABSTRACT

This paper presents a comprehensive methodology to minimize water and energy use in newsprint mills, in a manner consistent with the eventual implementation of zero effluent operation. First, “reference” newsprint mills were defined. Then the methodology for water and energy use reduction based on thermal pinch analysis was applied to each of the reference mills. Programs suitable for gradual implementation were formulated, and illustrated in two detailed mill studies. It was found that the overall roadmap for energy and water use reduction, suitable for the long-term, could be generalized for a broad class of pulp and paper mills.

INTRODUCTION

The reduction of water and energy use is an ongoing challenge facing the pulp and paper industry, and becoming a priority due to significant increases in energy costs which can impact mill profitability. While the Kyoto protocol will require effort from industry to reduce its dependence on fossil fuels, it can also represent an opportunity to reduce energy costs in the long-term by improving energy efficiency and switching to lower-cost biomass fuel [1]. At the same time, rules for treated effluent discharges are increasingly stringent and permit-based, for example the *attestations d'assainissement* in Québec [2]. Important synergies can be realized, i.e. a reduction in water usage can allow for improved energy reduction and for an increase in available waste heat used in district heating or effluent evaporation [3]. In this context, in some cases zero effluent operation at integrated newsprint mills may become an increasingly attractive long-term solution.

Achieving minimum steam use and minimum/zero effluent operation requires gradual implementation of energy and water reduction programs, in a manner that considers both short- and long-term mill objectives. These programs must be part of the continuous improvement objectives of the mill [4]. Capital spending projects can be identified through audits, benchmarking, the Kaizen approach, and/or by using pinch analysis. Mills face the challenge of organizing water and energy projects simultaneously, and planning them over a timeframe appropriate for capital spending programs. Careful planning is required to insure that projects identified individually will not jeopardize the performance of other projects.

Thermal pinch analysis is an established technique to address energy reduction. It has been applied for retrofit studies in pulp and paper mills since the mid 1980's [5][6][7][8]. In most cases, pinch is not used in retrofit to identify hidden projects, but rather it is an approach which helps identify coherent energy programs. Pinch analysis provides a holistic view of the energy system, and seeks to identify the global impacts of the projects on one another. However, no systematic tool exists to achieve this objective while considering both water and energy use reduction. In this study, a methodology is presented based on thermal pinch techniques for water and energy use reduction analysis. It permits the following:

- identifying opportunities for water and energy reduction;
- expressing these opportunities as projects;
- organizing projects into programs that address both the short- and long-term mill objectives.

OBJECTIVES

The objectives of this work were (1) to estimate practical and achievable water and energy levels in "reference" integrated newsprint mills, (2) to identify programs which reach these levels, and (3) to propose roadmaps that lead to minimum or zero effluent operation in the longer-term.

In order to achieve these objectives, a pinch-based methodology was applied to newsprint mills which allows for identifying simultaneous water and energy reduction projects, and for organizing them into programs to be implemented step-by-step. Reference mills were developed to represent the most common newsprint mill configurations in Canada, and used to explore the suitability of the method in a broad context. The methodology was also applied in two case studies.

THERMAL PINCH-BASED APPROACH

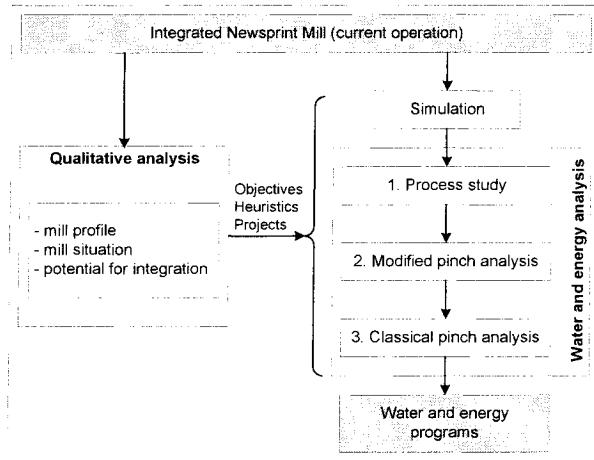


Figure 1: Methodology for water and energy reduction

Figure 1 shows the overall methodology used for this study. The qualitative analysis was performed to assemble mill information necessary for the study. It included executing and/or reviewing the

following components: benchmarking activities, water and energy audits, data collection, and mill situation (previous studies and projects, current issues, and strategic orientation). The information provides the user with the mill technology profile, as well as short- and long-term objectives. The water and energy analysis itself consists of a three-step methodology.

- The process study (Step 1) is inspired by benchmarking and audit activities in order to identify a typical water use reduction projects in similar pulp and paper processes such as TMP heat recovery, b) advanced modernization projects such as new drying technologies, and c) energy projects that cannot be identified by pinch analysis such as vacuum pump seal water recirculation.
- Based on the classical pinch technique, the modified pinch analysis (Step 2) is an energy-driven approach for water reduction. It allows for identifying process stream mixing points and recirculation projects using design rules.
- A classical pinch analysis (Step 3) is then performed to identify further energy reduction projects by the implementation of indirect heat exchangers.

At each step, the global impact of projects must be evaluated using a steady state simulation. At the end of Step 3, the analysis is completed by combining alternatives to identify the most appropriate water and energy reduction programs. This 3-step methodology has been demonstrated at an integrated newsprint mill [9].

Mill Name	Configuration	Level of integration	Comments
Base Case		-	-
TMP 1		Energy network more integrated	TMP heat recovery
TMP 2	100% TMP 1 PM 650 admt/d	Water network more integrated	- WW to PM showers - non-process cooling water in closed loops
TMP 3		W&E network more integrated	TMP1 + TMP2
TMP 4		Water network less integrated	- less WW to TMP - less recycled non-process water
DIP 20	20% DIP / 1 PM 650 admt/d	Same as base case	- PM WW to TMP and balance to DIP (with temperature limit of 45°C)
DIP 40	40% DIP / 2 PM 1100 admt/d	Same as base case	- no TMP WW to DIP
DIP 100	100% DIP / 2 PM 1100 admt/d	Same as base case	Temperature setpoint for DIP and PM circuits = 40°C

Table 1: Reference mill definitions

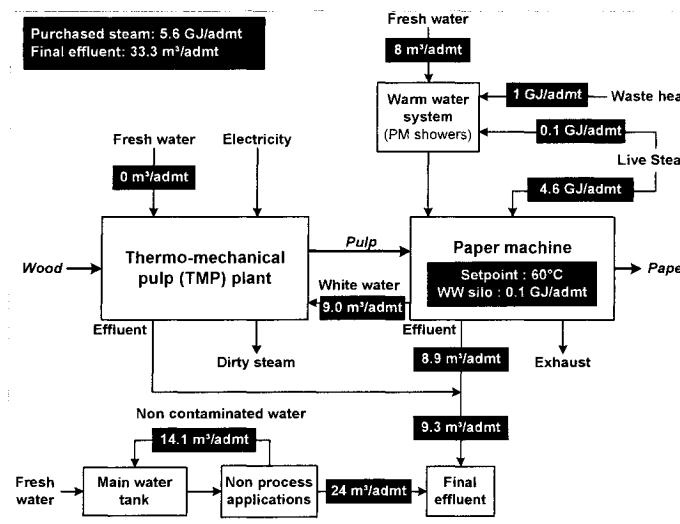


Figure 2: Base case mill definition

NEWSPRINT REFERENCE MILLS

The study of reference newsprint mills is supported with data from energy and environmental surveys done by FPAC and PAPRICAN (2005), from annual energy census data, and by work at several mills. The main classes of newsprint mills were established by production level, pulping types, and the number of paper machines. Then the key process configurations likely to have an impact on water and energy consumption were defined. Based on these two sets of characteristics, mill models were developed on an Excel spreadsheet including blocks for the thermo-mechanical pulp (TMP) plant, deinked pulp (DIP) plant, TMP heat recovery, stock preparation, paper machines (PM), warm water networks, white water (WW) networks, and non-process (NP) water networks. The main characteristics of the reference mills are given in Table 1. The base case mill was inspired from a real mill (Figure 2).

PRACTICAL CONSIDERATIONS

The level of detail in the models represents a trade-off between having sufficient data for a proper application of the methodology, and keeping the model simple enough to be able to draw general conclusions. Consequently, the projects identified for the reference mills accurately reflect the opportunities for water and energy reduction, although certain mill complexities may be overlooked, such as detailed equipment design. To overcome this issue, assumptions have been made to ensure that projects and their impacts are realistic and practical.

TMP heat recovery

A reboiler, which produce clean steam from the TMP dirty steam, is typical in modern TMP designs [10]. However, half the Canadian TMP plants do not have heat recovery. In some cases, dirty steam is used at atmospheric pressure in economizers. With state-of the-art systems, 6 GJ/bdmt of pulp can be

recovered. For this study, we considered that a system provides 3.5 GJ/bdmt as it is the typical value for Canadian mills. In addition to the energy benefit, increased production and fibre quality are also driving forces to justify this type of project.

DIP plant

PM white water is typically used as water make-up for DIP. The use of TMP white water as make-up is not desirable, for two reasons: a) TMP WW is hotter than the DIP circuits and thus to avoid stickies in the DIP from softening and passing through screen baskets, the maximum acceptable DIP temperature is 45 to 50°C, and b) the presence of pitch in the TMP white water can combine with high dissolved calcium concentrations in the DIP to create deposits. Recirculation of the DIP effluent back to the DIP plant is limited by the need to purge contaminants. A conservative value of 10 m³/admt has been set for the minimum DIP effluent.

White water network

White water management varies significantly from one mill to another including management of the excess WW between TMP and DIP, white water control strategies, size of storage tanks, broke system design, and so on. Only the excess WW sent to pulp mills was considered in the study of reference mills. A more detailed approach to white water network treatment was completed for the 2 case studies.

Paper machine showers

Quality requirements for paper machine showers depend on the types of shower (high-pressure jet, fan, purgable, single nozzle, etc.) and its application (cleaning, trim, lubrication, etc.). Some applications require fresh water or water of equivalent quality, while others can accept lean white water. The strategy for water recirculation to showers is principally related to the equipment in place, to the wet-end felt and fabric conditioning configurations, and to the level of risk the mill is ready to accept. Based on common practice [11], the minimum fresh water demand for this study was nominally set at one quarter of the total shower water demand.

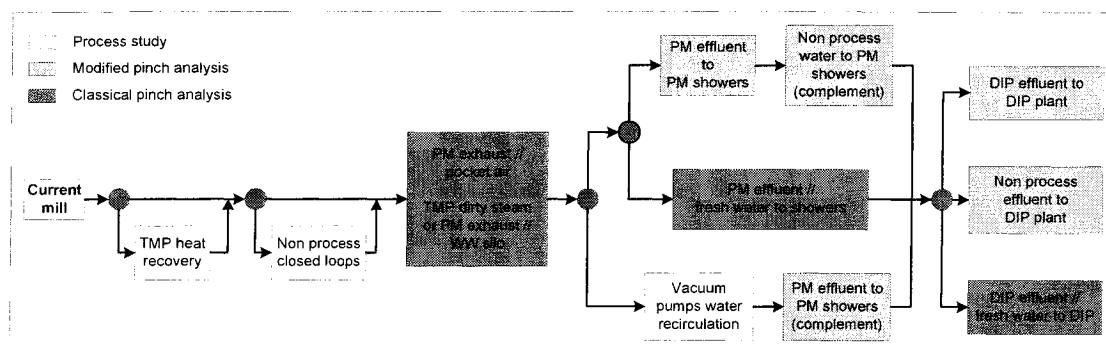


Figure 3: Typical water and energy program structure for newsprint mill minimum water and energy configuration

Equipment improvements

Improvements in certain mill areas require unique and careful analysis, e.g. optimization of the paper machine drying section and specific energy reduction in TMP refiners. These were not addressed specifically in the reference mill study, but would be addressed in Step 1 of the overall methodology.

Non-process water

Many opportunities exist for non-process (NP) water flow reduction. For each application, effluent can be recycled in several ways, e.g. to the same application in a closed loop, to another NP water application, to a process application, or to the main fresh water tank - depending on a careful evaluation of the design requirements. Water streams such as the HVAC cooling stream can be complex to collect and reuse. Cooling water for motors or lubrication systems present a risk of contamination by oil. Vacuum pump seal water can contain fines. Mill-wide, pump seal waters are typically a large flow and must be carefully addressed. Physical and spatial constraints need to be considered for economically feasible opportunities. The reference mills in this study have a level of NP water usage which is representative of typical mills.

WATER AND ENERGY RESULTS

The methodology was applied to each of the reference mills using the project identification methods described above, and consistent design rules. A similar general outcome was obtained for all the reference mills in Table 1, as summarized in Figure 3. Unless already in place, TMP heat recovery (production of clean steam from TMP dirty steam) and reduction of non-process water were initially implemented. In all cases, excess heat (PM exhaust and/or TMP dirty steam) was used to heat up paper machine white water and air for pocket ventilation. PM shower water demand and DIP make-up were addressed in the same way, i.e., considering recirculation of process effluent from the same area, recirculation of warm non-process effluent, or indirect heat exchange between the fresh water make-up and the process effluent from the same area. These three solutions compete with each other, and a mill would choose the best option for its particular case. The program should be implemented step-by-step, but not necessarily in the order given.

Water and energy reduction

For all reference mills, the results follow similar trends as shown in Figure 4 for the base case mill. Regarding the reduction in purchased steam, the largest opportunity is provided by TMP steam heat recovery (2.3 GJ/admt reduction). Water recirculation projects to PM showers have a low impact on steam usage, since the necessary water is already extensively heated with excess heat in the base case mill. Water recirculation to PM showers serves to increase the amount of excess heat available in hot air streams from the PM. When TMP dirty steam is already recovered, since the dirty steam was used for heating the shower water in the base case, water recirculation ends up with a significant steam reduction

(0.5 GJ/admt). NP water reduction projects by closed loop recirculation can serve to slightly increase steam use, because this results in a lower temperature in the main fresh water tank. Adding new indirect heat exchangers allows for a steam reduction of 0.5 to 0.75 GJ/admt.

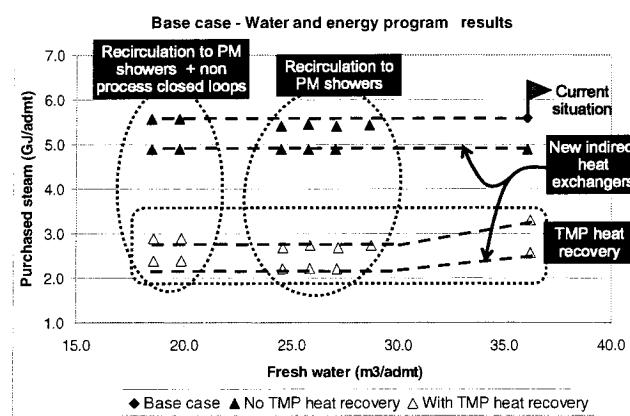


Figure 4: Impact of water and energy reduction programs for the base case mill

Regarding fresh water reduction, two distinct clusters can be observed in Figure 4. The first cluster is recirculation to PM showers alone ($-10 \text{ m}^3/\text{admt}$), and the second is water recirculation to PM showers plus NP water reduction using closed loops ($-18 \text{ m}^3/\text{admt}$). When considering a DIP plant, recirculation of process and non-process effluent to DIP leads to a significant reduction in water and steam use.

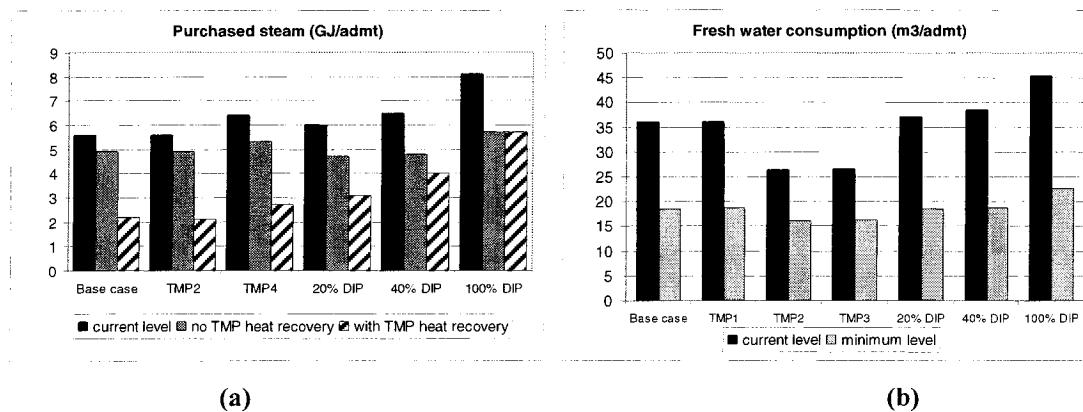


Figure 5: Achievable steam use (a) and water use (b) levels for the reference millsPractical minimum achievable level

When TMP heat is not recovered, all of the reference mills (defined in Table 1) can reach the same steam consumption level of approximately 5 GJ/admt (Figure 5a). The DIP fraction does not have a big impact on process steam requirement, even at 100% DIP. However, the situation changes when considering TMP heat recovery. For the 100% TMP mills, the achievable level is close to 2 GJ/admt. As

the DIP ratio increases, the achievable level quickly becomes less promising. Concerning water use, it is possible for all reference mills to reach the same consumption level between 16 and 18 m³/admt (Figure 5b), except for the 100% DIP configuration (22.5 m³/admt).

A new, state-of-the-art TMP-newsprint mill may be energetically self-sufficient and requires around 10 m³/admt of fresh water [3]. If the drying section and the clean steam production were further optimized, the energy level obtained for the reference mills would be close to that of a state-of-the-art mill. Yet, the water usage level remains 6-8 m³/admt above the state-of-the-art mill due to equipment specific consumption.

POTENTIAL FOR EVENTUAL IMPLEMENTATION OF ZERO EFFLUENT

Process strategies considered

It has been recognized that membrane treatment (including ultra-filtration and reverse osmosis) and evaporation are the most promising technologies to achieve zero effluent [12], and in recent years the cost for these technologies has decreased significantly [13]. Four strategies are proposed for zero effluent based on these two technologies, which are summarized in Table 2.

	Treated effluent	Description
Strategy 1	total effluent	Membrane treatment and recirculation after cooling if necessary
Strategy 2	process effluent	
Strategy 3	total effluent	Evaporation and recirculation of the clean condensate
Strategy 4	process effluent	

Table 2: Strategies for zero effluent operation

Membrane treatment consists of an ultra-filtration step to remove colloidal materials and fine suspended solids following biotreatment, and a reverse osmosis step to remove dissolved inorganic solids. The evaporation process involves two stages of evaporators using multi-vapour recompression, or high vacuum technology and process waste heat.

The total treated stream is recirculated to the mill following cooling. A wiser approach would be to send the hot treated effluent to process applications, and to cool only the fraction being sent to the non-process critical applications. A more efficient system design would include separated hot, warm, and cold water networks.

Roadmap to zero effluent operation

In Figure 6, it has been assumed that various water and energy use reduction programs have been implemented at the base case mill, and clusters have been identified using the final effluent flow rate and temperature. Effluent flow rate should be minimized, since it is the main design criterion for the major equipment items needed for zero effluent operation, i.e. has the greatest influence on capital and

operating costs. The effluent temperature is linked to the type of technology being used. Low temperature effluent is favourable for membrane treatment as the cooling of the treated flow would be minimized. High temperature is favourable for effluent evaporation, especially if using waste heat.

The same water and energy use reduction “roadmaps” have been identified for all the reference mills (Figure 7). Programs based on vacuum pump seal water recirculation lead to treatment of the total effluent (Strategies 1 and 3), while programs based on process effluent recirculation lead to treatment of the process effluent alone (Strategies 2 and 4).

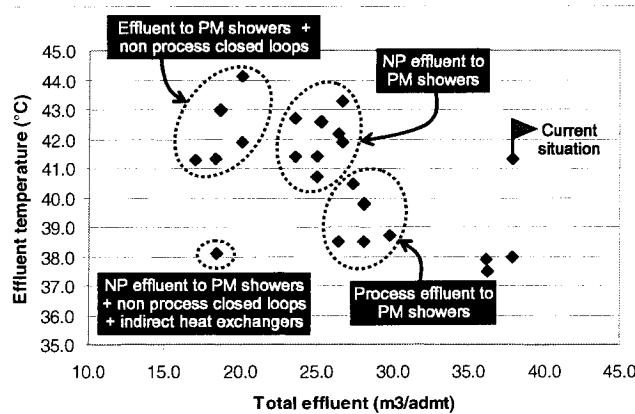


Figure 6: Effluent temperature versus total effluent flow for the base case mill use reduction programs

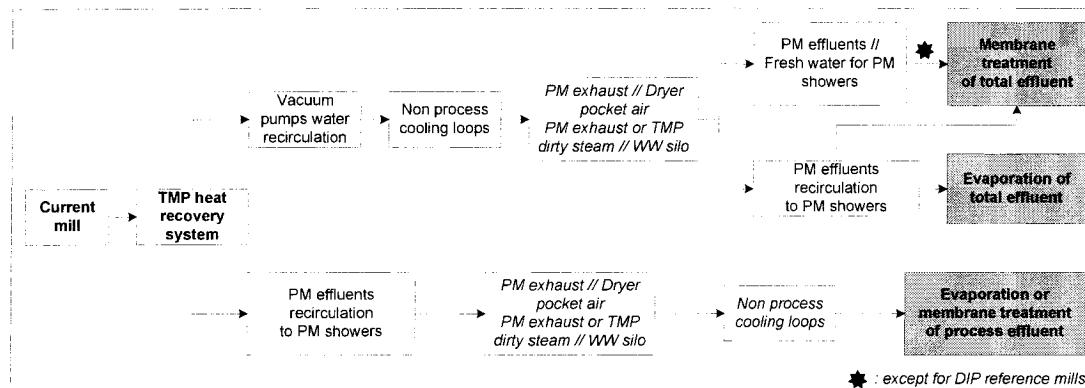


Figure 7: Roadmaps to zero effluent for the reference newsprint mills

CASE STUDIES

	Case study #1 Mill A	Case study #2 Mill B
Mill Description	100% TMP 1 paper machine	80% TMP,20% DIP 1 paper machine
Production (admt/d)	600	730
Location	Northern Québec	Southern USA
Purchased steam	5.6 GJ/admt	2.9 GJ/admt
TMP heat usage	Preheating of fresh water for PM	Clean steam production 5.6 GJ/odmt pulp
Drying section heat recovery	Preheating of fresh water for PM	None
Total effluent flow	35 m ³ /admt	30 m ³ /admt
Process effluent flow	10 m ³ /admt	25 m ³ /admt
Non-process water use	25 m ³ /admt	5 m ³ /admt
Warm water network	100% preheated fresh water	50% preheated fresh water + 50% treated PM effluents
Water/energy use reduction study Objectives	Reduce effluent temperature, steam consumption and TMP circuit temperature	Reduce energy cost through reduction of water and steam consumption

Table 3: Case study mill configurations

Case study #1

The first case study involves Mill A (described in Table 3). Since Mill A inspired the base case reference mill, the application of the methodology provides similar results: the achievable energy and water use levels are 1.8 GJ/admt and 20 m³/admt, respectively. The main difference lies in the level of detail: Mill A takes into account the complexity of the real site including a process objective related to the TMP white water networks. Stream mixing projects and indirect heat exchanger projects involve the TMP main line, TMP white water, and PM white water to address the reduction of pulp temperature. Despite these new projects, a similar roadmap for zero effluent is identified. This case study illustrates that even when mill-specific issues and process analysis are considered, the general conclusions still remain true.

Case study #2

In its design, Mill B (described in Table 3) is similar to a state-of-the-art newsprint mill. However, the TMP and PM white water networks are not operated optimally, and the process effluent is thus fairly high (25 m³/admt). In this case, a detailed study of the WW systems was critical during the application of the methodology. As shown in Figure 8, the mill can be potentially energetically self-sufficient. The TMP heat recovery system is more efficient (5.6 GJ/admt) than the typical system considered for the reference mills (3.5 GJ/admt). The practical achievable water level was found to be 17.5 m³/admt, which is similar to the levels obtained for the reference mills. Most of the identified projects deal with WW recirculation. Better results could be achieved by improving equipment efficiencies and control of the

WW network dynamics. The roadmaps identified are consistent with the general conclusions. The choice between membrane or evaporation technology for zero effluent operation would depend on whether or not indirect heat exchangers are used to cool down effluent streams.

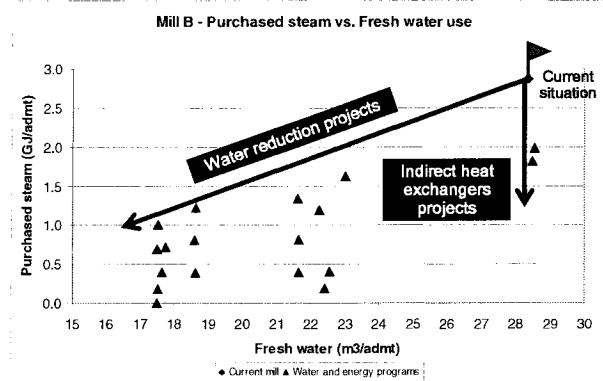


Figure 8: Results of water and energy programs for Mill B

DISCUSSION

Older paper machines

For the reference mills and the case studies, only relatively modern paper machines producing 550 tons to 750 tons per day were considered. Many newsprint mills operate older machines with lower capacities (e.g. 300 admt/d or less). These machines are typically water- and energy-inefficient with higher water consumption for showers, and lower efficiencies in the drying section and heat recovery. A higher water consumption implies more PM effluent, and hence a greater potential for recirculation. On the energy side, the wet-end and the drying sections would require major improvement studies before applying the methods presented here.

Common white water circuit

Newsprint mills with several machines may have a common white water system. The application of the water and energy methodology presented here will generate the same types of recirculation projects. However, the practical implementation of these projects implies additional risk because of the interaction between the species in the different WW streams – especially in mills making different added-value grades on different machines.

Inter-stage washing

It is common to store de-inked pulp at 30% consistency. When applied at DIP plant, this so-called inter-stage washing step results in the increase of steam demand at the DIP plant and in the reduction of steam demand at the PM WW silo. Interstage washing is less common in TMP for standard newsprint production however it is an attractive solution for addressing dissolved solids issues when a high level of water closure is reached [14]. Interstage washing results in an increase in steam demand at the paper machine and in an increase in TMP plant temperature. The methodology will nonetheless result in

similar programs because the recirculation projects occur within the same department. The projects will be more significant in terms of equipment size while achieving roughly the same levels of integration.

Increase in DIP production

When increasing the DIP production, the achievable water level remains roughly the same. In contrast, the minimum level steam use decreases significantly because of the decrease in potential TMP heat recovery. However, an increase in DIP production does not affect the structure of roadmaps to zero effluent, i.e., the mill may not need to change its strategy.

Implementation of cogeneration

Cogeneration with a condensing turbine is not sensitive to the process steam consumption, and thus it is not sensitive to water and energy programs. For cogeneration with a counter-pressure turbine, the potential for electricity production is sensitive to the process steam consumption in the process, i.e., if the steam use is reduced, the potential decreases. The impact can be significant if water reductions are needed. In the case of Mill A, the water reduction has a low impact on the cogeneration potential. In the case of Mill B, the water reduction dramatically reduces this potential.

Importance of Process Dynamics

This methodology considers the steady state mill design, and does not address methods to optimize the operation and control of the white water system process dynamics. This is an essential activity in order to achieve minimum practical effluent.

CONCLUSIONS

The application of the proposed methodology to the integrated newsprint mills leads to programs that significantly reduce water and energy consumption, in a manner suitable for the eventual implementation of zero effluent operation.

- Fresh water use can typically be reduced to 16-18 m³/admt. The 10 m³/admt level can be achieved through further equipment improvements, and careful control of process dynamics.
- The minimum achievable level for process steam is 5 GJ/admt without TMP heat recovery. The TMP heat recovery potential is significant, and decreases with an increase in DIP production. Further reduction can be achieved through improvements to the drying section. For 100% TMP mills, the minimum level with typical heat recovery system is 2 GJ/admt.

The methodology considers the roadmap eventually leading to zero effluent operation at integrated newsprint. Depending on the order of project implementation, zero effluent strategies should be identified in light of the integration strategy employed. The methodology was demonstrated at two integrated newsprint mills, and showed that the general conclusions for water/energy use reduction and for the zero effluent operation roadmap remain true when the methodology is applied in practice.

ACKNOWLEDGMENTS

This project was financially supported by Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and Abitibi-Consolidated. The authors would like to thank Leonid Akim for fruitful discussions and support for the realization of the second case study.

REFERENCES

1. BROWNE, T. "Canada's response to Kyoto: Economic impact on the Canadian Paper Industry". *Pulp & Paper Canada*. 104(1): 27-31 (2003).
2. STUART, P. R., SAVOIE, A., and MURRAY, R. "Environmental permit system in Quebec precipitates consideration of advanced environmental technologies. Part I: Benchmarking of proposed effluent limits". *Pulp & Paper Canada*. 100(11): 33-37 (1999).
3. International Energy Agency (IEA). "Process Integration Technologies Implementing Agreement - Process Integration in the Pulp and Paper Industry, Annex III - Final Report". In press (2004).
4. PAPRICAN. "Energy cost reduction in the pulp and paper industry". Pulp and Paper Research Institute of Canada. Pointe Claire, QC, Canada (1999).
5. NOEL, G. "Pinch technology study at the Donohue Clermont newsprint mill". *Pulp & Paper Canada*. 96(7): 38-41 (1995).
6. SCHAAEREMAN, M., VERSTRAETEN, E., BLAAK, R., HOOIMEIJER, A., and CHESTER, I. "Energy and water pinch study at the Parenco paper mill". *Paper Technology*. 41(1): 47-52 (2000).
7. DYLKE, E., FOLKESTAD, C., RETSINA, T., and SAVVAKIS, I. "Thermal optimization study at Prince George". 87th Annual Meeting. Pulp and Paper Technical Association of Canada. Montréal, QC, Canada (2001).
8. NOEL, G. and CONNAGHAN, C. "Application of pinch technology from studies to projects implementation in fast changing environment at the QRP mill (BC)". 89th Annual Meeting. Pulp and Paper Technical Association of Canada, Montréal, QC, Canada (2003).
9. LAFOURCADE, S., LABIDI, J., KOTELES, R., GELINAS, C., and STUART, P. "Thermal pinch analysis with process streams mixing at a TMP-newsprint mill". *Pulp & Paper Canada*. 104(12): 74-77 (2003).
10. PARKER, S. M., IONIDES, G. N., JOHNSTON, C., ORR, A., and MACKIE, D. M. "Heat recovery for TMP - the forgotten energy source". 89th Annual Meeting. Pulp and Paper Technical Association of Canada, Montréal, QC, Canada (2003).
11. PAPRICAN. "Water use reduction in the pulp and paper industry, 1994". Paper Research Institute of Canada. Pointe Claire, QC, Canada (1994).
12. GERBASI, B., STUART, P. R., ZALOUM, R., and ARSENAULT, F. "Techno-economic assessment of several closed cycle technology alternatives for an existing TMP- newsprint mill". 79th Annual Meeting. Canadian Pulp and Paper Association. Montreal, QC, Canada (1993).
13. STUART, P. R., BLENKHORN, D. A., TYLER, M. A., and MARTIN, R. E. "A review of closed cycle technology and its implementation in the pulp & paper industry". VII Latin American Pulp & Paper Association Conference (1994).
14. IPPC, Integrated Pollution Prevention and Control. Reference document on best available techniques in the pulp and paper industry. European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau. European Commission (2001). Available on: <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>

ARTICLE 5

***Retrofit design rules for water and energy analysis
in integrated newsprint mills***

Part I: Reference newsprint mill energy profiles

Sébastien Lafourcade, Ulrika Wising, Paul R. Stuart

NSERC Environmental Design Engineering Chair in Process Integration
Chemical Engineering Department, École Polytechnique de Montréal

Contact: paul.stuart@polymtl.ca

Application: The reference mills allow a systematic analysis of the effect of water and energy use reduction measures for typical newsprint mill process configurations.

Introduction

In the face of continued significant increases in energy costs, the pulp and paper industry is further prioritizing its search for innovative methods to reduce energy use [1]. At the same time, rules for wastewater discharge are increasingly stringent [2]. In water-based processes such as the pulp and paper industry, interactions between water and energy increase with the level of integration. This can lead to more complex problems, but also opportunities, i.e. a reduction in water usage can allow for energy reduction opportunities [3]. Mills should identify water and energy use reduction projects simultaneously, and organize them in a way that identified projects will not jeopardize the performance of other projects. As well, mills must plan water and energy use reduction programs over an appropriate timeframe for capital spending, in such a way that short-term projects are consistent with longer-term objectives. A systematic and practical tool is needed to address these issues.

Numerous studies using pinch analysis for simultaneous water and energy reduction have been conducted in the pulp and paper industry. Thermal pinch analysis has been applied for retrofit energy studies in pulp and paper mills since the mid 1980's [4-6]. The technique provides a holistic view of the energy system, and helps organize coherent energy programs where impacts of the projects on one another are controlled [7]. Pinch analysis based techniques are often used for water-energy analysis in order to identify and support pre-identified water reduction projects [8]. They have also been used to organize non-process water networks [9]. Several mass pinch techniques have been developed based on the analogy between energy transfer and mass transfer [10]. Some work has been performed to combine thermal pinch and mass pinch for simultaneous water and energy analysis [11] but this approach faces

critical limitations. First the complexity of the problem implies the use of sophisticated optimization tools where process specificity cannot rigidly be taken into account. Secondly there is a lack of models that appropriately describe the complex interactions between species in pulp and paper processes.

In earlier work [12], a methodology was proposed for practical, simultaneous water and energy analysis. Based on thermal pinch techniques, the methodology allows the identification of practical opportunities for water and energy use reduction, expressing these opportunities as projects, and organizing projects into programs that address both the short- and longer-term mill objectives. Design rules support the application of the methodology at newsprint mills, to insure that practical results are obtained. Preliminary design rules were proposed based on pinch fundamentals and on the their application for the case of an operating mill.

Objectives

The objectives of the present work were, for typical newsprint mill classes and configurations:

- (1) to verify that the water and energy use reduction methodology is practical,
- (2) to validate the preliminary design rules and
- (3) to further improve the design rules based on mill analyses.

These objectives have been achieved in two steps. First, reference mills were created based on an analysis of existing North American newsprint facilities. Then the methodology and proposed design rules were applied to the different reference mills. Part I of this paper is focused on development of the reference mills and their energy profiles. Part II presents and discusses the results and their implications. The work is illustrated by two mill case studies presented in Part II.

Methodology for water and energy analysis

Approach based on design rules

Design rules allow for simplifying a problem using heuristics in order to obtain practical design methodologies. When mathematical models are not available or when the problem requires a high level of interaction, methods based on design rules can be most suitable. Preliminary design rules have been developed for the proposed water and energy use reduction methodology based on: the study of the fundamentals of pinch; systematic sensitivity analyses of the method; experience with pinch techniques; and process observation. These rules support the application of our methodology in newsprint mills, to insure that it is practical and to insure that the user can take into account the specificities of the process.

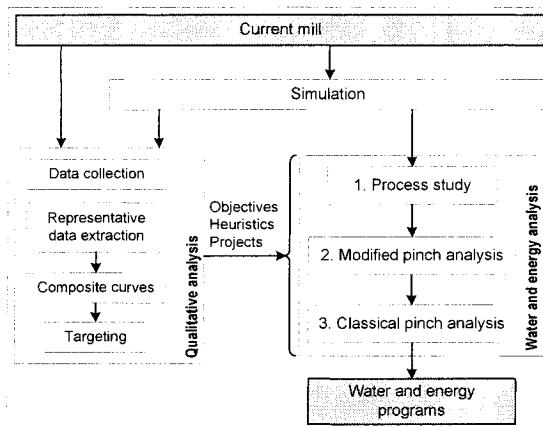


Figure 1: Methodology for water and energy analysis

Figure 1 presents the methodology developed for water and energy analysis. It is divided into two parts: qualitative analysis, and water and energy analysis.

Qualitative analysis

In the qualitative study, all relevant information is collected and the target for the analysis is estimated.

Data collection and simulation

Collected process information includes benchmarking results, water and energy audits, key process data, and general mill situation (including past related studies and projects, current issues and strategic direction). A steady state simulation provides mass and energy balances for all process and non-process flows. The simulation is essential for estimating missing data and for evaluating projects at each step of the analysis. If no simulation is available, one must be developed.

Targeting

The potential for integration is estimated in the targeting step, which also gives insight for the water and energy analysis. First a pre-defined data set describing specific process streams is used for data extraction, referred to in the methodology as representative extraction. Starting with the representative extraction, a classical targeting procedure is applied. First, the composite curves are developed for the current energy demand (Q_{h_0}). Composite curves are then developed for a lower ΔT_{min} (targeted ΔT_{min}), i.e. a higher level of integration. This gives the targeted energy demand ($Q_{h_{target}}$). The chosen targeted ΔT_{min} is typically 10°C for indirect heat exchangers used in the pulp and paper industry.

The comparison of the current and the targeted situation gives three types of information: 1) the energy bottlenecks for the process are identified by the pinch point at the targeted ΔT_{min} , 2) the pinch violations

observed on the curves at targeted ΔT_{min} represent the violations that can be eliminated in order to reach the targeted level, and 3) the potential for heat integration is given by the difference between Q_{h_0} and $Q_{h_{target}}$. It quantifies the heat reduction that can be achieved by improvement of the indirect heat exchanger network.

Water and energy analysis

The water and energy analysis consists of three steps. The process study (Step 1) identifies through process studies projects applied in the pulp and paper industry, including modernization projects. The modified pinch analysis (step 2) uses the classical pinch technique to identify energy driven projects for water reduction such as stream mixing points and recirculation projects, using $\Delta T_{min}=0$ in a methodology reported elsewhere [12]. The classical pinch analysis (step 3) aims to achieve further energy reduction with indirect heat exchangers.

Reference mills

The methodology for the development of the reference mills is shown in Figure 2. They have been developed based on an extensive literature review and detailed process reviews of several operating mills, describing common practice and best available technologies for newsprint production. Also energy and environmental surveys have been used as input (Forest Product Association of Canada, 1998 and 2001, and Pulp and Paper Research Institute of Canada, 2005).

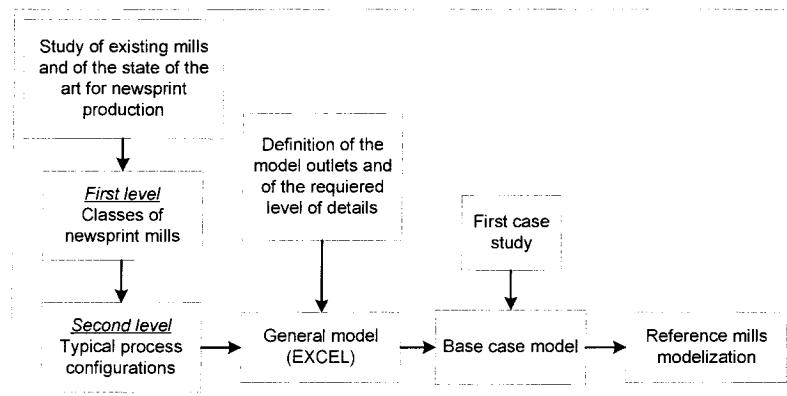


Figure 2: Development steps for the newsprint reference mills

Mill classes and typical configurations

The basic definition of the classes of newsprint mills is based on three criteria: the paper production, the pulping processes, and the number of paper machines (PM). 15 operating mills of a total of about 30 Canadian newsprint mills were considered. Thermo-mechanical pulp (TMP) is produced in the majority of the mills, with a variable fraction of de-inked pulp (DIP). When purchased, DIP typically represented less than 5% of the total pulp used. When produced on site, DIP represents typically 20% to 40% of the total pulp used. Two mills in Canada and several mills in the US produce newsprint using 100% de-inked pulp. Two different production levels per paper machine were considered: 200-300 or 500-700 air dried metric tonnes (admt) per paper machine. Table 1 summarizes the classes of newsprint mill that were identified.

Table 1: Classes of newsprint mills

Percentage of TMP in the total pulp production	Percentage of DIP in the total pulp production	Average paper production	Number of paper machines
100%	0%	650 admt/d	1
100%	0%	650 admt/d	2
100%	0%	1100 admt/d	2
80%	20%	650 admt/d	1
80%	20%	1100 admt/d	2
80%	20%	1100 admt/d	4
60%	40%	1100 admt/d	2
60%	40%	1100 admt/d	4
0%	100%	1100 admt/d	2

The configurations likely to impact the water and energy consumptions were studied. Table 2 summarizes the critical elements of the configuration for a newsprint mill, and the typical values for the parameters that define it. These values come from the literature and from existing mill analysis.

Table 2: Typical configurations for reference mills

Mill configuration	→ More integrated			
	Less integrated	Heating of fresh water and process streams	Production of clean steam (3.5GJ/t of pulp)	Maximum production of clean steam (6GJ/t of pulp)
TMP dirty steam heat recovery	None	Heating of fresh water and process streams	Production of clean steam (3.5GJ/t of pulp)	Maximum production of clean steam (6GJ/t of pulp)
Recirculation of the dirty condensate from TMP reboiler	No	Yes		
Chip washing: effluent flow (and type of water used as make-up)	2 m ³ / admnt of pulp (fresh water)	2 m ³ / admnt of pulp (white water)	0.3 m ³ / admnt of pulp (fresh water)	0.3 m ³ / admnt of pulp (white water)
DIP plant effluent	20 m ³ /t of pulp	15 m ³ /t of pulp	10 m ³ /t of pulp	
DIP plant steam consumption	0.5 GJ/t of pulp	0 GJ/t of pulp		
Part of PM shower water provided by recycled water	0%	50% treated white water	50%, non contaminated water	100% treated white water + non contaminated water
Part of shower water heating using excess heat	50%	100%		
Wet end heat loss (white water temperature drop)	- 1.25°C	- 1.14°C	- 1°C	
Drying section efficiency (steam usage per tonne water evaporated)	6 GJ/t water evaporated	4.5 GJ/t water evaporated	3.7 GJ/t water evaporated	3 GJ/t water evaporated
Non process water recirculation	0%	30%	50%	Closed loops with cooling
Paper machine excess white water to pulp plant	None	50% of the TMP needs are provided	100% of the TMP needs are fulfilled, none to DIP plant	100% of the TMP needs are fulfilled, remaining to DIP plant

General model

A general model has been developed to represent the different classes and configurations of newsprint mills. Mass and energy balances have been performed on each elementary bloc shown in Figure 3. The level of detail in the model represents a trade-off between having sufficient data for an in depth application of the methodology, and keeping the model simple enough to be able to draw general conclusions.

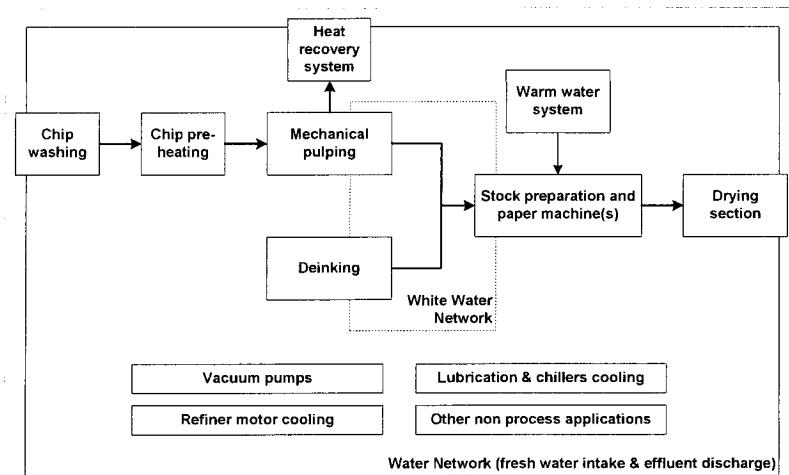


Figure 3: General model for reference mills

The model is used to calculate key performance indicators related to water and energy usage, provide data for targeting and pinch analysis, and reflects the impact of water and energy use reduction projects on the mill. As mentioned earlier, the representative data extraction was used in the model. Considering impact on water and energy systems, some mill areas have been simplified, e.g. the DIP plant. Other parts (e.g. non process water applications) were expanded into several blocs.

Base case

Table 3: Summary of the base case mill processes

Configuration element	Value of the definition parameters
TMP dirty steam heat recovery	Fresh water pre-heating
Recirculation of the dirty condensate from TMP reboiler	-
Chip washing: specific effluent (and type of water used as make-up)	0.3 m ³ /admt of pulp (fresh water)
Part of PM shower water provided by recycled water	0%
Shower water heating provide by excess heat	almost 100%
Wet end heat loss (white water temperature drop)	- 1.14°C
Drying section efficiency	3.7 GJ/t water evaporated
Non process water recirculation	30% to main water tank
Paper machine excess white water to pulp plant	No

In order to create the different reference newsprint mills, a base case mill ("Mill A") was created taking inspiration from the detailed analysis of an mill. The base case consists of an integrated 100% TMP – newsprint mill producing 650 tonnes of paper per day on one machine. Table 3 shows the configuration of the base case mill and Table 4 summarizes the water and energy usage. The summertime operation of

the mill was considered when water consumption is at its maximum (especially non process water) while steam consumption is still significant, the final effluent temperature is high which is critical regarding good operation of the waste water treatment plant, and excess heat is at its maximum.

Starting from the base case, the reference mills were developed by varying the level of integration and varying the percentage of de-inked pulp being produced.

Table 4: Water and energy consumption for the base case mill

	Base case	Canadian newsprint mills (average)	100% TMP only Canadian newsprint mills (average)
Net thermal energy (GJ/admt)	5.6	8.0*	5.3 [†]
TMP clean steam production (GJ/t pulp)	0	0 for one half of the mills, 3.5 for the other half [†]	
Electrical energy (GJ/admt)	11.8	10.1*	10.4 [†]
Total effluent (m ³ /admt)	33.3	51.7*	50.5*

* Forest Product Association of Canada (FPAC) surveys

[†] Pulp And Paper Research Institute of Canada (PAPRICAN) survey

Reference mills with 100% TMP

The 100% TMP reference mills were defined for different levels of water and energy integration of the base case, i.e. consumption of water and steam. To first establish the link between the different configurations and the water and energy consumption, a sensitivity analysis was performed on the base case mill. This analysis is done by making vary the parameters of configuration between their minimum and maximum values, as defined in the table 2.

The variation range presented in Figure 4 is a percentage of the initial water and steam consumption. Five key parameters were identified: the TMP heat recovery, the water recirculation to the paper machine showers, the pre-heating of fresh water for paper machine showers, the non process (NP) water recirculation, and the white water (WW) network. The drying section efficiency will be treated later and can be related to paper machine age. Twelve 100% TMP mills were created by combining these five parameters. Among the 12 reference mills, four were chosen (see Figure 5) and are characterized relative to the base case as 1) energy network more integrated, 2) water network more integrated, 3) energy and water networks more integrated and 4) water network less integrated.

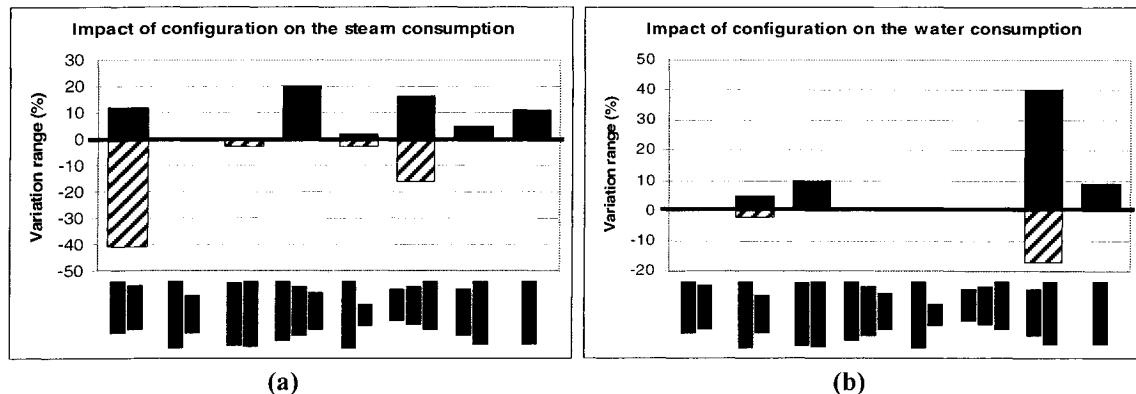


Figure 4: Sensitivity analysis on the base case for (a) steam and (b) water consumption

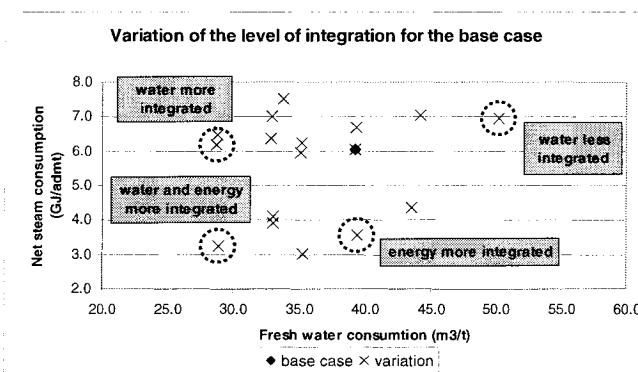


Figure 5: 100% TMP reference mills

Reference mills with DIP

The reference mills with DIP were developed by increasing the production of DIP in the total pulp production from the base case: 20% DIP, 40% DIP and 100% DIP. The jump from 20% to 40% DIP is accompanied by an increase of paper production from 650 admnt/d to 1100 admnt/d.

White water cascading (paper machine to TMP and TMP to DIP) is not a desirable management strategy for most mills. The use of TMP white water for DIP dilution implies mixing of contaminants and jeopardizing the pH control in the DIP plant and it must be avoided. The dilution demand of the TMP plant is typically fulfilled by the excess of paper machine white water. The remaining paper machine white water excess is sent to the DIP plant dilution. The energy contained in the paper machine white water heats up the DIP circuits. The DIP temperature is limited to 45 to 50°C to avoid stickies softening and passing through screen orifices. Because of this temperature limitation, the use of hot paper machine white water in DIP is limited.

In the case with 100% DIP, the temperature in the de-inked pulp circuit and in the paper machine circuit was set at 40°C, as observed in an operating 100% DIP mill in order to avoid a high amount of steam use for white water heating.

Special cases

Other mill and equipment configurations can have important impacts on the water and energy consumption. Three cases were considered: age of the paper machines, consistencies of the pulp outlets, and minimum water use.

Older paper machines

To study the impact of the paper machine age, we considered a 100% TMP mill producing 1100 admt/d with 4 older machines. The assumption was made that these machines are less energy and water use efficient than the machine in the base case as this has been observed in real mills and in surveys. The consumption of fresh water for the showers and the amount of effluent is higher. The heat losses at the wet-end are larger (-1.25°C), the drying section is less efficient (4.5 GJ/t of water evaporated), and less energy is recovered from the drying exhaust (one third less than the base case). This case will be referred to as the “OLD” mill.

Inter-stage washing

For the base case, the TMP outlet consistency is 8%. When DIP is considered, the outlet consistency is 10%. Higher consistencies can be reached using a strategy to keep more contaminants such as dissolved solid, within the pulp plant. It is not uncommon to store de-inked pulp at consistencies as high as 30%. This is less common in TMP for standard newsprint production, but it is more typical for state-of-the-art mills. A so-called inter-stage washing (ISW) step results in an increase of steam demand at the DIP plant and at the paper machine and an increase TMP plant temperature. These cases will be referred to as the “ISW” mill.

Minimum water use

A 100% TMP mill with a minimum water usage ($10 \text{ m}^3/\text{admt}$) can be defined based on best available technologies coupled with best operating practices for newsprint production. This includes the following items: the total water demand for paper machine showers and fresh water make-up is minimal, non-process cooling water is recirculated in closed loop systems, dry vacuum pumps (“turbo-blowers”) are used for the paper machine, the use of waterless packing and mechanical seals, and good housekeeping. Finally the condensate return to the boiler system is increased. This case will be referred to as the “MIN” mill.

White water network

The model includes white water balances between the main mill departments. However white water management is specific to each newsprint mill, including for example management of excess white water between TMP and DIP, control strategy, white water and broke storage tank sizes, broke recirculation strategy, and so on. This level of complexity in the white water network is not taken into account in the reference mills. This aspect will instead be discussed in Part II and illustrated using the case studies.

Final reference mills

Table 5 presents the reference mills retained for further analysis.

Table 5: Description of the newsprint reference mills

Name	Classes	Level of integration	Comments
Base Case		-	-
TMP 1		Energy network more integrated	TMP heat recovery (3.5 GJ/t of pulp)
TMP 2	100% TMP, 1 PM 650 admnt/d	Water network more integrated	- WW to 50% of PM shower needs - non process cooling water (refiner motors, HVAC, lubrication) in closed loops
TMP 3		Water and energy networks more integrated	TMP1 + TMP2
TMP 4		Water network less integrated	- less PM WW to TMP (-25%) - less recycled non process water (-50%)
DIP 20	20% DIP, 1 PM 650 admnt/d	Same as base case	- PM WW to TMP and balance to DIP (with temperature limit of 45°C)
DIP 40	40% DIP, 2 PM 1100 admnt/d	Same as base case	- no TMP WW to DIP
DIP 100	100% DIP, 2 PM 1100 admnt/d	Same as base case	Temperature setpoint for DIP and PM circuits = 40°C
OLD	100% TMP, 4 PM 1100 admnt/d	Same as base case	Paper machines less efficient
ISW 1		Same as base case	- TMP consistency = 30% - TMP circuit cooling load: 4.6 MW - DIP consistency = 10%
ISW 2	40% DIP, 2 PM 1100 admnt/d	Same as base case	- TMP consistency = 8% - DIP consistency = 30%
ISW 3		Same as base case	- TMP consistency = 30% - TMP circuit cooling load: 4.6 MW - DIP consistency = 30%
MIN	100% PTM, 1 PM 650 admnt/d	Minimum water usage	-

Energy consumption increases with DIP production (Figure 6a). For DIP 20 and DIP 40, this is mainly due to the cooling of the paper machine circuits since TMP at 85°C is replaced by the same amount of DIP at 45°C (Figure 7). The paper machine white water heating demand increases in order to maintain the 60°C setpoint in the headbox. For DIP 100, there is no TMP anymore and the paper machine white water used as make-up at the DIP plant is at the same temperature as the DIP circuit. Consequently, the heating demand at both the DIP circuit and the paper machine are high. Older paper machines can have a significant impact mill water and energy use performance. The OLD case reference mill has a much higher water and energy demand compared to the base case (Figure 6b). The MIN case has a lower water consumption, however the steam consumption for the minimum effluent mill is not much lower than the base case. This can be explained by two factors; first in the base case, excess heat from TMP dirty steam and paper machine drying exhaust is largely used to heat up fresh water for the showers. Therefore shower water reduction leads to more excess heat but no significant steam reduction. Secondly, the lower water usage compared to base case is essentially due to non process applications which are not consuming steam, the process water circuits are already fairly closed for the base case.

The outlet pulp consistency has only a marginal impact on the water consumption (Figure 8); On the energy side, the TMP inter-stage washing increases the heating demand at the paper machine white water circuit, at the same time 5.6 MW needs to be extracted from the TMP circuit because the pulp gets too hot. For inter-stage washing of DIP, the steam use for paper machine circuit heating is reduced (because less cold water is brought to the paper machine with DIP). This is compensated by increase of steam used for DIP circuit heating (caused by the decrease of paper machine white water make-up to DIP).

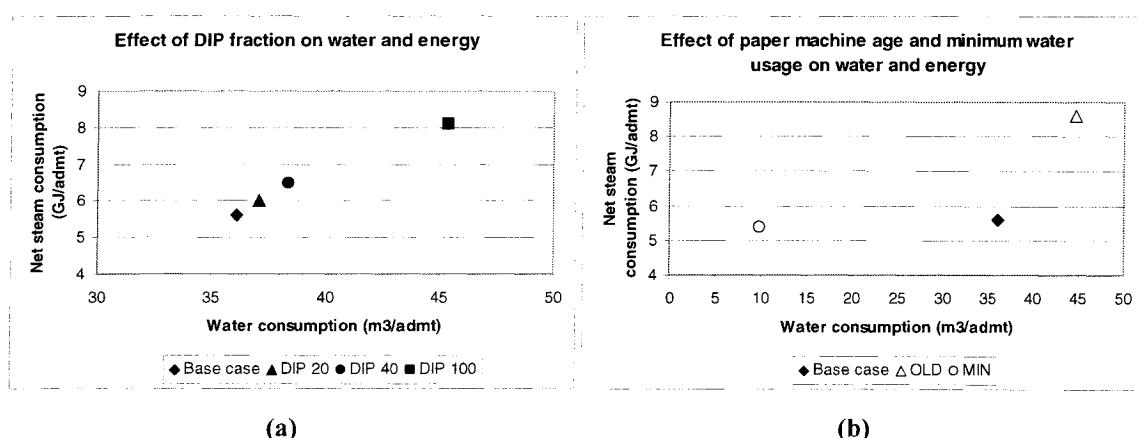


Figure 6: Comparison of water and energy consumption for the DIP reference mills (a) and for OLD and MIN reference mills (b)

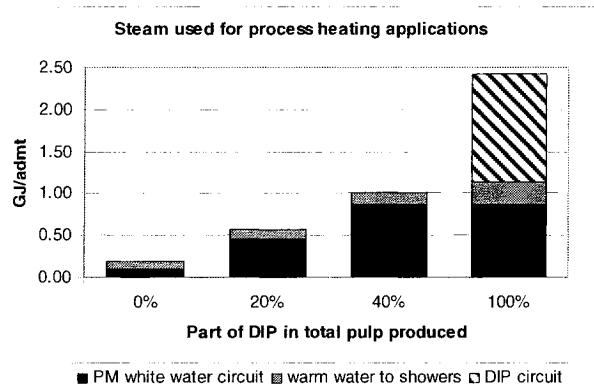


Figure 7 : Evolution of process heating demand with the DIP portion of total pulp produced

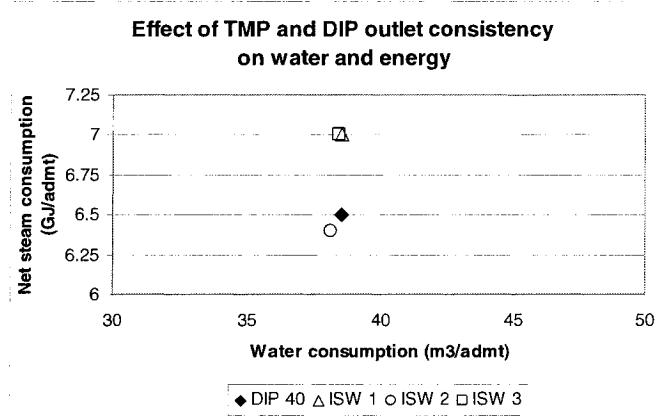


Figure 8: Comparison of water and energy consumption for the ISW reference mills

Simplified model for an existing mill

Data requirement

The general model used to create the reference mills can also be used to represent a real mill. The model of a newsprint mill requires initially 77 parameters to define the basic configuration. Some of these parameters are typical for all newsprint mill configurations, or have a small impact on the final results. After eliminating parameters not pertinent to this analysis, the required number of parameters needed is between 40 (for a 100% TMP mill with 1 paper machine) and 70 (for a mill with DIP plant and 4 paper machines). The data required for this analysis can be classified into 3 categories. First design data concerns the equipment and configuration in place at the mill and are relatively easy to collect (e.g., type of vacuum pumps). Secondly data related to operation are mostly setpoints which are easily available using the information system of the mill (e.g., outlet consistency of the DIP).

Finally, the last category of data includes unmeasured data that deal with secondary systems or that are not critical for paper production. This includes data around the heat recovery systems, the warm water network and in general the non-process water network. Depending on the information system of the mill, the collection of these data can require some additional effort including discussion with mill personnel, manual measurements, rough estimates, etc.

Example

The general model has been tested using data from an existing mill, referred to as Mill B. The number of key data required was 55. The results are compared with real data calculated from a detailed WinGEMS simulation (Table 6). The general model reflects fairly well the mill performance even if more detail could be added. There is a 10% difference in amount of steam purchased for the model compared to the actual mill. This can be seen as the penalty due to employing a simplified method.

Table 6: General model for Mill B

Mill B	Real data (WinGEMS simulation)	General model (Excel)	Difference
Total steam used (GJ/admt)	7.2	6.8	6%
Purchased steam (GJ/admt)	2.9	2.6	10%
Total effluent (m ³ /admt)	29.1	30.0	3%
Process effluent (m ³ /admt)	25.2	26.1	4%
Non process effluent (m ³ /admt)	3.9	3.9	0%
Total effluent temperature (°C)	49.5	49.4	0%

Conclusions

Eight reference mills have been developed based on a general model, which represent the main classes of newsprint mills and process configurations in North America. The general model can be used to represent real mills using a limited number of key water and energy use parameters (between 40 and 70). An existing integrated newsprint mill has been modeled using 55 key parameters, including 35 data that are easily obtained. This analysis leads to an effective tool for benchmarking existing mills against reference mills, such as the minimum water mill, or other operating mills.

The general model is detailed enough that it may be modified to represent the implementation of water and energy use reduction projects, including special technologies such as inter-stage washing at the DIP or TMP plants. The models are also suitable for application of the water and energy use reduction methodology being proposed in this study. This methodology is presented in Part II of this paper.

Acknowledgments

This project was financially supported by Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and Abitibi-Consolidated. The authors would like to thank Tom Browne (PAPRICAN), Martin Fairbank (Abitibi-Consolidated) and Kevin Riemer (KNRconsult) for providing data and comments for the development of reference mills.

Reference

1. Browne, T., Francis, D., and Towers, M., *Energy cost reduction in the pulp and paper industry: An overview*. Process Control News (for the Pulp and Paper Industries) 21(6), 6-7. 2001.
2. Stuart, P. R., Savoie, A., and Murray, R., *Environmental permit system in Quebec precipitates consideration of advanced environmental technologies, Part I: Benchmarking of proposed effluent limits*. Pulp and Paper Canada 100(11. Nov), 33-37. 99. Southam Inc.,Don Mills,Ont,Can.
3. WISING, U. 2003. *Process Integration in Model Kraft Pulp Mills : Technical, Economic and Environmental Implications*. Vol. . ed. Edited by . Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology. (2003)
4. DYLKE, E., FOLKESTAD, C., RETSINA, T., and SAVVAKIS, I. "Thermal optimization study at Prince George",87th Annual Meeting, Feb 1 2001, Pulp and Paper Technical Association of Canada,
5. Schaareman, M., Verstraeten, E., Blaak, R., Hooimeijer, A., and Chester, I. *Energy and water pinch study at the Parenco paper mill*. Paper Technology 41(1. Feb), 47-52. 2000. Paper Industry Technical Association,Bury,Engl.
6. NOEL, G. and CONNAGHAN, C. "Application of pinch technology from studies to projects implementation in fast changing environment at the QRP mill (BC)", Pulp and Paper Technical Association of Canada,
7. Noel, G. *Pinch technology study at the Donohue Clermont newsprint mill*. Pulp & Paper Canada 96(7. Jul), 38-41. 95. Southam Information and Technology Group Inc.,Don Mills,Ont,Can.
8. Berntsson, T., Bengtsson, Cecilia, and Nordman, Roger. *Utilization of excess heat in the pulp and paper industry - A case study of technical and economic opportunities*. Applied Thermal Engineering 22(9. June), 1069-1081. 2002. Elsevier Science Ltd.
9. Savulescu, L. E., Sorin, M., and Smith, R. *Direct and indirect heat transfer in water network systems*. Applied Thermal Engineering 22(8. June), 981-988. 2002. Elsevier Science Ltd.
10. Paris, J., *Systems approach to system closure in integrated newsprint mills*. Pulp and Paper Canada 101(5. May), 34-42. 2000. Southam Inc.,Don Mills,Ont,Can.
11. SAVULESCU, L., POULIN, B., HAMMACHE, A., and BEDARD, S. "Water and energy savings at a kraft paperboard mill using process integration",87th Annual Meeting, Feb 1 2001, Pulp and Paper Technical Association of Canada,
12. Lafourcade, S. and Stuart, P. R., "Novel approach based on pinch analysis with stream mixing for both energy and flow reduction," *Journal of Engineering Design and Innovation (JEDI)*. Accepted for publication

ARTICLE 6

Retrofit design rules for water and energy analysis in integrated newsprint mills

Part II: Results and discussion

Sébastien Lafourcade, Ulrika Wising, Paul R. Stuart

NSERC Environmental Design Engineering Chair in Process Integration
Chemical Engineering Department, École Polytechnique de Montréal

Contact: paul.stuart@polymtl.ca

Application: The design rules allow for a practical identification of water and energy programs in existing mills. In particular, 40 to 70 key parameters are enough to perform the targeting for an existing mill and pre-identify opportunity through benchmarking with the reference mills.

Introduction

Significant increases in energy costs can jeopardize the pulp and paper mills profitability. Also increasingly stringent rules related to effluent require a constant effort from the industry to reduce its water consumption. These two objectives should be considered simultaneously since there are strong interactions between water and energy flows in pulp and paper processes; water reduction can lead to important energy reduction. In previous work [1], a methodology has been developed for practical simultaneous water and energy analysis. Based on thermal pinch techniques, it helps identifying practical opportunities for water and energy reduction; expressing these opportunities as projects; and organizing projects into programs that address both the short- and long-term mill objectives. Design rules support the application at newsprint mills and insure that practical results are obtained. Preliminary design rules have been proposed based on pinch fundamentals and on its application in an existing mill.

Objectives

The objectives of the present work were, for common newsprint mill configurations:

- (1) to verify that the methodology is efficient,
- (2) to validate the preliminary design rules and
- (3) to develop new sets of design rules.

These objectives have been achieved in two steps. First, reference model mills were created based on real North American facilities. The models are presented in detail in Part I of this paper. These models represent the most common newsprint mill classes and configurations. Then the methodology and proposed design rules were applied to the different reference model mills. Part II is focused on the results

and their implications of applying the methodology and the design rules. The studies of two real mills support the conclusions.

Methodology for water and energy analysis

Figure 1 presents the methodology developed for water and energy analysis. First, the qualitative study collects all relevant information including benchmarking results, water and energy audit, key process data, mill situation (past studies and projects, current issues and strategic orientation). A pre-defined data set is used for data extraction, referred to in the methodology as representative extraction. Starting with this representative extraction, the composite curves are built. The targeting activity is the comparison between the curves for the current energy demand (Q_{h_0}) and for the targeted energy demand ($Q_{h_{target}}$) at $\Delta T_{min} = 10^{\circ}\text{C}$. Comparing Q_{h_0} and $Q_{h_{target}}$ gives the energy bottlenecks for the process, the pinch violations representing the process inefficiencies and the potential for heat integration.

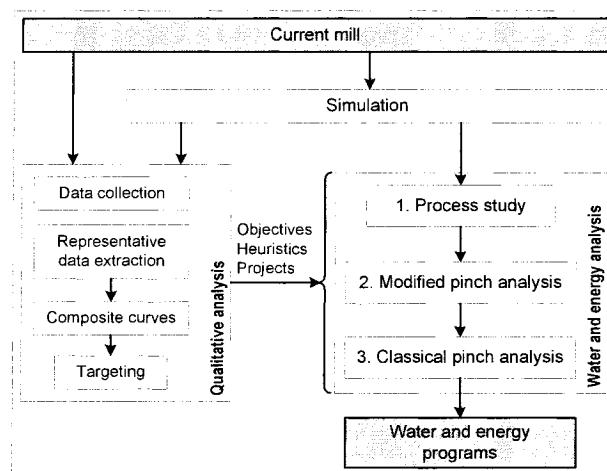


Figure 1: Methodology for water and energy analysis

Secondly, a water and energy analysis is performed, consisting into three steps: the process study to identify typical projects applied in the pulp and paper industry, the modified pinch analysis to identify energy driven stream mixing projects and recirculation projects and finally the classical pinch analysis to design an indirect heat exchanger network. Preliminary design rules insure practical application and practical results and the user can take into account the specificities of the process. More details about the methodology are given in the Part I of this paper.

In order to generalize the preliminary design rules, the methodology has been applied to 13 reference model mills shown in the Part 1.

Results: targeting

Composites curves

As described in Part I, the composite curves (CC) are based on the same extraction pre-defined extracted data set. This representative extraction aims to define the main process characteristics for a given mill. The study of the reference model mills shows that the same CC structure is obtained for all type of process configurations (Figure 1).

Each curve can be separated into a low temperature (LT) zone and a high temperature (HT) zone defined below and above the paper machine circuit temperature (60°C), respectively. On the hot composite curve, the LT zone includes the process effluent streams (excess of white water from paper machine and pulp departments, press effluent, DIP effluent) and hot non-process effluent (refiners motors cooling water, vacuum pump seal water). The HT zone of the hot curve includes the TMP dirty steam and the paper machine drying section exhaust. Since excess heat is defined in this paper as waste heat available in the mill below 100°C , the entire hot composite curve can be considered as excess heat for the base case (because its temperature is above 100°C). When clean TMP steam stream is produced, it is not considered to be excess heat.

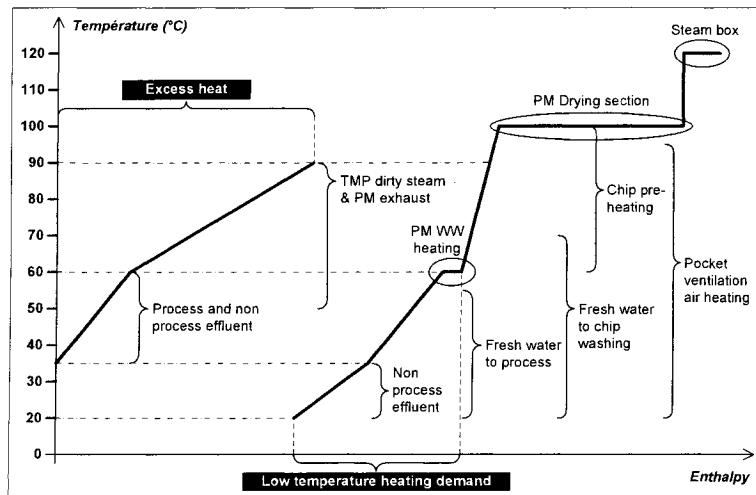


Figure 2: Typical composite curves for newsprint mills

On the cold composite curve, the LT zone includes the cold non-process effluent streams, fresh water make-up to the process (chip washing, de-inked plant, paper machine showers), paper machine WW and DIP circuit heating. This zone is referred to in this paper as the low temperature heating demand. The HT zone includes heating of wood chip and pocket ventilation air and the paper drying duty plus the steam

box operation. Pocket ventilation air preheating is in both the LT and HT zones. For each reference model mill, most of these elements are included and at the same temperature level.

The global structure of the curves is similar for all model mills. If we examine the curves in more detail, it shows that they can reflect all newsprint configurations and the effect of process changes. These curves are based on the representative extraction implemented into the newsprint models. It has been showed in Part I that 40 to 70 parameters are required, depending of the complexity of the process, to represent a real newsprint mill by using this model. The model and the CC are effective tools to benchmark the energy profile of an existing mill against the reference model mills or against other existing mills.

Targeting principals

For a given mill, the comparison between the current composite curves and the composite curves at $\Delta T_{min} = 10^{\circ}\text{C}$ gives the targeting results [2]. Figure 2 shows composite curves when ΔT_{min} is 10°C for some of the reference model mills.

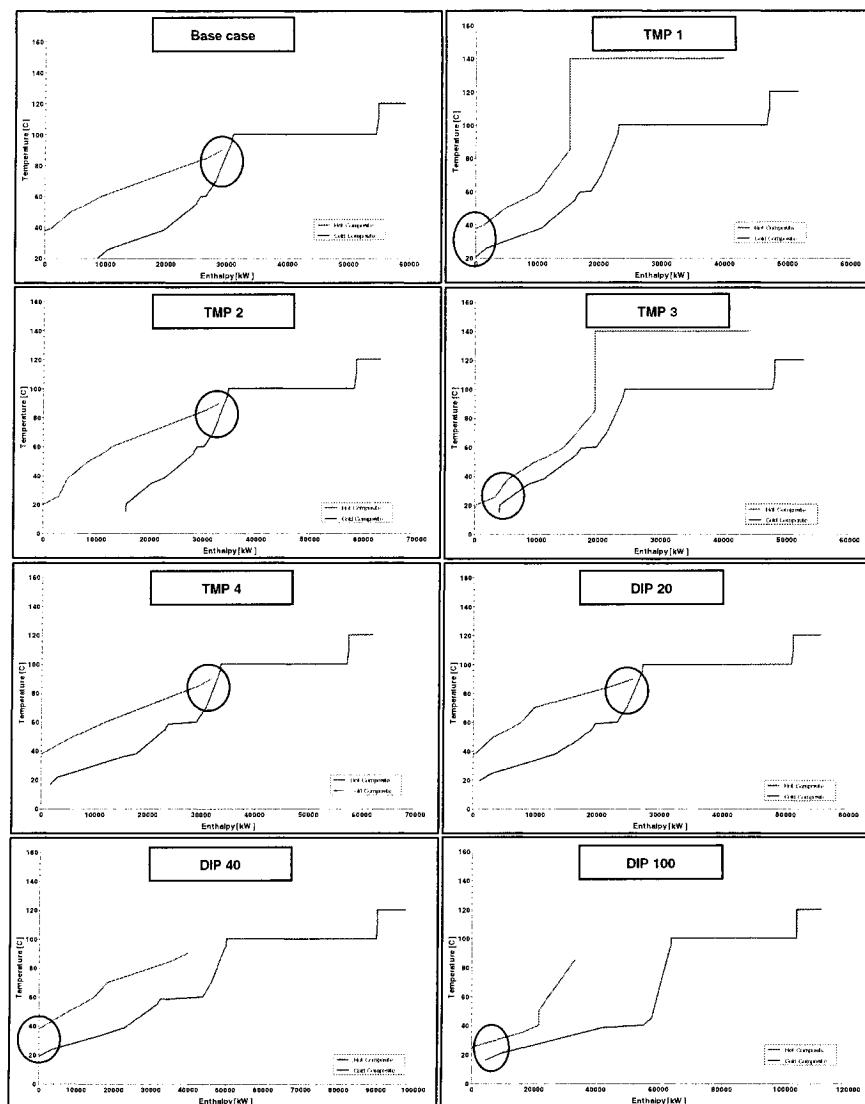


Figure 3: Composite curves at $\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$ for the reference model mills
(the circle indicates the location of the pinch point)

Bottlenecks

The bottleneck is given by the pinch point at $\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$. Three situations were observed for the reference model mills: (1) the bottleneck is caused by the TMP dirty steam (base case, TMP2, TMP4 and DIP20), (2) the situation $Q_c = 0\text{kW}$ is reached (TMP1 and DIP40) and (3) the bottleneck is caused by low temperature section of the curves (TMP3 and DIP100). The first occurs if the hot curve is longer than the LT zone of the cold curve. Otherwise, the situation $Q_c = 0\text{kW}$ occurs before the “dirty steam

bottleneck". The low temperature bottleneck occurs in two special cases. For the mill TMP3, the cooling duty for the non-process water closed loops can not be satisfied with process water with a ΔT of 10°C. For the mill DIP 100, the target temperature for the effluent is lower and once again, this cooling duty cannot be satisfied at $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$.

The bottlenecks give insights on improvement projects. For example the dirty steam clearly indicates that you need to recover it to produce clean steam if you want to push the integration forward. The bottleneck also indicates the flexibility the user has regarding the integration. If the bottleneck is the TMP dirty steam, there is enough excess heat to fulfill all the low temperature process demand. There are more possible projects than needed to reach the target. If some of them are not possible, there are options to reach the targeted Q_h . If the bottleneck is $Q_c = 0\text{kW}$, there is not enough excess heat. All of it must be used to reach the targeted Q_h , consequently the heat integration is less flexible.

Pinch violations

By definition, pinch violation depends on the position of the pinch point. If the pinch point is caused by the TMP dirty steam, the pinch violations are caused by the processes where live steam is used below 80°C, i.e. essentially the low temperature heating demands. If the pinch point occurs at $Q_c = 0\text{kW}$ or at low temperature, the violations are the excess heat that is cooled by external utility (e.g. cooling towers), more generally, by excess heat not used in the process.

Potential for integration

The potential represent the level that can be achieved by implementing indirect heat exchanger projects and is thus predictable using the composite curves (Figure 4). When projects such as stream mixing points, recirculation projects or TMP heat recovery are considered, the mass balance is affected and so is the structure of the composite curves. Consequently the potential defined from the CC is less relevant for water and energy program if it includes other projects than indirect heat exchangers.

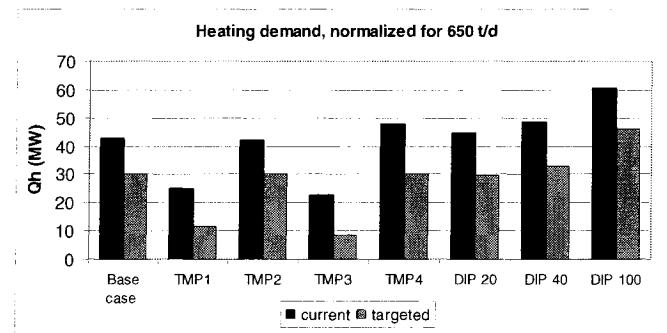


Figure 4: Heating demands for the reference mills

Results: water and energy analysis

Water and energy reduction

The application of the water and energy analysis to the reference model mill results in programs that can lead to significant reduction: between 25% (DIP 100) and 65% (Base case) of steam reduction and around 50% reduction of a fresh water consumption in all cases. The details of these results were presented in a previous paper [3].

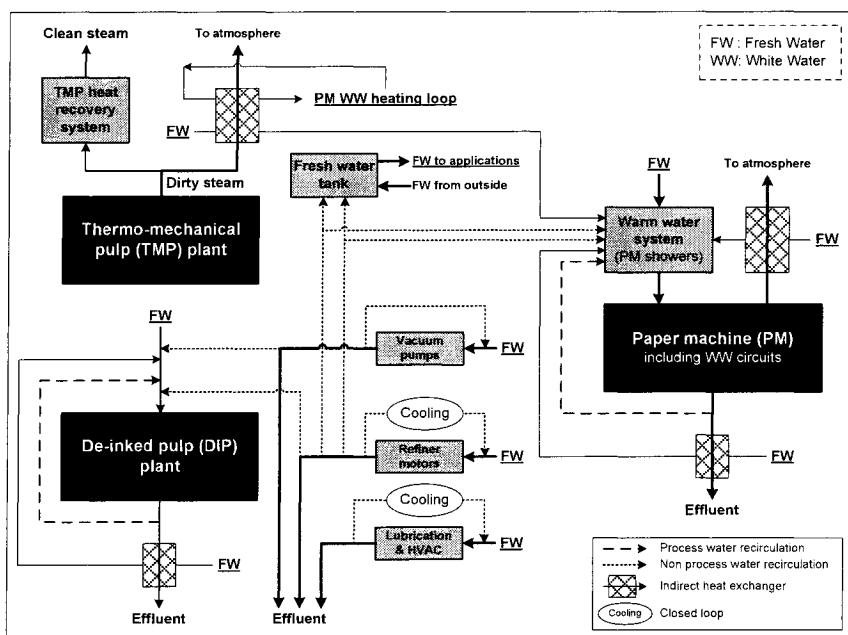


Figure 5: Typical opportunities identified for the reference newsprint model mills

Process study

In the context of the reference model mills, three key projects have been identified from the process study (Figure 5): TMP heat recovery (production of clean steam from the TMP dirty steam [4]), vacuum pump water recirculation (recycling of used seal water back to the pumps and recycling the hot effluent to paper machine showers [5]) and non-process closed loops (refiner motors cooling and lubrication and HVAC systems).

In practice, there are a larger number of projects that can be looked at depending on the mill's background and strategies:

- Implementation of project already identified and/or planned by the mill
- Management of white water, including fiber conservation, recirculation to the pulp plants, control strategy, broke management or inter-stage washing.

- Improvement of equipments or areas, including reduction of the total water consumption at paper machine showers or optimization of the drying section
- Implementation of new/more efficient technologies, such as dry vacuum pumps, advanced drying technologies or new TMP technologies.

Modified and classical pinch analysis

The application of the modified pinch analysis and the classical pinch analysis to the reference model mills confirmed the preliminary design rules. Both modified and classical pinch analysis include the following steps:

- 1) Definition of the system
- 2) Data extraction
- 3) Choice of ΔT_{min} (0°C for the modified analysis, 10°C for the classical one)
- 4) Design of an indirect heat exchanger network (HEN) for the chosen $\Delta T_{min} = 0^{\circ}\text{C}$
- 4.2) For the modified pinch analysis only: conversion indirect heat exchanger into stream mixing points or recirculation projects
- 5) Iteration of step 2 to 5
- 6) Implementation and evaluation of each project in the simulation
- 7) Selection of the best projects combination

The system is defined and separate into sub-system if necessary so that the design can be done manually. The constraints such as physical distance between the streams can then be taken into account during the design. This insures the user to obtain practical projects. The iteration of the extraction–design sequence starts with a wide range of streams and is then refined. Doing this guarantees that all of the opportunities available have been identified and tried. Only the more interesting options are selected.

Consequently, modified and classical pinch analysis ends up with key projects (Figure 5) for energy and water reduction in newsprint mills. However, concerning the white water network, case studies showed that the opportunities are strongly mill dependant.

Water and energy programs

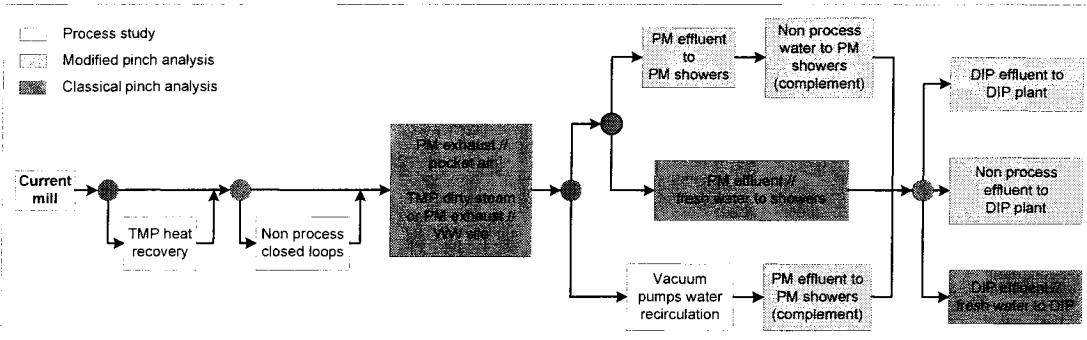


Figure 6: General structure of the water and energy programs

The water and energy programs obtained for the reference model mills present the same general structure as showed in Figure 6. The structure does not impose any order. However, in order to minimize the investment cost, it is better to follow the initial sequence: process study projects, direct heat exchanges (recirculation or stream mixing) and indirect heat exchanger.

Paper machine WW heating or pocket ventilation air heating can only be addressed by using indirect heat exchangers. The heating of the water make-up to the warm water system and DIP plant can be addressed either by indirect heat exchanging or by recirculation projects. The choice is not sensitive to mill configuration but rather given to other constraints such as contaminants the mill's preferences.

Discussion

Fresh water consumption

A sensitivity analysis has been done on the water closure level of the base case. It clearly shows that above $48 \text{ m}^3/\text{admt}$, the bottleneck is located at $Q_c = 0 \text{ kW}$. Below this level and until a practical limit ($10 \text{ m}^3/\text{admt}$), the bottleneck is the TMP dirty steam. Targeting showed that the situation $Q_c = 0 \text{ kW}$ means not enough excess heat available and less flexibility for integration. Consequently, before looking at indirect heat exchangers projects using classical pinch, the mill have to reduce its water consumption to least below $48 \text{ m}^3/\text{admt}$.

When starting with $48 \text{ m}^3/\text{admt}$ and reducing water consumption, the targeted heat demand at 10°C remain constant, 30 MW, even for the MIN case. $Q_{h_{targeted}}$ is the same because the bottleneck is still the TMP dirty steam and because the system above the pinch is not affected by the water closure. The water reduction results in an increase of the targeted cooling demand: $Q_{c_{targeted}}$ is 9 MW for the base case and 21 MW for the MIN case. This can be seen as an increase of excess heat.

Heat recovery

TMP heat recovery eliminates the dirty steam bottleneck. For the base case, the next bottleneck is $Q_c = 0 \text{ kW}$, meaning that water reduction is needed prior to classical pinch analysis. For the MIN case, the next bottleneck is the paper machine exhaust. The paper machine exhaust temperature can be increased through drying section optimization to relax the bottleneck. This will have a marginal impact on the integration potential; the MIN case with TMP heat recovery is at its maximum potential of integration.

If the mill already has a high level of heat recovery using indirect heat exchangers, new projects may affect the existing network efficiency and imply economic drawbacks. For example, recirculation project can result in idling indirect heat exchangers that may still have return on investment associated to it. In

this context economic incentive for changing the process is smaller. However, depending on the water and energy program, these equipments could be reused for other projects and results in a significant investment reduction.

Increase of DIP production

The increase of the DIP fraction in the total pulp production manifests itself by an increase of fresh water demand. It also leads to an increase, of DIP circuit and paper machine white water heating duty and a decrease of excess heat related mainly to the reduction of TMP dirty steam. The LT zone on the cold curve increases and the HT zone on the hot curve decreases with increasing DIP fraction. Thus, between 20% and 40% of DIP the situation $Q_c = 0^\circ\text{C}$ is reached. The consequence for the analysis is that at 30-40% DIP, there is less flexibility for integration, in particular to use excess heat. More effort must then be put on water reduction to counter this trend.

Old paper machine(s)

The study of the curves for the OLD mill shows that, even if the water consumption is slightly below 48 m^3/admt (45 m^3/admt) the bottleneck corresponds to the situation $Q_c = 0\text{kW}$. This is caused by the increase of paper machine white water heating demand due to higher wet end heat loss. There are several consequences for the definition of projects. The higher water consumption implies a increased amount of paper machine effluent: project related to showers area will be the same as base case but will involve bigger volume hence a bigger investment. On a techno-economic point of view, it is probably more relevant to rebuild the shower system in order to reduce its total water consumption prior to any recirculation. On the energy side, the wet-end and the drying section require a major improvement such as better hood control.

Inter-stage washing

When TMP outlet consistency is 30% (ISW1), the TMP WW needs be cooled and the WW heating demand at the paper machine silo increases compared to base case. The most efficient solution is an indirect heat exchanger between TMP WW and paper machine WW, given by the classical pinch analysis and predicted by the study of pinch violations. In this case, direct heat exchange would cancel the effect of the inter-stage washing. When DIP outlet consistency is 30% (ISW2), a part of the paper machine WW heating demand is displaced to the DIP circuit. On the cold curve, the plateau at 60°C decrease and the portion from 35 to 45°C increase a commensurate amount. Since a part of the heat must be provided at lower temperature, there are more opportunities for integration because there is a higher driving force.

Implications

Practical aspects

The projects identified for the reference model mills reflect well the opportunities that can be found in different configurations of newsprint mills. However due to the level of detail in the general model, certain mill complexities may be overseen, such as detailed equipment design and operation. In particular the opportunities related to the white water network could not be studied in detail; the WW management is too mill-specific.

The configuration of paper machine showers (types and application) determines the quality requirement for water supply, and thus the treatment needed for recirculation, the minimum fresh water make-up and the recirculation project potential feasibility.

The opportunities for improvement of equipment such as refiner or whole area such as drying section vary from a mill to another. Even if these improvements require many type of expertise and cannot be addressed directly by the water and energy analysis, recommendation can be made when the qualitative analysis shows an obvious potential.

Non process water streams such as the HVAC cooling stream can be complex to collect and reuse. Cooling water for motors or lubrication systems present a risk of contamination by oil. Vacuum pump seal water can contain fines. Moreover physical and spatial constraints need to be considered for feasible opportunities in the non process network.

Application of the methodology to a real newsprint mill

Considering practical aspects, the conclusions obtained for the reference model mills needed to be tested in an existing mill context. The methodology has been applied to two case studies described in Table 2. The first case study involves Mill A which includes a specific objective related to TMP white water networks. The design of Mill B is similar to a state-of-the-art newsprint mill. However, the TMP and white water networks are currently not operating properly, and the process effluent is fairly high (25 m³/admt).

Table 2: Description of the case studies

	Case study #1 Mill A	Case study #2 Mill B
Class of mill	100%TMP 1 paper machine	80%TMP, 20%DIP 1 paper machine
Production (admt/d)	600	730
Location	Québec	Southern USA
Purchased steam	6.1 GJ/admt	2.9 GJ/admt
TMP heat recovery	Preheating of fresh water	Clean steam production 5.6 GJ/odmt of pulp
Drying section heat recovery	Preheating of fresh water	None
Total effluent	35 m ³ /admt	29.1 m ³ /admt
Process effluent	10 m ³ /admt	25 m ³ /admt
Non-process	25 m ³ /admt	5 m ³ /admt
Warm water network	100% preheated fresh water	50% preheated fresh water / 50% treated PM effluents
Objectives	Reduce effluent temperature, steam consumption and TMP circuit temperature	Reduce energy cost through reduction of water and steam consumption

For the targeting phase, we observed that for Mill A the bottleneck is the TMP dirty steam. The amount of pinch violations is fairly low since waste heat is already extensively used to heat process water. For Mill B, where TMP heat recovery is already in place, the bottleneck is the paper machine WW heating. The pinch violations indicate the following inefficiencies; too much fresh water is used in the process resulting in high steam usage in the WW circuits; the excess heat is poorly used for heating.

When applying the water and energy analysis, the design rules validated for the reference model mills have been successfully applied and confirmed for the case studies. In particular for the modified and classical pinch analyses, the same type of projects and programs are obtained as the ones for the reference model mills (Figure 5 and Figure 6). Moreover, the white water issues were addressed mostly by the modified pinch analysis. In Mill A, stream mixing projects within the TMP plant met one of the mill objectives, reducing the TMP temperature. In Mill B, the WW network is reorganized through direct mixing and recirculation projects, resulting in significant reduction of WW discharge to sewer.

Application to other P&P mills

The methodology is valid when applying it to other pulp and paper mills. The sequence of the water and energy analysis (process study, modified pinch analysis, classical pinch analysis) is still justified.

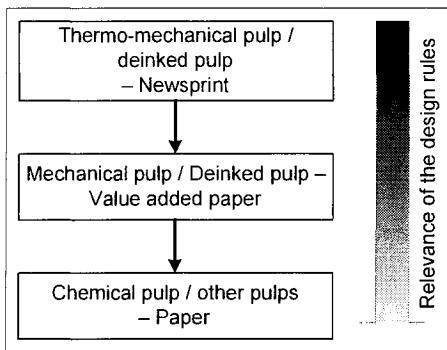


Figure 7: Generalisation of the design rules to several kind of integrated mills

Concerning the design rules, the relevance may decrease significantly (Figure 10). When considering value-added paper based on mechanical pulp, the constraints on recirculation are increased because of higher paper quality requirement and of the presence of fillers and coating materials. When considering chemical pulping, the process is very different in terms of operation and contaminant. It is more intensive on the thermal energy point of view. In this case, the design rules might need to be adjusted.

Conclusion

The application to the reference model mills shows that the preliminary design rules are valid for the main configurations of integrated newsprint mills.

At the targeting stage, the composite curves based on representative show that all the reference model mills are similar on the thermal pinch point of view. The curves can also reflect all the differences in process configurations between reference model mills. Thus the pre-defined data set for representative extraction is an efficient tool to use when energy benchmarking newsprint mills.

The bottleneck gives insight to the process limitations and indicates the flexibility the user has regarding the integration. Pinch violations help to pre-identified projects and provide good inspiration for the modified and the classic pinch analysis.

Thanks to the general model and the pre-defined data set, 40 to 70 key parameters are enough to perform the targeting activity for an existing mill and benchmark the results with reference model mills or other existing mills.

For all the newsprint configurations, the application of the water and energy analysis results in similar projects organized in programs with a similar structure. This shows that there are a finite number of key

water and energy projects for newsprint processes and the methodology helps to organized them into programs.

However, the projects related to WW management remains mill specific and case studies showed that it can be properly addressed using the modified pinch analysis. More generally practical aspects such as equipment design must be considered when applying these guidelines to existing mills.

These rules have a good chance to remain valid for value-added paper mills with no chemical pulp produced. When considering paper mills integrated with chemical pulp plant such as Kraft, the methodology will still be valid but the design rules needs to be adjusted.

Acknowledgments

This project was financially supported by Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and Abitibi-Consolidated. The authors would like to thank Martin Fairbank and Leonid Akim for their support and fruitful discussion for the case studies.

References

1. Lafourcade, S. and Stuart, P. R., "Novel approach based on pinch analysis with stream mixing for both energy and flow reduction," *Journal of Egineering Design and Innovation (JEDI)*. Accepted for publication
2. Linnhoff, B. Use pinch analysis to knock down capital costs and emissions. *Chemical Engineering Progress* (August 1994), 32-57. 94.
3. LAFOURCADE, S., FAIRBANK, M., and STUART, P. R. "Roadmap to energy and water use for integrated newsprint mills", 92nd Annual Meeting, Feb 7 2006, Pulp and Paper Technical Association of Canada,
4. PARKER, S. M. , IONIDES, G. N., JOHNSTON, C., ORR, A., and MACKIE, D. M. "Heat recovery for TMP - the forgotten energy source", Pulp and Paper Technical Association of Canada,
5. PAPRICAN. 1994. *Water use reduction in the pulp and paper industry*, 1994. Vol. . ed. Edited by Canadian Pulp and Paper Association. (1994)