

Efficacité énergétique dans le secteur de l'eau
(Volume 5)
Rapport synthèse
Hydro-Québec

HYDRO-QUÉBEC

INRS-Eau

Efficacité énergétique électrique

Les mesures d'efficacité énergétique électrique dans le secteur de l'eau

Volume 5

Gestion de la demande d'énergie électrique au Québec dans les industries de l'eau

par : J.L. Sasseville et J.F. Blais

Synthèse avec la participation de : Pierre Hosatte, Kibi Nlombi, Richard Lampron, Jacynte Lareau, Rabia Lebcir, Khalil Mamouny, Michel Létourneau, Jean-Daniel Bourgault, Denis Couillard, Michel Tremblay, Robert Fontaine, Charles Frenette, Luc Gauvin

Édition : Jean-Louis Sasseville et Jean-François Blais

INRS-Eau, Rapport scientifique No. 405
Institut national de la recherche scientifique

Équipe de réalisation du projet

INRS-Eau

*Jean-François Blais, Jean-Daniel Bourgault, Jacynthe Lareau, Rabia Lebcir, Khalil Mamouny,
Kibi Nlombi, Wanda Shoshanski, Jean-Louis Sasseville
Denis Couillard et Jean-Pierre Villeneuve*

OPTI-CONSEIL Inc.

Richard Lampron, Michel Tremblay, Robert Fontaine

Solivar Groupe Conseil Inc.

Michel Létourneau, Charles Frenette, Luc Gauvin

TN Conseil Inc.

Pierre Hosatte

Sommaire exécutif

Les Systèmes d'Approvisionnement, de Traitement, de Distribution et d'Épuration des Eaux Municipales (SATDEEM) et les Systèmes d'Approvisionnement, de Traitement, de Distribution et d'Épuration des Eaux Industrielles (SATDEEI) engendrent, sous la double pression démographique et des législations environnementales, une consommation d'énergie électrique de plus en plus significative par rapport au bilan national de production. Ces systèmes SATDEEM et SATDEEI sont en effet très énergivores, et vraisemblablement peu optimisés. Les fournisseurs d'électricité y voient une opportunité de procéder à une meilleure rationalisation de leur propre système de production, ceci par le biais d'incitations à la conservation de l'énergie et à une meilleure maîtrise des modes de consommation.

Les économies d'énergie pouvant être réalisées par la mise en place de mesures de conservation de l'énergie électrique pourraient entraîner des économies d'énergie de 10 à 20 %, peut-être beaucoup plus.

Face à ce potentiel d'économie, compte tenu de la diffusion des technologies modernes de traitement et de distribution de l'eau, Hydro-Québec est à mettre en place des programmes d'activités dans le secteur de l'efficacité énergétique électriques. À cette fin, la société d'État a procédé à un inventaire des programmes de même type pouvant exister aux États-Unis et en Europe, et à l'établissement de la problématique générale de l'efficacité énergétique électrique au Québec dans les industries de l'eau. C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux présentés dans la présente série de rapports de recherche. Cette série, intitulée "Mesures d'efficacité énergétique électrique dans le secteur de l'eau", comporte 5 volumes (avec appendices) et 3 annexes :

Volume 1. Les programmes administratifs

Volume 2. La demande d'énergie électrique pour le prélèvement, le traitement et la distribution de l'eau dans le domaine municipal

Volume 3. Les mesures d'efficacité énergétique pour l'épuration des eaux usées dans le domaine municipal

Volume 4. Les mesures d'efficacité énergétique dans le secteur du traitement et de l'épuration des eaux industrielles

Volume 5. Gestion de la demande d'énergie électrique au Québec dans les industries de l'eau

Annexes au rapport

Annexe 1. Bibliographie

Annexe 2. Comptes-rendus de réunions

Annexe 3. Glossaires des termes techniques et des concepts de gestion applicables au secteur de l'eau

Le présent rapport constitue le Volume 5 de la série. Il vient coiffer l'effort de recherche en présentant **une synthèse des travaux** sur la base d'énoncés, de conclusions et de raisonnements destinés à aider la mise en forme d'un programme d'efficacité énergétique dans les industries de l'eau. Il aborde aussi des questions plus théoriques relatives à la gestion de la demande d'énergie électrique, ceci permettant d'intégrer dans un tout cohérent la problématique de l'intervention sur la demande d'électricité, en tenant compte, d'un côté, des facteurs qui interviennent dans les choix d'Hydro-Québec et, d'un autre côté, des comportements des diverses clientèles en regard des procédés de traitement et d'épuration.

Le concept d'efficacité énergétique électrique réfère à la production, la distribution et l'utilisation rationnelle de l'énergie électrique, ceci devant permettre aux fournisseurs de maximiser leurs profits, et de planifier leurs investissements à moyen terme. Appliquée aux industries de l'eau, l'efficacité énergétique réfère surtout à l'utilisation rationnelle et durable de l'énergie électrique. Ici, il ne s'agit pas de minimiser la consommation d'énergie électrique, mais d'en maximiser l'utilité économique dans la production. Cette perspective est présentée au chapitre 1, où l'on aborde la problématique générale de la gestion de la demande. De son côté, le chapitre 2 présente une synthèse de la consommation

d'énergie électrique dans le secteur de l'eau au Québec, alors que le chapitre 3 porte sur l'identification des opportunités et mesures d'efficacité énergétique dans le traitement des eaux de consommation et l'épuration des eaux usées municipales et industrielles. Au chapitre 4, on discute de certaines stratégies de recherche et développement dans le secteur de l'efficacité énergétique dans les industries des eaux municipales (SATDEEM). Le chapitre 5 fait un survol des programmes d'efficacité énergétique pouvant s'appliquer aux SADTEEM¹ et SADTEEI² et discute de certains aspects relatifs à la création d'un programme cadre et de certaines de ses implications pour les industries de l'eau. Enfin, le chapitre 6 résume les principales conclusions de l'étude et formule les recommandations.

Gestion de la demande d'énergie électrique

Si les mécanismes de marché étaient parfaitement opérants dans le secteur de la production et la consommation d'énergie électrique, on peut penser que l'allocation des ressources serait optimale, tant au plan de la production et de la distribution d'électricité, qu'à celui de la consommation. Cependant, en pratique, on observe que les systèmes de consommation sont loin d'être optimisés. Pour contrer cette tendance à la sous-optimisation qui affecte leur rentabilité, les entreprises de production d'énergie électrique ont mis sur pied des programmes de gestion de la demande. Hydro-Québec, par exemple, dès 1990, annonçait un programme d'efficacité énergétique devant réduire la consommation d'électricité de 9.3 TWh en l'an 2000, soit l'équivalent de 5.6 % de la consommation Québécoise à ce moment. Le coût de ce programme est estimé à 1.9 milliards de dollars.

Les programmes de gestion de la demande sont destinés à augmenter l'efficacité ou le rendement énergétique des systèmes de consommation. Ils sont conçus pour influencer le consommateur dans ses habitudes de consommation. La question qui se pose ici est : pourquoi intervenir sur la demande alors qu'il serait vraisemblablement plus simple d'élaborer une tarification représentant le coût marginal de production, et de laisser aux consommateurs, ainsi qu'au système de production afférent de biens et services de s'ajuster à ce prix de l'électricité, prix représentant une vérité des coûts de production?

L'intérêt de la tarification marginaliste repose dans la valeur du signal tarifaire que les fournisseurs d'électricité adressent à leur clientèle, ce dernier ayant théoriquement la capacité d'inciter les acheteurs à adopter un comportement aboutissant à l'optimum sectoriel dans l'allocation des ressources à la production et à la consommation d'électricité. En concurrence parfaite, la tarification au coût marginal serait à cet effet supérieure à la tarification à la valeur d'usage. En effet, en théorie, la tarification marginaliste révélerait aux consommateurs les coûts de satisfaction de la demande et les périodes de l'année et de la journée où il doit faire diligence, tout en favorisant la maximisation des bénéfices des fournisseurs d'électricité, ceci par la constitution d'un parc d'équipement de production en équilibre avec la demande. Un tel équilibre est susceptible de minimiser les coûts d'exploitation. De plus, une tarification marginale plus élevée que la tarification moyenne refléterait la rareté des sources d'énergie primaire.

Cependant, cette approche tarifaire comporte de nombreuses difficultés et imperfections puisqu'elle risque d'entraîner des déficits d'exploitation compromettant l'équilibre budgétaire de la société d'État, et exige d'atteindre un équilibre optimal entre la capacité du parc d'équipement de production et la consommation; en situation d'incertitude, comme le montre l'expérience française, cet équilibre peut-être rompu sur de longues périodes, la société d'État ayant tendance à surdimensionner sa capacité de production. De plus, plusieurs paramètres interviennent dans l'établissement du coût marginal de production, ceci rendant com-

¹ *Systèmes d'Approvisionnement, de Traitement, de Distribution et d'Épuration des Eaux Municipales.*

² *Systèmes d'Approvisionnement, de Traitement, de Distribution et d'Épuration des Eaux Industrielles.*

plexe le calcul des tarifs. Par ailleurs, pour engendrer un optimum sectoriel, la tarification marginaliste, surtout en situation de monopole, exige qu'il soit possible de minimiser les coûts d'utilisation pour le consommateur, c'est-à-dire de minimiser le coût de production, de transport et de distribution et de favoriser l'efficacité énergétique maximale. Enfin, pour être efficace, la tarification marginaliste doit s'accompagner d'un programme d'information du consommateur et doit intégrer la totalité des coûts externes, tel les dommages socioculturels et environnementaux résultant du développement du parc de production. Ainsi, si la tarification marginaliste présente un intérêt pour minimiser le gaspillage par les consommateurs et accroître les profits du monopole d'État, ses difficultés d'application, la dépendance et le caractère captif des clientèles, sont des facteurs qui s'opposent à une telle initiative.

Par ailleurs, on peut montrer que, à défaut d'un tarif au coût marginal, la minimisation des besoins de consommation des consommateurs accompagnée d'une modification de la structure de la demande, s'avèrent le meilleur deuxième choix (second-best). Bref, non seulement les programmes de gestion de la demande découlent directement des impératifs de la recherche d'un optimum économique sectoriel, mais, s'ils sont bien conçus, ils peuvent (1) se substituer partiellement à la tarification marginaliste, (2) engendrer nombre d'avantages monétaires pour les clientèles, (3) harmoniser les rapports clients fournisseurs, (4) améliorer l'équilibre budgétaire de la société d'État, tout en permettant aux pouvoirs publics (5) de minimiser la dissipation de la rente (6) sans engendrer le mécontentement des citoyens.

Doctrines des programmes d'efficacité énergétique

Les éléments constituant la doctrine à la base de la conception et de la mise en oeuvre des programmes d'efficacité énergétique dans les industries de l'eau sont les habituels critères de choix coûts-bénéfices, ainsi que les critères d'intervention concernant les deux aspects cruciaux que sont l'équité vis-à-vis des clientèles (municipalités et industries) et la recherche de l'efficacité sectorielle.

Coûts-bénéfices et équité

Si la société d'État amène certains clients à réduire leur demande d'électricité à partir d'une subvention qui n'excède pas le coût marginal de production et le prix, on se rapprocherait de l'optimum sectoriel. Un tel raisonnement est à la base du programme d'efficacité énergétique soulève cependant certaines réserves quant à l'efficacité réelle d'une telle approche.

De plus, certains impératifs de gestion publique s'imposent à la société d'État. L'équité est une assise importante sur laquelle s'échafaude les relations entre les clientèles et le fournisseur, et par rapport à laquelle les autorités de contrôle sont très sensibles. Non seulement l'intervention est-elle souvent motivée par un souci d'équité, mais la conduite des programmes doit, par principe, minimiser tout effet pouvant augmenter le bien-être des uns au détriment du bien-être des autres. On reconnaît en général que le souci d'équité est un facteur important qui pousse le gouvernement à intervenir pour corriger les problèmes et à surveiller le comportement des sociétés d'État en cette matière.

Au Québec, près de 70 % de la consommation d'électricité des 289 stations d'épuration des eaux usées est concentré dans trois centrales : la communauté urbaine de Montréal, de l'Outaouais et de Québec. Pour la société d'État, par exemple, en limitant son programme d'efficacité énergétique à ces seuls grands centres, elle pourrait limiter considérablement les coûts de son programme, tout en s'assurant d'un maximum de résultats.

Doit-on intégrer toutes les municipalités au programme de contrôle, quel qu'en soient les coûts et les bénéfices pour Hydro-Québec, ou doit-on songer à une formule d'équité sur la base du consentement à payer, par exemple par un partage des coûts du programme?

On peut montrer sur base des critères d'équité que les citoyens des petites municipalités ont droit au même niveau minimal d'efficacité énergétique que dans les grandes, surtout qu'ils sont pénalisés par

des coûts plus élevés. Ce raisonnement aboutit à une règle mixte d'équité absolue et de capacité de payer : toutes les municipalités devraient en principe être traitées de la même manière (se voir offrir le service d'efficacité), le coût du service devant être impartie en fonction du bénéfice économique résultant de la mesure d'efficacité, et non en fonction du coût de la mesure.

L'efficacité sectorielle

Le concept d'efficacité (économique) sectorielle peut-être perçu comme une répartition optimale des coûts de production de l'énergie électrique et des bénéfices que l'on peut obtenir de cette ressource. On dira ici que l'optimum sectoriel est atteint, pour une période donnée, quand le prix de la ressource reflète véritablement la totalité des coûts internes (capital et exploitation) et externes (dommage à l'environnement) et lorsque les consommateurs ne peuvent augmenter ou diminuer leur consommation sans réduire leur bien être.

Synthèse de la consommation d'énergie électrique

Les analyses effectuées dans le cadre de cette étude ont permis d'établir une approximation de la consommation électrique globale associée aux industries de l'eau. Le Tableau présenté ci-bas résume la consommation électrique pour les trois grands secteurs de l'industrie de l'eau.

<i>Eaux de consommation</i>	716 GWh/an	40.1 M \$
<i>Eaux usées municipales</i>	393 GWh/an	24.0 M \$
<i>Eaux industrielles</i>	1 193 ± 550 GWh/an	73 ± 33 M \$
<i>Total</i>	2 302 ± 550 GWh/an	137 ± 33 M \$

Ainsi, en considérant l'approvisionnement, le traitement et la distribution de l'eau de consommation, l'épuration des eaux usées domestiques, ainsi que l'approvisionnement et le traitement des eaux industrielles, on peut estimer la consommation annuelle totale à

2 302 ± 550 GWh. En considérant une augmentation de 25 % (298 ± 138 GWh/an) de la consommation énergétique pour la gestion des eaux industrielles, une hausse de 248 GWh/an pour l'épuration des eaux usées municipales attribuable à la poursuite du PAEQ, ainsi qu'une hausse de 10 % (72 GWh/an) de la dépense électrique pour la gestion de l'eau de consommation, il appert que la consommation électrique dédiée aux industries de l'eau sera d'environ 2 920 ± 688 GWh/an à la fin du siècle.

La demande d'énergie électrique dans les SADTEEM et les SATDEEI est relativement bien structurée. Dans les SADTEEM, par exemple, les pointes de consommation sont souvent en phase avec les pointes de demandes, ceci se distinguant des SATDEEI, où la consommation est en général plus régulière, avec un léger relâchement au cours des fins de semaines, et quelques pointes occasionnées par des opérations de nettoyage. Les pourcentages de contribution au bilan global de consommation de chaque étape de traitement et de chaque type d'équipement sont bien connus, le pompage et l'aération contribuant pour une proportion marquée de la consommation.

Ces exemples laissent entendre que l'on peut cibler avec circonspection les mesures d'efficacité les plus performantes en termes de coûts-avantages. Cependant, il faut compter avec l'obligation de mettre de l'avant une panoplie de mesures d'efficacité si l'on veut exploiter à fond les opportunités d'économie disponibles dans les procédures et technologies en opération actuellement. De plus, par une programmation administrative adéquate, il faut intégrer les facteurs qui interviennent dans les choix des décideurs, d'un côté, en regard de la performance technologique des SADTEEM et les SATDEEI et, d'un autre côté, en regard de leur intérêt pour adopter des mesures d'efficacité coûteuses et contraignantes, dans un contexte de resserrement budgétaire.

Il existe dans la littérature plusieurs approches à la gestion de la demande où s'entrelacent des mesures d'efficacité, basées sur la substitution technologique, l'amélioration des équipements ou la confi-

guration des procédés, et des *stratégies administratives* regroupant des programmes de persuasion morale, d'audit énergétique, de tarification, de rabais, de subvention remboursables ou à risques partagées, d'investissements, de recherche et développement, de substitution technologique, Aucune de ces approches n'est directement orientée vers les industries de l'eau. Indirectement, cependant, elles visent à la gestion de la demande de puissance et à la conservation stratégique (permettant la maximisation des profits des fournisseurs, et la conquête d'une part optimale du marché sur la base d'une tarification avantageuse), au développement de nouvelles technologies plus performantes et moins consommatrices d'électricité, ainsi qu'à la diffusion de nouvelles applications électrotechnologiques.

Pour illustrer ce tissu complexe de programmes et de mesures, mentionnons, à titre d'exemple, *pour les mesures d'efficacité*:

Analyse énergétique en bâtiment : éclairage, chauffage, ventilation et climatisation

- Remplacement du système de refroidissement à air avec une pompe à chaleur dans la source d'eau
- Mise en place d'une surveillance rigoureuse du contrôle du système d'éclairage
- Installation de tubes fluorescents économiseurs d'énergie
- Remplacement des ballasts des divers systèmes d'éclairage fluorescent par des ballasts économiseurs d'énergie
- Substitution de lampes à incandescence par un nouveau type de fluorescent à ballast intégré
- Rationalisation des besoins en chauffage des bâtiments (par exemple, diminution, lorsque possible de 3 à 2 changements d'air frais par heure)
- Réduire le chauffage et la climatisation pendant les fins de semaine et les jours de congé dans les bâtiments inoccupés
- Établissement des températures d'exploitation minimales l'hiver et maximales l'été en fonction de l'utilisation des locaux
- Installation d'un système informatisé de régulation centrale assurant la commande et la surveillance des installations de chauffage, de ventilation et d'air climatisé dans les ouvrages d'assainissement ou de traitement de l'eau

Contrôle de charge

- Installation d'un système de contrôle pour corriger le facteur de puissance

- Installation d'un moniteur de puissance sur le système de distribution pour réduire la demande de charges
- Installation d'un réservoir d'égalisation entre les flux de charges provenant du conduit principal et ceux des conduites secondaires pour contrôler les augmentations soudaines de pression et de charges

Contrôle de la consommation

- Remplacement de la soupape de contrôle de pression en vue de la récupération de l'énergie
- Installation de moniteurs pour le contrôle de l'O₂ dans le système d'aération
- Installation d'un système de contrôle de la nitrification par ordinateur dans les soufflantes
- Augmentation de fréquences de soufflage dans le filtre de nettoyage
- Céduler le nombre de clarificateurs basés sur la charge et le débit
- Installer des chronomètres sur le pompage des boues primaires
- Équilibrer la distribution d'air au niveau des bassins d'aération
- Installer un système d'ajustement automatique du débit d'air
- Réduire le taux de pompage des boues
- Maximiser l'opération dans les filtres à vide durant les heures de pointe
- Remplacer les moteurs des mélangeurs par des moteurs efficaces

Électrotechnologies

- Installation de diffuseurs à fines bulles combinée au contrôle de O₂
- Installation de diffuseurs à membranes poreuses
- Mise en place des procédés de digestion aérobie ou anaérobie thermophile pour stabilisation microbienne des boues
- Mise en place de la combinaison de procédés thermophiles et mésophiles
- Installation pour le traitement des boues des électrotechnologies émergentes: des centrifugeuses à teneurs élevées en solides; des presses électroacoustiques; des presseurs verticaux à auge; des lits de séchage sous vide; des filtres-presses rotatifs à vis; des filtres-presses tubulaires; des membranes filtrantes à courant longitudinal; des déshydratateurs à micro-ondes; systèmes de séchage des boues à la vapeur ou par infra-rouge, etc

Déplacement de la charge

- Implantation d'un système de production d'énergie par le consommateur ou cogénération
- Emmagasiner thermique
- Création de réservoir ou gestion des débits dans les réseaux d'égouts
- Création de réservoirs d'eau fraîche

Moteur efficace et à vitesse variable

- Installation des moteurs à fréquence variable (VFD) pour le contrôle des pompes

- Installation des moteurs à vitesse variable sur les systèmes de pompage des eaux usées
- Installation des moteurs à vitesse ajustable (ASD) sur les soufflantes d'air
- Installation des moteurs à vitesse ajustable (ASD) sur les pompes
- Installation des moteurs à fréquence variable (VFD) sur une des surfaces d'aérateur dans chaque bassin d'aération de deuxième stage
- Installation des pompes à débit variable dans le système de pompage
- **Production d'énergie par le consommateur**
 - Cogénération
 - Bi- ou multi-énergie
- **Tarification spéciale**
 - Tarification au coût marginal en temps réel
 - Mise en place d'un programme de taux interruptibles ou de taux selon la période de consommation
 - Atténuation de la demande et stockage thermique d'énergie

et pour les programmes d'efficacité énergétique :

- **Programme d'audits**
 - Diagnostic, simulation et recommandation de MEEE applicable au chauffage, éclairage, ventilation et air climatisé favorisant l'identification des opportunités de conservation de l'électricité et de gestion de la charge
 - Diagnostics sur les systèmes d'alimentation électrique dans les usines
 - Analyse énergétique en procédé
- **Programmes de substitution et d'amélioration technologique**
 - Promotion d'électrotechnologies efficaces
 - Installation de diffuseurs à fines bulles combinée au contrôle de l'oxygène dissous
 - Programme de pompage
 - Moteur efficace et à vitesse variable (systèmes de pompage de ventilation et de compression)
- **Programmes de recherche, développement et démonstration**
 - Valorisation des biogaz
 - Recompression mécanique de la vapeur
 - Méthanisation des résidus
 - Récupération de l'énergie hydraulique
 - Récupération de l'énergie thermique des eaux usées
 - Refroidissement de procédés industriels par des alternatives
 - Utilisation de pompes à chaleur
 - Transfert d'oxygène et de masse
- **Programmes de promotion de l'efficacité énergétique**
 - Guides de conservation de l'énergie électrique
 - Programme de communication sur la gestion de l'énergie, service offert aux clients pour une meilleure compréhension de leur mode de consommation et du coût de l'énergie, sur la base de logiciel de simulation permettant de vérifier divers scénario d'utilisation
 - Programme de bonnes pratiques : économies d'eau en contrôlant le débit par modulation de

- la pression, aération, recyclage maximal d'eau, digestion anaérobie
- Programme d'assistance technique pour informer la clientèle sur les économies d'énergie potentielles
- Programme de standards énergétiques + donnant des services de design, des incitatifs financiers et des récompenses morales aux industries entreprenant des travaux de rénovation ayant une contribution à la conservation de l'énergie électrique et à la gestion de la demande
- **Programme favorisant les associations de clientèles**
 - Programme formation de consortium ou trust de consommateurs d'énergie électrique
- **Programmes de tarification**
 - Programme de taux interruptibles permettant aux grands clients ayant une charge constante de contrôler leur demande en interrompant la consommation pendant des périodes fixes
 - Programme de taux interruptibles ou de taux selon la période de consommation
 - Programme horaire de prix à la consommation d'énergie électrique en essai en 1990 pour juger de son effet sur la consommation d'énergie, en comparaison avec les autres stratégies de tarification, avec ou sans coût pour accéder
 - Programme d'interruption volontaire pour les clients de plus de 500 kW
 - Tarification au coût marginal en temps réel
 - Rabais standards ou sur mesure, et prêts sans intérêt pour 30 à 40 MEEE, touchant l'éclairage, CAHV, moteurs, procédés de fabrication et autres
 - Rabais directs et incitatifs pour le respect des standards d'efficacité énergétique
 - Rabais et incitatifs pour favoriser les initiatives en efficacité énergétique
- **Programme d'initiatives énergétiques**
 - Assistance technique et incitatifs pour la réduction de la consommation et pour l'écroûtage des pointes de demande dans les programmes de modernisation ou de remplacement d'équipements désuets
 - Assistance technique et incitatifs pour la réduction de la consommation, pour l'écroûtage des pointes de demande et pour le déplacement des demandes de charges pour les nouvelles constructions
 - Incitatifs pour des techniques plus performantes pour le refroidissement des édifices (expansion directe et pompe à chaleur)
 - Incitatifs pour le recouvrement de la chaleur perdue provenant des systèmes de chauffage
- **Programme d'investissement**
 - Programme commercial et industriel d'éclairage couvrant 50 % des coûts du rehaussement de l'efficacité
 - Programmes de rabais sur l'acquisition de nouveaux appareils d'éclairage
 - Programme de rabais sur l'acquisition d'équipements autres que les moteurs et

les appareils d'éclairage négociés ad hoc avec le client

- Subventions remboursables pour le développement et l'implantation de programme de gestion de la demande, de réduction des coûts et de réduction de la consommation
- Programme d'économie partagée permettant le financement à 100 % par le fournisseur d'électricité, le remboursement à 100 % du financement et la conservation par la suite de l'économie d'énergie par le client industriel
- Programme de réduction à deux ans des périodes de retour sur l'investissement (max. la moitié du coût) pour des projets réduisant la demande de 500 MWh/an, ou réduisant la demande de 500 kW
- Programme de déplacement des pointes par des investissements pour l'emménagement thermique, la création de réservoir ou la production d'énergie par le consommateur ou cogénération

Le choix de mesures efficaces et de programmes efficaces parmi cet ensemble complexe de relations "MEEE - Programmes administratif" peut être considérablement simplifié si l'on procède par structuration progressive du plan d'intervention en efficacité énergétique, au fur et à mesure que se développeront les connaissances sur l'impact des mesures, la façon de les implanter, leur efficacité économique, leur équité et leur acceptabilité par les clientèles.

Ceci exige la mise en place d'une organisation porteuse, structurée sous forme de centre d'activités : l'unité d'intervention en matière d'initiatives d'efficacité dans les industries de l'eau devrait englober des responsabilités pour les eaux urbaines et industrielles. Elle devrait se coordonner avec une unité d'intervention dans le secteur des procédés industriels, et vraisemblablement avec une unité d'intervention au niveau des clientèles résidentielles et commerciales.

La recherche, développement et démonstration (RD&D) devrait aborder la problématique de l'efficacité énergétique dans sa globalité. Sur ce sujet, il faut considérer l'opportunité de créer un centre régional en collaboration avec EPRI, dont la responsabilité en matière d'efficacité énergétique pourrait dépasser le cadre environnemental. Par ailleurs, il faut nécessairement un centre de coordination, ce dernier pouvant être articulé sur la base d'un système d'information et de communication moderne.

La formule du guichet unique, à cause de la complexité intrinsèque du marché de l'efficacité énergétique, est la seule qui apparaît en mesure de dynamiser le programme d'efficacité. De même, un organe de promotion et commercialisation devrait être positionné en soutien. Enfin, un organe de gouverne et de planification stratégique doit voir à impartir les budgets de développement et de commercialisation, de même que l'ensemble des règles devant aboutir aux choix les plus pertinents des programmes et des mesures d'efficacité énergétiques.

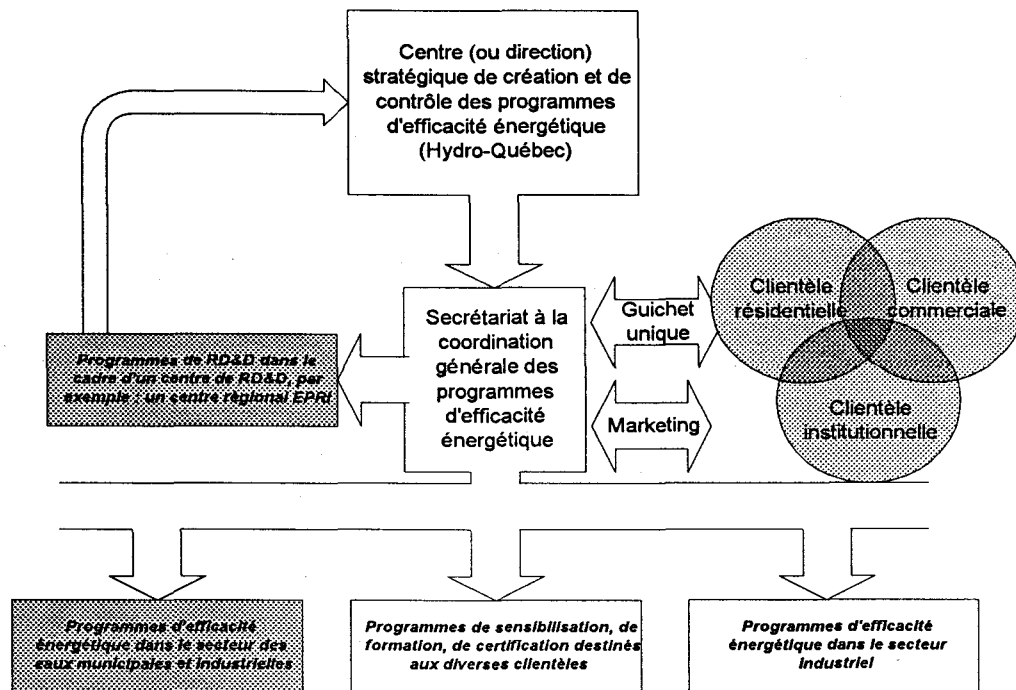


Table des matières

SOMMAIRE EXÉCUTIF	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	xi
LISTE DES TABLEAUX	xiii
INTRODUCTION.....	1
 1. GESTION DE LA DEMANDE D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE	 5
1.1 L'intérêt et les limites de la tarification marginaliste	6
1.2 Le bien-fondé et les avantages de la gestion de la demande.....	11
1.3 Doctrine des programmes d'efficacité énergétique	13
 2. SYNTHÈSE DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS LE SECTEUR DE L'EAU AU QUÉBEC	 20
2.1 Approvisionnement, traitement et distribution de l'eau municipale.....	20
2.1.1 Systèmes de traitement.....	20
2.1.2 Consommation d'énergie électrique.....	28
2.2 Épuration des eaux usées municipales.....	30
2.2.1 Demande globale actuelle et projection	32
2.2.2 L'efficacité énergétique hydraulique	33
2.2.3 L'efficacité énergétique épuratoire.....	34
2.2.4 La demande de puissance.....	35
2.2.5 Fluctuation de la consommation.....	36
2.2.6 Configuration des procédés et des équipements électriques.....	40
2.3 Traitement et épuration des eaux industrielles (SADTEEI).....	49
2.3.1 L'analyse des SADTEEI.....	49
2.3.2 Évaluation de la consommation des SADTEEI desservie par HYDRO-QUÉBEC	53
2.3.3 Évolution des SADTEEI et de la consommation.....	54
2.4 Valeur économique de la conservation de l'énergie électrique dans les SADTEEI et SADTEEI.....	55
2.4.1 Les coûts reliés à la consommation d'électricité pour le traitement des eaux de consommation.....	55
2.4.2 Les coûts reliés à la consommation d'électricité pour l'épuration des eaux usées	55
2.4.3 Les coûts reliés à la consommation d'électricité pour le traitement et l'épuration des eaux industrielles.....	57
2.5 Synthèse générale de la consommation	57
 3. LES MESURES D'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE	 59
3.1 Le traitement des eaux de consommation municipales.....	60
3.1.1 Ozonisation.....	60
3.1.2 Filtration à taux rapide.....	60
3.1.3 Pompage.....	61
3.1.4 La désinfection de l'eau	62
3.1.5 Les réservoirs de stockage	62
3.1.6 L'éclairage	63
3.1.7 Les fuites dans le réseau.....	63
3.1.8 La conservation de l'eau de consommation	63
3.1.9 Les réservoirs de chasse des toilettes	63
3.1.10 Les douches	64

3.2 L'épuration des eaux usées municipales.....	64
3.2.1 Amélioration des systèmes de pompage des eaux usées et des boues	68
3.2.2 Réduction de l'infiltration et de l'impact de la charge hydraulique	69
3.2.3 Efficacité des prétraitement et traitement primaire	69
3.2.4 Traitement secondaire.....	70
3.2.5 Traitement tertiaire	72
3.2.6 Traitement et élimination des boues	73
3.2.7 Éclairage, chauffage et climatisation des bâtiments	76
3.2.8 Optimisation de la puissance appelée	77
3.2.9 Le contrôle du facteur de puissance	77
3.2.10 L'interconnexion réseau d'aqueduc - minicentrale thermique.....	77
3.3 Opportunités d'économies d'énergie pour les SADTEEI	81
4. LES STRATÉGIES DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT EN EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DANS LES INDUSTRIES DE L'EAU	84
4.1 Recherche et développement en cours dans le secteur de l'efficacité énergétique	84
4.1.1 États-Unis.....	84
4.1.2 Europe	89
4.1.3 Recherche à l'internationale	91
4.1.4 Québec.....	92
4.2 Pistes de RD&D dans le secteur des eaux municipales (SATDEEM).....	93
4.2.1 Situation énergétique de référence.....	93
4.2.2 Système informatique de gestion en efficacité énergétique électrique dans le secteur des eaux municipales	93
4.2.3 Récupération de chaleur	95
4.2.4 Mesures visant à réduire la consommation d'eau et indirectement d'électricité.....	97
4.2.5 Chauffage et alimentation des usines de traitement	98
4.2.6 Interconnexion réseau d'aqueduc - minicentrale thermique.....	99
4.2.7 Le développement de technologies plus performantes.....	99
4.3 Le secteur des eaux industrielles (SADTEED).....	101
4.3.1 Situation énergétique de référence.....	101
4.3.2 Système informatique de gestion en efficacité énergétique électrique dans le secteur des eaux industrielles	101
4.3.3 Mesures visant à réduire la consommation d'eau et indirectement d'électricité.....	101
5. PROGRAMMES ADMINISTRATIFS EN EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DANS LES INDUSTRIES DE L'EAU	103
5.1 Objectifs des programmes de gestion de la demande.....	103
5.2 Type de programmes de gestion de la demande	105
5.2.1 Les programmes administratifs dans le secteur de l'eau	107
5.2.2 Programmes administratifs applicables aux industries de l'eau	108
5.3 La conception des programmes de gestion de la demande dans le secteur de l'eau	117
5.4 La structure du programme d'efficacité énergétique.....	123
5.5 Organisation porteuse	125
6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES.....	129
BIBLIOGRAPHIE	135

Liste des Tableaux

TABLEAU 1.	BILAN DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE GLOBALE DE L'ÉPURATION DES EAUX USÉES MUNICIPALES AU QUÉBEC EN FONCTION DE LA POPULATION DESSERVIE.....	17
TABLEAU 2.	CRITÈRES D'INTERVENTION OU IMPÉRATIFS DE GESTION ET ÉVALUATION INTUITIVE DE LA CONTRIBUTION À L'EFFICACITÉ SECTORIELLE (C.E.S.) ..	19
TABLEAU 3.	POPULATION ET CAPACITÉ DE TRAITEMENT MOYENNES PAR STATION D'ÉPURATION.....	31
TABLEAU 4.	RENDEMENTS ANNUELS MOYENS (%) DES STATIONS D'ÉPURATION POUR LES DIVERS TYPES DE TRAITEMENT DES EAUX USÉES UTILISÉS AU QUÉBEC.....	32
TABLEAU 5.	BILAN DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE GLOBALE DE L'ÉPURATION DES EAUX USÉES MUNICIPALES AU QUÉBEC EN FONCTION DE LA CHARGE HYDRAULIQUE	34
TABLEAU 6.	BILAN DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE GLOBALE DE L'ÉPURATION DES EAUX USÉES MUNICIPALES AU QUÉBEC EN FONCTION DE LA CAPACITÉ ÉPURATOIRE.....	35
TABLEAU 7.	BILAN GLOBAL DE LA PUISSANCE ÉLECTRIQUE APPELÉE LORS DE L'ÉPURATION DES EAUX USÉES MUNICIPALES AU QUÉBEC	35
TABLEAU 8.	VARIATION DU FACTEUR DE POINTE DE PUISSANCE (FP*) LORS DE L'ÉPURATION DES EAUX USÉES MUNICIPALES AU QUÉBEC	36
TABLEAU 9.	CONSOMMATION ÉLECTRIQUE TYPIQUE DES ÉTAPES DE TRAITEMENT DES EAUX USÉES MUNICIPALES	41
TABLEAU 10.	CONSOMMATION ÉLECTRIQUE TYPIQUE DES ÉTAPES DE TRAITEMENT DES BOUES D'ÉPURATION MUNICIPALES.....	42
TABLEAU 11.	BILAN DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE POUR L'APPROVISIONNEMENT ET LE TRAITEMENT DES EAUX INDUSTRIELLES AU QUÉBEC.....	53
TABLEAU 12.	BILAN DES COÛTS EN ÉLECTRICITÉ ASSOCIÉS À L'ÉPURATION DES EAUX USÉES MUNICIPALES AU QUÉBEC	56
TABLEAU 13.	BILAN DES COÛTS EN ÉLECTRICITÉ ASSOCIÉS À L'APPROVISIONNEMENT ET AU TRAITEMENT DES EAUX INDUSTRIELLES AU QUÉBEC ÉTABLI SUR LA BASE DE LA CONSOMMATION MÉDIANE ESTIMÉE.....	57
TABLEAU 14.	BILAN GLOBAL DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE QUÉBÉCOISE ASSOCIÉE AUX INDUSTRIES DE L'EAU.....	58
TABLEAU 15.	IDENTIFICATION DES MEEE POTENTIELLES ET LEUR INCIDENCE SUR LA GESTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.....	64
TABLEAU 16.	LÉGENDE DES ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES	65
TABLEAU 17.	MEEE APPLICABLES PAR SECTEUR D'UNE STATION D'ÉPURATION.....	66
TABLEAU 18.	LES MESURES D'ÉCONOMIE DE L'EAU	83
TABLEAU 19.	ÉVALUATION DES MESURES D'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE (POUR LES PROJETS COMPLÉTÉS ET POUR LES PROJETS PROPOSÉS) DANS LES USINES DE TRAITEMENT D'EAU POTABLE PAR LE NEW JERSEY AMERICAN WATER COMPANY WATER SYSTEMS	85
TABLEAU 20.	RÉSUMÉ DES MESURES D'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE APPLIQUÉES DANS LES OUVRAGES D'ASSAINISSEMENT DES EAUX USÉES.....	86
TABLEAU 21.	SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS PROPOSÉES POUR LA GESTION DE L'EAU À PARTIR DES AUDITS D'ÉNERGIE	87
TABLEAU 22.	EXEMPLE DES MEILLEURS RÉSULTATS OBTENUS AVEC FMCT	89
TABLEAU 23.	MESURES TOUCHÉES PAR 54 PROJETS INTERNATIONAUX	92
TABLEAU 24.	POURCENTAGE RELATIF DES PROGRAMMES DE GESTION DE LA DEMANDE AUX ÉTATS-UNIS.....	106

TABLEAU 25.	IDENTIFICATION DES PROGRAMMES AMÉRICAINS APPLIQUÉS AUX INDUSTRIES DE L'EAU.....	110
TABLEAU 26.	SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L'ENQUÊTE DE MCRAE ET SCHICK (1990) SUR LES PROGRAMMES ADMINISTRATIFS ET TECHNIQUES DANS LE SECTEUR DE L'ATTÉNUATION DES POINTES.....	111
TABLEAU 27.	PROCESSUS DE PLANIFICATION DES PROGRAMMES D'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ADOPTÉ PAR HYDRO-QUÉBEC	118
TABLEAU 28.	EXEMPLE DU CALCUL DU COÛT MARGINAL DE L'ÉLECTRICITÉ PAR TRANCHES DE FACTEURS DE CHARGE.....	119
TABLEAU 29.	EXEMPLE DE MATRICE D'IMPACT	122

Introduction

Les Systèmes d'Approvisionnement, de Traitement, de Distribution et d'Épuration des Eaux Municipales (SATDEEM) et les Systèmes d'Approvisionnement, de Traitement, de Distribution et d'Épuration des Eaux Industrielles (SATDEEI) engendrent une consommation d'énergie électrique de plus en plus significative par rapport au bilan national de production. Ces systèmes SATDEEM et SATDEEI sont en effet très énergivores, et vraisemblablement peu optimisés. Les fournisseurs d'électricité y voient une opportunité de procéder à une meilleure rationalisation de leur propre système de production, ceci par le biais d'incitations à la conservation de l'énergie et à une meilleure maîtrise des modes de consommation.

Aux États-Unis, par exemple, on estime qu'entre 1 à 2 % de la production d'énergie électrique est consommé par les SATDEEM et le double par les SATDEEI. Selon les études de l'Electric Power Research Institute (l'EPRI), les dépenses liées à la consommation énergétique représentent entre 20 et 35 % des budgets de fonctionnement affectés au traitement et à l'épuration des eaux (Burton Environmental Engineering *et al.*, 1993). On estime que la croissance de la demande d'énergie électrique pour le traitement des eaux usées au cours des 20 prochaines années sera d'environ 40 %, et atteindra plus de 40 milliards de kilowattheure à la fin de cette période. Le traitement de l'eau de consommation (capture, pré-traitement, pompage, traitement chimique, filtration, désinfection, mise sous pression et distribution, avec disposition des boues de filtration) exige approximativement 1 500 à 2 000 kWh/Million de gallons d'eau, ceci étant l'équivalent de la consommation journalière d'environ 5 000 personnes (i.e. environ 125 kWh/personne-année); la structure de la demande d'énergie révèle des crêtes de consommation de 2 à 4 fois plus élevées que la consommation moyenne. Les économies d'énergie pouvant être réalisées par la mise en place de mesures de conservation de l'énergie électrique pourraient entraîner des économies d'énergie de 10 à 20 %, peut-être beaucoup plus.

Face à ce potentiel d'économie, compte tenu de la diffusion des technologies modernes de traitement et de distribution de l'eau, certains organismes sont à mettre en place des programmes d'activités dans le secteur de l'efficacité énergétiques électriques. Par exemple, l'Electric Power Research Institute (EPRI), en collaboration avec l'American Water Works Association Research Foundation (AWWARF) et le Water Environment Research Foundation (WERF), ont créé en 1990 un programme de recherche et développement dans ce secteur; ce programme supporte aussi le développement et la promotion d'électrotechnologies destinées à améliorer la performance coûts-efficacité des systèmes de traitement des eaux de consommation et des eaux usées. De plus, la majorité des fournisseurs nord-américains d'électricité offrent des incitatifs pour favoriser la conservation et la gestion de la demande de puissance.

De son côté, Hydro-Québec étudie la mise sur pied un programme cadre portant sur les mesures d'efficacité énergétiques électriques (MEEE) pour les stations de pompage et de traitement des eaux de consommation et usées. À cette fin, Hydro-Québec a procédé à un inventaire des programmes de même type pouvant exister aux États-Unis et en Europe. De plus, sur la base des connaissances actuelles, la société d'État désire comprendre la problématique générale de l'efficacité énergétique électrique au Québec dans les industries de l'eau.

C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux présentés dans la présente série de rapports de recherche. Cette série, intitulée "**Mesures d'efficacité énergétique électrique dans le secteur de l'eau**", comporte 5 volumes (avec appendices) et 3 annexes :

Volume 1. Les programmes administratifs

Volume 2. La demande d'énergie électrique pour le prélèvement, le traitement et la distribution de l'eau dans le domaine municipal

Volume 3. Les mesures d'efficacité énergétique pour l'épuration des eaux usées dans le domaine municipal

Volume 4. Les mesures d'efficacité énergétique dans le secteur du traitement et de l'épuration des eaux industrielles

Volume 5. Gestion de la demande d'énergie électrique au Québec dans les industries de l'eau

Annexes au rapport

Annexe 1. Bibliographie

Annexe 2. Comptes-rendus de réunions

Annexe 3. Glossaires des termes techniques et des concepts de gestion applicables au secteur de l'eau

Le présent rapport constitue le Volume 5 de la série. Il vient coiffer l'effort de recherche en présentant **une synthèse des travaux** sur la base d'énoncés, de conclusions et de raisonnements destinés à aider la mise en forme d'un programme d'efficacité énergétique dans les industries de l'eau. Il aborde **des questions plus théoriques relatives à la gestion de la demande d'énergie électrique**. Ceci permet d'intégrer dans un tout cohérent la problématique de l'intervention sur la demande d'électricité, en tenant compte, d'un côté, des facteurs qui interviennent dans les choix d'Hydro-Québec et, d'un autre côté, des comportements des diverses clientèles en regard des procédés de traitement et d'épuration.

Ainsi, il est important de situer le *concept d'efficacité énergétique électrique* dans le cadre général de l'efficacité technologique³. L'efficacité

³ Certains réfèrent à la notion d'efficacité technique ou d'efficacité d'un système socio-technique, Nous préférons utiliser le terme efficacité technologique pour fermer quelque peu le champ des objets auxquels réfère le terme. Ainsi, lorsque l'on parle d'efficacité technologique on réfère à une technologie bien déterminée (ou à un ensemble bien de déterminé de technologies), c'est-à-dire à un procédé (ou ensemble de procédés) utilisant

technologique fait appel aux notions d'optimisation des facteurs socio-techniques dans une production quelconque d'un bien ou d'un service. La recherche de l'efficacité technologique ne s'impose pas d'elle même dans une économie où les ressources sont offertes en surabondance sur le marché, à des prix qui ne reflètent pas la totalité des coûts de production. Dans une économie concurrentielle, ou dans un contexte de restriction budgétaire, la recherche de l'efficacité technologique devient cependant un principe à la base de toutes actions techniques.⁴ On cherche à obtenir, aux moindres coûts, un produit ou un service répondant à des normes socio-économiques, que ces "normes" soient imposées par les forces du marché ou par le législateur.

Dans une telle perspective, le concept d'efficacité énergétique électrique prend deux sens bien différents. Selon la perspective du fournisseur, il réfère à la production, la distribution et l'utilisation optimale de l'énergie électrique, ceci devant lui permettre de maximiser ses profits, et de planifier ses investissements à moyen terme. Appliquée aux industries de l'eau, l'efficacité énergétique réfère surtout à l'utilisation rationnelle de l'énergie électrique. Il ne s'agit pas de minimiser la consommation d'énergie électrique, mais d'en *maximiser l'utilité économique dans la production*. Le corollaire de ce concept est que la minimisation de la consommation d'énergie électrique par les SADTEEM et SADTEEI n'est pas ce qui nécessairement recherchée en *efficacité énergétique électrique*. Il est vrai, cependant, que cet effort de maximisation de l'utilité de chaque facteur intervenant dans la production d'une eau d'une qualité désirée se traduit inévitablement par une minimisation des pertes *inutiles* d'énergie, et par une optimisation de la consommation pour minimiser les coûts d'exploitation des SADTEEM et SADTEEI.

Cette perspective est présentée au chapitre 1, où l'on aborde la problématique générale de la gestion de la demande. Le chapitre 2 présente une synthèse de la consommation d'énergie électrique dans le secteur de l'eau au Québec. On y traite de la consommation de l'électricité pour l'approvisionnement, pour le traitement et distribution de l'eau de consommation, ainsi que pour l'épuration des eaux usées municipales (demande globale actuelle et projection, efficacité énergétique hydraulique et épuratoire, la demande de puissance, les fluctuations de la consommation, la configuration des procédés et des équipements électriques. De plus, on y aborde la demande d'électricité dans le traitement et l'épuration des eaux industrielles (pour les secteurs des pâtes et papier, de la métallurgie, de l'agro-alimentaire, des mines,

des composantes physiques pour transformer une ou plusieurs caractéristiques de la matière ou pour transmettre et traiter une information.

⁴ *En concurrence pure et parfaite, la rareté des ressources s'exprime en tant que vérité dans les mécanismes de prise de décision. De même, en période de restrictions budgétaires, l'obligation de réduire les coûts de fonctionnement intervient dans toute décision d'affectation des budgets. Dans un tel contexte, la minimisation des coûts de production impose une amélioration de l'efficacité technologique.*

des produits chimiques, du textile et du traitement de surface). Enfin, on y détermine la valeur économique approximative que représente le marché de l'électricité dans ces secteurs.

Le chapitre 3 porte sur l'identification des opportunités et mesures d'efficacité énergétique dans le traitement des eaux de consommation et l'épuration des eaux usées municipales et industrielles. Au chapitre 4, on discute de certaines stratégies de recherche et développement dans le secteur de l'efficacité énergétique dans les industries des eaux municipales (SATDEEM), en s'inspirant des travaux en développement ailleurs dans le monde, et en tenant compte de certaines particularités québécoises. Le chapitre 5 fait un survol des programmes d'efficacité énergétique pouvant s'appliquer aux SADTEEM et SADTEEI et discute de certains aspects relatifs à la création d'un programme cadre et de certaines de ses implications pour les industries de l'eau. Enfin, le chapitre 6 résume les principales conclusions de l'étude et formule les recommandations.

1. Gestion de la demande d'énergie électrique

En mai 1991, sur les ondes de Radio-Canada, Hydro-Québec rendait public la construction d'une centrale thermique de pointe dans la région de Bécancour, d'une puissance de 400 MW, destinée à assurer une marge de puissance durant 200 h par an. Les coûts d'investissement sont estimés à environ 400 M\$ et il était précisé que la centrale consommerait environ 8 M\$ de combustible par an. L'obligation de mettre de l'avant un tel projet est un bon exemple des problèmes d'équilibre du parc d'équipement de production et du niveau de la demande auquel la société d'État est confrontée : les coûts croissants occasionnés par la production d'électricité pendant quelques heures par an, au moment de la plus forte demande. Ces coûts sont de plusieurs fois plus élevés que le prix de vente de l'électricité (qui se situe environ à 6 ¢/kWh). En effet, dans l'exemple précédent, on calcule facilement, sur la base d'un amortissement sur 20 ans, un prix de revient minimal de l'électricité d'appoint dépassant 70 ¢/kWh, ceci sans compter le personnel, l'entretien de la centrale, ou le coût du capital.

Si les mécanismes de marché étaient parfaitement opérants dans le secteur de la production et la consommation d'énergie électrique, on peut penser que l'allocation des ressources serait optimale, tant au plan de la production et de la distribution d'électricité, qu'à celui de la consommation. Cette allocation optimale des ressources traduirait en quelques sortes l'optimum social sectoriel où, en tout temps, est produite et consommée la quantité d'énergie électrique requise pour engendrer un maximum de bien-être. Cependant, en pratique, on observe que les systèmes de consommation sont loin d'être optimisés. Sans une certaine incitation morale ou tarifaire à une meilleure efficacité dans l'usage de l'énergie électrique, il est difficile d'envisager comment pourrait se réduire la pression sur la demande d'énergie, et ainsi les tendances aux augmentations du coût de l'énergie et du gaspillage des ressources naturelles.

Pour contrer cette tendance au gaspillage qui affectent leur rentabilité, les entreprises de production d'énergie électrique, parfois assistées des autorités législatives, ont mis sur pied des programmes de gestion de la demande. Hydro-Québec, par exemple, dès 1990, annonçait un programme d'efficacité énergétique devant réduire la consommation d'électricité de 9.3 TWh en l'an 2000, soit l'équivalent de 5.6 % de la consommation Québécoise à ce moment. Le coût de ce programme est estimé à 1.9 milliards de dollars (Bernard, 1994).

Les programmes de gestion de la demande sont presque tous destinés à augmenter l'efficacité ou le rendement énergétique des systèmes de consommation, mais certains se destinent à accroître de façon contrôlée la demande.⁵ Ils sont conçus, comme on le verra plus loin, pour influencer le

⁵ Comme on le verra au chapitre 5 en détail, les programmes qui s'attaquent directement à réduire les coûts marginaux de production en période de pointe visent plus particulièrement

consommateur dans ses habitudes de consommation soit pour réduire son niveau de consommation, soit pour déplacer dans le temps ses demandes, ceci se traduisant par une réduction de la demande générale ou par une diminution substantielle de la puissance de pointe à être supportée par le réseau de production et de consommation, soit encore pour remplacer des technologies traditionnelles par des électrotechnologies, ceci résultant irrémédiablement en une augmentation de la demande et une certaine maîtrise par les fournisseurs de leur part du marché.

La question qui se pose ici est : pourquoi intervenir sur la demande alors qu'il serait vraisemblablement plus simple d'élaborer une tarification représentant le coût marginal de production, et de laisser aux consommateurs, ainsi qu'au système de production afférent de biens et services de s'ajuster à ce prix de l'électricité, prix représentant une vérité des coûts de production? C'est cette question et ses conséquences sur la gestion de la demande que nous allons brièvement traiter dans ce chapitre, avant de nous adresser plus spécifiquement à certaines questions théoriques touchant la conception des programmes d'efficacité énergétique et la mise en forme de programme de R&D et de RD&D devant favoriser la substitution technologique.

1.1 L'intérêt et les limites de la tarification marginaliste

La maîtrise des niveaux de consommation de l'énergie électrique dans le secteur des eaux municipales et industrielles procède, d'une part, des grands programmes de conservation des ressources naturelles mis en place progressivement au cours de 20 dernières années par les gouvernements et, d'autre part, des efforts des fournisseurs d'électricité pour planifier et contrôler la demande d'énergie électrique dans un contexte de rareté ou du contingentement des sources de production. Ainsi, sous la pression des citoyens, les gouvernements ont accru considérablement les normes de performances sociales pour la mise en oeuvre et l'opération des installations de production d'électricité. Ces nouvelles normes d'encadrement de la filière énergétique résultent en une augmentation sensible des coûts de développement de nouvelles unités de production, coûts devant éventuellement se traduire par une élévation du prix à la consommation.

Or, la sécurité énergétique est maintenant considérée comme un bien public, et les gouvernements deviennent de plus en plus imputables de sa pro-

quatre objectifs : 1) l'écrêtement ou effacement de la charge pendant les heures de demande de pointe, par arrêt de service ou substitution par une autre source d'énergie; 2) le déplacement de charges ou report de la consommation pendant les heures de pointe vers les heures de plus faible demande, essentiellement par le recours à des méthodes de stockage (qui s'appliquent bien dans le cas de l'industrie de l'eau); 3) la modulation, l'équivalent du déplacement de charges mais sur des périodes plus longues (périodes de faible débit hydraulique); et 4) le comblement de creux ou l'incitation à l'utilisation d'électricité pendant les périodes excédentaires, qui se conçoit mal également dans le secteur de l'eau.

duction. Le contrôle des prix à la consommation, notamment auprès du segment de clientèle que sont les clients résidentiels, est une composante centrale de la sécurité énergétique, cela d'autant plus que les substituts efficaces aux multiples fonctions de l'électricité sont à toute fin pratique inexistantes et que les entreprises produisant et distribuant l'énergie électrique exercent un pouvoir quasi monopolistique. Les gouvernements fixent ainsi les tarifs d'électricité, c'est le cas dans la majorité des provinces canadiennes, et de toute autre fourniture d'énergie auprès des clientèles captives. Lorsqu'il s'agit d'une entreprise publique, comme c'est le cas pour Hydro-Québec, le contrôle tarifaire déborde irrémédiablement sur tous les segments de clientèle, ce contrôle s'avérant un levier important dans la production du bien-être et la répartition des richesses⁶.

Pourquoi la mise en oeuvre de programmes d'efficacité énergétique ou de gestion de la demande dans le secteur de la production et de la consommation d'électricité plutôt qu'une tarification marginaliste?

L'intérêt de la tarification marginaliste repose dans la valeur du signal tarifaire que les fournisseurs d'électricité adressent à leur clientèle, ce dernier ayant théoriquement la capacité d'inciter les acheteurs à adopter un comportement aboutissant à l'optimum sectoriel dans l'allocation des ressources à la production et à la consommation d'électricité. En concurrence parfaite, la tarification au coût marginal serait à cet effet supérieure à la tarification à la valeur d'usage. En effet, cette dernière suscite une surconsommation en période de pointe, tout en faussant le choix des consommateurs sur la quantité d'énergie à utiliser, ou encore. La tarification marginaliste serait aussi supérieure à la tarification au coût moyen comptable, cette dernière résultant inévitablement en une allocation sous-optimale des ressources, en encourageant la consommation, et en rendant indifférent le consommateur au période de consommation; comme plaidoyer pour juger de la sous-optimalité de la tarification au coût moyen comptable, il faut noter que le ratio du coût de production entre les pointes d'hiver et les heures creuses d'été peut atteindre un facteur 10 (Gouja, 1993).

En théorie, en concurrence parfaite, la tarification marginaliste révélerait aux consommateurs les coûts de satisfaction de la demande et les périodes de l'année et de la journée où il doit faire diligence (Levy, 1990), tout en favorisant la maximisation des bénéfices des fournisseurs d'électricité, ceci par la constitution d'un parc d'équipement de production en équilibre avec la demande. Un tel équilibre est susceptible de minimiser les coûts d'exploitation⁷. De plus,

⁶ Au Québec, un comité de l'Assemblée nationale étudie le plan de développement d'Hydro-Québec, et élabore des recommandations pour le ministre de l'Énergie et des Ressources sur les modifications tarifaires à apporter. Sur recommandation de ce dernier, le Conseil des ministres autorise toute hausse tarifaire.

⁷ Gouja (1993) note qu'en situation de monopole public, à long terme, l'industrie électrique devrait produire des rendements d'échelle croissants, ceci impliquant des coûts marginaux

une tarification marginale plus élevée que la tarification moyenne reflétera la rareté des sources d'énergie primaire.⁸

Ainsi, en théorie, la tarification marginale aura un effet significatif sur la demande et sur la conservation d'électricité, tout en favorisant l'adoption d'électrotechnologies émergentes sur la base des avantages réels qu'elles procurent à leurs acquéreurs. *En fonctionnement idéal de marché, la tarification marginale se substitue avantageusement à tout programme de gestion de la demande.*

Cependant, malgré les succès obtenus par la tarification marginaliste sur le contrôle de la demande, comme peut le démontrer la longue expérience de l'EDF en cette matière, cette approche tarifaire comporte de nombreuses difficultés et imperfections (Gouja, 1993; Bélanger et Bernard 1992) :

- En situation de monopole public, la tarification marginaliste risque d'entraîner des déficits d'exploitation compromettant l'équilibre budgétaire de la société d'État.
- Les comportements des fournisseurs de services à la société d'État et des consommateurs d'électricité ne sont en pas en pratique optimaux, d'un côté la tendance à la surenchère pouvant fausser la tarification, alors que d'un autre côté, les habitudes de consommation bien implantées peuvent s'avérer résister aux vrais coûts de la consommation, la valeur d'usage augmentant "artificiellement" (faible part du coût de l'électricité dans les budgets, recherche de temps de retour court dans les investissements comme réaction à la tarification et difficulté d'accès aux capitaux, coûts d'information élevés).

décroissants, et à la longue, une tarification marginale inférieure au coût moyen de production, et ainsi des déficits d'exploitation. Ce serait la situation d'Hydro-Québec. Cependant, ce raisonnement ne semble s'appliquer que lorsque l'on fait l'hypothèse que le monopole ne sera pas contraint par un contingentement ou une raréfaction des sources d'approvisionnement en énergie primaire. Or, les normes sociales deviennent plus sévères, ceci soit par un contingentement coûteux des projets de mise en valeur, où par des obligations de sécurité engendrant des coûts d'investissement et d'exploitation toujours plus important, tendance s'opposant à l'établissement de rendements croissants. À ce sujet, Bélanger et Bernard (1992) soutiennent que la disponibilité des économies d'échelle relativement à la taille du marché est épuisée au niveau de la production d'énergie, mais subsiste encore au niveau du transport de l'énergie et de la distribution.

⁸ Bélanger et Bernard (1992) soutiennent que Hydro-Québec doit faire appel à des installations éloignées et coûteuses pour satisfaire à la demande, et que ceci entraînerait une tarification marginale fort avantageuse pour la société d'État, produisant d'importants profits sur les kW produits par les installations moins récentes ou par celles de Churchill Falls, cette dernière représentant 16 % la puissance disponible.

- Dans la tarification marginaliste, il est important que le coût marginal de production de court terme soit sensiblement équivalent à celui du long terme, ceci entraînant l'obligation d'un équilibre optimal entre la capacité du parc d'équipement de production et la consommation; en situation d'incertitude, comme le montre l'expérience française, cet équilibre peut-être rompu sur de longues périodes, la société d'État ayant tendance à surdimensionner sa capacité de production.
- On reconnaît qu'en tarification marginaliste, l'établissement du tarif doit assurer l'équilibre budgétaire de la société publique en tenant compte de son rôle dans les politiques économiques, sociales et industrielles de l'État. Les tarifs peuvent ainsi être manipulés par l'autorité gouvernementale pour fins, par exemple, de régulation conjoncturelle, de protection et de création d'emplois, ceci s'opposant au principe même de la tarification marginale.
- Plusieurs paramètres interviennent dans l'établissement du coût marginal de production, ceci rendant complexe le calcul des tarifs, et : il existe différents coûts marginaux de production selon les types d'électricité produite (haute tension vs basse tension); les coûts marginaux augmentent aux périodes de pointes; ils sont fortement dépendant de l'augmentation de la demande et de son caractère permanent ou temporaire; ils dépendent aussi de la capacité de production, répondant faiblement à l'augmentation de la demande en situation de surcapacité et inversement; enfin, la marge de réserve de puissance qui, en s'accroissant, agit à la hausse sur le coût marginal. Ces paramètres introduisent un caractère de complexité dans la tarification, limitant ainsi la qualité de l'ajustement du comportement de choix du client en réponse au signal tarifaire. Cette difficulté a tendance à s'opposer à l'implantation d'un tarif marginaliste reflétant la vérité des coûts.
- Pour engendrer un optimum sectoriel, la tarification marginaliste, surtout en situation de monopole, exige qu'il soit possible de **minimiser les coûts d'utilisation pour le consommateur**, c'est-à-dire de minimiser le coût de production, de transport et de distribution et de favoriser l'efficacité énergétique maximale. Ainsi, le problème est d'établir un tarif qui représente la vérité des coûts, mais qui soit en même temps capable d'inciter à l'efficacité énergétique (amélioration de la gestion des équipements, substitution d'électrotechnologies désuètes par des technologies efficaces). Comme il a été souligné précédemment, ces deux fonctionnalités ne sont pas atteintes en pratique dans un seul tarif représentant les coûts marginaux de production. En fait, les autorités de tarification doivent s'engager, dans les plans d'investissement, à livrer les fournitures aux moindres coûts, "tant au niveau de la demande

(demand-side resources) qu'au niveau de l'offre (supply-side resources)" (Gouja, p. 373). Le moyen généralement utilisé pour ce faire est le "least cost plan", qui comporte une série d'options pour la gestion de la demande d'électricité. Par ailleurs, pour être efficace, la tarification marginaliste doit s'accompagner **d'un programme d'information du consommateur**. Ce programme se destine à intégrer au comportement du consommateur le signal tarifaire. On peut penser qu'un tel programme d'information, pour être bien reçu, devrait offrir aux clientèles captives des moyens faciles de contourner les hauts tarifs, par des incitations à une plus grande efficacité énergétique. Ainsi, sur la base de ces arguments, il est essentiel de souligner que la **tarification marginaliste est presque qu'indissoluble d'un programme de gestion de la demande**.

- Enfin, pour être efficace, la tarification marginaliste doit **intégrer la totalité des coûts externes**, tel les dommages socioculturels et environnementaux résultant du développement du parc de production. Pour ce faire, le législateur doit établir un système d'évaluation de ces coûts externes. Les plus simples à évaluer, c'est-à-dire les plus tangibles, sont les coûts de contrepartie qui résultent des ententes formelles entre les diverses communautés et le monopole d'État, ou encore, les interventions de mitigation ou d'atténuation des dommages fait à l'environnement identifiés par les évaluations environnementales. D'autres coûts devront éventuellement être évalués sur la base de normes d'encadrement des systèmes d'exploitation, coûts représentant des dommages sociaux difficiles à circonscrire, comme la contribution à l'enrichissement de l'atmosphère en SO₂ ou en CO₂.

Dans l'ensemble, l'adoption d'une tarification marginaliste présente un intérêt⁹ certain. En effet, cette dernière est théoriquement capable, dans une certaine mesure, d'orienter les comportements de consommation vers l'optimum sectoriel et de magnifier les bénéfices de l'entreprise publique de production et de distribution de l'électricité. On constate cependant que la tarification marginaliste, pour produire un optimum sectoriel, doit presque inévitablement être accompagnée d'un programme de gestion de la demande.

⁹ *Bélanger et Bernard (1992) soulignent que la mondialisation de l'économie et l'ouverture du Québec sur les marchés internationaux, la redéfinition de ententes commerciales telle le GATT et l'ALENA, l'internalisation des dommages externes, notamment les impacts sociaux et environnementaux des projets hydroélectriques, l'expansion des dépenses gouvernementales, la réduction des revenus discrétionnaires des pouvoirs publics, sont tous des facteurs qui rendent plus acceptables la tarification marginale.*

Si la tarification marginaliste présente un intérêt pour minimiser la dissipation de la rente¹⁰ par les consommateurs et accroître les profits du monopole d'État, ses difficultés d'application, la nature de l'entreprise publique comme instrument d'intervention économique et sociale de l'État, la complexité intrinsèque du tarif marginaliste, le surplus des consommateurs résidentiels et industriels qui sont avantagés par une tarification au coût moyen comptable¹¹, la dépendance et le caractère captif des clientèles, sont des facteurs qui s'opposent à une telle initiative.

1.2 Le bien-fondé et les avantages de la gestion de la demande

Cette courte réflexion sur la tarification marginaliste a permis de faire ressortir les points suivants :

- En pratique, pour produire un optimum sectoriel, la tarification marginaliste doit être assortie de programmes de minimisation des coûts de production (l'offre) et d'utilisation (la demande), cela malgré qu'en théorie, sous certaines conditions, le signal tarifaire devrait suffire à maximiser (... à optimiser plutôt) l'efficacité énergétique.
- La tarification marginaliste présente de nombreuses difficultés technico-administratives, et soulève certaines barrières politiques qui rendent peu probables son application à court terme.
- Un système de tarification hybride accompagné d'un solide programme d'efficacité énergétique peut engendrer un comportement

¹⁰ On réfère au concept de rente pour identifier les revenus privés ou publics pouvant être retirés de la mise en valeur des ressources naturelles.

¹¹ Le tableau suivant présente les coûts marginaux (en valeur de 1990), le prix de vente moyen et la répartition de la consommation (tiré de Bélanger et Bernard, 1990).

<i>Clients</i>	<i>Coûts marginaux ¢/kWh</i>	<i>Prix de vente moyen ¢/kWh</i>	<i>prix moyen/coût marginal %</i>	<i>Répartition de la consommation %</i>
<i>Résidentiel</i>	7,00	4,97	71,0	33,2
<i>Commercial</i>	5,90	5,54	93,9	20,5
<i>Industriel</i>	4,06	3,05	75,1	46,0

Ce tableau met en évidence que les clients résidentiels et les industries énergivores dissipent la rente, c'est-à-dire gaspille de l'électricité à des fins dont les bénéfices sont inférieurs aux coûts. La protection des avantages retirés entraîne la création d'un lobby qui intervient pour inciter les gouvernements à maintenir leur emprise sur la tarification.

des consommateurs (résidentiels, industriels et commerciaux) se rapprochant de l'optimum sectoriel, minimisant ainsi la dissipation de la rente (de la valeur économique des richesses naturelles).

On peut sur cette base conclure qu'au Québec, la gestion de la demande s'inscrit ainsi dans la recherche de l'optimum économique sectoriel. À défaut d'un tarif au coût marginal, la minimisation des besoins de consommation des consommateurs accompagnée d'une modification de la structure de la demande permettant de réduire les charges de pointes et la marge de réserve, s'avèrent le meilleur deuxième choix (second-best).

Les programmes de gestion de la demande présentent plusieurs autres avantages pour le monopole d'État :

- Selon l'hypothèse que le monopole d'État ne peut plus faire d'économie d'échelle au niveau de la génération d'électricité, les programmes d'efficacité énergétique permettent de minimiser la dissipation de la rente et d'augmenter la marge bénéficiaire du fournisseur. En effet, en rationalisant la demande, on aboutit à un contrôle de la croissance des coûts marginaux de production, ceci se traduisant par une réduction de l'écart entre la tarification marginale et le coût moyen comptable.
- En augmentant ses tarifs, sans affecter sensiblement la facture des clients, la société d'État augmente sensiblement ses capacités d'investissement.
- En contrôlant davantage les fluctuations de la demande, il devient possible de mieux équilibrer les capacités de production à la demande réelle, ceci se traduisant par un meilleur contrôle des coûts d'exploitation et d'investissement, diminuant d'autant les pressions à la hausse sur les tarifs et augmentant ainsi la satisfaction des clientèles et des pouvoirs publics.
- Un meilleur contrôle de la demande retarde les besoins d'investissements et assainit l'équilibre budgétaire du producteur d'électricité. De plus, la libération de la marge de réserve permet de dégager de l'énergie pour l'exportation.
- Les programmes de gestion de la demande qui offrent des choix aux clients pour minimiser leur consommation et réduire leur facture d'électricité favorisent l'aménagement des relations saines avec le fournisseur d'électricité, cela d'autant plus qu'il s'agit de clientèles captives. Les clients recevant ainsi le signal que la société d'État est préoccupée de son bien-être, adoptera une attitude conciliante face à des éventuelles augmentations de tarif.

Bref, non seulement les programmes de gestion de la demande découlent directement des impératifs de la recherche d'un optimum économique sectoriel, mais, s'ils sont bien conçus, ils peuvent (1) se substituer partiellement à la tarification marginaliste, (2) engendrer nombre d'avantages monétaires pour les clientèles, (3) harmoniser les rapports clients fournisseurs, (4) améliorer l'équilibre budgétaire de la société d'État, tout en permettant aux pouvoirs publics (5) de minimiser la dissipation de la rente (6) sans engendrer le mécontentement des citoyens.

1.3 Doctrine des programmes d'efficacité énergétique¹²

Les éléments constituant la doctrine à la base de la conception et de la mise en oeuvre des programmes d'efficacité énergétique dans les industries de l'eau sont les habituels critères de choix coûts-bénéfices, ainsi que les critères d'intervention concernant les deux aspects cruciaux que sont l'équité vis-à-vis des clientèles (municipalités et industries) et la recherche de l'efficacité sectorielle.

Coûts-bénéfices des mesures d'efficacité

Dans l'ensemble, on reconnaît que l'absence de tarification marginale justifie l'intervention économique d'Hydro-Québec en matière d'efficacité énergétique. Rappelons qu'en l'absence de tarification marginale, en qu'en rendement monopolistique décroissant, la société d'État vend l'électricité au coût historique moyen, ce coût étant devenu inférieur au coût marginal de production. Les difficultés sociales, politiques et technico-administratives d'en arriver à une tarification marginaliste entraînent qu'une réduction des obligations de vendre de l'électricité sous le coût de production devient la solution la plus avantageuse pour le fournisseur. Ainsi, plutôt que d'augmenter les tarifs, par des mesures d'efficacité énergétique électrique, on réduit la consommation générale et la consommation de pointe, et ainsi coûts de production.

Un tel programme, beaucoup plus populaire qu'une augmentation des tarifs, satisfait l'ensemble des intervenants. En effet, "si la société d'État amène certains clients à réduire leur demande d'électricité à partir d'une subvention qui

¹² Il est important de bien poser les bases de la doctrine d'intervention. Ceci permettra de procéder de façon cohérente à la mise en forme du système de raisonnement pour le développement et l'application d'un programme d'efficacité énergétique dans le secteur de l'eau. Cet effort est d'autant plus pertinent que la nature même de la société d'état, son monopole sur la production et la distribution d'électricité et l'importance fondamentale accordée à la sécurité énergétique par la population et les autorités politiques, tout cela impose nombre de critères d'intervention et d'impératifs de gestion. Noter que cette courte incursion dans la doctrine de gestion n'engage que la responsabilité du premier auteur de ce rapport et n'engage aucunement la responsabilité d'Hydro-Québec, cette réflexion ne visant à soutenir le présent effort de rationalisation et à accroître la cohérence du système de raisonnement.

n'excède pas le coût marginal de production et le prix, tous les participants en sortiraient gagnants : premièrement Hydro-Québec réduirait ses pertes à la marge; deuxièmement, le client bénéficiaire de la subvention recevrait un service à un coût inférieur et, finalement, les autres clients ne verraient pas leurs factures augmenter."^{13,14} Cependant, l'intervention économique ne serait justifiée que si le coût de la mesure d'efficacité est inférieur au coût marginal de production de l'énergie économisée.

Un tel raisonnement à la base du programme d'efficacité énergétique soulève cependant certains commentaires. Bernard (1994) soutient que, si la société d'État adopte en pratique le critère de 63 % comme niveau de prise en charge de la mesure d'efficacité (le 37 % résiduel étant à charge du bénéficiaire), un tel partage pourrait impliquer une subvention aux bénéficiaires dépassant le coût marginal de production. Bernard soutient de plus que, lorsque la subvention accordée par Hydro-Québec dépasse le coût de la substitution inter-énergétique, il y a avantage pour la société d'État de supporter ce coût de substitution, plutôt que d'inciter uniquement aux gains d'efficacité techniques.

L'équité

L'équité est une assise importante sur laquelle s'échafaude les relations entre les clientèles et le fournisseur, et par rapport à laquelle les autorités de contrôle sont très sensibles¹⁵. La notion d'équité est une notion morale à la base de l'intervention gouvernementale et, par conséquent, des sociétés d'État. Non seulement l'intervention est-elle souvent motivée par un souci d'équité, mais la conduite des programmes doit, par principe, minimiser tout effet pouvant augmenter le bien-être des uns au détriment du bien-être des autres. Par exemple, plusieurs mesures gouvernementales et de société d'État sont directement issues du souci d'équité :

- Permettre l'amélioration de bien-être pour tous les citoyens respectant des normes minimales relatives au revenu, à la santé, à la sécurité, à l'éducation, etc. Par exemple, en l'absence de capacité

¹³ Bernard (1994), page 27.

¹⁴ Noter qu'Hydro-Québec reconnaît que l'ensemble des dépenses de 1.9 milliards de dollars et la diminution des ventes résultant des mesures d'efficacité viendront augmenter les hausses tarifaires annuelles, mais à long terme la réduction de la croissance de la demande aurait un effet nul sur les tarifs. (Hydro-Québec, 1992)

¹⁵ La notion d'équité réfère aux concepts de justice et d'impartialité: est équitable, ce qui est conforme à la bonne règle, ce que l'on estime convenable ou correct. Les inégalités économiques et sociales ne sont justes (équitable) que si elles aboutissent à des avantages compensatoires pour chacun, particulièrement pour les moins bien nantis de la société, ceci signifiant que les mesures sociales qui pourraient avantager les mieux nantis doivent également améliorer le sort des moins bien favorisés.

de substitution, la sécurité énergétique entraîne des obligations vis-à-vis des plus démunis.

- Assurer à tous un traitement juste devant la loi et les institutions sociales.
- Réduire les inégalités dans la répartition des revenus, de la richesse, du pouvoir et des opportunités sociales et économiques. Par exemple, le partage des coûts dans l'entretien des réseaux de distribution.
- Empêcher les transactions économiques sur les droits (sociaux et politiques) inaliénables.
- Atténuer l'incidence des facteurs arbitraires ou fortuits sur la condition économique et sociale des individus et des groupes, comme la formulation de normes minimales pour les services d'électricité ou les interventions d'urgence.

On reconnaît en général que le souci d'équité est un facteur important qui pousse le gouvernement à intervenir pour corriger les problèmes et à surveiller le comportement des sociétés d'État en cette matière. Comme on peut le voir au glossaire en Annexe 3, il existe une multiplicité de concepts d'équité, plusieurs s'appliquant aux clientèles municipales et industrielles. Dans la mise en forme de son programme d'efficacité énergétique, la société d'État doit voir à l'établissement d'une politique redistributive et incitative basée sur système cohérent de principes d'équité. Quoique ce ne soit pas ici notre rôle d'élaborer une telle politique, examinons rapidement quelques exemples démontrant l'importance d'un système cohérent de critères d'efficacité.

Le cas des grandes et des petites municipalités.

Au Québec, près de 70 % de la consommation d'électricité des 289 stations d'épuration des eaux usées est concentré dans trois centrales : la communauté urbaine de Montréal, de l'Outaouais et de Québec. Pour la société d'État, par exemple, en limitant son programme d'efficacité énergétique à ces seuls grands centres, elle pourrait limiter considérablement les coûts de son programme, tout en s'assurant d'un maximum de résultats, ces grands centres d'épuration étant bien nantis en ressources spécialisées et pouvant recourir sans trop de difficultés à des budgets d'investissement, même dans le cas de longues périodes de retour sur les investissements.

À ce sujet, le Tableau 1 fait le bilan de la consommation électrique globale par type de station et par personne desservie. On constate que l'efficacité énergétique civique (EEC, exprimée en kWh/d/pers desservie) est à peu près semblable pour les 2 stations de traitement chimique (0.28 kWh/d/prs) et pour les 135 traitements par étangs aérés (0.31 kWh/d/prs). De plus, on peut apprécier que la facture d'électricité y correspondant imputable à chaque citoyen est faible par rapport au budget journalier qu'il affecte à la consommation énergétique. Enfin, on constate que la moyenne de consommation d'énergie électrique par station est de 176 000 kWh/d pour le traitement chimique et de 1 000 kWh/d pour le traitement par étangs aérés. Sur cette base, il est clair que les résultats escomptables pour chaque intervention en terme de retombée pour la société d'État ne sont aucunement comparables, et qu'il faut être prudent avant de s'engager dans un programme élargi si l'on souhaite que ses bénéfices soient plus importants que ses coûts.

Ainsi, compte tenu d'une certaine indifférence du citoyen à cause des faibles économies perceptibles et des coûts collectifs importants pour sa municipalité pouvant résulter du programme d'efficacité énergétique, la question de l'équité horizontale par exemple ne se traite pas à main levée. Doit-on intégrer toutes les municipalités au programme de contrôle, quel-qu'en soient les coûts et les bénéfices pour Hydro-Québec, ou doit-on songer à une formule d'équité sur la base du consentement à payer, par exemple par un partage des coûts du programme? Si on opte pour un partage des coûts du programme, doit-on tenir compte de la capacité de payer des municipalités ou établir une formule de prix marchand au niveau des services?

Voyons, à titre d'exemple, quelques règles de raisonnement susceptibles de s'appliquer à la répartition des coûts et des bénéfices des programmes d'efficacité énergétique dans le secteur de l'eau.

Tableau 1. Bilan de la consommation électrique globale de l'épuration des eaux usées municipales au Québec en fonction de la population desservie

Type de traitement	Nombre de stations	Population desservie	Capacité épuratoire (kg DBO ₅ enlevé/d)	CE (kWh/d)	EEC (kWh/d/prs desservie)
Boues activées	27	616 632	44 255	161 130	0.26
Biodisques	4	3 856	207	2 627	0.68
Biofiltration	4	559 400	40 493	103 470	0.18
Étangs aérés	135	437 519	27 107	134 077	0.31
Physico-chimiques	2	1 235 000	70 150	351 239	0.28
Total	172	2 852 407	182 212	752 542	0.26

Dans le secteur municipal, la sécurité environnementale (entre autres, l'approvisionnement en eau de bonne qualité et l'hygiène dans la disposition des eaux usées) doit être considérée comme un bien public. L'énergie électrique est partie intégrante de la production de cette sécurité. Cette sécurité doit être accessible à tout citoyen, et fait l'objet d'une obligation éthique de toutes les municipalités, sans exception. Chaque citoyen a droit au même niveau minimal d'efficacité énergétique. Ceci se traduit inévitablement par un recours de sa collectivité au même niveau de service offert programme d'efficacité, même si cette dernière n'est pas sensibilisée à l'intérêt d'implanter des mesures d'efficacité, ou encore en dépit du fait que le citoyen ne se mobilisera pas pour s'engager dans des dépenses collectives importantes, puisque son gain en bien-être résultant de l'implantation des mesures sera faible. De plus, on peut penser que le coût social du service pour une petite municipalité dépassera largement le bénéfice qu'elle pourra en retirer.

Ce raisonnement aboutit à une règle mixte d'équité absolue et de capacité de payer : toutes les municipalités devraient en principe être traitées de la même manière (se voir offrir le service d'efficacité), le coût du service devant être impartie en fonction du bénéfice économique résultant de la mesure d'efficacité, et non en fonction du coût de la mesure. Évidemment, il s'agit là d'une règle non marchande qui risque d'inciter les petites municipalités à profiter de l'intervention, ceci exerçant une pression très forte sur le coût du programme. La société d'État joue ainsi son rôle comme instrument de répartition des richesses.

L'efficacité sectorielle

Le concept d'efficacité (économique) sectorielle peut-être perçu comme une répartition optimale des coûts de production de l'énergie électrique et des bénéfices que l'on peut obtenir de cette ressource. On dira ici que l'optimum sectoriel est atteint, pour une période donnée, quand le prix de la ressource reflète véritablement la totalité des coûts internes (capital et exploitation) et externes (dommage à l'environnement) et lorsque les consommateurs ne peuvent augmenter ou diminuer leur consommation sans réduire leur bien être.

Le Tableau 2 montre quelques exemples de caractéristiques idéalement recherchées par la société d'État dans une perspective de recherche d'efficacité économique sectorielle.

On constate que sur les 14 critères suggérés pour maximiser l'efficacité économique sectorielle, que les critères No. 2, 4 et 14 s'opposent à la règle générale d'équité applicable à l'affectation des coûts et des bénéfices.

De façon générale, pour les entreprises gouvernementales, tout comme pour les sociétés d'État, on dira que l'équité vis-à-vis du citoyen est hiérarchiquement supérieure à l'efficacité sectorielle dans les règles de raisonnement. Ceci n'est pas une règle fondamentale qui s'applique nonobstant tout autres facteurs, mais obéit aux contraintes de fonctionnement du marché politique et aux impératifs de la gestion publique. Ainsi, par exemple, le souci d'équité peut entraîner Hydro-Québec à subventionner des mesures d'efficacité énergétique à un coût plus grand que le coût marginal de production. Une telle situation risque de se produire dans les petites municipalités, par exemple, où les principaux bénéficiaires seront les contribuables municipaux.

Tableau 2. Critères d'intervention ou impératifs de gestion et évaluation intuitive de la contribution à l'efficacité sectorielle (c.e.s.)

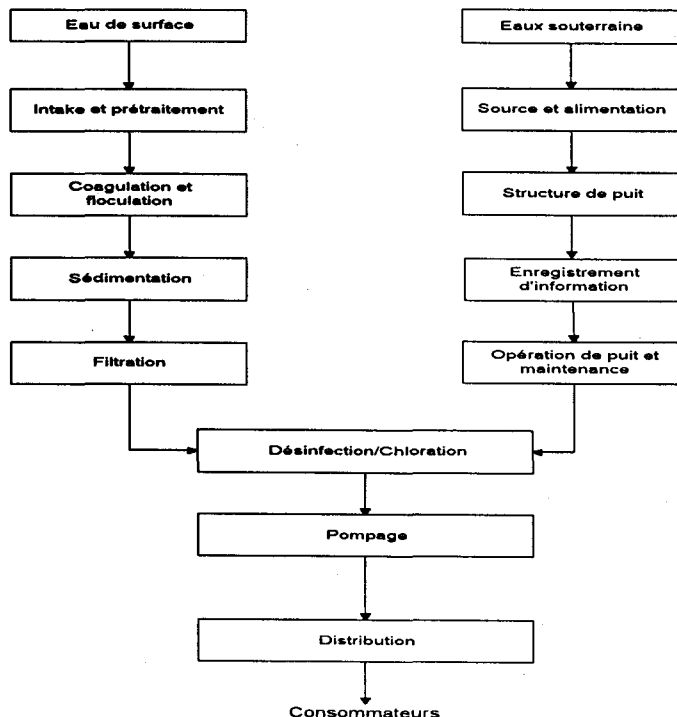
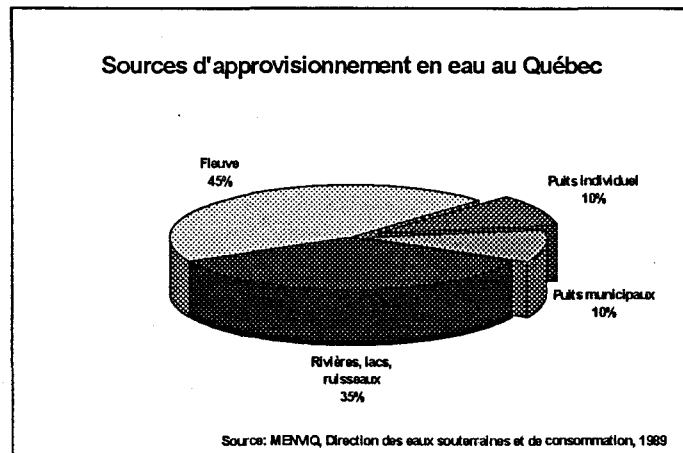
Caractéristiques recherchées	c.e.s.	Commentaires
1. Favoriser l'optimisation des modes de réduction de la consommation de l'énergie électrique ou de modification du patron de consommation au niveau de chaque consommateur municipal et industriel, ceci en tenant compte des autres facteurs intervenants dans sa fonction de production.	+++++	Favorise le choix des méthodes ou technologies de moindres coûts sociaux. Favorise l'intégration et l'efficacité épuratoire.
2. Soutenir, sur la base des règles du marché, les initiatives du consommateur, notamment en favorisant la substitution inter énergétique lorsqu'elle s'impose par des coûts moindres.	+++	Réduit les coûts sociaux des mesures. Favorise la substitution technologique. Notons que ceci s'oppose au principe d'équité.
3. Minimiser l'interférence avec la rationalité des choix des clients municipaux et industriels.	++++	Réduit l'impact des interventions sur les coûts de production de l'exploitant.
4. Minimiser les coûts des programmes d'efficacité à la société d'État.	++++	Réduit les coûts sociaux. Augmente la marge bénéficiaire. S'oppose à la règle d'équité.
5. Favoriser l'utilisation des forces du marché pour la réduction de la consommation d'énergie électrique.	++	Équilibre les investissements avec les capacités financières des clients, mais réduit l'accessibilité aux mesures d'efficacité dans les petites municipalités.
6. Favoriser les interactions entre les clients, le fournisseur d'électricité et les autorités réglementaires.	+++++	Rapproche les décisions tarifaires de l'optimum social.
7. Favoriser la diffusion de l'information et l'apprentissage des clientèles en vue de hausser les connaissances techniques des consommateurs.	++++	Favorise l'acceptabilité des mesures d'efficacité et facilite leur application en pratique, réduisant ainsi les coûts sociaux des programmes.
8. Favoriser le recours à des approches capables d'augmenter la productivité des clients industriels.	+++++	Réduit ou élimine les investissements improductifs.
9. Améliorer la connaissance des coûts d'option résultant des investissements pour les mesures d'efficacité énergétiques	++++	Permet d'identifier les niveaux d'investissement et les périodes de retour qui sont acceptables aux clientèles, favorise la diversification énergétique.
10. Harmoniser les mesures d'efficacité énergétique aux délais imposés par les forces du marché et l'apparition de nouvelles électrotechnologies.	+++++	Minimise le coût des mesures.
11. Minimiser les impacts sur les habitudes des clientèles.	+	Permet d'augmenter le bénéfice social résultant des mesures d'efficacité énergétique et favorise la diffusion des MEEE.
12. Attribuer les coûts des mesures d'efficacité aux clientèles.	-	Favorise l'établissement d'une vérité sur la valeur d'usage. Mais réduit le caractère incitatif des programmes d'efficacité.
13. Voir à exclure les resquilleurs dans le cas d'incitations financières	++++	Favorise l'équité, augmente l'atteinte des objectifs d'efficacité sectorielle.
14. Limiter l'aide financière aux mesures produisant des résultats, et équilibrer l'aide aux bénéfices escomptables par la société d'État.	-	Permet une utilisation efficace des fonds publics. Mais s'oppose au principe d'équité résultant du bien public qu'est la sécurité énergétique.

2. Synthèse de la consommation d'énergie électrique dans le secteur de l'eau au Québec

2.1 Approvisionnement, traitement et distribution de l'eau municipale

2.1.1 Systèmes de traitement

Les origines des sources d'approvisionnement en eau de consommation au Québec sont présentées dans le schéma ci-contre. Les eaux de surface non traitées représentent généralement un plus grand risque pour la santé publique que les sources d'eaux souterraines, et ainsi devront subir des traitements plus complexes, choisis selon le degré de contamination. Les eaux souterraines devront de leur côté subir une ou plusieurs étapes de traitement, telles que la désinfection, la défermentation et l'adoucissement. Un organigramme des étapes conventionnelles de traitement de l'eau de consommation est présenté ici.



De nombreuses municipalités utilisent les procédés physico-chimiques pour l'élimination des matières colloïdales et en suspension. Ce procédé consiste principalement en une filtration rapide précédée par des étapes de coagulation, de floculation et de décantation. D'autres procédés de traitement sont employés à l'occasion, notamment les procédés pour améliorer le goût et les odeurs des eaux, la fluoration, l'ozonisation, l'aération et la déferrisation. Dans moins que 10 % des cas, divers autres types de traitement peuvent être utilisés, dont les traitements biologiques, la reminéralisation/stabilisation, la flottation, l'éradication des moules, le dé-

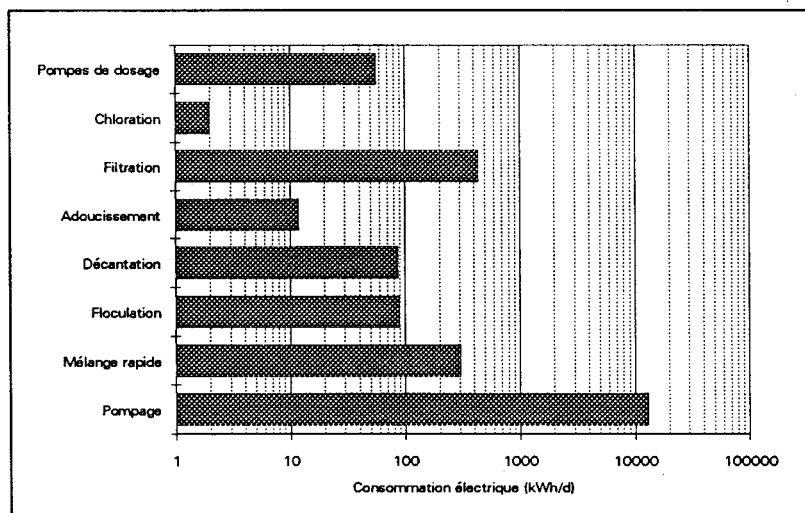
grillage, l'adoucissement et les traitements anti-corrosion.

Principes de traitement

Le traitement de l'eau consiste à enlever toutes formes d'impuretés présentes dans l'eau sous forme solide ou dissoute. Le degré de traitement de l'eau dépend de la qualité de l'eau brute désirée, laquelle est souvent déterminée par les normes environnementales en vigueur. Puisque c'est le degré de traitement qui détermine le nombre et le type des unités de traitement, il existe plusieurs configurations possibles des chaînes de traitement.

Dans le traitement de l'eau potable, l'électricité sert au transport de l'eau, au dosage et mélange des produits chimiques avec l'eau, au lavage des filtres et au transport et déshydratation des boues. Une partie de l'énergie électrique est dédiée à l'éclairage et au chauffage des locaux pour le bien être du personnel, ainsi que pour la protection de la machinerie contre le gel. L'énergie électrique consommée au fin du transport de l'eau sert au pompage de l'eau brute vers l'usine de traitement, et de l'usine vers les consommateurs. Celle-ci représente la grande plus fraction de la consommation totale en électricité, soit un minimum de 70 %.

Les besoins en électricité pour le mélange ne constituent pas une fraction importante de la consommation globale de l'usine. Le mélange se fait au niveau des bassins d'agitation rapide, lesquels nécessitent des gradients de vitesse élevés, afin de permettre une agitation efficace des coagulants. Les bassins de floculation



à leur tour requièrent moins d'énergie car l'agitation doit être faible pour permettre la formation des floccs. La quantité d'électricité utilisée pour le lavage des filtres est consommée par les pompes de lavage et par les compresseurs des soufflantes d'air. Elle est consommée en intermittence, donc selon les besoins inhérents au lavage des filtres. Le transport et la déshydratation des boues s'effectuent respectivement à l'aide de pompes à boues et de filtres-presses. Il faut toutefois noter que ces opérations sont rarement pratiquées au Québec, car la plupart des municipalités déchargent par gravité leurs effluents de lavage et les boues de décantation dans les milieux récepteurs environnants, lesquels peuvent être des cours d'eau naturels ou des réseaux d'égouts.

Désinfection par chloration

La désinfection par chloration consiste en l'étape finale de traitement de l'eau et est utilisée pour la destruction des germes pathogènes. Elle sert également à l'oxydation des matières organiques dissoutes dans l'eau. La réaction du chlore avec des concentrations excessives de matières organiques entraîne la formation de sous-produits organochlorés qui peuvent représenter des risques pour la santé humaine. Ainsi, ce phénomène fait en sorte de réduire progressivement cette pratique, laquelle ne devrait plus être employée à la fin de cette décennie. L'ozonisation remplacera progressivement la chloration pour le traitement de l'eau potable, avec des ajouts légers de chlore afin de garantir la désinfection de l'eau dans les conduites d'eau et les réservoirs de stockage. Il existe des systèmes fonctionnant à l'hypochlorite de sodium, à l'hypochlorite de calcium, au chlore gazeux et au dioxyde de chlore.

L'énergie consommée par la désinfection au chlore est faible par rapport au bilan global.

Désinfection par ozonisation

Il existe, à l'heure actuelle, plus de 1 000 installations à travers le monde dont 35 au Québec, celle de Montréal étant l'une des plus importantes au Monde. Peu utilisé au Québec, seulement 27 % des municipalités emploient l'ozonisation. L'ozonisation se pratique surtout dans les grosses municipalités principalement alimentées en eau de surface.

Les équipements utilisés comprennent des générateurs d'oxygène, des tours de refroidissement, des dessiccateurs, des équipements auxiliaires d'ozone, et des générateurs d'ozone. Opérés en continu, les générateurs d'ozone ont une durée de vie de plus de 30 ans.

L'ozonisation pratiquée en amont de traitement permet d'oxyder le fer et le manganèse, de diminuer la concentration de différents micro-polluants par oxydation et floculation, de briser des molécules organiques complexes et réfractaires, et d'éliminer d'éventuels inhibiteurs biologiques qui pourraient interférer avec les étapes en aval. Pratiquée en aval, l'ozonisation permet l'oxydation des micro-polluants, la désinfection, et l'amélioration de la qualité organoleptique de l'eau.

Une augmentation de la température d'eau à traiter de 4-6 °C à 18-21 °C résulte en une hausse de 60 % de la consommation en ozone et le procédé est moins efficace pendant la période estivale à cause de l'augmentation de la température moyenne d'eau (0° hiver à 20 °C en été). De plus, pour des eaux contenant de fortes concentrations en carbone organique total, le traitement à l'ozone peut s'avérer onéreux à cause d'une grande consommation en ozone. Il n'est pas tout à fait efficace pour oxyder quelques hydrocarbures halogénés. Sa concentration résiduelle disparaît rapidement dans l'eau, soit dans environ 5

minutes. Son coût de génération est élevé et sa production doit se faire sur place. Il a cependant une faible solubilité dans l'eau.

L'énergie consommée pour l'ozonisation est dédiée principalement aux compresseurs d'air, aux fours de séchage et aux ozoniseurs. La consommation en électricité dépend du type d'air utilisé. La génération d'ozone peut se faire à partir d'oxygène liquéfié ou de l'air ambiant (extérieur). L'utilisation d'oxygène liquéfié requiert moins d'énergie que l'usage de l'air extérieur. Il faudrait toutefois considérer l'énergie requise pour la production d'oxygène liquéfié. Aux États unis, la consommation moyenne se situe à 9.9 et 16.5 kWh/kg par usage respectif d'oxygène et d'air. Quant à la moyenne canadienne de consommation, elle varie entre 14 et 33 kWh/kg, alors que la dose moyenne dans l'eau est d'environ 1.5 g/m³. Il n'est pas rare d'observer des variations importantes par rapport à la moyenne de consommation, ceci est le cas d'une municipalité québécoise dont la production revient à 105.5 kWh/kg O₃. Une étude plus poussée devrait sans doute porter sur la gestion des pratiques d'ozonisation au Québec, afin de définir les causes responsables de cette consommation élevée d'énergie électrique.

Désinfection à l'ultra-violet

L'utilisation de la lumière ultraviolette (U.V.) comme moyen unique de désinfection est convenable pour les eaux de faible turbidité et contenant peu de matières organiques biodégradables, telles que les eaux souterraines ou les eaux de surface ayant subi un traitement préalable ou une pré-filtration.

Prise d'eau, micro-tamissage et dégrillage

La prise d'eau est un élément de captage d'eau provenant des cours d'eau, lacs, ou nappe souterraine pour l'acheminer vers l'usine de filtration. Il constitue l'ensemble des équipements, tels que le grillage et le pompage. Les dispositifs de dégrillage ne sont utilisés que pour le pompage d'eau brute, afin d'éviter l'entrée des corps solides dans les pompes. Il existe deux types principaux de grilles; les grilles fixes à barreaux, dont le nettoyage se fait manuellement ou automatiquement par des râteliers mécaniques et les grilles tournantes à toiles mécaniques disposées en bande ou en tambour. Le nettoyage s'effectue par lavage de la toile par des rampes d'eau sous pression. Ces unités doivent être disposées de façon à procurer une eau offrant la meilleure qualité possible, tout en évitant les problèmes de colmatage.

Mélange rapide (coagulation)

Le mélange rapide consiste en l'agitation de l'eau en présence d'agents coagulants dans le but de complexer les matières colloïdales généralement électronégatives présentes dans l'eau et ainsi, de former un précipité décantable. La durée d'agitation varie entre 30 et 60 secondes. Les bassins doivent être équipés de dispositifs mécaniques de mélange rapide qui sont ajustables, afin de pouvoir répondre aux variations de débit et de la qualité de

l'eau brute. Au Québec, les chicanes dans les bassins et d'autres dispositifs, tel que l'insertion d'un mélangeur dans la conduite (in-line blender) ne sont pas acceptés.

Floculation

La floculation est un procédé de traitement visant à promouvoir la formation et la croissance des flocs par agitation lente et prolongée de l'eau sortant du mélange rapide. Le bassin de floculation est muni d'un équipement de brassage lent qui permet aux particules de s'agglomérer en entrant en contact les unes avec les autres pour former une particule plus grosse appelée "floc". L'entrée et la sortie de l'eau des bassins de floculation doivent assurer une bonne distribution de l'eau, éviter le bris des flocs formés et prévenir les courts-circuits. Le temps de rétention est fonction des conditions de l'eau et du dosage de produits chimiques et ne peut être déterminé adéquatement que par des essais en laboratoire. La vitesse d'écoulement dans les bassins de floculation doit se situer entre 0.15 à 0.45 m/s, avec un temps de résidence de 30 à 60 min.

Selon la réglementation québécoise, tout équipement d'agitation mécanique doit être réglable et avoir une vitesse périphérique des palettes variant entre 0.15 à 0.60 m/s. L'emploi des chicanes horizontales ou verticales respectant les critères d'une floculation mécanique n'est accepté que pour des petites installations et selon certaines conditions opératoires. Un ou plusieurs moteurs électriques sont utilisés pour des fins de floculation. Aucune énergie n'est requise pour le pompage, car la turbulence créée à l'intérieur des pompes peut causer une destruction des flocs formés. L'écoulement doit donc se faire par gravité et en écoulement laminaire.

Sédimentation (décantation)

Comme son nom l'indique, la sédimentation consiste à la séparation des particules formées lors de l'étape de la floculation-coagulation. Les bassins de décantation statiques ou conventionnels permettent une séparation solide-liquide pour des eaux contenant de faibles teneurs en impuretés. Ces bassins sont de formes rectangulaires ou circulaires, mais sont conçus de façon à pouvoir traiter adéquatement la charge hydraulique acceptée. Le temps de rétention est de quatre heures, au débit de conception maximum journalier. Lorsque la concentration en impuretés est plus élevée et que l'abondance du floc crée une décantation d'ensemble caractérisée par une interface nettement marquée entre la masse boueuse et le liquide surnageant, la séparation solide-liquide se fait par une décantation dynamique. Le temps de séjour minimal est de deux heures, au débit maximal journalier.

Les dispositifs d'entrée et de sortie doivent assurer une bonne répartition et collection de l'eau afin d'éviter les courts-circuits. Des équipements mécaniques (racleurs) doivent être installés dans les décanteurs. La décantation statique est habituellement employée pour le traitement de l'eau

potable. L'évacuation des boues accumulées se fait par gravité ou par pompage. La plupart des municipalités utilisent le mode gravitaire.

Filtration

La filtration est une étape de polissage par laquelle les fines matières en suspension présentes dans l'eau ayant subi les étapes en amont du traitement, sont éliminées, permettant ainsi l'obtention d'une eau de bonne qualité en termes de turbidité et de MES. Les principaux mécanismes de filtration sont la sédimentation, le coincement, l'interception, les forces hydrodynamiques et la diffusion. Ces mécanismes peuvent agir séparément ou en combinaison. Dans la plupart des cas on trouve au moins deux ou trois facteurs se combinant pour séparer les particules. Ces mécanismes sont régis par de nombreux éléments tels que le diamètre des pores ou le diamètre des grains du lit, la vitesse d'écoulement, le diamètre des particules, la température de l'eau, etc. Ces processus se rencontrent dans la filtration rapide ou lente sur lit granulaire (sable, silice, anthracite).

Une filtration est de type physico-chimique quand la séparation des particules se fait par un ou plusieurs mécanismes de séparation physiques en plus de mécanismes chimiques par forces d'attraction de London-Van der Waals. Pour ce qui est de la filtration biologique, en plus des processus physiques et chimiques, intervient l'assimilation des matières solubles par les microorganismes retenus par le filtre, ce qui permet une réduction significative de la DBO₅ soluble.

Selon le type des matériaux, on distingue plusieurs type de filtres. Ceux dont l'usage est répandue dans l'industrie du traitement de l'eau potable sont les filtres à sable et les filtres à charbon actif granulaire. Ceci n'écarte pas cependant la possibilité de trouver des filtres sous pression, dont l'application est surtout limitée aux industries de produits chimiques.

Au Québec, l'efficacité des filtres semble limitée car 2.7 % des municipalités québécoises dépassent les limites de turbidité admissibles pour la qualité de l'eau potable. Il a été constaté que la majorité de ces cas (28 sur 29), les réseaux sont de capacité modeste, où l'eau n'est pas traitée ou subie une simple chloration (MENVIQ, 1989). La gamme des valeurs hors-normes s'étend de 5.2 à 68 UTN. En vertu des normes environnementales relatives à la turbidité, une concentration limite de 5 UTN est admissible au Québec. Cette norme est très relâchée en comparaison à la valeur prescrite par le U.S. EPA (Clean Water Act) qui est de 0.1 UTN.

La filtration à taux rapide. Les systèmes de filtration à taux rapide comprennent plusieurs filtres intercalés en amont de la désinfection et en aval du procédé de pré-traitement, incluant la coagulation et la floculation suivie d'une décantation. Les filtres peuvent aussi être en aval d'une chaîne incluant seulement une décantation, avec bassin de rétention et pré-filtres.

Dans le cas de la filtration rapide, l'énergie électrique est utilisée pour le fonctionnement des pompes et compresseurs d'air servant au lavage des filtres. Le lavage d'un filtre s'effectue chaque 1 à 3 jours. Le temps de lavage dure environ 15 à 20 minutes, alors que la directive actuelle du MEF exige une durée minimale de 20 minutes.

La consommation électrique comprend celle attribuable au traitement de l'eau et celle requise pour le nettoyage des filtres. L'eau employée pour le lavage est produite avec une consommation électrique égale à 0.29 kWh/m³ d'eau traitée et pour la station typique étudiée, elle est égale à 0.4 kWh/m³. Quant à la quantité d'eau utilisée, elle représente en moyenne 2.4% de l'eau filtrée, soit pour le cas type de 4 353 m³/d.

Filtration à taux lents. Ces filtres sont utilisés pour le traitement de l'eau potable et pour le traitement tertiaire des eaux usées. Ils servent à la réduction de la turbidité et à l'élimination des microorganismes. Dans ces filtres, une biomasse se forme à la surface du filtre après quelques jours d'opération permettant donc la biodégradation des matières organiques présentes dans les eaux. La durée d'opération d'un tel filtre varie entre 4 à 8 semaines, selon la concentration des matières solides à l'entrée du filtre, pour une vitesse d'écoulement d'eau variant entre 0.1 à 0.3 m/h.

Consommation électrique. L'opération de ces filtres ne requiert aucune énergie électrique, l'écoulement étant gravitaire et le lavage étant effectué manuellement ou par des pelles mécaniques. Une fois le filtre colmaté, il suffit d'enlever puis d'entreposer la première couche superficielle de sable, d'une épaisseur 10 à 15 cm et de remettre le filtre en opération normale. Cette opération est répétée à chaque fois qu'un colmatage est constaté jusqu'à ce que la profondeur totale des couches de sable enlevées est atteinte environ 1.2 m (Ellis, 1988). À ce moment, l'ensemble du sable retiré est lavé puis remplacé.

Le bilan énergétique quotidien et annuel pour la filtration dans cette usine typique peut s'exprimer ainsi :

Étapes	CE (kWh/d)	CE (kWh/an)
Filtration	288	105 120
Lavage des filtres	1 262	529 980
Total	1 550	635 100

De son côté, le coût pour une usine typique de cette étape est de 32 000 \$ (sur la base de 0.29 kWh/m³) et de 35 500 \$ (sur la base de 0.40 kWh/m³).

Le pompage de l'eau

L'énergie de pompage dépend de trois principaux facteurs, soit la capacité de traitement de l'usine, la taille de la population desservie et l'efficacité des pompes (U.S. EPA, 1992).

Eaux souterraines. Les pompes peuvent être placées en surface ou à l'intérieur des puits. Les **pompes de surface** sont employées pour les puits d'un niveau statique d'eau élevé avec une faible quantité d'eau. Les plus employées sont les pompes centrifuges à déplacement variable. Toutes les pompes centrifuges ont des courbes de performance caractéristiques qui relient la pression dynamique totale, l'efficacité et la puissance. Une caractéristique importante de ces pompes est que le débit fourni est inversement proportionnel à la hauteur manométrique. Les pompes à déplacement positif et les pompes à déplacement variable sont également utilisées comme **pompes submersibles**. L'emploi des pompes à déplacement positif et à piston a décliné en faveur des pompes centrifuges installées au fond des puits, ayant la flexibilité d'avoir un moteur d'entraînement installé en surface ou encore submergé. L'avantage principal des pompes submersibles est qu'elles éliminent l'usage de longs arbres et coussinets. En plus, elles sont moins affectées par les déviations de l'alignement vertical de l'arbre à l'intérieur du puits. Cependant, un moteur submersible peut causer des problèmes, car il fonctionne à une grande vitesse et n'est pas directement accessible pour l'observation et la réparation. Les pompes à jet et à soulèvement d'eau par air (air lift) peuvent également être utilisées. Les pompes à jet sont relativement inefficaces et leur emploi se limite aux puits individuels de maison. Les pompes à injection d'air sont aussi inefficaces et sont utilisées lorsque l'aération est requise et dans les endroits où l'eau peut causer de la corrosion aux pièces de pompes. L'efficacité du pompage s'étale habituellement entre 72 et 76 % (Helweg *et al.*, 1983).

Comme exemple de consommation électrique et d'efficacité hydraulique, mentionnons :

	1 ^{er} cas	2 ^e cas	3 ^e cas
Pression de pompage (pi)	192.7	286	268.2
Débit pompé (GPM)	1 685	1 260	1 345
Énergie consommée (kWh)	2 353	2 232	2 287
kWh/MG	969	1 230	1 180
kWh/m ³	0.26	0.32	0.31

Eaux de surface. Le pompage des eaux de surface s'effectue au niveau des prises d'eau, au niveau des stations de traitement et sur les réseaux de

distribution. On fait souvent appel à plusieurs pompes, installées en parallèle ou en série selon la pression requise et le débit à fournir. Ces pompes peuvent également être opérées en intermittence ou en continue, selon la demande quotidienne en eau. Plusieurs types de pompes peuvent être utilisées, toutefois, les pompes centrifuges est le type le plus souvent employé. Les pompes axiales offrent l'avantage de fournir de gros débits d'eau à basse pression et avec un haut rendement. Pour atteindre ces conditions de basse pression et de haut débit, le rapport des moyeux doit être maintenu bas. À la sortie de la pompe, une portion du diffuseur convertie une partie de l'énergie cinétique pour faire le travail par une récupération de pression. La vitesse spécifique des pompes axiales est élevée, par rapport à celle des pompes centrifuges et à écoulement mixte.

2.1.2 Consommation d'énergie électrique

La consommation électrique est généralement proportionnelle à la quantité d'eau traitée. La quantité d'énergie électrique a été calculée sur la base de données interprétées de 35 usines de traitement d'eau de consommation. En général, l'énergie électrique consommée par mètre cube d'eau diminue avec l'augmentation de la capacité de l'usine. Cette observation s'explique par l'utilisation de gros moteurs dans les grandes usines, plus efficaces par rapport aux petits moteurs employés dans les petites usines. De plus, pour les usines importantes, le traitement de l'eau est généralement optimisé par l'emploi de systèmes de commande et du personnel hautement qualifié.

L'efficacité énergétique hydraulique moyenne est égale à 0.30 kWh/m^3 . Par ailleurs, celui-ci varie entre un minimum de 0.10 et un maximum de 0.83 kWh/m^3 , dépendamment des procédés utilisés, de la pression et du débit de pompage. Sachant que la majorité des usines de traitement d'eau opèrent entre 50 et 80 % de leur capacité maximale, il demeure donc important de tenir compte que les valeurs réelles sont nettement supérieures. La moyenne de consommation électrique varierait ainsi entre 0.36 et 0.58 kWh/m^3 . Ces résultats sont basés sur un échantillon de 35 municipalités, dont 50 % ont une capacité inférieure à $4\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ et 90 % supérieure à $20\,000 \text{ m}^3/\text{d}$, ce qui correspond assez bien à la situation globale du parc d'usines de traitement d'eau potable du Québec.

La consommation électrique par habitant varie appréciablement d'une localité à une autre. En général, la consommation électrique pour le traitement de l'eau potable par capita d'une petite agglomération est supérieure à celle d'une municipalité de grande taille. En effet, l'individu d'une petite municipalité consomme jusqu'à 3.5 fois plus d'électricité qu'un citoyen d'une grande localité.

La consommation d'eau par capita est d'environ 580 à 935 L/d pour une usine opérant entre 50 et 80 % de la capacité maximale. La moyenne établie est de 500 L/d. Il est donc justifiable de dire que ces valeurs obtenues tiennent

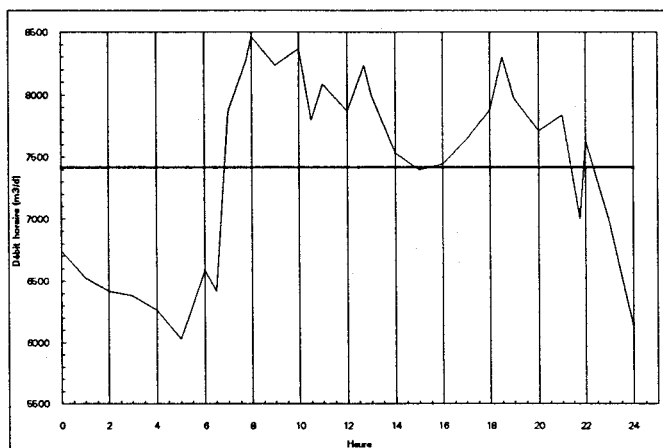
compte des différentes pertes d'eau, aux niveaux des usines et des réseaux de distribution.

Les 35 municipalités étudiées ont une capacité totale de 1 090 000 m³/d. Ces municipalités regroupent environ 1 087 000 habitants utilisant 3 300 000 kWh/d d'énergie électrique au coût moyen pondéré de 5.6 ¢/kWh. Ainsi, la facture quotidienne est d'environ 16 740 dollars canadiens. Par conséquent, en basant les calculs sur une population québécoise de 6.5 millions d'individus, on obtient une consommation annuelle de 716 GWh/an, ceci correspondant à un coût de 40.1 M \$/an. Les données réelles de consommation sont sans doute nettement supérieures, car il faut considérer l'existence des sous-stations de pompage d'eau potable et d'eau brute, lesquelles sont souvent facturées individuellement.

Variations diurnes de la demande électrique

La demande électrique varie selon la demande journalière en eau. En effet, une forte demande en eau requiert le fonctionnement à pleine charge de l'ensemble des pompes d'eau brute et d'eau traitée, des filtres, des pompes doseuses, ainsi que le système d'ozonisation, s'il en existe un. La variation de la demande en eau suit l'activité humaine journalière. Elle varie d'une agglomération à l'autre, selon le nombre d'habitant.

En général, les municipalités de petite taille subissent une plus grande fluctuation de la demande journalière que les stations de taille importante. Le schéma ci-haut présente un cas typique de la fluctuation de la consommation d'eau potable au cours d'une journée.



2.2 Épuration des eaux usées municipales

En date du 1^{er} janvier 1992, le Ministère de l'Environnement du Québec (MEF) recensait 257 ouvrages municipaux d'assainissement des eaux en opération sur le territoire québécois. Ce nombre s'élevait à 284 stations d'épuration au début de l'année 1993 et serait d'environ 289 stations en ce début de l'année 1994. Les 289 ouvrages municipaux d'assainissement des eaux comprennent, entre autres, les ouvrages de la CUM et de la CUQ (est et ouest) qui, à eux seuls, représentent 59.1 % de la capacité de traitement installée au Québec. Ce pourcentage sera de plus de 70 % avec la fin des travaux de raccordement du versant sud de la CUM. Au terme du volet municipal du PAEQ, plus de 879 municipalités auront acquis les infrastructures requises pour le traitement de leurs eaux usées.

Divers types de traitement ont été installés dans les municipalités. Le choix du type de traitement à privilégier est fonction de la taille de la municipalité, le type d'eau à traiter, les contraintes physiques de localisation, les objectifs environnementaux, etc. En ce début de l'année 1994, on recense :

- 36 stations d'épuration utilisant un traitement par *boues activées*, ce qui comprend des procédés de type classique, à aération prolongée, par fossés d'oxydation, ou à réacteurs biologiques séquentiels.
- 14 stations d'épuration utilisant un traitement par *disques biologiques* ou équivalents.
- 179 stations d'épuration utilisant un traitement par *étangs aérés* ou étangs aérés facultatifs.
- 14 stations d'épuration comprenant un traitement par *biofiltration*.
- 2 stations d'épuration employant un traitement *physico-chimique*.
- 20 stations d'épuration utilisant un traitement par *étangs non-aérés*.
- 24 stations d'épuration utilisant un traitement par *fosses septiques* et champs d'infiltration.

La clientèle actuellement desservie par les systèmes d'épuration est décrite au Tableau 3.

Tableau 3. Population et capacité de traitement moyennes par station d'épuration

Type de traitement	Débit moyen (m ³ /d)	Population desservie moyenne	Débit /Population (m ³ /d/pers.)
Boues activées (BA)	17 257	20 365	0.847
Biodisques (BD)	485	721	0.673
Biofiltration (BF)	46 237	57 199	0.808
Étangs aérés (EA)	2 933	3 542	0.828
Étangs non-aérés (ENA)	385	540	0.713
Fosses septiques (FS)	89	219	0.406
Physico-chimiques (PC)	863 650	617 500	1.399
Total	12 241	11 865	1.032

Le Ministère de l'Environnement du Québec a défini les exigences de performance pour encadrer l'exploitation des ouvrages d'assainissement des eaux municipales. Le ministère prépare un bilan annuel du rendement des stations d'épuration municipales. Pour l'année 1991, 166 stations ont été examinées sur un total de 239, ce qui représente près de 70 % des cas. En considérant l'ensemble des 165 ouvrages d'assainissement (CUM exclue), la somme des débits d'eaux usées traités en 1991 représente 96 % de la capacité de conception¹⁶ (contre 102 % en 1990), alors que la charge en DBO₅ constitue 86 % de la capacité prévue à la conception. Dans 61 % des cas, les débits d'eaux traités ont été inférieurs aux débits de conception et dans 93 % des cas, les débits moyens mesurés n'ont pas dépassé 125 % de ces mêmes débits de conception. De plus, dans 80 % des cas, les charges en DBO₅ ont été inférieures aux charges de conception et dans 93 % des cas elles n'ont pas excédé 125 % des charges prévues à la conception. Les cas de surcharges hydrauliques (> 125 % de la valeur de conception) se sont produits dans 25 stations d'épuration représentant une capacité de traitement égale à 8 % du parc d'équipement d'épuration.

La charge moyenne en DBO₅ à l'entrée des stations d'épuration est de 105 mg/L a été déterminée en 1991 pour les 164 stations d'épuration évaluées (Laval et CUM non-incluses). Les eaux diluées se retrouvent majoritairement avec les procédés de type étangs aérés et constituent une capacité de traitement peu élevée (10 % du total des 164 stations). Les teneurs moyennes mesu-

¹⁶ La capacité de conception réfère à la capacité maximale de la station prévue à la conception et représentant une réserve pour l'expansion de la population desservie jusqu'à l'année 2010.

rées à l'affluent pour les MES et le phosphore ont été respectivement de 115 mg/L et de 3.5 mg/L en 1991. Dans presque la moitié des cas (représentant 35 % de la capacité), les stations ont traité moins de 75 % de la charge prévue à la conception.

Un rendement moyen annuel de 90 % a été mesuré pour l'enlèvement de la DBO₅, alors que pour l'enlèvement des MES et du phosphore, des rendements globaux respectifs de 89 % et 74 % ont été déterminés. Le Tableau 4 présente une analyse plus détaillée selon le type de traitement utilisé.

Tableau 4. Rendements annuels moyens (%) des stations d'épuration pour les divers types de traitement des eaux usées utilisés au Québec

Type de traitement	Rendement (%)		
	DBO ₅	MES	P
Boues activées (BA)	92	92	77
Biodisques (BD)	83	81	84
Étangs aérés (EA)	88	87	70
Physico-chimiques (PC)	--	62	63
CUM (Nord) (PC)	55*	81	74
Moyenne générale (excluant la CUM)	90	89	74

* *Estimation*

2.2.1 Demande globale actuelle et projection

Le système informatique d'Hydro-Québec recense plus de 359 comptes reliés à des ouvrages d'assainissement des eaux usées au Québec. L'analyse conjointe de ces données de consommation électrique avec les données du MEF sur les critères de conception des stations d'épuration a permis de caractériser les besoins énergétiques pour plus de 196 stations d'épuration municipales, desservant 2 965 947 habitants et traitant un débit hydraulique de plus de 3 075 436 m³/d. Sur la base de ces données, cette analyse a permis de relier la consommation électrique de plus de 86.5 % de la population desservie par des ouvrages d'assainissement et de plus de 86.9 % du débit total d'eaux usées traitées.

Pour la période se situant entre la mi-1992 à la mi-1993, la consommation électrique totale pour l'ensemble des 196 stations d'épuration recensées est de 773 220 kWh/d. On peut extrapoler la consommation électrique totale pour le

traitement des eaux usées municipales au Québec, soit d'environ 889 780 kWh/d, ce qui correspond à une consommation électrique annuelle de 324 770 MWh. Cette valeur ne tient pas compte des systèmes de pompage des eaux usées distribués à l'extérieur des stations d'épuration, sur le réseau d'interception et d'acheminement des eaux d'égouts.

En comparaison, Ontario-Hydro (1993b) estime la consommation ontarienne actuelle dans les stations d'épuration à 787 624 000 kWh, et à 164 446 000 kWh pour les postes de pompage localisés à l'extérieur des stations de traitement, pour un total d'environ 952 GWh. Un total de 17 % de cette énergie est consommé "hors-usine", le ratio consommation hors-usine/consommation en usine étant de 0.21.

Utilisant un ratio semblable pour le Québec, dans la mesure où il pourrait s'appliquer¹⁷, on peut estimer la consommation annuelle totale au Québec à $324.8 + 67.8 = 392.6$ GWh.

En considérant que 3 429 100 personnes sont présentement reliées à des ouvrages d'épuration municipaux, et que le programme d'assainissement des eaux du Québec prévoit desservir près de 5 600 000 habitants, *on peut extrapoler la consommation annuelle d'électricité à plus de 641 GWh aux termes du programme d'assainissement de eaux.* D'ici la fin de l'année 1994, le raccordement du versant sud de la CUM devrait à lui seul entraîné une hausse de la consommation électrique d'environ 75.7 GWh/an.

2.2.2 L'efficacité énergétique hydraulique

Le Tableau 5 montre les données moyennes de consommation électrique calculées pour les divers types de traitement des eaux employés au Québec. Plus de 45.4 % de l'énergie électrique est employé pour les stations de type physico-chimique (principalement l'usine de la CUM). Les stations de type boues activées et biofiltration consomment respectivement 21.9 et 13.8 % de l'énergie, alors que les stations de type étangs aérés sont responsables de 18.6 % des besoins énergétiques. Les autres systèmes de traitement (biodisques, fosses septiques communes et étangs non-aérés) ne représentent qu'une très faible portion (< 0.5 %) de la demande énergétique électrique.

L'Efficacité Énergétique Hydraulique (EEH) des stations est comprise entre 0.203 et 0.749 kWh/m³. *Globalement, au Québec, il ressort de cette analyse que 0.251 kWh d'énergie électrique est dévolue, en moyenne, au traitement de chaque mètre cube d'eaux usées municipales.*

¹⁷ Les données accessibles actuellement ne permettent pas de juger la validité de cette hypothèse.

Tableau 5. Bilan de la consommation électrique globale de l'épuration des eaux usées municipales au Québec en fonction de la charge hydraulique

Type de traitement	Nombre de stations	Population desservie	Débit hydraulique (m ³ /d)	CE (kWh/d)	EEH (kWh/m ³)
Boues activées	31	660 920	512 740	169 322	0.330
Biodisques	5	4 710	3 510	2 630	0.749
Biofiltration	5	567 100	429 530	106 500	0.248
Étangs aérés	150	497 550	402 000	143 400	0.357
Fosses septiques	3	669	309	177	0.573
Physico-chimiques	2	1 235 000	1 727 300	351 238	0.203
Total	196	2 965 947	3 075 436	773 220	0.251

2.2.3 L'efficacité énergétique épuratoire

Pour l'ensemble des types de traitement, la moyenne¹⁸ s'établit à 4.13 kWh pour l'enlèvement de chaque kilogramme de DBO₅. Les moyennes globales pondérées par type de traitement de l'Efficacité Énergétique Épuratoire (EEE) se situent entre 2.56 et 12.69 kWh/kg DBO₅ enlevé (Tableau 6).

L'EEE moyenne par station, tous traitements confondus, est de 8.02 ± 5.29 kWh/kg DBO₅ enlevé. La valeur moyenne de l'EEE par station de type étang aéré est de 8.37 ± 5.38 kWh/kg DBO₅ enlevé alors que la moyenne pondérée est de 4.95 kWh/kg DBO₅ enlevé. Les petites stations présentent une performance énergétique épuratoire moins bonne que les stations de dimensions plus importantes. Cette caractéristique est observée pour les autres systèmes de traitement des eaux usées. Par exemple, la valeur moyenne de l'EEE par station de type boues activées est de 6.79 ± 4.69 kWh/kg DBO₅ enlevé alors que la moyenne pondérée est de 3.64 kWh/kg DBO₅ enlevé. Le même phénomène est observé pour les autres systèmes avec des valeurs moyennes respectives de 2.90 ± 0.63 et 5.85 ± 1.23 kWh/kg DBO₅ enl. pour les stations de biofiltration et physico-chimiques. Pour les quatre stations de type biodisque, la moyenne des EEE individuelles est inférieure (10.93 ± 6.54 kWh/kg DBO₅ enl.) à celle obtenue de la somme des charges organiques extraites et de la consommation électrique (12.69 kWh/kg DBO₅ enl.).

¹⁸ Cette valeur a été établie à partir de la somme des consommations électriques de 172 stations d'épuration divisée par la somme des charges de DBO₅ enlevé (charge à l'affluent - charge à l'effluent de la station).

Tableau 6. Bilan de la consommation électrique globale de l'épuration des eaux usées municipales au Québec en fonction de la capacité épuratoire

Type de traitement	Nombre de stations	Population desservie	Capacité épuratoire (kg DBO ₅ enlevé/d)	CE (kWh/d)	EEE (kWh/kg DBO ₅ enl)
Boues activées	27	616 632	44 255	161 130	3.64
Biodisques	4	3 856	207	2 627	12.69
Biofiltration	4	559 400	40 493	103 470	2.56
Étangs aérés	135	437 519	27 107	134 077	4.95
Physico-chimiques	2	1 235 000	70 150	351 239	5.01
Total	172	2 852 407	182 212	752 542	4.13

2.2.4 La demande de puissance

La demande de puissance appelée de l'ensemble des ouvrages d'assainissement municipaux (PA_{total}), calculée sur la base d'une moyenne mensuelle des maxima journaliers, peut être estimée à 44.4 MW, ceci excluant les équipements hors usines non raccordés. Pour les diverses stations examinées, cette puissance appelée moyenne (PA_{moy}) se situe entre 11 et 19 636 kW, la valeur moyenne par station étant de 311 kW (Tableau 7).

Tableau 7. Bilan global de la puissance électrique appelée lors de l'épuration des eaux usées municipales au Québec

Type de traitement	CE _{total} (kWh/d)	PA _{total} (kW)	PA _{min} (kW)	PA _{max} (kW)	PA _{moy} (kW)
Boues activées	161 129	9 447	37	1 869	350
Biodisques	2 626	193	26	110	48
Biofiltration	103 470	7 015	319	3 347	1 754
Étangs aérés	126 724	7 746	11	266	73
Physico-chimiques	351 239	20 037	401	19 636	10 018
Total	745 188	44 438	11	19 636	311

L'établissement de la demande de puissance électrique appelée permet d'établir les facteurs de pointe de puissance (FP). Ce paramètre peut se définir

comme étant le rapport entre la puissance maximale appelée dans une période de temps donnée et la puissance moyenne utilisée durant cette même période. Le Tableau 8 identifie les facteurs de pointe minimum, maximum et moyen pour l'ensemble des ouvrages et pour les divers types de traitement. Pour les 143 stations examinées, le facteur de pointe calculé varie entre 1.104 et 3.845, avec une moyenne globale de 1.649 ± 0.417 . Cette valeur signifie qu'en moyenne, sur une base mensuelle, la puissance maximale appelée excède de 65 % la puissance moyenne utilisée durant cette période.

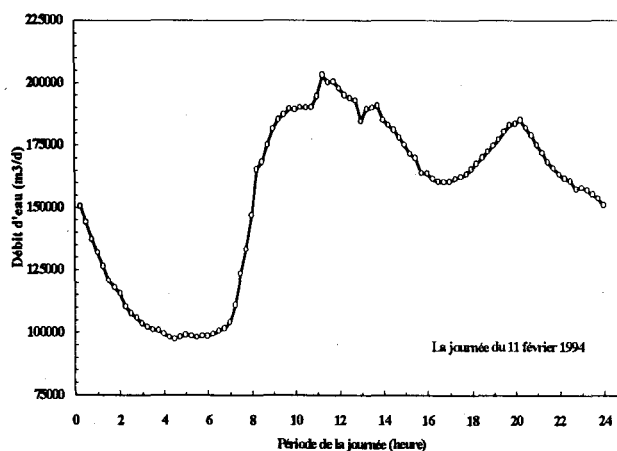
Tableau 8. Variation du facteur de pointe de puissance (FP*) lors de l'épuration des eaux usées municipales au Québec

Type de traitement	FP _{min}	FP _{max}	FP _{moy}
Boues activées	1.141	2.033	1.439 ± 0.206
Biodisques	1.487	2.426	2.127 ± 0.435
Biofiltration	1.525	1.757	1.612 ± 0.106
Étangs aérés	1.104	3.845	1.688 ± 0.443
Physico-chimiques	1.364	1.704	1.534 ± 0.241
Total	1.104	3.845	1.649 ± 0.417

* La puissance moyenne pour chaque station résulte de la division de la consommation électrique journalière moyenne par le nombre d'heures par jour ($PM = CE/24$).

2.2.5 Fluctuation de la consommation

Les ouvrages d'assainissement des eaux usées opèrent de façon continue. Elles sont soumises à d'importantes fluctuations de charge hydraulique et



organique. Ces variations de charge se rencontrent aussi bien sur une base diurne, journalière, hebdomadaire ou mensuel/saisonnière. Ces perturbations des conditions opératoires se répercutent inévitablement sur la demande et la consommation électrique. Ainsi, les divers systèmes de traitement des eaux usées doivent être conçus de manière à être capable d'opérer adéquatement en période de pointe. Les équipements

électriques installés dans les stations d'épuration seront donc, dans bien des cas, surdimensionnés en terme de puissance installée.

Profil diurne de la consommation électrique

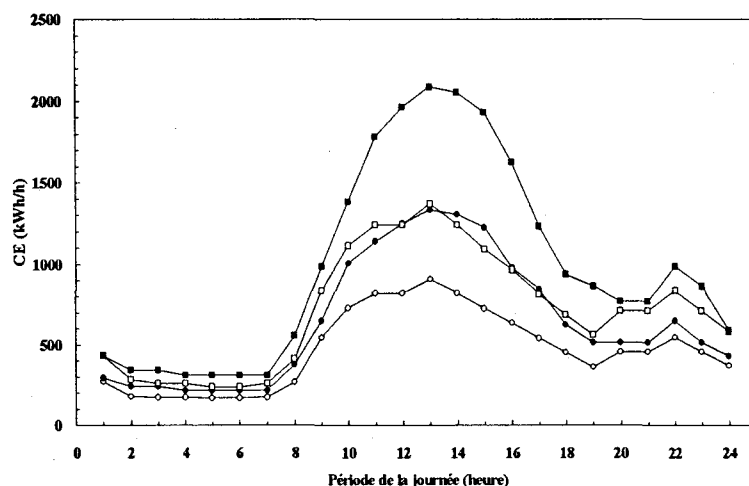
Une variation journalière appréciable de la charge organique et hydraulique de l'affluent est observable dans les stations d'épuration. Généralement, le débit d'eau à traiter ainsi que la charge en matière organique (DBO_5) atteignent leurs maximums dans le milieu de journée, entre 10 et 13 heures, ainsi que le soir entre 19 et 22 heures, puis diminuent progressivement jusqu'à un minimum observable dans les premières heures du matin, soit entre 3 et 5 heures. Dans le schéma ci-contre, les données obtenues pour la station d'épuration de la Communauté Urbaine de Québec (CUQ-Est) montre le profil de charge hydraulique diurne, celui-ci correspondant assez bien à ce qui a été mesuré pour les stations américaines.

Le niveau de sollicitation des équipements électriques est lié au débit d'eau à traiter ou à la charge en matière organique. Ainsi, les variations diurnes de ces paramètres résulteront en une fluctuation de la demande électrique. Le schéma ci-contre présente un profil-type diurne de consommation électrique pour une station d'épuration de type boues activées (conventionnelles et avancées avec nitrification) traitant un débit moyen de 38 000 m³/d (10 millions de gallons U.S./d). Cette figure montre les variations de la moyenne annuelle de la consommation électrique horaire (pour chaque heure de la journée) et les débits maximums pouvant survenir dans une journée.

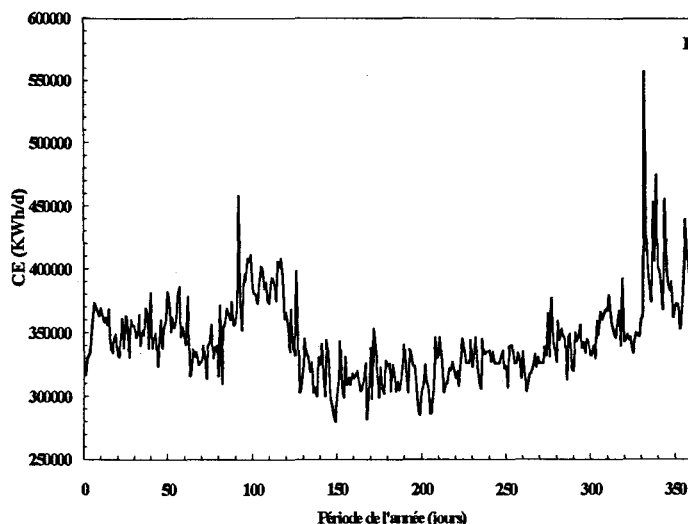
De mauvaises conditions opératoires peuvent réduire considérablement les variations diurnes de consommation d'électricité. Les systèmes d'aération fonctionnant en régime constant entraîneront alternativement une sous-aération et une sur-aération des boues activées. Bien que l'opération des équipements électriques en régime constant diminue les périodes de pointe, l'efficacité épuratoire des ouvrages d'assainissement peut ainsi en être grandement affectée.

Profil quotidien de la consommation électrique

Le schéma ci-contre illustre les fluctuations journalières de la consommation électrique pour chaque jour de l'année 1993 pour la station



d'épuration de la Communauté Urbaine de Montréal (CUM). Au cours de l'année 1993, la consommation électrique journalière à la station de la CUM a varié entre 280 000 et 557 000 kWh/d, avec une moyenne de 345 436 kWh/d. La déviation standard de la consommation électrique se situe à 32 765 kWh/d, ce qui correspond à 9.5 % de la consommation moyenne. La

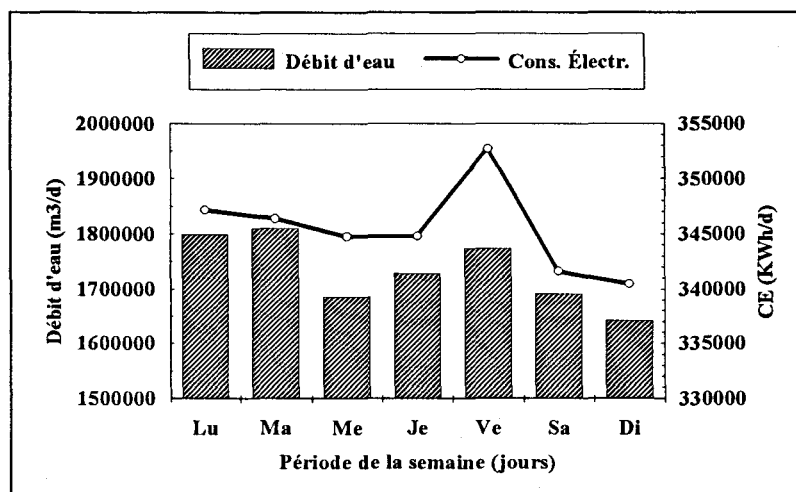


consommation électrique dans les stations d'épuration fluctue moins que la charge hydraulique à traiter, ceci s'expliquant en bonne partie par l'opération en régime constant de plusieurs équipements électriques intégrés au procédé de traitement. Ce mode d'opération sous-optimal des équipements électriques entraîne inévitablement des variations de l'efficacité énergétique hydraulique (EEH).

Profil hebdomadaire de la consommation électrique

Les activités domestiques et industrielles n'ont pas toutes la même intensité chaque jour de la semaine. Il en est de même pour les pratiques de gestion des stations d'épuration. Le schéma ci-contre compare les débits moyens d'eaux usées

traités à la station d'épuration de la CUM ainsi que la consommation électrique au cours de l'année 1993, pour les divers jours de la semaine. Le profil de charge hydraulique se reflète en partie au niveau de la consommation électrique de la station. La consommation électrique moyenne des ven-

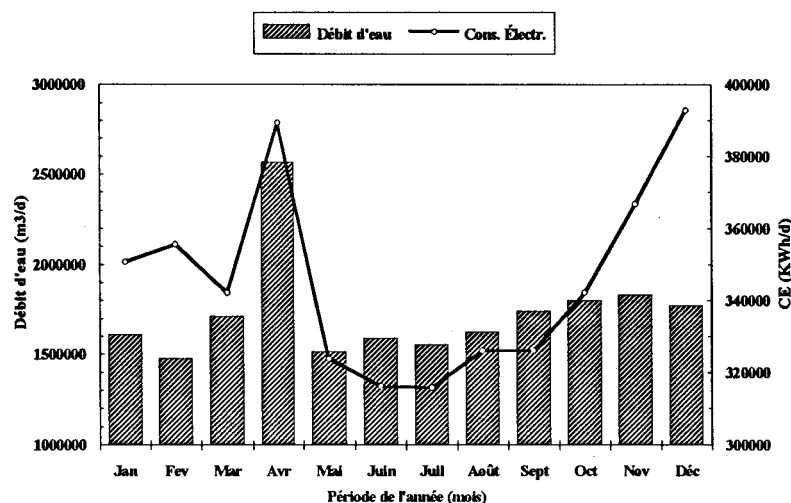


dredis est toutefois supérieure aux lundis et mardis, ces deux jours se caractérisant par une charge hydraulique plus élevée. Une différence de 3.5 % est calculée entre les moyennes des vendredis et des dimanches.

Profil mensuel de la consommation électrique

Sur le schéma ci-contre tiré des données de la CUM, on constate une consommation électrique plus élevée pour les mois d'hiver en comparaison aux mois d'été. Ce phénomène peut s'expliquer en bonne partie par la nécessité de chauffer les installations et par l'effet de la température froide

sur l'efficacité des diverses étapes de traitement (pompage, dessablage, coagulation/floculation, décantation, etc.). En effet, la plupart des processus physiques, chimiques et biologiques impliqués dans le traitement des eaux usées sont altérés par la baisse de la température des eaux. Ainsi, dans bien des cas, une chute de température devra être compensée par une prolongation des temps de réaction, ceci entraînant une hausse de la consommation électrique.



L'efficacité énergétique hydraulique varie entre 0.187 et 0.241 kWh/m³ en fonction des divers mois de l'année 1993 (station de la CUM), à l'exception de la valeur de 0.152 kWh/m³ obtenue pour le mois d'avril. Cette valeur peut être expliquée par le fait que la faible charge organique transportée dans les eaux usées au cours du mois d'avril permet un traitement plus rapide. De plus, le détournement des eaux usées excédentaires dans l'émissaire de la station au cours de cette période peut contribuer à expliquer ce phénomène.

Les sections précédentes ont mis en perspective l'importance de la fluctuation temporelle de la consommation électrique dans les stations d'épuration et ce, sur les bases diurne, journalière, hebdomadaire, mensuelle et saisonnière. *Les variations significatives de charges hydraulique et organique sur ces diverses bases de temps mettent en évidence le besoin d'instaurer des systèmes de contrôle et de régulation des différents équipements électriques associés à l'assainissement des eaux usées. Ce type de contrôle permettrait de réduire les pertes énergétiques et de stabiliser la performance épuratoire des ouvrages d'assainissement des eaux usées.*

2.2.6 Configuration des procédés et des équipements électriques

Cette section est consacrée l'analyse de la consommation électrique inhérente aux différentes étapes de traitement incluses dans les diverses chaînes de traitement des eaux usées et des boues d'épuration. Le Tableau 9 présente, selon l'analyse de la littérature, la consommation électrique nécessaire pour les diverses étapes de traitement des eaux usées municipales. De même, le Tableau 10 expose l'énergie électrique requise (kWh/tonne de boues sèches) pour les procédés de traitement des boues d'épuration municipales.

Prétraitement

Les *étapes de prétraitement* les plus couramment employés dans les ouvrages d'assainissement des eaux usées sont, après 1) le pompage des affluents, 2) le dégrillage, 3) le dessablage aéré ou non-aéré et 4) la comminution (broyage des résidus de dégrillage). Généralement, ces diverses étapes ne sont responsables que d'une faible portion de la consommation électrique totale des systèmes de traitement des eaux.

Pompage des eaux usées. L'énergie électrique consommée pour l'acheminement des eaux usées aux infrastructures d'épuration dépend de la structure et de la situation géographique du réseau d'égout et des installations constituant la station d'épuration. De manière générale, une consommation variant entre 0.031 et 0.045 kWh/m³ a été établie par Burton Environmental Engineering et al. (1993). Dépendamment de la taille de la station et des systèmes d'épuration employés, cet apport énergétique peut représenter entre 5 et 18 % de la demande électrique totale.

Dégrillage. La consommation d'énergie associée à l'étape de dégrillage requiert entre 0.0001 et 0.0005 kWh/m³ (Burton Environmental Engineering et al., 1993), ce qui équivaut entre 0.01 et 0.09 % de la demande totale pour des stations de moyenne et forte capacité.

Tableau 9. Consommation électrique typique des étapes de traitement des eaux usées municipales

Étapes	CE (kWh/m ³)
<i>Prétraitement et traitement primaire</i>	
Pompage des eaux usées	0.0130 - 0.0510
Dégrillage	0.0001 - 0.0067
Dessablage aéré	0.0020 - 0.1538
Dessablage non-aéré	0.0001 - 0.0038
Comminution	0.0003 - 0.0246
Décantation primaire	0.0007 - 0.0370
<i>Traitement secondaire</i>	
Boues activées conventionnelles	0.1120 - 0.2170
Boues activées à aération prolongée	0.2720 - 0.4800
Biodisques	0.0530 - 0.2460
Lits filtrants	0.0340 - 0.1330
Étangs aérés	0.1950 - 0.5680
Décantation secondaire	0.0040 - 0.0650
Recirculation des boues	0.0080 - 0.0120
<i>Traitement tertiaire</i>	
Dosage des produits chimiques	0.0170 - 0.0270
Filtration tertiaire	0.0270 - 0.0740
Chloration	0.0003 - 0.0007
Chloration-déchloration	0.0098 - 0.0109
Radiation ultraviolet	0.0177 - 0.0216
Ozonisation	0.0290 - 0.0290
<i>Mécanique de bâtiment</i>	
Éclairage, chauffage et climatisation	0.0080 - 0.0530

Tableau 10. Consommation électrique typique des étapes de traitement des boues d'épuration municipales

Étapes	CE (kWh/tbs)
Épaississement gravitaire	3.9 - 7.5
Flottation à l'air dissous	176 - 185
Digestion aérobie	484 - 925
Digestion anaérobie	44 - 79
Stabilisation chimique	0.6 - 2.4
Filtres-presses sous vide	50 - 158
Filtres-presses à plateaux	20 - 106
Filtres à bandes presseuses	10 - 50
Centrifugeuses	30 - 383
Incinération conventionnelle	49 - 183
Incinération sur lit de sable fluidisé	70 - 301

Dessablage. Plusieurs techniques de dessablage sont utilisées dans les stations d'épuration. Les variantes de type aéré entraînent une dépense électrique se situant entre 0.0032 et 0.0129 kWh/m³, ce qui constitue approximativement entre 0.8 et 2.7 % de la consommation globale des stations de moyenne et de forte capacités de traitement (Burton Environmental Engineering *et al.*, 1993). Selon Middlebrooks *et al.* (1981), le dessablage de type aéré exige entre 0.0033 et 0.1538 kWh/m³ pour des stations de faible capacité (0.1538 kWh/m³ à 189 m³/d et 0.0033 kWh/m³ à 18 925 m³/d).

Comminution. La comminution entraîne une dépense énergétique se situant entre 0.0013 et 0.0246 kWh/m³ (0.0246 kWh/m³ à 189 m³/d et 0.0013 kWh/m³ à 18 925 m³/d). Cette pratique est peu employée au Québec, peut représenter environ 0.5 à 4.4 % de la consommation électrique des ouvrages d'assainissement (Middlebrooks *et al.*, 1981).

Traitement primaire

Le traitement primaire consiste en une étape de séparation dans des décanteurs circulaires munis de racleurs mécanisés. Pour des usines de moyenne et forte capacités, elle nécessite environ 0.004 kWh/m³, ce qui correspond à une fraction du bilan total de consommation située entre 0.5 et 2.3 %, alors que pour des usines de faibles capacités, on estime la consommation entre 0.002 kWh/m³ (18 925 m³/d) et 0.037 kWh/m³ (189 m³/d), soit entre 0.7 et 6.6 % de la

demande totale (Burton Environmental Engineering *et al.*, 1993; Middlebrooks *et al.*, 1981).

Traitement secondaire

Les divers systèmes de traitement secondaire des eaux usées sont responsables d'une proportion importante de la quantité d'énergie électrique consommée. Toutefois, la consommation peut être très variable selon les différents types de traitement.

Boues activées. Les travaux de Burton Environmental Engineering *et al.* (1993) indiquent des gammes de consommation électrique pour les étapes suivantes : l'aération des bassins pour les procédés conventionnels; l'aération supplémentaire associée à l'ajout d'une étape de nitrification biologique; l'étape de décantation secondaire, ainsi que le pompage du système de recirculation des boues.

- *Aération des bassins d'oxydation* : Une consommation électrique moyenne de 0.140 kWh/m³ a été calculée d'après une enquête effectuée sur plusieurs unités de boues activées américaines. Selon la capacité de traitement, cette consommation peut représenter entre 18.0 et 51.7 % de l'énergie électrique d'une station d'épuration.
- *Nitrification biologique* : L'ajout d'une étape de nitrification biologique dans le traitement secondaire des eaux usées entraîne une dépense énergétique supplémentaire pour l'aération se situant approximativement à 0.09 kWh/m³, ce qui équivaut environ entre 11.7 et 21.7 % de la demande totale.
- *Décantation secondaire* : Tout comme pour la décantation primaire, une faible quantité d'énergie est associée à ce procédé, soit environ 0.004 kWh/m³ ou encore 0.5 à 1.5 % de la consommation globale d'électricité des moyennes et grosses stations.
- *Pompage de retour des boues activées* : Le pompage nécessaire à la recirculation des boues secondaires décantées résulte en une consommation électrique de l'ordre de 0.008 à 0.012 kWh/m³. Cet apport énergétique constitue, selon le scénario de traitement, entre 1.5 et 3.5 % de l'électricité consommée dans les stations de forte et moyenne capacités.

Biodisques. Middlebrooks *et al.* (1981) a établi la consommation électrique moyenne à 0.053 kWh/m³, ce qui correspond à une part variant entre 20.2 % (189 m³/d) et 37.5 % (18 925 m³/d) de la demande totale de la station.

Biofiltration. L'utilisation de biofiltres pour l'épuration des eaux exige moins d'énergie électrique que pour les procédés par boues activées. Pour les

systèmes conventionnels de lits bactériens, Burton Environmental Engineering *et al.* (1993) estiment la demande entre 0.06 et 0.09 kWh/m³, soit l'équivalent de 19.4 à 33.9 % de la chaîne de traitement. De plus, dans le cas des lits bactériens conventionnels, la consommation électrique associée à la décantation secondaire est de 0.004 kWh/m³ (0.8 à 2.3 % du total), alors que pour le pompage de recirculation des boues requiert entre 0.008 et 0.012 kWh/m³ (2.5 à 5.0 % du total). Pour les petites stations, Middlebrooks *et al.* (1981) ont déterminé une consommation se situant entre 0.032 et 0.053 kWh/m³ pour le pompage au lit filtrant, ce qui équivaut à une fraction de la demande globale se situant entre 20.3 % (189 m³/d) et 28.8 % (18 925 m³/d). Pour ce qui est de la décantation secondaire, ces mêmes auteurs avancent une consommation électrique s'étalant entre 0.002 kWh/m³ (18 925 m³/d) et 0.045 kWh/m³ (189 m³/d).

Étangs aérés. D'après Wesner *et al.* (1978), l'emploi des étangs aérés, une pratique courante au Québec, nécessite un apport énergétique moyen de 0.195 kWh/m³. Selon Owen (1982), la dépense électrique moyenne pour l'opération des étangs aérés serait plus élevée, soit de 0.568 kWh/m³. Cette valeur moyenne a été mesurée à partir d'une consommation électrique dans les stations américaines de 10 019 kWh/d et une charge hydraulique de 17.64 Mm³/d. Pour les unités de traitement par étangs aérés, une consommation énergétique spécifique variant entre 6.82 et 17.2 kWh/kg DBO₅ enlevé est proposée par Owen (1982). Pour ce qui est des étangs aérés facultatifs, le même auteur suggère une consommation spécifique s'étalant entre 1.78 et 3.30 kWh/kg DBO₅ enlevé. *En terme d'efficacité électrique, le traitement par étang aéré est moins performant que les systèmes d'étangs aérés facultatifs, de boues activées, de biofiltres ou de disques biologiques, lesquels montrent une consommation spécifique se situant entre 0.53 et 3.30 kWh/kg DBO₅ enlevé.*

Traitement tertiaire

Les procédés de finition (traitement tertiaire) améliorent la qualité des effluents issus des traitements primaire et secondaire. Parmi ces procédés, l'on retrouve principalement la déphosphoration chimique, la filtration tertiaire et bien sûr, la désinfection des eaux épurées. Ces traitements, souhaitables du point de vue environnemental, entraînent cependant une augmentation de la consommation électrique à la station d'épuration.

Dosage des produits chimiques. Les équipements mécanisés nécessaires à l'injection des produits chimiques (sels d'aluminium ou de fer, réactifs chlorés, chaux, etc.) sont en général peu consommateurs d'énergie (< 0.02 kWh/m³), ceci équivalant à moins de 4.0 % de la dépense énergétique électrique (Burton Environmental Engineering *et al.*, 1993).

Pompage pour la filtration tertiaire. L'énergie nécessaire au pompage des effluents pour la filtration tertiaire se situe entre 0.018 à 0.038 kWh/m³, soit entre 4.3 et 6.3 % de la consommation électrique globale (Burton Environmental Engineering *et al.*, 1993)

Filtration tertiaire. La *filtration tertiaire* requiert entre 0.009 et 0.036 kWh/m³, ce qui équivaut à environ 2.1 à 5.3 % de l'énergie électrique totale consommée à la station. Pour sa part, a déterminé que la consommation électrique américaine totale pour la filtration tertiaire est de 720 MWh/d, pour une charge hydraulique de 45.17 Mm³/d, ceci équivalant à une dépense électrique moyenne de 0.016 kWh/m³. Un apport électrique moyen de 0.065 kWh/m³ a été établie pour la filtration sur charbon activé granulaire. Owen, 1982, Burton Environmental Engineering et al., 1993.

Désinfection des eaux. La chloration, l'ozonisation et la radiation ultraviolet, sont maintenant employées couramment dans les stations d'épuration d'eaux usées. Comme nous le verrons dans les pages suivantes, le choix d'une technologie de désinfection aura un effet certain sur le bilan énergétique électrique des ouvrages d'assainissement (Burton Environmental Engineering et al., 1993; Wesner et al. 1978; Owen, 1982; EPRI, 1993a; Metcalf & Eddy, Inc., 1992c) :

- *Chloration.* La consommation électrique du *procédé de chloration des eaux épurées* se situe entre 0.0003 et 0.0007 kWh/m³, ce qui constitue approximativement entre 0.03 à 0.40 % du bilan total, dépendamment du type de chaîne de traitement et de sa capacité hydraulique.
- *Radiation ultraviolet.* La *radiation ultraviolet* est de plus en plus employée dans les usines d'épuration pour la désinfection des eaux usées épurées. On estime la dépense électrique associée au traitement des eaux usées par radiation U.V. entre 0.0177 et 0.0216 kWh/m³. Les coûts d'investissement reliés aux systèmes de radiation U.V. sont moins élevés que pour les systèmes conventionnels de chloration-déchloration (35 %) et d'ozonisation (20 %).
- *Ozonisation.* L'*ozonisation* des eaux usées entraîne une consommation électrique moyenne de 0.0290 kWh/m³. De manière générale, les coûts d'énergie électrique constituent environ 75 % des coûts totaux d'opération et d'entretien des unités d'ozonisation.

Traitement et élimination des boues

L'énergie consommée aux diverses étapes du *traitement et de la disposition finale des boues* des stations d'épuration peuvent représenter une fraction très importante du bilan électrique global d'une station. Évidemment, cette avancé s'applique principalement dans les stations où les boues doivent être stabilisées et/ou déshydratées avant leur disposition dans l'environnement. À l'heure actuelle, la plupart des boues produites dans les stations de types boues activées, biodisques, biofiltration, physico-chimiques doivent subir de tels traitements. Dans la presque totalité des cas, les boues issues des traitements par

lagunage (aéré ou non-aéré) et par utilisation de fosses septiques communes ne sont pas traitées à la station d'épuration.

Épaississement des boues. L'épaississement préalable des boues d'épuration avant leur stabilisation dans des digesteurs ou avant déshydratation est une pratique qui permet de réduire significativement les coûts de traitement des boues. Pour les boues primaires, cette étape s'effectue par une simple sédimentation gravitaire dans des décanteurs, alors que pour les boues secondaires la flottation à l'air dissous est d'usage commun (Burton Environmental Engineering et al., 1993; EPRI, 1993c; Middlebrooks et al., 1981; SCS Engineers Inc., 1985).

- *Épaississement gravitaire.* Selon , la consommation électrique associée à l'épaississement gravitaire peut être estimée entre 0.0004 et 0.0016 kWh/m³, ce qui correspond à environ 0.09 à 0.33 % de la demande totale pour les moyennes et grosses stations. Pour les usines de faible capacité, situent la consommation entre 0.0004 et 0.0005 kWh/m³ pour cette pratique, ce qui correspond à une fraction de la demande globale se situant entre 0.09 % (189 m³/d) et 0.16 % (18 925 m³/d). L'analyse des stations d'épuration américaine montre une dépense électrique de 0.0008 kWh/m³ pour cette étape.
- *Flottation à l'air dissous.* La flottation par injection d'air surpressé exige davantage d'énergie électrique que l'épaississement gravitaire. La consommation se situe entre 0.031 et 0.053 kWh/m³ (8.5 à 21.2 % de la demande électrique totale) pour des moyennes et fortes capacités de traitement, par rapport à l'épaississement gravitaire qui n'exige qu'une consommation située entre 0.0004 et 0.0016 kWh/m³ correspondant à environ 0.09 à 0.33 % de la demande. Pour les petites station, la consommation se situe entre 0.035 kWh/m³ (18 925 m³/d) et 0.063 kWh/m³ (189 m³/d) pour les petites installations. Cette dépense énergétique correspond à une fraction se situant entre 11.3 % et 15.9 % de la demande totale.

Stabilisation des boues. En pratique, cependant, trois procédés sont employés : les digestions aérobie ou anaérobie (mésophile ou thermophile) et la stabilisation par chaulage.

Digestion aérobie. Ce type de procédé n'est employé habituellement que dans les stations de petite et moyenne capacité (< 35 000 m³/d). Burton Environmental Engineering et al. (1993) ont déterminé que la consommation électrique pour le procédé conventionnel de digestion aérobie mésophile peut varier entre 0.106 et 0.317 kWh/m³. Cette apport énergétique équivaut selon les scénarios de traitement à environ 24.9 à 55.2 % de l'énergie électrique consommée à la station d'épuration. Le document préparé par Owen (1982) établie à 0.394 kWh/m³ la quantité d'électricité requise pour la digestion aérobie des

boues. L'utilisation d'oxygène pur permet une augmentation de l'efficacité énergétique des digesteurs aérobies, avec une valeur moyenne de 0.315 kWh/m³. L'apport énergétique nécessaire à la digestion aérobie serait de 484 à 634 kWh/tbs avec agitation mécanique et de 792 à 925 kWh/tbs avec air diffusé (SCS Engineers Inc., 1985).

Digestion anaérobie. La *digestion anaérobie*, plus cher à l'investissement que la digestion aérobie, cette technologie, est utilisée dans les stations de moyenne et grande capacités de traitement. Il faut également tenir compte que l'utilisation du méthane comme combustible, produit lors de la fermentation des matières organiques, permet de réduire les coûts énergétiques de chauffage des installations. Globalement, la digestion anaérobie mésophile requiert entre 0.026 et 0.034 kWh/m³, ce qui correspond à, selon les cas, entre 7.8 à 16.3 % de la demande totale (Burton Environmental Engineering et al., 1993). Pour les stations de faible capacité, Middlebrooks et al. (1981) ont calculé une consommation électrique moyenne de 0.018 kWh/m³, soit entre 3.2 et 7.2 % de l'énergie totale utilisée à la station. Une valeur moyenne de 0.045 kWh/m³ a été proposée par Owen (1982) pour cette étape de traitement des boues.

Stabilisation chimique. La consommation électrique pour le *traitement des boues par chaulage* a été établie par Owen (1982) à 0.018 kWh/m³. Cette valeur est tirée d'une consommation électrique de 46 MWh/d et d'un débit d'eau de 2.54 Mm³/d (94 unités américaines). Selon une autre source (SCS Engineers Inc., 1985), la neutralisation des boues à la chaux exigerait un apport électrique de 0.62 à 2.38 kWh/tbs.

Procédés de décontamination. Le développement récent de quelques *procédés de décontamination* des boues permettant également une stabilisation des boues s'avère une perspective d'intérêt pour la gestion de la demande énergétique. Les bilans énergétiques, établis pour une station d'épuration traitant 20 tonnes de boues sèches par jour (population desservie d'environ 300 000 personnes), témoignent de l'importante économie potentielle d'énergie électrique qui pourrait être obtenue par la substitution de la digestion aérobie par l'un des procédés de décontamination des boues. De plus, ces technologies réduisent les teneurs en métaux lourds dans les boues sous les normes prescrites pour l'épandage agricoles et sont plus performantes que la digestion aérobie et anaérobie pour l'élimination des germes pathogènes (Blais et al., 1992a, b et c; Tyagi et al., 1993a, b, Tyagi et Couillard, 1990)

Filtres-presses sous vide. Selon les recherches menées par l'EPRI (1993c), la déshydratation par *filtres-presses sous vide* nécessiterait une dépense électrique de 0.2198 kWh/m³ pour une station-type traitant 38 000 m³/d. Degrémont et Lyonnaise des Eaux (1989) suggère que cette technique de déshydratation est la plus énergivore, avec une consommation électrique variant entre 50 et 150 kWh/tbs. Metcalf & Eddy, Inc. (1992b) estime à 158 kWh/tbs, la consommation électrique pour la déshydratation sous vide des boues d'épuration.

Filtres-presses à plateaux. Selon Degrémont et Lyonnaise des Eaux (1989), l'utilisation de *filtres-presses à plateaux* exigerait la consommation de 20 à 40 kWh/tbs. Pour leur part, Metcalf & Eddy, Inc. (1992b) ont avancé une consommation de 106 kWh/tbs pour l'utilisation des filtres-presses à plateaux, alors que SCS Engineers Inc. (1985) suggère une consommation variant entre 31 et 87 kWh/tbs (Tableau 32).

Filtres-presses à bandes presseuses. Selon Burton Environmental Engineering et al. (1993), l'utilisation de *filtres-presses à bandes presseuses*, largement employée au Québec, requiert entre 0.006 et 0.012 kWh/m³. Cette consommation est l'équivalent de 1.6 à 4.5 % de l'énergie électrique d'une station d'épuration. L'EPRI (1993c) estime à 0.010 kWh/m³, la consommation électrique inhérente à la filtration sur bandes presseuses. D'après Degrémont et Lyonnaise des Eaux (1989), l'emploi de filtres à bandes presseuses est la technique de déshydratation la moins énergivore, avec une consommation d'électricité se situant entre 10 et 25 kWh/tbs. Selon Metcalf & Eddy, Inc. (1992b), l'utilisation des filtres-presses à bandes exigerait une dépense électrique de 50 kWh/tbs. Pour leur part, SCS Engineers Inc. (1985) ont établi entre 18 et 40 kWh/tbs l'apport électrique pour cette méthode de déshydratation.

Centrifugeuses. Les travaux de l'EPRI (1993c) établissent la dépense électrique de la *déshydratation des boues d'épuration par centrifugation* à 0.0311 kWh/m³, pour une station-type ayant une capacité hydraulique de 37 860 m³/d. Une consommation d'énergie électrique se situant entre 30 et 60 kWh/tbs est avancée par Degrémont et Lyonnaise des Eaux (1989), alors que Metcalf & Eddy, Inc. (1992b) suggère une dépense électrique de 284 kWh/tbs. Selon SCS Engineers Inc. (1985), la consommation électrique reliée à la centrifugation se situerait entre 88 à 383 kWh/tbs, dépendamment de la concentration initiale en solides.

Incinération des boues. Les travaux de Owen (1982), montre que la dépense électrique moyenne associée à l'*incinération des boues* sur lit de sable fluidisé est de 0.205 kWh/m³ (pour un débit hydraulique de l'ordre de 30 Mm³/d. La co-incinération ou incinération normale des boues est nettement moins coûteuse, du point de vue énergétique, avec une dépense électrique moyenne estimée à 0.0027 kWh/m³.

Éclairage et chauffage/climatisation des bâtiments

La quantité d'énergie électrique inhérente au *chauffage, à la climatisation et à l'éclairage* des ouvrages d'assainissement est fortement dépendante des conditions climatiques où se situe la station d'épuration. Une étude effectuée à partir des stations américaines démontre que l'énergie électrique moyenne dévolue à ces fonctions se situe entre 0.008 et 0.053 kWh/m³, ce qui peut être l'équivalent de 1.9 à 11.0 % de la demande globale de la station (Burton Environmental Engineering et al., 1993).

2.3 Traitement et épuration des eaux industrielles (SADTEEI)

Les secteurs industriels québécois pour lesquels a été réalisée l'analyse potentiel d'application des mesures d'efficacité énergétique électrique aux systèmes d'approvisionnement, de traitement et d'épuration des eaux industrielles sont les suivants : 1) les pâtes et papiers, 2) la métallurgie, 3) le secteur agro-alimentaire, 4) les mines, 5) la chimie, 6) le textile, et 7) les traitements de surface.

2.3.1 L'analyse des SADTEEI

Secteur des pâtes et papier

Le secteur de l'industrie des pâtes et papiers occupe une place importante au sein de l'activité économique québécoise. Les quelques 60 usines en opération produisent près de 8.8 millions de tonnes par année et génèrent des transactions de plus de 1.5 milliard de dollars. Consommatrices avides d'énergie thermique et électrique, les papetières ont utilisé jusqu'à présent de grandes quantités d'eau à bon marché. Ces usines, dont les impacts sur l'environnement sont bien documentés (débits, température et charges polluantes des effluents), sont les premières industries de taille à devoir se conformer aux nouvelles normes environnementales. L'investissement requis pour assainir leurs effluents et les coûts d'opération sont proportionnels au volume d'eau à traiter. Il s'avère donc urgent de restreindre les débits (une usine a réduit ses besoins d'eau fraîche), afin de minimiser le coût des immobilisations associé au traitement des effluents, ainsi que les coûts d'opération. Les données recueillies auprès des papetières recèlent suffisamment d'informations techniques pour élaborer un programme de mesures d'économies d'énergie électrique et, indirectement, d'incitatifs à la conservation de l'eau. On peut s'attendre à ce que sa mise en application des mesures d'efficacité et de conservation permettent des économies substantielles, principalement au niveau du pompage de l'eau.

La consommation énergétique globale de l'ensemble des fabriques de pâtes et papiers représente le tiers de la consommation industrielle québécoise. La consommation quotidienne d'eau des papetières se situe, en moyenne, au environ de 35 000 m³ d'eau/d, ce qui correspond à une consommation spécifique moyenne variant de 0.5 à 1.2 kWh/m³ (estimation selon une précision de l'ordre de 25 %). Selon ces données, la consommation électrique associée à la gestion de l'eau dans ce secteur industriel peut être estimée entre 1 050 et 2 520 MWh/d. Selon les études du CRIQ (1993), l'implantation des systèmes de traitement secondaire et tertiaire des eaux au cours des prochaines années résultera en une hausse de la consommation d'environ 1 384 MWh/d, alors qu'une augmentation de près de 575 MWh/d sera attribuable au traitement des boues produites.

L'analyse des différents systèmes a permis de déduire que le système de pompage représente la principale source de consommation d'énergie électrique, soit près de 70 % de la consommation globale de ces systèmes.

Pour l'épuration des effluents, en plus des obligations de pompage associées au traitement primaire et à l'évacuation des eaux usées traitées, les nouveaux procédés exigeront des équipements consommateurs d'énergie électrique au niveau du traitement secondaire. Pour l'instant, le pompage s'accapare la plus large part énergétique. Les entrevues réalisées ont permis de constater que, malgré que le rendement énergétique des pompes pourrait être grandement amélioré, il n'existe en pratique que très peu d'initiatives touchant l'optimisation de ses systèmes de pompage. La majorité de ces systèmes sont éligibles au programme d'analyses et d'initiatives énergétiques d'Hydro-Québec (SPVC).

L'élargissement du programme de réduction des rejets industriels (PRRI) du MENVIQ aux autres secteurs industriels aura pour conséquence d'améliorer nos connaissances sur les caractéristiques de leurs effluents. Il sera alors possible d'établir leur profil de consommation énergétique. Actuellement, pour les autres secteurs, les informations pertinentes sont de nature confidentielle. Dans un tel contexte, il est quasi impossible d'estimer rigoureusement les consommations énergétiques.

Les connaissances actuelles des systèmes de production ainsi que des modes et préoccupations de gestion en milieu industriel permettent d'affirmer que l'ensemble des mesures générales d'économie d'énergie se rapportant au domaine des pâtes et papiers s'appliquent également aux autres secteurs industriels, en tenant compte bien entendu des particularités propres à chacun. Ainsi, plusieurs usines de petite et de moyenne taille (en particulier, du secteur agro-alimentaire) s'approvisionnent à l'aqueduc de leur municipalité. D'autres disposent de leurs eaux usées dans les égouts et leurs effluents sont ainsi traités à l'usine de traitement municipale.

Le secteur de la métallurgie

Le secteur des fabriques de produits métallurgiques regroupe les industries les plus consommatrices d'énergie électrique. Les fabriques de produits métallurgiques consomment en moyenne près de 37 300 m³ d'eau quotidiennement avec une consommation spécifique moyenne de 0.35 à 1.0 kWh/m³. Considérant les 13 usines répertoriées dans cette étude, il appert que la consommation électrique pour l'approvisionnement et le traitement de l'eau dans ce secteur soit environ de 170 à 485 Mwh/d.

Le secteur de l'agro-alimentaire

Le secteur de l'industrie agro-alimentaire n'a pas été épargné par la récession. Le PIB du secteur de l'agriculture, qui représente 1.4 % de celui de l'ensemble de l'économie québécoise, a suivi la tendance à la baisse de l'économie en 1991. Il a fléchi de 3.1 % pour se situer à 1.8 milliard \$. Les analyses effectuées témoignent d'une consommation moyenne variant de 0.15 à 0.50 kWh/m³, selon l'envergure de l'usine et l'importance accordée au traitement des effluents agro-alimentaires. Si l'on tient compte d'une valeur moyenne de 500 m³/d pour les 1 174 usines agro-alimentaires, la consommation électrique associée à la gestion de l'eau dans ce secteur se situerait entre 88 et 294 MWh/d. La documentation technique publique portant sur la performance des procédés agro-alimentaires n'est que partiellement accessible. En effet, la banque de renseignements, autrefois centralisée aux bureaux du Ministère de l'Environnement de Montréal, a été fragmentée et redistribuée dans chacune des directions régionales. Il sera donc essentiel de procéder à un inventaire systématique des entreprises pour obtenir une vue globale plus précise de ce vaste secteur d'activités industrielles. L'analyse des différents systèmes a permis de déduire que le système de pompage représente la principale source de consommation d'énergie électrique, soit près de 80 % de la consommation globale de ces systèmes.

Le secteur minier

Les quelques 62 sites miniers en activité au Québec en 1991 généraient des transactions financières de l'ordre de 2 milliards de dollars. Les mines utilisent l'eau comme véhicule de transport de la matière ce qui implique donc une grande consommation de ce fluide transporteur. Le Ministère de l'Environnement suit de près ce secteur riche en problèmes de pollution. Une attention particulière devra être portée à cette industrie afin d'optimiser ses procédés. Une substitution technologique présentant une excellente perspective d'avenir pourrait être envisagée. En effet, le triage à sec du minerai au moyen du transport mécano-pneumatique posséderait le double avantage de réduire la consommation d'eau à la source et de minimiser proportionnellement les volumes d'effluent à traiter. D'un point de vue énergétique, la consommation électrique globale de l'ensemble des sites et des centres de transformation du métal primaire représente près de la moitié de la consommation industrielle québécoise. De plus, les mines québécoises rejettent quotidiennement, en moyenne, près de 9 000 m³ d'eau. Une consommation moyenne variant de 0.5 à 1.2 kW/m³ a pu être estimée avec une précision de l'ordre de 25 %. À partir de ces données, il peut être évalué que la consommation énergétique reliée à l'approvisionnement et au traitement de l'eau dans le secteur minier se situe entre 279 et 670 MWh/d.

Le secteur des produits chimiques

En 1987, dans le secteur des produits chimiques industriels (produits chimiques organiques et inorganiques), on dénombrait 79 sociétés, 41 d'entre elles se partageaient le secteur des produits inorganiques et 38 participaient à celui des produits organiques. Elles généraient alors, dans leur ensemble, 2 187 M \$. Les industries canadiennes de chimie ont adopté un programme de réduction des effluents à la source. On doit ainsi s'attendre à des changements majeurs dans ce secteur. La consommation énergétique moyenne pour le traitement des effluents de ce secteur industriel est estimée entre 0.25 à 1.2 kWh/m³. En considérant une valeur moyenne de 8 600 m³/d établie à partir des données d'une quinzaine d'usines, il appert que la gestion de l'eau dans le secteur de la chimie industrielle nécessiterait entre 170 et 815 MWh/d..

Le secteur du textile

Le secteur de l'industrie du textile regroupait, en 1982, plus de 365 établissements responsables de 46 % de la production canadienne du textile. Bien qu'elle ait manifesté une tendance à la baisse au cours de la dernière décennie (fermetures d'usines), elle demeure un secteur économique d'importance au Québec. La consommation moyenne d'électricité variant de 0.15 à 0.50 kWh/m³, selon l'envergure de l'usine et l'importance accordée au traitement des effluents. Le système de pompage représente la principale source de consommation d'énergie électrique, soit près de 80 % de la consommation globale de ces systèmes. Un programme d'économie d'énergie thermique adapté à leurs particularités et la rationalisation de leur consommation d'eau (économie de pompage) leur seraient bénéfique. Les économies ainsi réalisées leur permettraient d'affronter une concurrence des plus féroces dans ce domaine d'activité économique.

Le secteur de l'industrie du traitement de surface

L'industrie du traitement de surface utilise divers procédés chimiques et physiques pour modifier la surface des métaux, en améliorer l'aspect, en augmenter la résistance à la corrosion ou pour obtenir des propriétés spécifiques désirées. Elle comptait environ 250 entreprises en 1989. Elle comporte plusieurs secteurs d'activités, les trois principaux étant les feuillards d'acier, l'aéronautique et le militaire, ainsi que les pièces automobiles. Il a été possible d'estimer que le traitement des effluents des usines de traitement de surface requiert une consommation moyenne variant de 0.25 à 1.0 kWh/m³.

2.3.2 Évaluation de la consommation des SATDEEI desservie par HYDRO-QUÉBEC

Les recherches menées dans le cadre de cette étude ont permis d'évaluer entre 1 760 et 4 780 MWh/d la consommation d'énergie électrique inhérente à l'approvisionnement et au traitement des eaux industrielles. Cet estimé est établie à partir de données obtenues pour les cinq principaux secteurs industriels québécois, soit l'industrie des pâtes et papiers, l'industrie minière, l'industrie agro-alimentaire, l'industrie métallurgique et l'industrie de la chimie organique et inorganique. Le Tableau 11 expose le bilan énergétique par secteur industriel en tenant compte des données moyennes présentées précédemment. Il faut cependant tenir compte que ce bilan n'est qu'un estimé basé sur les informations recueillies en cours de projet. Une étude plus détaillée serait profitable afin d'obtenir un profil plus précis de la dépense électrique associée à la gestion de l'eau dans le domaine industriel.

Tableau 11. Bilan de la consommation électrique pour l'approvisionnement et le traitement des eaux industrielles au Québec

Secteur	CE médian (MWh/d)	CE min-max (MWh/d)
Pâtes et papiers	1 785	1 050 - 2 520
Métallurgie	328	170 - 485
Agro-alimentaire	191	88 - 294
Mines	475	279 - 670
Chimie	493	170 - 815
Total	3 270	1 760 - 4 780

2.3.3 Évolution des SADTEEI et de la consommation

De façon générale, les systèmes de contrôle de la pollution au sein des usines québécoises affichent un retard technologique par rapport à l'Europe. Les diverses technologies développées sur le continent européen répondent en partie aux futurs besoins en équipements d'assainissement pour les SADTEEI, alors que les activités de RD&D en matières de maîtrise de la pollution, dont plusieurs sont avancées sur nos propres programmes, viendront faciliter les analyses du potentiel de substitution technologique.

La mise en application de nouvelles normes environnementales et/ou de programmes de pollueur-payeur d'ici les cinq prochaines années dans les divers secteurs industriels fera en sorte d'obliger les entreprises à moderniser, ou du moins, à actualiser leur système de traitement des effluents. De manière générale, même s'il est difficile de déterminer le taux de croissance de la demande électrique, une augmentation globale de près de 25 % pourrait être atteinte durant cette période.

2.4 Valeur économique de la conservation de l'énergie électrique dans les SATDEEM et SATDEEI

2.4.1 Les coûts reliés à la consommation d'électricité pour le traitement des eaux de consommation

Avec l'augmentation progressive du niveau de vie de la population, la consommation d'eau potable ne cesse de s'accroître, ce qui entraîne une hausse parallèle de la consommation électrique. De nos jours, l'industrie de l'eau potable se situe dans une plage de consommation se situant entre 0.03 et 0.83 kWh/m³ d'efficacité énergétique hydraulique avec une moyenne pouvant être estimée à 0.29 kWh/m³. Le coût équivalent à cette consommation varie entre 3.73 et 6.81 ¢/kWh avec une moyenne de 5.6 ¢/kWh.

Comme la majorité des usines ne sont opérationnelles qu'entre 50 % et 80 % de leur capacité, la consommation d'électricité aura tendance à être nettement supérieure à celle requise en condition de capacité maximale. Il faut également prendre note que la mise en application de la nouvelle loi du Ministère de l'Environnement, à partir du mois d'avril 1994, limitant la concentration des trihalométhanes dans l'eau à 50 µg/L et la turbidité à 0.1 UTN, entraînera une augmentation de la dépense électrique. En effet, cette concentration maximale requise des trihalométhanes n'est actuellement atteinte que par l'emploi de l'ozonisation seule ou suivie de la filtration sur lit de charbon actif granulaire. La génération de l'ozone se fait en continue et requiert une quantité excessive d'électricité, entre 14 et 33 kWh/kg. Quant à son dosage dans l'eau, la moyenne canadienne est d'environ 1.5 g/m³ (Smith et Klein, 1988). La réduction de la turbidité à 0.1 UTN ne causera toutefois qu'une faible hausse de la consommation d'énergie électrique.

2.4.2 Les coûts reliés à la consommation d'électricité pour l'épuration des eaux usées

Selon Burton Environmental Engineering *et al.* (1993), la consommation d'énergie électrique peut représenter entre 20 et 35% des coûts d'opération des stations d'épuration des eaux usées municipales. Plus spécifiquement, Owen (1982) avance que les coûts inhérents à la consommation électrique constitue approximativement 10 % des coûts totaux pour les stations d'épuration de type boues activées de faible capacité (< 3 786 m³/d) et peut représenter plus de 30 % du total, pour des stations de forte capacité (< 378 600 m³/d).

Le Tableau 10 présente le bilan des coûts de l'électricité établi sur la base de facturation émise par Hydro-Québec sur une période de 12 à 14 mois, pour les 196 stations d'épuration. Rappelons que ces stations qui consomment 773 220 kWh/d, traitent 86.9% du débit total d'eaux usées. La consommation totale des usines en opération peut être estimée à 889 780 kWh/d. En considérant, que les stations de pompage hors usine consomment 21% de cette valeur,

soit 186 854 kWh/d, la dépense électrique totale dévolue à l'épuration des eaux usées municipales peut être établie à environ 1 077 MWh/d.

Selon ces calculs, un montant total annuel de 23 920 470 \$ serait consacré directement à la consommation d'énergie électrique dans les stations d'épuration québécoises.

Si l'on considère la population desservie par les ouvrages d'assainissement municipaux, il en coûte en électricité approximativement 5.81 \$ par année pour chaque individu raccordé aux stations d'épuration des eaux. Cet estimé ne comprend toutefois pas les stations de pompage hors usine. *En considérant que celles-ci consomment 21 % de l'énergie électrique utilisée dans les stations, les frais annuels peuvent être établis à 7.03 \$/personne.*

Les coûts opératoires en électricité sont également exprimables par rapport au débit d'eau traité ou encore à la charge organique enlevée des eaux usées lors du traitement. Il en coûte 1.534 ¢/m³ d'eau épuré, ou encore 25.83 ¢/kg DBO₅ enlevé. En ajoutant 21% à ces valeurs, pour tenir compte du pompage hors usine, les coûts hydraulique et épuratoire pour la situation québécoise, peuvent être estimés à respectivement 1.856 ¢/m³ d'eau traité et 31.25 ¢/kg DBO₅ enlevé.

Le Tableau 12 montre qu'en moyenne pour les 196 stations d'épuration examinées, le coût de l'énergie électrique basé sur la consommation électrique est de 6.10 ± 2.96 ¢/kWh.

Tableau 12. Bilan des coûts en électricité associés à l'épuration des eaux usées municipales au Québec

Type de traitement	Montant facturé (\$/an)	Montant individuel (\$/an.pers.)	Coût unitaire de l'énergie (¢/kWh)	Coût hydraul. (¢/m ³)	Coût épuratoire (¢/kg DBO ₅ enlevé)
Boues activées	3 409 405	5.25	5.57 ± 0.52	1.849	21.11
Biodisques	68 400	14.52	7.12 ± 3.12	5.336	90.53
Biofiltration	2 406 253	4.24	6.19 ± 0.85	1.535	16.28
Étangs aérés	3 217 468	6.47	6.15 ± 3.30	2.193	32.52
Fosses septiques	4 516	6.74	7.03 ± 1.52	4.017	-
Physico-chimiques	7 487 011	6.06	5.84 ± 0.00	1.188	29.24
Total	17 179 251	5.81	6.10 ± 2.96	1.534	25.83

2.4.3 Les coûts reliés à la consommation d'électricité pour le traitement et l'épuration des eaux industrielles

La consommation électrique associée à la gestion de l'eau dans les cinq principaux secteurs industriels québécois a été établie de manière approximative. Le Tableau 13 expose les bilans de consommation électrique annuel de ces secteurs industriels, ainsi que les coûts estimés tenant compte d'un coût unitaire moyen de l'électricité de 6.1 ¢/kWh. Selon ces calculs, un montant annuel total d'environ 72.8 M \$ est requis pour l'approvisionnement et le traitement des eaux industrielles, ce qui plus de trois fois supérieur à ce qui a été estimé pour l'épuration des eaux usées municipales (23.9 M \$).

Tableau 13. Bilan des coûts en électricité associés à l'approvisionnement et au traitement des eaux industrielles au Québec établi sur la base de la consommation médiane estimée

Secteurs industriels	Consommation électrique médiane estimée	Coût en électricité
	(GWh/an)	(\$/an)
Pâtes et papiers	651	39 711 000
Métallurgie	120	7 320 000
Agro-alimentaire	70	4 270 000
Mines	172	10 492 000
Chimie	180	10 980 000
Total	1 193	72 773 000

Si l'on tient compte de l'estimé minimal et maximal (voir Tableau 11), c'est-à-dire une consommation minimale annuelle de 642 GWh/an (1 760 MWh/d) et une consommation maximale de 1 744 GWh/an (4 780 MWh/d), on peut estimer que la valeur économique du traitement et de l'épuration des eaux industrielles se situe entre 39 M \$ et 106 M \$.

2.5 Synthèse générale de la consommation

Les analyses effectuées dans le cadre de cette étude ont permis d'établir une approximation de la consommation électrique globale associée aux industries de l'eau. Le Tableau 14 résume la consommation électrique pour les trois grands secteurs de l'industrie de l'eau. Ainsi, en considérant l'approvisionnement, le traitement et la distribution de l'eau de consommation, l'épuration des eaux usées domestiques, ainsi que l'approvisionnement et le traitement des eaux industrielles, on peut estimer la consommation annuelle totale à $2\,302 \pm 550$ GWh. En considérant une augmentation de 25 %

(298 ± 138 GWh/an) de la consommation énergétique pour la gestion des eaux industrielles, une hausse de 248 GWh/an pour l'épuration des eaux usées municipales attribuable à la poursuite du PAEQ, ainsi qu'une hausse de 10 % (72 GWh) de la dépense électrique pour la gestion de l'eau de consommation, il appert que la consommation électrique dédiée aux industries de l'eau sera d'environ $2\,920 \pm 688$ GWh/an à la fin du siècle.

Tableau 14. Bilan global de la consommation électrique québécoise associée aux industries de l'eau

Secteurs	Consommation électrique		
	MWh/d	GWh/an	Valeur économique (M \$)
Eaux de consommation	1 962	716	40.1
Eaux usées municipales	1 076	393	24.0
Eaux industrielles	$3\,300 \pm 1500$	$1\,193 \pm 550$	73 ± 33
Total	$6\,338 \pm 1500$	$2\,302 \pm 550$	137 ± 33

En utilisant la valeur moyenne de 5.6 ¢/kWh pour le traitement des eaux et sa consommation et une valeur moyenne de 6.10 ¢/kWh pour l'épuration des eaux usées et pour les SATDEEI, il résulte que les coûts en énergie électrique associés aux industries de l'eau, peuvent être estimés à environ 137 ± 33 M \$/an. Si l'on considère une hypothèse d'augmentation de 618 GWh/an ($2\,302 + 618 = 2\,920 \pm 688$ GWh/an), il appert qu'une somme de 175 ± 41 M \$/an sera consacrée, à la fin du siècle, à l'utilisation de l'énergie électrique dans les industries de l'eau. Cet estimé est basé sur un coût unitaire de 6.0 ¢/kWh, en valeur de 1994.

Maintenant, si l'on admet que la mise en application de diverses opportunités et mesures d'économie d'énergie puisse résulter en une réduction d'environ 20 %, de la dépense électrique globale dans les industries de l'eau, il ressort que l'impact économique de cette pratique serait d'environ 35 ± 10 M \$/an au début du 21^{ème} siècle. Cet estimé permet donc d'apprécier l'importance à accorder aux programmes d'efficacité énergétique dans le domaine de l'eau.

3. Les mesures d'efficacité énergétique

Les mesures d'efficacité énergétique sont orientées pour la plupart vers la gestion de la demande de puissance et de consommation électrique. Elles touchent, 1) *la conservation stratégique de l'énergie électrique* (i.e. mesures destinées à réduire la consommation de l'énergie électrique, ces mesures pouvant contribuer ultimement à réduire les pointes de demande), 2) *la gestion de la demande d'électricité* (mesures destinées à agir sur la demande d'électricité : écrêtage des pointes de demande, transfert de la charge demandée, distribution de la charge vers des périodes de faibles demandes, structure variable de la demande), et 3) *la croissance stratégique de la demande d'électricité* (planification et gestion de la croissance de la demande).

Ce chapitre présente une synthèse des mesures d'efficacité énergétique électriques (MEEE) pouvant être implantées dans les stations de traitement et d'épuration des eaux usées municipales et industrielles québécoises. Les opportunités d'économie d'énergie découlent de l'analyse de la situation particulière québécoise et des études en efficacité énergétique électrique réalisées à l'étranger et discutées dans les chapitres précédents. Les MEEE préconisées touchent, d'un côté, les besoins énergétiques de base (meilleur système d'éclairage, de chauffage, de ventilation, etc.), et, d'un autre côté, l'amélioration des rendements épuratoires et l'efficacité des équipements opérés dans les stations d'épuration (changement de moteurs, remplacement des systèmes d'aération, substitutions technologiques, etc.). Sont également discutées les modifications des pratiques opératoires susceptibles d'agir sur le niveau ou la structure de la demande énergétique des ouvrages d'assainissement.

Le principe général à la base de cette discussion est que les MEEE d'intérêt seront celles qui peuvent améliorer ou conserver la performance épuratoire des stations, en relaxant les demandes de pointes, en favorisant un contrôle stratégique de la croissance de la demande et en réduisant au minimum les pertes d'énergie électrique. Les MEEE susceptibles d'apporter des solutions viables seront celles qui interviennent pour maximiser l'utilité de l'énergie électrique dans les fonctions touchant les systèmes de transport, de traitement et de disposition des eaux (par exemple, la quantité d'énergie nécessaire pour effectuer un travail comme le chauffage, l'entraînement du rotor d'un moteur, etc.) Dans le fonctionnement de ces systèmes, les pertes surviennent au moment de la transformation de l'énergie électrique en travail utile en raison d'un rendement limité de certains équipements, appareils, etc.

Les mesures d'efficacité énergétique électrique à préconiser différeront donc, suivant le type d'usine de traitement et d'épuration, en rapport avec les différents procédés, et à l'intérieur d'une même station, au niveau de la configuration des équipements, de l'âge de la station, etc. Par exemple, les stations d'un certain âge et de plus de 10 000 m³/d seront de bonnes candidates pour la substitution des équipements électriques et des techniques plus

anciennes pour l'aération et la pulvérisation, ainsi que pour l'introduction de systèmes automatiques de contrôle. Les stations plus récentes pourront réduire leur demande en bonifiant leurs équipements d'urgence, alors que les stations en construction pourront être dotées de système de gestion de la demande d'électricité.

3.1 Le traitement des eaux de consommation municipales

3.1.1 Ozonisation

- La production d'ozone peut être régulée à partir des paramètres principaux (débit et ozone résiduelle) par un automate programmable qui agit sur la vitesse des compresseurs d'air.
- Le recyclage de l'ozone d'échappement en post-ozonisation et son utilisation en pré-ozonisation. Pour ce faire l'ozone doit être recomprimé puis diffusée par turbine.
- La récupération de la chaleur dégagée dans les gaz d'échappement, dont la température varie entre 90 °C et 100 °C.
- L'utilisation d'une moyenne fréquence (500 à 2 000 Hz) au lieu de la basse fréquence pourrait permettre de doubler la production d'ozone pour la même dépense énergétique.
- L'utilisation de l'eau froide dans les tours de refroidissement car l'ozone se dégrade plus rapidement à température élevée.
- L'emploi de l'oxygène pur ou enrichi au lieu de l'air ambiant.
- L'utilisation de moteurs à haut rendement.
- L'utilisation de l'air extérieur au lieu de l'air de la chambre des compresseurs.

3.1.2 Filtration à taux rapide

Une augmentation possible de la durée d'opération des filtres de 32 heures en moyenne à 42 heures permettrait de réduire les coûts d'électricité et des produits chimiques utilisés pour le lavage des filtres. Dans ce cas on réduit l'énergie utilisée pour une usine type de 23.8%, soit une valeur monétaire se situant entre 7 500 à 8 500 \$ annuellement. Dans le deuxième cas, une réduction des fréquences de lavage à 9 au lieu de 12 filtres par jour permettrait des économies sur les coûts de traitement chimique pour un volume d'eau annuel égale à 378 145 m³ coûtant 22 700 \$/CAN (sur une base de 6 ¢/m³). Les économies totales seraient ainsi comprises entre 30 200 et 31 200 \$. Les dépenses sur la filtration seule seraient alors entre 1 482 et 4 360 \$ CAN/année.

De plus, il est possible de réaliser des économies supplémentaires en réduisant le volume d'eau de lavage à 1 % au lieu de 2.4 %, tel qu'employé actuellement. Ce faisant on réussit à conserver 58 % de l'eau de lavage (718 793 m³ d'eau/année), ce qui se traduit par une économie de 86 255 \$ CAN.

Les lignes suivantes présentent d'autres mesures d'économie d'énergie envisageables pour la filtration de l'eau potable :

- Un lavage efficace des filtres peut être accompli par utilisation simultanée de l'eau et de l'air, ou encore par la pratique actuelle d'utilisation de l'eau ou de l'air seul pour laver la surface du lit, suivi ou en parallèle d'un jet d'eau à contre-courant à travers le lit.
- Optimiser le procédé de décantation et de coagulation.
- Utiliser des filtres à support mixte au lieu des filtres à granulométrie uniforme. Le bénéfice ainsi obtenu ne se limite pas uniquement à l'économie d'énergie, mais permet d'atteindre une turbidité moindre de l'ordre de 0.1 UTN.
- Inclure l'ajout d'une couche de charbon actif granulaire pour réduire la consommation d'ozone, malgré les difficultés que cela peut poser lors du lavage à contre-courant.
- Utiliser de l'air extérieur frais au lieu de l'air intérieur chaud pour l'alimentation des compresseurs.
- Laver les filtres en dehors des périodes de pointe permet de réduire la puissance facturée d'au moins 11 520 \$ durant la période hivernale.
- Utiliser des polymères à l'entrée des filtres pour une meilleure efficacité des filtres.

3.1.3 Pompage

Il est conseillé d'éviter les démarrages fréquents, ceux-ci provoquant une augmentation de la puissance appelée de l'ordre de 6 à 8 fois. L'achat des moteurs électriques à faible vitesse de rotation, plus coûteux que les moteurs à haute vitesse, résulte en une baisse de la consommation d'électricité. Plusieurs facteurs peuvent contribuer à réduire la performance des pompes, notamment l'encrassement, la corrosion, la rouille, l'usure, les fuites par les joints, l'accroissement du facteur de glissement, etc. De même, la déviation du point de meilleure performance de fonctionnement avec le changement de la demande, cas des pompes à vitesse constante, entraîne une surconsommation énergétique.

Le remplacement ou la réparation des pompes installées depuis une vingtaine d'années est souhaitable (durée de vie normale d'une pompe varie entre 18 à 25 ans). Or, on trouve au Québec, un grand nombre de pompes en opération depuis le début des années soixante. Il est bien établi que pour une telle durée de vie, l'efficacité d'une pompe diminue significativement. Le critère de base pour le remplacement ou la réparation d'une pompe est que les bénéfices annuels de la pompe déjà installée doivent être égaux aux bénéfices marginaux maximums de la pompe de remplacement.

3.1.4 La désinfection de l'eau

Diverses mesures sont envisageables pour réduire la dépense électrique associée à la désinfection de l'eau par ozonisation. Par exemple, la production d'ozone peut être régulée à partir des paramètres principaux (débit et ozone résiduelle) par un automate programmable qui agit sur la vitesse des compresseurs d'air. De même, des économies peuvent être réalisées en recyclant l'ozone d'échappement de la post-ozonisation en pré-ozonisation. Aussi, il est possible de récupérer la chaleur dégagée dans les gaz d'échappement, dont la température varie entre 90 °C et 100 °C. L'utilisation d'une moyenne fréquence (500 à 2 000 Hz) au lieu de la basse fréquence pourrait permettre de doubler la production d'ozone pour la même dépense énergétique. L'emploi de l'eau froide dans les tours de refroidissement peut être profitable car l'ozone se dégrade plus rapidement à température élevée. L'emploi de l'oxygène pur ou enrichi au lieu de l'air ambiant permet de diminuer l'énergie nécessaire à la production de l'ozone. L'utilisation de moteurs à haut rendement est également de mise, ainsi que l'emploi de l'air extérieur au lieu de l'air de la chambre des compresseurs.

3.1.5 Les réservoirs de stockage

Étant donné que la période maximale de consommation journalière et saisonnière d'eau coïncide bien avec celle de la demande de puissance électrique, l'installation d'un réservoir de stockage avant et après les usines de traitement d'eau permet de réduire la demande en électricité durant les heures de pointe. Ces installations réduisent la facture d'électricité en évitant le dépassement inutile de la puissance souscrite. L'eau est pompée au réservoir durant les périodes creuses, la nuit par exemple, puis est utilisée durant les périodes de pointe. Au Québec, on constate une certaine réticence des municipalités à installer des réservoirs de stockage pour des raisons de gel. Il est cependant important de signaler qu'il existe actuellement des réservoirs bien adaptés aux conditions climatiques canadiennes. Plusieurs unités sont d'ailleurs déjà installées dans des campings militaires au Canada. Ce genre de réservoir peut être installé en surface et peut résister à des extrêmes de températures variant entre -32 et +52 °C.

3.1.6 L'éclairage

Pour ce qui est de l'éclairage, les économies d'énergie électrique potentielles comprennent le remplacement des modèles conventionnels de ballasts par des ballasts de technologie récente à haut rendement énergétique (ballast électronique, ballast électromagnétique efficace), permettant ainsi des réductions de consommation se situant entre 22 et 35 %. De même, la substitution des lampes fluorescentes conventionnelles du type T8-T12 par des tubes fluorescents efficaces permet des économies énergétiques de 13 à 20 %.

3.1.7 Les fuites dans le réseau

L'eau perdue par manque d'étanchéité du réseau d'aqueduc peut représenter jusqu'à 50 % de l'eau produite ou achetée par la municipalité. Il existe pourtant des moyens simples, efficaces et rentables de localiser et de corriger les fuites.

3.1.8 La conservation de l'eau de consommation

La conservation de l'eau est un moyen efficace pour réduire indirectement la consommation électrique. En effet, elle assure la diminution de la consommation électrique dans les stations de pompage d'eau, dans les réseaux d'adduction et de distribution, ainsi qu'au niveau des équipements des usines de traitement d'eau potable. Elle permet également des économies d'énergie au niveau de l'assainissement et du traitement des eaux usées. Cette stratégie repose sur la réduction de l'utilisation de l'eau par un choix des appareils de plomberie.

3.1.9 Les réservoirs de chasse des toilettes

Il existe trois principaux systèmes de chasse de toilette. Le système de réservoir conventionnel, appelé de non-conservation, lequel nécessite 5.5 gal/chasse. Ce système fût remplacé par un autre s'appelant toilette à basse chasse "low flash toilet" qui utilise presque la moitié de cette quantité d'eau, soit 3.5 gal/chasse. Malgré cette importante réduction du volume d'eau nécessaire par effectuer la chasse des toilettes, celui-ci vient d'être remplacé par un nouveau système de toilette à ultra-basse chasse, traduction du mot anglais "Ultra low flash toilet". Ce système de chasse ne requiert que 1.6 gal/chasse (6 litres). Au Québec, le débit d'eau requis par chasse de toilette varie entre 19 à 27 litres (5 à 7.13 gal). D'après ces chiffres, il paraît bien évident que des systèmes conventionnels sont employés largement dans la province. Le remplacement de ceux-ci par des toilettes Ultra-flash, permettrait de réduire la consommation d'eau d'un facteur variant entre 3.12 à 4.46 fois, soit une économie de 68 à 78 %.

3.1.10 Les douches

La quantité d'eau utilisée dans les douches est non négligeable. Le débit standard d'une douche de non conservation d'eau est de 8 gal/min. Une grande partie de ces eaux est gaspillée à cause du débit excédentaire utilisé. L'utilisation des pommeaux à faible débit de 3 gal/min. permettra d'effectuer une réduction dépassant la moitié de la consommation, soit précisément de 62.5 %. L'AQTE estime que la quantité d'eau utilisée par douche varie entre 95 et 99 litres (25.0 à 26.2 gal.). Selon les sondages effectués, le temps moyen d'une douche pris par un québécois varie entre 5 et 10 min.

Tableau 15. Identification des MEEE potentielles et leur incidence sur la gestion de l'énergie électrique

No.	Description des MEEE	Influence sur la gestion de l'énergie		
		Conservation stratégique	Gestion de la demande	Croissance stratégique
1	Moteur à haut rendement énergétique	2	1	
2	Entraînement de moteur à vitesse variable	2	1	
3	Aérateurs à fines bulles	3	2	
4	Boucle de contrôle de l'O.D. dans les bassins d'aération	2	1	
5	Boucle de contrôle de la TCO à l'affluent (respiromètre)	2	1	
6	Soufflantes avec des performances hydrauliques accrues	1	1	
7	Bassin d'égalisation des eaux usées	1	1	
8	Digestion anaérobie des boues	2	2	
9	Correcteur du facteur de puissance	-	2	
10	Entretien préventif des équipements mécaniques	1	-	
11	Formation des opérateurs	1	1	x
12	Gestion de la demande électrique	-	2	x
13	Système de gestion de l'énergie	2	1	x

Légende : 1 faible; 2 moyen; 3 élevé

3.2 L'épuration des eaux usées municipales

Avant d'aborder en détails les mesures potentielles d'économies d'énergie électrique (MEEE) pour les diverses étapes et secteurs du traitement des eaux usées, les principales MEEE ainsi que leur incidence sur la conservation stratégique de l'énergie électrique, la gestion de la demande de

puissance d'électricité et la croissance stratégique de la demande d'électricité sont présentées au Tableau 15. Par ailleurs, le Tableau 17 décrit les MEEE applicables pour chaque secteur d'une station d'épuration, alors que le Tableau 16 présente la légende des équipements électriques employés au Tableau 17.

Tableau 16. Légende des équipements électriques

Code	Équipements électriques
A	Moteur d'entraînement
B	Chauffe-eau
C	Pompe à eau
D	Pompe à sable
E	Pompe à écumes
F	Pompe à boues
G	Pompe doseuse de produits chimiques
H	Soufflante
I	Générateur d'oxygène
J	Élément chauffant
K	Lampes à ultraviolets

Tableau 17. MEEE applicables par secteur d'une station d'épuration

Description du traitement	Équipement électrique (tableau 16)	Consommation et demande électrique	MEEE envisageables (tableau 15)
1) Prétraitement			
Dégrilleur à nettoyage mécanique	A	faible	1
Dégrilleur statique, nettoyage à l'eau chaude	B, C	faible	1
Dégrilleur rotatif, nettoyage à l'eau chaude	A, B, C	faible	1
Récupération des déchets, convoyeur auto.	A	faible	1
Compacteur à déchets	A	faible	1
Déchiqueteur à déchets	A	moyen	1
Dessableur à vortex	A	faible	1
Dessablage aéré	H	élevé	2, 6
Enlèvement des sables	D	faible	1
Lavage des sables	A	faible	1
Bassin d'égalisation aéré	A, H	élevé	1, 2, 6
2) Traitement primaire			
Décantation primaire (incluant les écumes)	A	faible	1
Enlèvement des écumes	E	faible	1
Récupération des boues primaires	F	faible	1
3) Traitement secondaire			
Physico-chimique	A	faible	1
Bacs de mélange des produits chimiques	A	faible	1
Dosage des produits chimiques	G	faible	1
Biofiltration et lits bactériens	A	faible	1
Eau de lavage	C	moyen	1
Air de lavage	H	élevé	2, 6
Disques biologiques	A	faible	1
Recirculation des boues	F	faible	1

Tableau 17. MEEE applicables par secteur d'une station d'épuration (suite)

Description du traitement	Équipement électrique (tableau 16)	Consommation et demande électrique	MEEE envisageables (tableau 15)
Boues activées (différentes formes)			
Aération par diffusion	H	élevé	2, 3, 4, 5, 6
Aération de surface ou par jet	A, C	élevé	1, 2, 3, 4, 5
Oxygène pur	I	élevé	4, 5
Agitation mécanique	A	moyen	1
Recirculation des boues	F	faible	1
Digestion anaérobie			
Brassage	A	moyen	1
Chauffage	J	élevé	
Étangs aérés			
Aération par diffusion	H	élevé	2, 3, 4, 5, 6
Aération de surface ou par jet	A, C	élevé	1, 2, 3, 4, 5
Dosage de l'alun	G	faible	1
Décantation secondaire (incluant écumes)	A	faible	1
Enlèvement des écumes	E	faible	1
Récupération des boues secondaires	F	faible	1
4) Traitement tertiaire			7
Dénitrification biologique			
Aération par diffusion	H	élevé	2, 3, 4, 6
Aération de surface ou par jet	A, C	élevé	1, 2, 3, 4
Oxygène pur	I	élevé	4
Agitation mécanique	A	moyen	1
Déphosphoration physico-chimique	A	faible	1
Bacs de mélange des produits chimiques	A	faible	1
Dosage des produits chimiques	F	faible	1
Filtration	C	moyen	1
Désinfection aux ultraviolets	K	élevé	

Tableau 17. MEEE applicables par secteur d'une station d'épuration (suite)

Description du traitement	Équipement électrique (tableau 16)	Consommation et demande électrique	MEEE envisageables (tableau 15)
5) Traitement des boues			7
Stockage des boues	A	moyen	1
Pompage des boues	F	faible	1
Épaississement	A	élevé	1
Pompage des boues	F	faible	1
Digestion aérobie			
Aération	H	élevé	2, 6
Brassage mécanique	A	faible	1
Digestion anaérobie	A	faible	1, 9
Chauffage des boues	J	élevé	
Pompe de recirculation	F	faible	1
Déshydratation			
Filtre à vacuum	A	moyen	1
Filtre à bandes presseuses	A	moyen	1
Filtre à plateaux	A	moyen	1
Centrifugeuse	A	moyen	1
Convoyeur	A	faible	1
Conditionnement des boues	G	faible	1
Séchage et incinération	A	moyen	1

3.2.1 Amélioration des systèmes de pompage des eaux usées et des boues

La consommation d'énergie électrique associée au pompage est considérable. Les mesures visant une utilisation plus efficace de l'énergie électrique dans les systèmes de pompage auront ainsi un impact significatif sur la consommation totale des ouvrages d'assainissement. La WPCF (1985) soutient que *les mesures d'économie d'énergie dans le pompage des eaux usées doivent porter prioritairement au niveau de l'entretien des équipements. Une attention doit également être portée à la propreté et à l'ajustement des contacts électriques essentiels pour une utilisation optimale de la puissance.*

Burton Environmental Engineering et al. (1993) suggère que, dans le cas des opérations à forte consommation d'électricité comme les systèmes de pompage, des économies d'énergie substantielles peuvent être obtenues en utilisant des moteurs à haute efficacité. Cette étude souligne en effet que les moteurs à haute efficacité sont de 3 à 5 % plus performants que les moteurs standards, et

ont un facteur de puissance plus élevé. *Pour les cas de fluctuations importantes de la charge hydraulique, l'emploi de pompes à débit variable permet aussi de réaliser des économies d'énergie en fournissant seulement la puissance nécessaire pour une opération donnée. Il est toutefois recommandé d'employer des pompes à débit constant lorsque les conditions opératoires sont optimisées et fixes (Metcalf & Eddy, Inc., 1992b).*

La réduction, lorsque possible, de la hauteur de la tête d'eau des pompes et du nombre de coudes dans les conduites est une MEEE efficace. Particulièrement recommandable au Québec, l'installation et à l'optimisation de l'utilisation des bassins d'égalisation des eaux et de stockage des boues permettrait une opération accrue des pompes en période hors pointe, et ainsi une réduction en période de pointe. Des mesures correctrices devraient également être apportées à la puissance des pompes en place, notamment dans les petites stations.

3.2.2 Réduction de l'infiltration et de l'impact de la charge hydraulique

L'une des principales causes de pertes énergétiques reliée à l'assainissement des eaux usées provient de l'infiltration de l'eau de la nappe phréatique dans les réseaux d'égouts. Ce serait le cas des ouvrages d'assainissement des eaux usées de la CUM. Par ailleurs, les réseaux unitaires (interception des eaux domestiques, industrielles et pluviales) desservent la presque totalité du territoire québécois. Ceci résulte à l'obligation de traiter des volumes très importants d'eaux usées et occasionne une fluctuation très prononcée de la charge hydraulique et organique. *Considérant ces éléments, à défaut de remplacer les réseaux d'égouts unitaires par des égouts sélectifs, il est nécessaire de veiller à l'entretien des réseaux de collecte des eaux usées et à optimiser les apports de charges hydrauliques par la gestion en temps réel des débits.*

3.2.3 Efficacité des prétraitement et traitement primaire

Au niveau du traitement primaire, des mesures d'économie peuvent être réalisées en évitant le pompage excessif de la mousse, des écumes et des boues primaires. Le surpompage résultant de ces pratiques peut causer une augmentation des besoins énergétiques pour les opérations subséquentes, comme l'augmentation des besoins de chauffage des digesteurs. Les retenues de grilles, après élimination de l'eau en excès, sont habituellement autocombustibles et peuvent ainsi contribuer à réduire les besoins supplémentaires de chaleur du niveau de l'incinération. Une attention particulière devrait être portée au niveau du mélange avec les autres solides, comme les boues primaires et secondaires, ainsi que les écumes. Au niveau du dessablage, des économies d'énergie peuvent être obtenues en minimisant le lavage des dessableurs. D'une manière générale, une plus grande attention doit être accordée aux pratiques de pompage, pour réduire les volumes de boues à pomper.

3.2.4 Traitement secondaire

Les opportunités d'économie d'énergie susceptibles d'être considérées au niveau du *traitement secondaire* dépendent du débit, des caractéristiques de l'affluent à traiter, du type de traitement, des exigences de rejet et du niveau de formation des ressources humaines qui opèrent les équipements.

Boues activées (36 stations)

Plusieurs recherches ont démontré que des économies d'énergie majeures peuvent être réalisées au niveau de l'aération des systèmes de *boues activées* (Andersson, 1980; Metcalf & Eddy, Inc., 1992a, b; Rein, Crowther & Partners, Ltd, 1978). *En contrôlant la sortie d'air dans les soufflantes de façon à maintenir l'oxygène dissous au niveau minimum requis pour un traitement adéquat, une économie d'énergie substantielle peut être réalisée.* L'EPRI (1993b) a répertorié dans la littérature des économies d'énergie variant entre 10 et 58 %, suite à l'installation de systèmes de contrôle automatisés de l'aération. *L'utilisation de diffuseurs à fines bulles ou à membranes présentant une meilleure capacité d'oxygénation que les diffuseurs conventionnels à grosses bulles permet aussi de réduire considérablement la dépense électrique.* Burton Environmental Engineering et al. (1993), des économies d'énergie de 9 à 40 % ont été mesurées dans des stations d'épuration américaines suite à l'installation de diffuseurs à fines bulles ou à membranes. Ontario-Hydro (1993a) décrit une économie possible variant entre 20 et 40 % pour une telle substitution technologique. *Une autre mesure préconisée par Andersson (1980), et applicable à la situation québécoise, consiste en l'optimisation du rapport F/M dans les bassins d'aération* (rapport entre la quantité de matière organique présente dans les eaux à épurer et la concentration de biomasse disponible dans le bassin de traitement pour assimiler les matières dissoutes, exprimé en kg DBO₅/d/kg MES). *L'emploi des systèmes avec nitrification-dénitrification, lorsque les systèmes de boues activées doivent comprendre au moins l'étape de nitrification, peut s'avérer intéressant puisque l'ajout d'une étape de dénitrification ne nécessite pas d'aération et permet de hausser l'efficacité énergétique épuratoire du traitement.* *L'utilisation de pompes plus performantes pour la recirculation des boues est également une pratique énergétiquement profitable.* Dans tous les cas de mise en place de mesures visant les économies d'énergie électrique, il est recommandé de tenir compte des effets généraux de ces mesures sur l'ensemble de la chaîne de traitement.

Biodisques (14 stations)

Au Québec, avec 14 petites stations, la part de l'électricité dédiée à l'opération des *systèmes de biodisques* est pratiquement négligeable par rapport au parc d'équipements d'épuration. En toute équité, cependant, il faut que les populations desservies soient avantagées au même titre que pour les traitements plus répandus. L'efficacité énergétique de ce type de station est particulièrement faible et des *recherches plus poussées pourraient être menées, notam-*

ment au niveau des moteurs employés et des conditions opératoires, afin de déterminer les causes de la sous-efficacité énergétique de ce type de traitement. Généralement, hormis les mesures portant sur le chauffage des bâtiments qui ont des effets sur les opérations, les principales mesures d'économie d'énergie pour le traitement par biodisques portent sur la vitesse de rotation du support de biomasse, puisque l'énergie électrique consommée est majoritairement utilisée dans cette opération. Selon les conditions opératoires et les exigences de rejet, la vitesse de rotation peut être ajustée pour économiser l'énergie. La mise au point d'un système de contrôle automatique de la vitesse de rotation des disques en fonction de la charge organique à traiter permettrait de réduire la dépense électrique.

Biofiltration (14 stations)

La majeure partie de la consommation d'énergie dans les procédés utilisant les lits bactériens est utilisée pour la recirculation des eaux. Ainsi, ce sont l'amélioration des pompes et des moteurs qui est la plus susceptible d'entraîner des réductions de consommation. En plus des mesures portant sur les systèmes de pompage, une étude de la performance des systèmes d'aération devrait déboucher sur des MEEE efficaces. Il faut toutefois noter que les unités de biofiltration en opération sont très récentes et que, par conséquent, celles-ci doivent être relativement bien optimisées du point de vue énergétique. *Considérant ces faits, il appert que la priorité des efforts poussés en efficacité énergétique devrait porter sur les autres systèmes de traitement en opération au Québec, notamment les stations de type boues activées et étangs aérés.* Toutefois, une analyse de l'efficacité énergétique de ce type de station devrait pouvoir apporter certains bénéfices aux populations desservies.

Étangs aérés (179 stations)

Les stations de type étangs aérés, avec 15 % du débit total des eaux usées traitées au Québec, constituent plus de 60 % du nombre de stations en opération. Ces ouvrages d'assainissement ont une efficacité énergétique faible. Sur cette base, on peut soutenir qu'il s'agit d'un domaine où les mesures d'économie d'énergie devraient engendrer des bénéfices sociaux importants. Les MEEE devraient porter sur l'opération des soufflantes et sur la substitution des systèmes de diffusion d'air ou d'aération mécanique. On privilégiera l'utilisation de diffuseurs à fines bulles ou à membranes poreuses en remplacement des diffuseurs à grosses bulles (presque uniquement des diffuseurs ATARA modèle 1218), et également, la mise en place de systèmes de réglage automatisé de l'aération par un contrôle de la teneur en oxygène dissous dans les eaux usées. Des études pilotes menées dans quelques stations d'épuration devraient porter sur l'analyse de la faisabilité technico-économique de l'opération conjointe de ces équipements.

Autres systèmes (46 stations)

Les autres systèmes de traitement utilisés au Québec sont le traitement physico-chimique (2), l'utilisation de fosses septiques communes (24) et les étangs non-aérés (20). *Les deux derniers tenant un rôle négligeable dans l'épuration des eaux usées domestiques au Québec, le développement des MEEE devraient plutôt s'intégrer comme facteurs d'optimisation.* Pour ce qui est du traitement physico-chimique, il faut mentionner qu'un programme de gestion de l'énergie, élaboré par le bureau d'efficacité énergétique du gouvernement du Québec, est à l'étude à la station d'épuration de la CUM (Bégin, 1993). *Il serait recommandable que Hydro-Québec participe à cette étude, afin de pouvoir définir quelles seraient les mesures pertinentes à envisager pour les autres stations d'épuration québécoises.* Les mesures d'efficacité énergétique discutées pour les étapes de pompage, de prétraitement, de traitement primaire et de gestion des boues sont applicables à ce type de traitement.

3.2.5 Traitement tertiaire

Les *traitements tertiaires* sont peu utilisés au Québec. Les types de traitement tertiaire employés se limitent presque exclusivement à la déphosphoration, à la désinfection des eaux épurées et, dans certains cas, à la filtration tertiaire.

Désinfection des eaux

La désinfection des eaux épurées est une mesure peu employée au Québec. Seulement trois stations (Notre-Dame-du-Lac, Rock Forest et Magog), traitant au total moins de 20 000 m³/d d'eaux usées, font appel encore à des procédés de chloration. Il semble que cette pratique ne sera pas privilégiée pour les prochains ouvrages d'assainissement. Ce sont plutôt les électrotechnologies, principalement la radiation ultraviolet avec ses faibles coûts d'investissement, qui seront donc appelées à jouer un rôle plus important pour la désinfection des eaux usées. Une douzaine de stations d'épuration opèrent des systèmes U.V., dont celle de la CUQ (cette station représentant 80 % des eaux subissant le traitement U.V.). Tenant compte d'une consommation électrique moyenne de 0.02 kWh/m³ pour cette activité et d'un débit hydraulique moyen de 2 765 000 m³/d (prévu à la fin de cette année après raccordement du réseau du versant sud de la CUM), il appert que l'opération d'un tel système entraînerait une hausse directe de la dépense électrique de 55 300 kWh/d, ce qui représente approximativement 6.2 % de toute l'énergie consommée quotidiennement pour l'épuration des eaux usées au Québec. *Étant donné un tel impact sur la demande énergétique électrique, il serait souhaitable que Hydro-Québec conseille les intervenants de la CUM afin, le cas échéant, de choisir le système de radiation U.V. le plus performant pour la situation donnée. Il en est de même, avec les autres municipalités qui devront, dans bien des cas, installer une technologie de désinfection des eaux.*

Déphosphoration

La déphosphoration, aussi appelée *déphosphoration*, est appliquée comme traitement tertiaire, ou intégrée dans les traitements primaire et secondaire. Au Québec, plus de 83 % du débit hydraulique total des usines subit une déphosphoration par ajout principalement de *chlorure ferrique* ou de *sulfate d'aluminium* (alun). Si l'on considère la faible dépense énergétique associée à la déphosphoration des eaux, les économies d'énergie envisageables seront assez limitées. Les MEEE recommandées sont les mêmes que celles qui ont été préconisées pour l'utilisation des moteurs et pompes plus performantes.

Filtration tertiaire

Moins de 2 % de la charge totale utilisent la *filtration tertiaire* comme étape de traitement. *Les MEEE envisageables porte sur l'utilisation de pompes plus efficaces sur un plan énergétique.*

3.2.6 Traitement et élimination des boues

La consommation électrique associée au traitement et à l'élimination des boues d'épuration représente une proportion de plus en plus importante de la demande énergétique globale des ouvrages d'assainissement. Elle est engendrée à diverses étapes de la chaîne de traitement, soit au niveau du pompage et de l'épaississement des boues, de la stabilisation microbiologique de celles-ci,

du conditionnement et de la déshydratation de cette biomasse, et finalement, de leur disposition et élimination finale dans l'environnement.

Épaississement des boues

L'épaississement est une pratique relativement peu énergivore, principalement pour le cas de la sédimentation gravitaire (0.0004 à 0.0006 kWh/m³), qui *entraîne une réduction substantielle de l'apport énergétique pour la stabilisation et la déshydratation des boues*. Il serait important de vérifier, dans les stations d'épuration municipales, les possibilités de mise en place de techniques d'épaississement des boues. Des efforts de recherche devraient également porter sur l'efficacité, in situ, des systèmes implantés, afin d'une part, d'optimiser ces unités et, d'autre part, de définir si le type d'épaississeur employé constitue le meilleur choix technologique pour la situation donnée.

Stabilisation des boues

La gestion des boues d'épuration au Québec fera inévitablement l'objet de divers transferts technologiques au cours des prochaines années. Les améliorations technologiques qui seront apportés aux ouvrages d'assainissement des eaux usées entraîneront une augmentation significative de la demande d'énergie électrique. Examinons brièvement les opportunités d'économie d'énergie se rattachant aux procédés usuels de stabilisation des boues, ainsi qu'à certaines nouvelles voies technologiques. *Comme première mesure d'efficacité énergétique reliée à la stabilisation des boues, lorsque possible, il est avantageux de privilégier l'emploi de systèmes de digestion anaérobie au lieu des systèmes aérobies*. Dans les cas où il s'avère impossible d'opérer des digesteurs anaérobies, quelques mesures opératoires pourraient être entreprises. Le remplacement des diffuseurs à grosses bulles par des diffuseurs à fines bulles présentant une meilleure capacité d'oxygénation, tout comme l'installation de système de contrôle automatisé de la teneur en oxygène dissous sont des mesures profitables pour réduire les pertes d'énergie électrique. Les économies d'énergie réalisées dans ces cas permettent de rembourser, dans un délai assez bref, le coût initial d'investissement. Au niveau de la stabilisation anaérobie, la mise au point au cours des dernières années d'un digesteur optimisé de type "egg-shaped" permet de diminuer la dépense électrique inhérente à ce type de traitement des boues (Metcalf & Eddy, Inc., 1992b). La digestion aérobie-anoxie, développée durant les dernières années, permet de diminuer de presque 50 % les coûts associés à l'aération des boues, sans pour autant affecter significativement la qualité du traitement. L'opération de procédés de digestion aérobie ou anaérobie thermophile est également une voie à explorer comme technologies de substitution. La combinaison de procédés thermophiles et mésophiles apparaît également une approche intéressante pour réduire la consommation énergétique. Par ailleurs, les technologies de décontamination des boues développées à l'INRS-Eau, indiquent clairement que l'opération de celles-ci peut résulter en une réduction de la consommation électrique associée au traitement des boues.

Le compostage ou co-compostage des boues d'épuration

Il s'agit d'une pratique présentement au stade du développement-démonstration aux États-Unis (Metcalf & Eddy, Inc., 1992b). *L'amélioration des diverses variantes de compostage, réalisée en bonne partie par le développement d'électrotechnologies plus performantes au niveau du broyage, du mélange, du convoyage, de la ventilation et des soufflantes augmente considérablement l'intérêt de cette approche.* La faisabilité du compostage sera étudiée pour le traitement des boues produites à la station de la CUM.

Le chaulage des boues

Le chaulage des boues est largement répandu aux États-Unis, mais n'est pas une pratique courante au Québec. *Étant donné la nature souvent acide des sols agricoles dans nos régions, ainsi que la faible demande d'électricité requise pour ce traitement (0.62 à 2.38 kWh/tbs), cette alternative devrait être examinée soigneusement.*

Conditionnement des boues

La réduction de l'utilisation des produits chimiques à un effet sur la dépense d'énergie dans le système. Les gains résultant de ce type de MEEE sont cependant forts modestes, les mesures d'économie d'énergie pour le conditionnement chimique des boues se limitent donc principalement à *l'utilisation de moteurs et de pompes plus performantes.*

Prétraitement thermique

Le chauffage sous pression des boues sur une courte période permet une meilleure coagulation des solides. Les frais d'opération élevés de cette technologie limitent leur application aux stations d'épuration de grande capacité (Metcalf & Eddy, Inc., 1992b). *Le conditionnement électro-acoustique et la congélation des boues devraient faire l'objet d'étude de faisabilité technico-économique.*

Déshydratation des boues

Au Québec, la déshydratation des boues d'épuration s'effectue dans la plupart des cas par filtration sur bandes presseuses. Cette technique est la moins énergivore. Son efficacité est cependant limitée (< 25 % de siccité du gâteau). Une innovation intéressante, déjà examinée au laboratoire des technologies électrochimiques et des électrotechnologies d'Hydro-Québec à Shawinigan, *combine le séchage par radiation infrarouge à la filtration sur bandes presseuses.* Cette méthode permet de hausser le rendement de déshydratation des boues, et *devrait être explorée dans le cadre d'une étude pilote.*

Il est peu probable d'assister à l'implantation de technologies comme les centrifugeuses à teneurs élevées en solides, les presses électroacoustiques, les

pressoirs verticaux à auge, les lits de séchage sous vide, les filtres-presses rotatifs à vis, les filtres-presses tubulaires, les membranes filtrantes à courant longitudinal et la déshydratation par micro-ondes et par congélation (Metcalf & Eddy, Inc., 1992b). Toutefois, l'analyse du potentiel d'efficacité énergétique et de valorisation économique des boues devrait être réalisé conjointement, ceci permettant une meilleure compréhension des débouchés technologiques.

Le séchage thermique des boues

Cette technique permet de hausser la siccité des gâteaux de boues après déshydratation mécanique. *La substitution des procédés conventionnels de stabilisation des boues, par un séchage à la vapeur ou par infrarouge, représente une voie de recherche d'un intérêt évident.* Deux unités de stabilisation thermique seront construites sous peu à la station d'épuration de la CUM (Bégin, 1993).

Incinérateurs à boues

L'amélioration de l'efficacité énergétique des incinérateurs à boues constitue également un domaine à explorer. L'efficacité énergétique des incinérateurs à foyers multiples peut être accrue par un meilleur contrôle du rendement, tout en réduisant la consommation d'électricité et/ou de gaz naturel (par exemple, une économie annuelle de 300 000 \$ à la CUM). *La vapeur produite lors de l'incinération des boues peut également être employée pour divers usages dans la station, permettant ainsi une réduction de la consommation électrique.*

Des recherches devraient être réalisées afin d'étudier les possibilités de récupération et de réutilisation de la chaleur produite dans les diverses étapes de traitement dans les stations d'épuration. En effet, plusieurs procédés, notamment les procédés biologiques, sont fortement influencés par la température de réaction. L'optimisation de l'utilisation de la chaleur dans les stations permettrait de hausser les performances épuratoires et de réduire la dépense électrique. La mise en place d'échangeur de chaleur entre les eaux affluentes et effluentes des stations d'épuration constitue un exemple intéressant de récupération thermique.

3.2.7 Éclairage, chauffage et climatisation des bâtiments

L'optimisation des luminaires permettrait d'économiser de 20 à 30 % de l'énergie attribuable à l'éclairage sans aucune perte dans le rendement du travail ou de la sécurité. Dans un document portant sur la gestion de l'énergie à la station d'épuration des eaux usées de la CUM (Bégin, 1993), on mentionne qu'un programme de contrôle de l'éclairage a été mis en place depuis juin 1992. À la station de la CUM, la surveillance rigoureuse du contrôle du système d'éclairage a permis d'économiser annuellement 20 000 \$, alors que le remplacement des ballasts engendre une économie de 3 000 \$, et la substitution de lampes à incandescence par un nouveau type de fluorescent à ballast intégré économise 21 000 \$. *Il serait donc approprié d'encourager des programmes de*

surveillance et d'amélioration de l'éclairage, l'utilisation de tubes fluorescents économiseurs d'énergie. Les mesures d'économie d'énergie envisageables pour le chauffage des stations visent la rationalisation des besoins. Selon la WPCF (1985), la diminution, lorsque possible, de 3 à 2 changements d'air frais par heure, résulte en une baisse de l'énergie dédiée au chauffage de 25 à 30 %, alors que la réduction de la température d'ambiance peut réduire le coût du chauffage de 35 à 45 %. *On suggère de réduire le plus possible le chauffage et la climatisation pendant les fins de semaine et les jours de congé, dans les bâtiments inoccupés. Il est aussi souhaitable d'établir des températures d'exploitation minimales l'hiver et maximales l'été, en fonction de l'utilisation des locaux. Une autre mesure envisageable comprend l'installation d'un système informatisé de régulation centrale pour assurer la commande et la surveillance des installations de chauffage, de ventilation et d'air climatisé des ouvrages d'assainissement.* Le bureau de l'efficacité énergétique (B.E.E.) du gouvernement du Québec a d'ailleurs proposé cette mesure aux autorités de la station d'épuration de la CUM (Bégin, 1993).

3.2.8 Optimisation de la puissance appelée

L'optimisation de la puissance appelée par l'installation de systèmes de surveillance automatisés peut s'avérer du plus grand intérêt économique. La puissance souscrite représente la puissance minimale, fixée en collaboration avec le fournisseur d'électricité, pour laquelle le client est tenu de payer. Si celui-ci consomme moins que la puissance souscrite, il doit néanmoins payer pour la puissance souscrite car le fournisseur doit en tout temps prévoir la quantité d'électricité à livrer dans son réseau de distribution. Par contre, si la puissance utilisée ou appelée excède de 10 % ou plus la puissance souscrite, l'excédent est alors assujéti à des frais de dépassement forts onéreux. La mise en place d'instruments de contrôle permet alors aux opérateurs de prévoir les heures de surconsommation et de prendre des dispositions pour atténuer les pointes. À la station de la CUM, l'installation de tableaux visuels et sonores pour un coût de 10 000 \$, ainsi qu'une surveillance accrue de la puissance appelée, résultera en une économie annuelle d'environ 300 000 \$.

3.2.9 Le contrôle du facteur de puissance

L'installation d'un système automatisé de contrôle du facteur de puissance est également une mesure d'intérêt. Le facteur de puissance représente le rapport de la puissance active (kW) à la puissance apparente (kilovolts-ampères). Pour éviter une pénalité à la facturation, le facteur de puissance doit être maintenu égal ou supérieur à 95 %. À la station d'épuration de la CUM, un investissement de 2 000 \$ pour instaurer un système de contrôle constant entraîne une économie annuelle de près de 10 000 \$.

3.2.10 L'interconnexion réseau d'aqueduc - minicentrale thermique

L'interconnexion "réseau d'aqueduc - minicentrale thermique", lorsque le contexte si prête, peut présenter de nombreux avantages. Par exemple, 1) le

délestage de la charge électrique des stations de pompage pendant la période hivernale et la récupération de cette consommation le reste de l'année, 2) la production additionnelle d'électricité pendant la période hivernale, 3) la réduction, dans le secteur résidentiel, de la consommation électrique ainsi que de la demande en période hivernale, 4) l'amélioration du service à la population.

Quel intérêt y-a-t-il pour Hydro-Québec à une cogénération dirigée vers les SADTEEM et SADTEEI ? Le réseau d'Hydro-Québec est en milieu nordique : la pointe survient entre novembre et avril, la saison d'été est, à l'exception des centres-ville, toujours hors-pointe. La société d'État a déjà recours à des centrales thermiques (e.g. Tracy) pour assurer la production d'électricité de pointe et même la charge intermédiaire (1 500 premières heures). Aucune récupération de l'énergie thermique de ces centrales n'est actuellement réalisée. Les rejets, absorbés par le fleuve ou le milieu ambiant, deviennent ainsi une source de "pollution thermique").

Par ailleurs, il faut considérer que l'eau d'alimentation est souvent pompée dans des plans d'eau à 0 °C, le réseau de distribution circule sous-terre à une profondeur où la température se maintient, selon les régions, entre 5 et 10 °C. Au coeur de l'hiver et au printemps, même réchauffée par le sol, l'eau arrive vers 2 °C dans une grande partie des résidences. Le chauffage de cette eau est fortement énergivore. Au Québec, l'eau chaude sanitaire résidentielle est produite par un parc de plus de 2 300 000 chauffe-eau électriques. Une étude récente a montré que ces chauffe-eau contribuaient pour 2 760 MW à la demande de pointe. La consommation d'énergie associée à la production d'eau chaude sanitaire correspond à une élévation moyenne de température de plus de 55 °C en hiver. Les périodes de pointe de demande électrique et de demande d'eau sont quasi parfaitement coïncidentes.

Ainsi, l'installation de mini-centrales thermiques de production d'électricité sur le site d'usines de pompage et de filtration d'eau et la récupération de la chaleur co-générée dans l'eau potable avant distribution pourrait s'avérer une solution avantageuse. La période de fonctionnement de ces centrales pourrait être du 1^{er} décembre au 15 avril (135 jours ou 3 200 h). La récupération de chaleur se ferait au niveau du bloc moteur et au niveau des fumées d'échappement grâce à une technologie québécoise éprouvée d'échangeur à contact direct qui permet de récupérer la chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau des fumées, et de retirer de celles-ci les polluants qu'elles contiennent.

Le sol se maintenant aux environs de 5 à 10 °C en hiver, on peut chauffer l'eau jusqu'à 7 ou 12 °C sans perdre beaucoup de chaleur dans le réseau d'eau (élévation de température à l'entrée de l'aqueduc de l'ordre de 8 °C). L'eau arriverait au consommateur environ 5 °C plus chaude qu'habituellement. L'eau peut-être réchauffée jusqu'à 10 °C sans exiger un contrôle important de la prolifération des microorganismes et des algues. Une élévation de température de 8 °C sur un débit d'eau de 1 m³/h signifie une capacité d'absorption de 75 kW de chaleur. Si dans un système de cogénération on récupère, sous forme de

chaleur, environ 55 % de l'énergie primaire, et que la puissance électrique fournie représente 35 % de l'énergie primaire, on conclut que l'on peut associer une production électrique de l'ordre de 50 kW par m³/h.

L'énergie électrique produite pourrait permettre à la station de pompage de subvenir à ses besoins propres d'électricité. Les surplus produits sont injectés de manière très efficace sur le réseau électrique local, proche des sources de consommation, les usines de pompage étant proches des secteurs de concentration de population.

Le consommateur verrait son niveau de confort amélioré, l'eau froide étant déjà "dégourdie" au robinet. Il réaliserait des économies substantielles sur sa consommation d'eau chaude qui diminuerait de près de 10 % en hiver. Si l'on estime entre 2 500 et 3 000 kWh la consommation d'eau chaude de décembre à avril, cela signifie des économies d'environ 250 kWh par consommateur, ou 1.5 % de sa facture totale annuelle d'électricité, ou 14 \$/an. Rappelons qu'en plus des économies réalisées sur l'élévation de température nécessaire à la production d'eau chaude, s'ajoute une économie sur le volume d'eau chaude soutirée. Par exemple, pour fournir une même quantité d'eau pour une douche à 38 °C, on soutire moins d'eau chaude à 60 °C si l'eau froide est à 8 °C plutôt qu'à 2 °C. La mini-centrale ne fonctionnant pas du printemps à l'automne, le consommateur est alimenté en eau à sa température habituelle (10 °C env.) pendant la saison chaude.

Les municipalités y trouveraient aussi leur compte. Les risques de gel du réseau d'aqueduc seraient réduits, et des dépenses de réparation évitées. Le réseau d'eau serait maintenu à une température plus uniforme sur une année, réduisant les contraintes mécaniques et donc les risques de fuites.

Par ailleurs, il faut souligner que la mini-centrale électrique ne fonctionne pas du printemps à l'automne. Ainsi, la consommation des chauffe-eau demeure inchangée pendant cette période (maintien d'une consommation en période creuse).

La station de pompage demeure une charge électrique pendant la saison de faible consommation électrique, et devient producteur d'électricité pendant la saison hivernale, couvrant en 3 200 h la quasi totalité des 1 500 premières heures de pointe. Pour une puissance installée de 1 kW, la production d'électricité serait de 3 200 kWh (valeur marchande de 180 \$) dont 300 kWh pendant la fine pointe (coût marginal équivalent à 185 \$), 1 200 kWh pendant la période charge intermédiaire (coût marginal équivalent à 65 \$) et 1 800 kWh pendant la période de charge de base (coût marginal de 70 \$). Les coûts évités sont donc pour Hydro-Québec d'environ 320 \$/an par kW installé.

En plus, il faut considérer l'impact indirect sur la demande. Un chauffe-eau résidentiel a une puissance apparente sur le réseau coïncidente avec les périodes de pointe équivalente à 1.2 kW. Une diminution de l'élévation de température de 5 °C sur 55 °C (-9%) amènerait, elle aussi, une diminution de la

puissance appelée apparente d'environ 9 % soit 0.11 kW par chauffe-eau installé sur le réseau d'eau touché par la mesure proposée. Si l'on prend un réseau d'eau d'une capacité minimale de pompage de 100 m³/h alimentant une population de 15 000 habitants où se trouvent 5 000 chauffe-eau électriques, et que l'on branche sur ce réseau une mini-centrale de 5 MW, aux coûts évités annuels de 1 850 000 \$ viennent s'ajouter les gains nets indirects dus à l'impact de la demande des 5 000 chauffe-eau. Selon le calcul précédent, la puissance effacée en période de pointe de 550 kW, et la diminution de la consommation de 1 250 000 kWh peut être répartie en 230 000 kWh pendant la fine pointe (coûts évités de 142 000 \$), 490 000 kWh pendant la période de charge intermédiaire (coûts évités de 27 000 \$), et 525 000 kWh pendant la période de charge de base (coûts évités de 20 000 \$). Le total des coûts évités par Hydro-Québec est donc d'environ 190 000 \$. Le manque à gagner s'élevant à 70 000 \$, les gains nets indirects annuels s'élèvent à 120 000 \$/an.

Enfin, il faut mentionner les avantages stratégiques. Une telle stratégie de cogénération permet de répondre à la demande croissante d'électricité sans retarder dans le temps l'augmentation des infrastructures de production, transport et distribution. De plus, la production d'électricité d'origine thermique peut se réaliser à l'aide d'une solution de pollution minimale grâce au lavage des fumées qui peut inclure l'absorption d'une partie du gaz carbonique grâce à l'échangeur de chaleur à contact direct; de leur côté, les condensats peuvent être retraités sur le site même de la station de traitement des eaux où se trouve la centrale.

Enfin, il s'agit là d'une belle opportunité de développer un savoir-faire typiquement québécois. La solution proposée utilise des techniques québécoises qui ont déjà été éprouvées dans un autre contexte (ex. projet de cogénération de 500 kW de l'hôpital Saint-Joseph à Trois-Rivières). La solution proposée présente une certaine originalité due au contexte particulier de climat nordique du Québec. Le savoir-faire développé pourrait être exporté vers les autres pays faisant face à la même problématique (reste du Nord de l'Amérique du Nord, Scandinavie, Russie, et l'ensemble des régions alpines) et ainsi créer une activité économique et d'exportation.

La viabilité économique apparaît intéressante à ce stade de l'analyse. Le total des gains nets indirects annuels pour Hydro-Québec est d'environ 120 000 \$/an pour une minicentrale de 5 MW desservant un réseau de 5 000 foyers. L'injection de la production de cette minicentrale, environ 16 000 MWh/an, ayant une valeur marchande de 880 000 \$, amène des coûts évités de l'ordre de 1 600 000 \$. Hydro-Québec ne perdrait donc pas d'argent en achetant l'électricité produite à environ 0.10 \$/kWh. Si l'on enlève des frais de maintenance de l'ordre de 0.015 \$/kWh et des frais d'énergie primaire de 0.055 \$/kWh, le revenu net d'opération de la mini-centrale s'élèverait donc à 480 000 \$/an, de quoi amortir en 10 ans, avec un taux net d'actualisation de 4 %, un capital initial de 3 750 000 \$ ou 750 \$/kW installé.

3.3 Opportunités d'économies d'énergie pour les SADTEEI

Comme discuté précédemment, dans le secteur industriel, le **pompage** représente la principale source de consommation électrique des systèmes d'approvisionnement en eau et de traitement des effluents. Les opportunités d'économies d'énergie électrique à privilégier viseront donc à **améliorer l'efficacité des pompes** ou à **diminuer leur consommation**.

MEEE directes

La façon la mieux adaptée de réduire la consommation électrique des **systèmes de pompage** consiste en une analyse intégrée du mode de gestion de l'eau et de l'utilisation de l'eau dans le procédé industriel et en la formulation d'un programme de réduction des volumes d'eau et d'optimisation des filtres et des aérateurs dans les systèmes de traitement et d'épuration. Les importantes réductions de consommation qui peuvent être réalisées à l'intérieur des usines par la réutilisation ou la fermeture des circuits d'eau (particulièrement les circuits d'eau blanche) contribueront à diminuer la quantité d'eau consommée quotidiennement. À titre d'exemple, considérons une usine qui est passée d'une consommation de plus de 24 millions de gallons américains (91 000 m³) par jour à environ 12.5 millions (47 000 m³) en moins de deux ans. Cette importante diminution se traduit par une diminution de la moitié du débit à pomper. *Malheureusement, le surdimensionnement des systèmes de pompage, leur vétusté et le non-remplacement des pompes en fonction des nouveaux débits occasionnent une surconsommation électrique.*

La pression développée par les pompes est souvent supérieure aux besoins réels du procédé immédiat et peut entraîner des coûts supplémentaires importants reliés à une surconsommation. Ainsi, les grosses pompes surélévatrices (*booster pumps*) pourraient être remplacées par des pompes de capacité moindre, à condition d'installer des pompes d'appoint aux différents points critiques à l'intérieur de l'usine où une pression moyenne ou élevée est nécessaire.

En général, les pompes des systèmes d'approvisionnement et de traitement sont plutôt vétustes et leur efficacité relativement faible. Le changement de certaines pompes au profit de systèmes plus modernes permettrait d'obtenir une efficacité nettement supérieure (75 % vs 55 %) et d'être moins énergivore. À défaut de changer les équipements existants et déjà en place, et ainsi éviter des coûts de capitalisation parfois importants, certains auteurs suggèrent de réduire le diamètre de l'impulseur. Cette pratique vise à réduire du même coup le débit et la pression de la pompe et ce à un coût relativement faible. Les améliorations faites au système physique proprement dit (pompe) peuvent être altérées par une spécification inadéquate du moteur électrique. Le remplacement des moteurs de faible rendement par des moteurs haute efficacité renforcera les économies engendrées par des modifications au système de pompage et permettra ainsi des économies appréciables. De même, l'utilisation de moteurs à entraînement variable s'adaptant instantanément aux fluctuations devrait per-

mettre d'économiser des sommes considérables en fonction des demandes et de la consommation réelle de l'usine. Actuellement, le contrôle de débit est assuré par un système de vannes de contrôle. Une partie importante de l'énergie de pompage est ainsi dissipée pour combattre les restrictions imposées par ces systèmes de régulation.

Pour la ventilation, l'utilisation de ventilateurs à basses vitesses en remplacement des équipements à haute vitesse pourrait représenter un potentiel d'économie énergétique appréciable. En effet, plusieurs manufacturiers européens et des études américaines préconisent l'utilisation des ventilateurs à basse vitesse afin de minimiser la consommation énergétique tout en assurant une aération équivalente. Le pourcentage de diminution de la consommation électrique varie de 15 à 35 % selon la capacité des appareils et du taux d'aération désiré.

Au chapitre de l'étalement de la demande, il faut considérer, qu'en général, les industries ont des consommations relativement constantes d'eau, avec certaines pointes de consommation

MEEE indirectes

Parmi les mesures indirectes d'efficacité énergétique électrique, ce sont les mesures de conservation de l'eau qu'il faut privilégier. Ainsi, chaque secteur industriels se comportant de façon plus ou moins similaire en regard de la gestion de l'eau, l'approche globale traditionnelle ("Les 4 RV") visant la réduction, le recyclage, la récupération, la réutilisation et la valorisation de l'eau pourrait s'avérer d'intérêt pour Hydro-Québec, surtout dans un cadre conjoint impliquant plusieurs institutions comme le Ministère de l'Environnement, le Ministère de l'Industrie et du Commerce. Notons toutefois que l'effet de la rationalisation de la consommation de l'eau sur la consommation de l'énergie électrique demeure à évaluer. Le Tableau 18 résume les grandes lignes d'un tel programme.

L'eau contaminée pourrait, avant traitement ou après un traitement léger, être affectée à d'autres tâches telles que : a) le lavage, b) le préchauffage des eaux fraîches ou autres devant servir au procédé et c) la réutilisation éventuelle à l'intérieur ou à l'extérieur de l'usine pour les corvées de nettoyage. Cette ségrégation des eaux contaminées devrait permettre de diminuer la consommation d'eau fraîche.

De même, la réutilisation de l'eau clarifiée à l'intérieur du procédé devrait permettre de diminuer la quantité d'eau fraîche consommée par l'usine. Il faut cependant vérifier et la qualité de cette eau (degré de contamination résiduel vs besoins du procédé) et l'énergie nécessaire à pomper cette eau versus l'eau fraîche.

Le pompage pourrait également être effectué en fonction des différents cycles de consommation électrique globaux et locaux. Ainsi, plusieurs usines possèdent un réservoir surélevé dans lequel pourrait être emmagasinée une quantité appréciable d'eau durant la nuit ou les périodes de consommation creuses. L'eau ainsi emmagasinée servirait à combler les pointes de consommation instantanées et éviterait les pointes de consommation électrique qui pourraient être causées par une demande instantanée importante.

Tableau 18. Les mesures d'économie de l'eau

Action	Méthode	Moyen
Réduire	Élimination des pertes	Colmater les fuites et fermer les robinets
	Substitution technologique	Refroidisseur à l'air
	Optimisation des surfaces d'échange thermique	Nettoyage des échangeurs de chaleur
	Instrumentation	Contrôle de température
Recycler	Catégorisation et ségrégation des eaux	Construire des circuits séparés
	Fermeture des circuits	Réservoir tampon
Récupérer	Captation de l'eau de pluie	Drainage vers un puits de pompage
	Collecte des eaux de refroidissement	Circuit de récupération
Réutiliser	Système en cascade	Eau de refroidissement acheminée au laveur de gaz
	Double tâche	Refroidissement des cendres
Valoriser	Épuration	Filtre et osmose inverse

4. Les stratégies de recherche et développement en efficacité énergétique dans les industries de l'eau

La recherche et le développement, ainsi que la démonstration et la diffusion des MEEE directes ou indirectes, constituent une clé majeure de la réussite du programme d'efficacité énergétique envisagé par Hydro-Québec. En effet, bien que les domaines d'intervention soient relativement bien connus comme le montre l'analyse des MEEE réalisée au chapitre précédent, les modes d'interventions et la configuration optimale des MEEE ne sont pas nécessairement bien dominées, et nécessiteront des analyses poussées voire des recherches génériques et des projets de démonstration de la faisabilité industrielle et des programmes de promotion destinés à la diffusion des mesures d'efficacité. De plus, comme on l'a suggéré précédemment, les comportements de gestion des opérateurs des technologies dans les industries de l'eau ne sont pas nécessairement orientés vers la minimisation de la consommation d'énergie, mais plutôt vers l'optimisation de leur production. La mise en application de plusieurs mesures d'efficacité passent ainsi par des activités de RD&D, ces dernières conduisant à une meilleure intégration des besoins d'Hydro-Québec et de ses clientèles.

Ce chapitre fait un survol de la recherche et développement en cours actuellement en Amérique du Nord et en Europe, et suggère des pistes d'activité de RD&D pouvant être conduit sous l'égide d'Hydro-Québec.

4.1 Recherche et développement en cours dans le secteur de l'efficacité énergétique

4.1.1 États-Unis

L'EPRI joue un rôle de premier plan dans le développement de connaissances et de techniques orientées vers l'efficacité énergétique électrique dans le secteur des eaux municipales et industrielles. Au cours des dernières années, l'organisme a produit plusieurs rapports et commentaires techniques (EPRI, 1993) traitant spécifiquement de la gestion de la demande dans cet important secteur de consommation.

Les résultats des travaux de recherche portant sur l'utilisation efficace de l'électricité dans les usines de traitement des eaux usées montrent que les systèmes de pompage, d'aération et le traitement des boues constituent une portion considérable de la demande électrique globale (Andersson, 1980; Burton Environmental Engineering *et al.*, 1993; Ontario-Hydro, 1993b; Metcalf & Eddy Inc., 1992a, b; Middlebrooks *et al.*, 1981; Owen, 1982; WPCF et ASCE, 1988; Young et Koopman, 1991). Les Tableaux 19 à 21 constituent une synthèse des activités des résultats de recherche et développement extraite de Burton Environmental Engineering *et al.* (1993). On y retrouve des mesures

spécifiques d'efficacité énergétique pour le traitement et l'épuration des eaux municipales.

Tableau 19. Évaluation des mesures d'efficacité énergétique (pour les projets complétés et pour les projets proposés) dans les usines de traitement d'eau potable par le New Jersey American Water Company water Systems

Type de facilité	Type de mesures	Résultats
Pompe aspirante pour réservoir	Installation d'un moteur à fréquence variable (VFD) pour contrôler une des quatre pompes de 150 HP.	Augmentation d'opération de pompes sur le générateur par l'augmentation du service de cartilage (CURX) par 112 Kw. Une économie monétaire de \$51,000.
Station de pompage à relais	Installation d'un VFD sur une des pompes de 100 HP.	Contrôle accru des pressions et des débits. Augmentation du temps de séjour dans les réservoirs de 4 à 12 heures. Une économie annuelle de \$13,000.
Pompes à haute efficacité	Installation d'un VFD sur la pompe à turbine verticale de 250 HP.	Harmonisation de la pression entre l'entrée et la sortie de la pompe pour éliminer les accélérations et décélérations soudaines du moteur ou pour minimiser les arrêts/départs. Économie annuelle de \$85,600.
Station de pompage de relais	Installation d'un VFD sur une des pompes de 150 HP.	Le système remplace la soupape de réglage.
Contrôle du bâtiment	Remplacer le système de refroidissement à air avec une pompe à chaleur dans la source d'eau.	Étude de faisabilité autorisée.
Station de pompage de relais	Installation d'un VFD sur la pompe de 100 HP; installer un VFD et une puissance de base de 50 HP sur la pompe de charge.	Système en évaluation
Nouvelle station de pompage de relais	Installation des deux pompes de 150 HP avec les VFD à la place des quatre pompes de différentes dimensions avec un voltage de départ réduit.	Le système fournit un meilleur contrôle de pression et réduit le capital à investir. Une économie de \$14,000 sur le coût annuel estimé.
Récupération d'énergie	Remplacement de la soupape de contrôle de pression.	Étude de faisabilité autorisée.
Applications des VFD	Évaluer le potentiel d'application des VFD sur 18 systèmes de pompage	Étude de faisabilité à réaliser dans le futur.

Tableau 20. Résumé des mesures d'efficacité énergétique appliquées dans les ouvrages d'assainissement des eaux usées

Station et localisation	Capacité (mgd)	Type de mesures	Résultats
Station de traitement des eaux usées de Columbia, TN	7	Installation des moniteurs pour le contrôle de l'O.D. et des moteurs à vitesse ajustable (ASD) sur les soufflantes d'air	24 % d'économie d'énergie dans les souffleurs d'air
Station de traitement des eaux usées de Willits, CA.	0.7	Installation des moteurs à vitesse variable sur les systèmes de pompage des eaux usées	39 % de réduction dans la consommation d'électricité
Station de traitement avancées des eaux usées de la comm. sanitaire de Washington, Piscataway, MD.	30	Installation d'un système de contrôle de la nitrification par ordinateur, dans les soufflantes. L'instrumentation inclut le contrôle des soupapes et de l'O.D.	34 % de réduction dans la consommation d'électricité, comparativement à un contrôle manuel.
Station de traitement des eaux usées de Pacifica, CA.	non rapportée	Installation des moteurs à fréquence ajustable sur les soufflantes et sur les pompes. L'instrumentation inclut les moniteurs pour le contrôle de l'O.D. et des contrôleurs programmables.	Plus de 20 000 \$ d'économie sur la puissance. Le facteur de puissance est passé de 65-70 % à 95 %.
Station de traitement des eaux usées de Durham, OR.	20	Remplacement des aérateurs mécaniques par des aérateurs avec diffuseurs à bulles fines et d'un système de contrôle de l'O.D.	21 % de réduction dans la consommation d'électricité (environ 12 000 Kwh /jour).
Système de traitement des eaux usées régional central de Dallas, TX.	90	Remplacement des diffuseurs à bulles grossières par des diffuseurs à bulles fines.	25 % de HP de moins requis. Progrès dans la qualité de l'effluent.
Station de traitement des eaux usées de Flint, MI	50	Installation de diffuseurs à bulles fines.	Économie de coûts d'énergie estimée entre 450 000 et 575 000 \$ par année.
Station de traitement des eaux usées du district sanitaire de Greater Lawrence, N. Andover, MA.	Non rapportée	Installation des moteurs à vitesse variable sur les aérateurs mécaniques et installation d'un système de contrôle de l'O.D.	25 % de réduction dans la consommation d'énergie. La période de retour est de 3.3 années. Diminution de la puissance fournie à la compagnie.
Station de traitement des eaux usées du district sanitaire île de Taylorville	3	Diminution de l'usage de lagunes tertiaires, augmentation de fréquences de soufflage dans le filtre de nettoyage.	13 % de réduction dans la puissance électrique utilisée (mesurée en Kwh/mg).
		Installation de diffuseurs à bulles fines.	39 % de réduction dans la puissance électrique en Kwh/mg (pour six mois d'opération).

Tableau 21. Synthèse des recommandations proposées pour la gestion de l'eau à partir des audits d'énergie

Facilité	Unité opératoire	Mesures recommandées
Usine de traitement des eaux usées de Central Creek, Cincinnati, OH. Débit: (130 mgd).	Pompage de l'affluent.	Installation des moteurs à fréquence variable. Informatisation de la séquence de pompage. Test périodique de la performance de la charge totale.
	Clarificateurs primaires.	Céduler le nombre de clarificateurs basés sur la charge et le débit. Installer des chronomètres sur le pompage des boues primaires.
	Bassins d'aération.	Équilibrer la distribution d'air au niveau des bassins. Remplacer systématiquement les diffuseurs d'air. Installer un équipement de monitoring pour l'O.D. Utiliser des aérateurs à débit contrôlable.
	Pompage de retour des boues.	Installer des moteurs à fréquence ajustable. Tester périodiquement la performance de la charge totale de pompes et de moteurs.
	Système électrique de la station.	Installer un moniteur de puissance sur le système de distribution pour réduire la demande de charges représentant 40 % du coût d'électricité. Faire fonctionner deux générateurs de sortie pour couper la demande et ainsi économiser sur le coût d'énergie. Économie possible de 20 % sur la demande et le coût d'énergie. Investiguer la mise en place des systèmes de cogénération. Installer des moteurs très efficaces de dimensions entre 7.5 et 200 HP. La période de retour est de moins d'un an.
Usine de traitement des eaux usées de Fitchburg, Fitchburg, MA. (10 mgd).	Système électrique de l'usine.	Installer les contrôleurs pour corriger le facteur de puissance. Analyser l'opération de sortie des générateurs pour les charges de pointe. La période de retour est d'environ un an.
	Aérateurs.	Installer les moteurs à fréquence variable sur une des surfaces d'aérateur dans chaque bassin d'aération de deuxième stage. La période de retour est de 2 ans.
	Retour de boues.	Installer les moteurs à fréquence variable sur les pompes. La période de retour est de 2 ans.
Usine de traitement des eaux usées de Kokomo, Kokomo, IN. (20 mgd).	Gestion des boues.	Continuer l'étude pour changer le système d'oxydation à air humide et de filtration à vide par un presseur à bande.
	Gestion de la charge et du débit.	Évaluer l'installation d'un réservoir d'égalisation entre les flux de charges provenant du conduit principal et ceux des conduites secondaires de façon à réduire les augmentations soudaines de pression et de charges.

Rock River Water Reclamation Plant Rockford, IL. (26 mgd).	Système d'aération.	Évaluer l'installation d'un système pour un monitoring continu de O.D. et un ajustement automatique du débit d'air. Maintenir l'O.D. entre 1 et 4 mg/L dans les bassins d'aération. Considérer les méthodes alternatives de nitrification/dénitrification.
	Pompes.	Test de charge maximale dans toutes les pompes centrifuges.
	Système électrique de l'usine.	Installer les contrôleurs pour corriger le facteur de puissance à 0.95. Installer un dispositif de monitoring pour la charge électrique. Remplacer les moteurs standard de 5 à 100 HP par des moteurs très efficaces.
	Pompage.	Augmenter le pompage de l'eau brute de la station à un bon niveau pour réduire la tête de pompe.
	Système des boues activées.	Éliminer un bassin d'aération à partir de l'opération. Réduire le taux de pompage des boues de retour.
	Gestion des boues.	Maximiser l'opération dans les filtres à vide durant les heures de pointe.
Ventura Water Renovation Facility San Buenaventura, CA.	Système électrique de la station.	Installer un dispositif de monitoring pour la charge électrique. Remplacer les moteurs standard de 7.5 à 200 HP par les moteurs très efficaces.
	Soufflantes.	Installer des systèmes de contrôle de l'O.D. pour réduire l'opération de soufflage.
	Pompage des boues de retour.	Réduire le débit des boues de retour et installer un moteur à fréquence variable sur la pompe. La période de retour est de 1.7 an.
	Pompage de l'effluent primaire.	Changer une pompe par une pompe à fréquence variable. La période de retour est de 1.7 an.
	Pompage de l'eau chaude du digesteur.	Opérer les pompes de recirculation de l'eau chaude sur chronomètres pour réduire le temps d'opération.
	Bassins de mélange.	Remplacer les moteurs des mélangeurs. La période de retour est de 0.6 an.

Il ressort de ces tableaux que les différentes mesures d'efficacité énergétique électrique proposées contribuent effectivement à une meilleure utilisation de l'électricité dans les différentes opérations de la chaîne de traitement des eaux usées ou de l'eau potable. On note généralement une baisse dans la consommation de l'électricité, soit au niveau de l'énergie électrique effective ou encore au niveau de la puissance installée. Cette baisse peut aller jusqu'à 34 % dans les mesures touchant le système d'aération et jusqu'à 39 % dans celles touchant le système de pompage.

En termes monétaires, par exemple, on note des économies d'énergie pouvant se chiffrer à 575 000 \$ par année pour le remplacement de diffuseurs à bulles fines dans le système d'aération. Les périodes de retour sur l'investissement peuvent être aussi courtes que six mois, dans les cas de remplacement de moteurs.

4.1.2 Europe

Les programmes de recherche de la Commission des Communautés Européennes relèvent de la DG XII (Science, Recherche et Développement). Une étude a permis la publication d'un manuel intitulé "Advanced Design and Operation of Municipal Waste Water Treatment Plants". La consommation énergétique est plusieurs fois mentionnée, sans toutefois être une préoccupation importante. La gestion de la station d'épuration est basée sur la technologie du contrôle de la masse de matières organiques (FMCT : food mass technology control). Les résultats de consommation énergétique mesurés sur un projet-pilote en Espagne sont décrits au Tableau 22.

Tableau 22. Exemple des meilleurs résultats obtenus avec FMCT

Pour la meilleure configuration en hiver	Conv.*	FMCT	Red.(%)
Consommation totale (kWh/m ³)	0.45	0.27	- 40
Consommation du procédé d'aération (kWh/m ³)	0.37	0.22	- 40
Consommation totale (kWh/kg DBO ₅)	3.13	1.66	- 47
Consommation du procédé d'aération (kWh/kg DBO ₅)	2.55	1.37	- 46
Consommation d'air (m ³ d'air / kg DBO ₅ enlevé)	116	59.6	- 48

* Station d'épuration opérée en mode conventionnel

L'analyse du programme 1981-85 et 1987-91 de Recherche et Développement en Environnement de la DG XII, ainsi que le programme (1987-91) STEP REWARD (Science and Technology for Environmental Protection, REcycling WAsTe R & D), a permis de mettre en évidence certains projets proches du domaine d'intérêt de cette étude en ce qui a trait aux eaux industrielles :

- Projet no. ENV-629-D "Analysis and cleaning of vapour condensates from drying paper and board" dont l'objectif est le développement de technologies propres pour réduire la pollution de l'air et de l'eau (élimination de substances organiques dissoutes, d'acide acétique et de dextrines) et réduire la consommation d'énergie dans le secteur des pâtes et papiers, en condensant les vapeurs

de séchage avec récupération de chaleur et traitement des condensats. Le projet a toutefois montré un impact minime.

- Projet no. ENV-520-F "Depollution of effluents from pulping industries" dont l'objectif est de développer une méthode économique pour réduire les effluents (boues, DBO, DCO) de la production de pâte blanche par procédé mécanique-chimique-thermique, avec récupération sélective de fibres. Un procédé démontré fiable montre une consommation énergétique de l'ordre de 0.01 kWh/m³.
- Les projets de lagunage (e.g. projets no. ENV-631-F, ENV-634-B) montrent des performances moindres durant les saisons froides, ils sont donc difficilement recommandables pour le Québec.
- Plusieurs projets de compostage ont été menés (e.g. projet no. ENV-810-1) mais la technologie n'est toujours pas adoptée et ne semble pas encore mature.
- Plusieurs projets utilisant des électrotechnologies comme l'ultrafiltration visent la récupération de contaminants de haute valeur comme l'indigo dans l'industrie textile (projet no. ENV-685-NL) ou la réduction des boues organiques dans la laine (projet no. ENV-668-UK) qui permet en plus la récupération de chaleur. Le secteur des tanneries est également étudié (projet no. ENV-645-IRL).
- Un projet sur le contrôle de l'accumulation de dépôts microbiologiques dans les circuits fermés (projet no. ENV-736-F). Ce projet peut avoir un impact intéressant sur l'efficacité des systèmes de pompe dans l'industrie.
- La production d'ozone par générateur 400 Hz dans le mélange gazeux (O₂ à 80%, N à 5%, CO₂ à 15%) est une méthode efficace de blanchiment des pâtes qui permet la réduction de polluants tels que les organochlorés, la DCO et les rejets d'ozone (projet no. ENV-801-F).
- Des techniques d'imprégnation des textiles par mousse ou pulvérisation électrostatique permettent des économies de consommation d'eau et d'énergie (projet no. ENV-671-F).
- Un projet fait le recensement statistique des méthodes de traitement et d'élimination des boues. (projet no. ENV-001-UK). 37% des boues sont recyclées dans l'agriculture, les remblais, le paysagement, 44% sont jetées dans des décharges, 9% sont incinérées, 7% sont rejetées dans la mer, et 3% sont rejetées hors-contrôle direct. Environ 79 % des boues sont traitées avant rejet, principalement par digestion anaérobie mésophile et digestion aérobie

à température ambiante. Un total de 71 % des boues sont déshydratées par filtration, centrifugation ou séchage à l'air.

- **Projet STEP-CT910123, Sujet 8.2 :** "Feasibility of using artificially immobilized nitrifying bacteria for waste water treatment at low temperatures". Ce projet dirigé par l'institut norvégien de recherche dans les sciences de l'eau, permet la nitrification à basse température. Des retombées pour le climat du Québec pourraient être intéressantes.

La compagnie DORNIER-System GmbH (Allemagne) est active dans le développement de technologies "plus propres" pour la protection et la réhabilitation de l'environnement, notamment pour la mise en oeuvre de nouveaux procédés de traitement des eaux usées permettant la réutilisation de l'eau dans les procédés industriels. Ainsi, par exemple, ils ont développé un système pour lave-auto, avec recyclage d'eau et contrôle de la salinité. Ce système consomme aussi peu que 10 kWh/jour. Dans le climat du Québec, ce système peut être d'autant plus intéressant qu'il permet de réduire la charge thermique de réchauffage de l'eau de lavage en hiver.

L'intérêt de R&D porte aussi sur l'optimisation des profils d'écoulement pour l'élimination simultanée des composés d'azote, de phosphore et de la charge organique (DBO), ainsi que sur le développement de senseurs et de techniques de contrôle et de monitoring des procédés. On vise de plus la recherche de solutions pour remplacer la chloration pour la désinfection et le stockage des eaux résiduaires, avec amélioration des problèmes d'odeurs, ainsi que des traitements minimisant les risques biologiques afin de permettre la réutilisation de l'eau pour d'autres usages comme l'irrigation.

Du côté du développement et de la diffusion d'électrotechnologies, EDF possède un service "Applications de l'Électricité et Environnement" qui développe des électrotechnologies basées sur les membranes : microfiltration tangentielle (MFT), ultrafiltration (UF), osmose inverse (OI), électrodialyse (ED), pervaporation (PV). Ces technologies visent surtout la récupération ou la revalorisation d'effluents polluants ayant une valeur intrinsèque (e.g. indigo) et l'élimination de déchets toxiques.

4.1.3 Recherche à l'internationale

La banque de données de CADDET de l'Agence Internationale de l'Énergie a permis de mettre en évidence 24 projets : sept fiches de projet THERMIE de la DG XVII, 14 projets de la DG XII, programme STEP REWARD, deux projets de la ville de Zürich, quatre fiches de projet du programme "Best Practice" du Royaume-Uni, deux articles de la revue "IEA Heat Pump Newsletter" et un de la revue de CADDET. Ces fiches de projet sont présentées en Appendice du Volume 1 de la présente série de rapports de

recherche. Les 54 projets inventoriés ont été classifiés par types de mesure d'efficacité (voir Tableau 23).

Tableau 23. Mesures touchées par 54 projets internationaux

Type de mesure	Nombre	%
1. Intégration dans un procédé industriel (recyclage d'eau inclus)	8	15
2. Récupération de chaleur	22	41
3. Méthanisation des boues	15	28
4. Cogénération (chaleur/force motrice ou électricité)	5	9
5. Aération performante	9	17
6. Pompage performant	5	9
7. Système de contrôle	6	11
8. Incinération	1	2
9. Plantes hydroponiques	2	4
10. Valorisation ou récupération des effluents	7	13
11. Autres (nitrification performante, etc.)	1	2

Les projets qui retiennent le plus d'attention dans l'échantillonnage de projets étudiés sont donc les suivants : La récupération de chaleur, la méthanisation des boues, les techniques performantes d'aération, l'intégration dans les procédés industriels, contrôle et gestion optimisée, cogénération chaleur + force motrice ou électricité, pompage performant.

4.1.4 Québec

Le bureau d'efficacité énergétique du Ministère de l'Énergie et des ressources du Québec offre un programme d'aide au développement des technologies de l'énergie. Ce programme a pour objet de favoriser la mise au point et la diffusion de nouvelles technologies de production et d'utilisation de l'énergie. L'organisme offre une aide financière à des projets de RD&D dans les secteurs de l'utilisation des ressources québécoises à des fins énergétiques, la diversification énergétiques, l'autonomie énergétique, les technologies exportables, l'amélioration de l'efficacité énergétique, le contrôle de la pollution liée à l'utilisation de l'énergie.

Plusieurs sociétés ou groupes de recherche sont actifs directement ou indirectement en efficacité énergétique. Mentionnons :

- Gendron Lefebvre Inc., filtration biologique mono- et multi-couche
- Lac Mégantic, "Calo-Duc", protection des écumes des décanteurs contre le gel
- Degremont, filtration biologique BIOFOR
- SNC, thermovalorisation des boues (OFS)
- St-Hyacinthe, Urgel Delisle, valorisation agricole des boues
- Cascades, Pâtes et Papiers, unités flottantes pour air dissous pour boues activée et étangs
- Zénon, BPR, utilisation des membranes pour l'eau potable
- Envirotem Inc., secteur des pâtes et papiers

4.2 Pistes de RD&D dans le secteur des eaux municipales (SATDEEM)

4.2.1 Situation énergétique de référence

Il s'agit d'établir de manière détaillée la situation énergétique de référence dans les secteurs où des interventions prometteuses sont envisagées à court, comme à plus long terme. Nous avons montré au chapitre 3 qu'il s'agissait d'une étape indispensable dans le processus de mise sur pied d'un programme en efficacité énergétique. La recherche de données de consommation effectuées par l'INRS-Eau au cours de cette étude ont confirmé qu'il restait beaucoup à faire de ce côté.

La banque de données que l'INRS-Eau a commencé à bâtir reste donc à détailler. Dans certains secteurs, cela conduit à mener des audits plus poussés, à entreprendre du monitoring.

4.2.2 Système informatique de gestion en efficacité énergétique électrique dans le secteur des eaux municipales

Il s'agit de développer un système d'aide à la décision visant à *maximiser l'efficacité épuratoire* (du traitement et de l'assainissement) et à *minimiser les coûts* (par optimisation des facteurs et conservation de l'eau).

En première étape, ce projet de R&D vise à mettre en forme une base de connaissances orientée objets comportant quatre grands domaines d'information :

- *Les connaissances factuelles* par station de traitement et d'épuration, c'est-à-dire les caractéristiques civiques, les procédés, les équipements (incluant les caractéristiques liées à l'efficacité et aux coûts d'opération dont le coût de l'électricité, d'entretien et de remplacement), les clientèles desservies, volume et type d'eau traitée, facteurs de production comme les produits chimiques, l'électricité, la main d'oeuvre, enfin toutes les informations requises pour établir pour chaque unité de traitement ou d'assainissement les fonctions de production (eau traitée, boues). Un tel système, destiné à l'efficacité énergétique électrique, est à l'état de gestation chez Hydro-Québec.
- *Les connaissances génériques* (équations, constante de conversion, etc.) permettant, sur la base des fonctions de production d'établir les relations "coûts - consommation d'énergie - facteurs de production - efficacité épuratoire".
- *Les connaissances sur le suivi des interventions* (reconfiguration, entretien, substitution, cédule opératoire) sur les systèmes de traitement, de distribution et d'assainissement.
- *Les ensembles de requêtes et systèmes de raisonnement* permettant le suivi, le diagnostic, le choix des modes d'intervention, ainsi qu'un système d'exploitation permettant de simuler plusieurs problèmes de décision tant au niveau des coûts que de l'efficacité.

En deuxième étape, il s'agira de constituer un service de soutien à l'efficacité technologique (coûts et efficacité épuratoire) pouvant se rentabiliser sur une base de location annuelle ou de vente ponctuelle auprès des clientèles dont particulièrement les municipalités ou les fournisseurs de services.

Évidemment, il s'agit d'un projet de grande envergure faisant intervenir de multiples intervenants et devant se réaliser sur plusieurs années. Certaines données essentielles sont déjà sous forme de base de données. D'autres sont à identifier, à acquérir et à intégrer dans le cadre de l'expansion de la puissance et des fonctionnalités de la base de connaissance.

Hydro-Québec procède actuellement à l'acquisition de l'information et à la mise en forme d'un système d'information destiné à améliorer l'efficacité énergétique électrique. Il serait cependant bien avisé d'examiner d'autres initiatives qui pourraient aboutir à l'efficacité technologique dans l'industrie de l'eau municipale. Pour ce faire, il serait important de procéder à une analyse de faisabilité d'un tel système d'information et de gestion, ceci permettant de mettre en forme les structures de la base de données et du système d'information qui serait compatible avec un système plus vaste de gestion de l'efficacité technologique dans l'industrie de l'eau. Ceci est d'autant plus intéressant pour Hydro-Québec, que l'industrie de l'eau est une filière importante pour le développement, la démonstration et la diffusion des électrotechnologies, ces dernières jouant un rôle important dans l'efficacité technologique.

Au nombre des retombées d'un tel programme de R&D, mentionnons :

- Un système d'aide à la décision pour juger de l'impact financier et technologique de mesures d'efficacité sur l'ensemble du parc, et réciproquement, pour juger de l'effet de l'implantation de certaines mesures sur l'efficacité épuratoire.
- Un système de suivi permettant de détecter et de corriger des déficiences dans les systèmes de traitement et d'épuration.

4.2.3 Récupération de chaleur.

Nous venons de voir que la récupération de chaleur des eaux usées est adoptée dans de nombreux projets. Dans le climat froid du Québec, on dispose des niveaux de température d'eau froide qui peuvent rendre cette récupération plus aisée. De plus, les besoins de chauffage d'eau et de bâtiments sont plus grands et la justification économique devrait être au moins équivalente à celle des pays européens, même si nos coûts d'énergie sont plus faibles.

On distingue essentiellement trois niveaux de récupération :

- 1) *Directement à la source de rejet* : Le consommateur récupère la chaleur des eaux usées qu'il produit avant de les rejeter à l'égout. Le potentiel de récupération maximale dépasse la consommation d'énergie pour la production d'eau chaude. En effet, à l'aide d'une pompe à chaleur, on peut théoriquement rejeter les eaux d'égoûts à une température plus basse que la température d'alimentation en eau froide. De plus, on peut récupérer la chaleur extraite à la maison par les toilettes où l'eau froide de la chasse se réchauffe au contact de l'air de la salle de bain. Les difficultés de mise en

oeuvre touchent la simultanéité des rejets avec les besoins de chaleur, la mise en oeuvre sans problèmes d'encrassement et d'odeur, les modifications au réseau de collecte des eaux usées dans l'édifice.

- 2) *Dans le réseau dégoûts avant traitement* : Une invention que nous ne pouvons divulguer dans ce rapport concerne des sections d'égoûts-échangeurs de chaleur (voir page suivante).
- 3) *Dans les eaux usées après traitement, avant leur rejet* : Cette solution présente l'avantage de mettre en oeuvre facilement le stockage de ces eaux sans danger de créer la fermentation anaérobie, génératrice de mauvaises odeurs. En revanche, elle ne peut se faire que sur le site des usines de traitement, donc loin des utilisateurs de chaleur, et nécessite des réseaux de chauffage urbain.

Voyons ici quelques projets pouvant être envisagés à court terme au Québec.

Analyse des technologies domestiques de l'eau

CANMET (Ressources Naturelles, Canada) a adopté différents systèmes de gestion de l'eau dans le programme canadien de Développement-Démonstration des "Maisons Performantes". En particulier, la Maison Performante de l'APCHQ intègre deux systèmes : 1) récupération et stockage estival des eaux de pluie avec alimentation des robinets extérieurs et du système d'arrosage; 2) collecte des eaux grises dans un réseau distinct de tuyaux collecteurs, permettant leur passage par un réservoir échangeur de chaleur, où la chaleur est récupérée par la boucle centralisée d'eau froide qui collecte tous les rejets ou surplus énergétique de la maison pendant la saison de chauffage. Ces systèmes sont installés et opérationnels depuis un an. Leur monitoring, financé par RNCAN, est en cours et se poursuivra jusqu'en 1995, alors que la maison sera occupée par les nouveaux propriétaires. Le budget du projet se limite à la collecte des données. Avec une contribution financière d'Hydro-Québec, une analyse plus détaillée des données opérationnelles de ces systèmes, avec leur analyse technico-économique pourrait être entreprise. On pourrait également envisager de prolonger la période de monitoring pour connaître la fiabilité de ces équipements à plus long terme.

Système de récupération de la chaleur des eaux usées

La difficulté dans la récupération de chaleur des eaux usées est la non-simultanéité fréquente de ces rejets avec les besoins. La solution à ce problème est le stockage, solution compromise à cause de la fermentation. Il y a une exception cependant : l'eau chaude sanitaire. En général, il y a consommation d'eau chaude si il y a rejet d'eaux usées. Plusieurs thèmes peuvent être étudiés.

- Optimisation du réseau de collecte des eaux usées d'une résidence ou d'un ensemble résidentiel (prise de l'évier ou non, de la laveuse ou non, etc.);
- Développement du réservoir tampon - échangeur de chaleur;
- Faisabilité technique et légale d'un échangeur eaux usées / eau potable;
- Développement d'une stratégie utilisant un groupe frigorifique branché sur un réservoir de préchauffage de l'eau. Cette technologie existe déjà avec un échangeur à air (climatiseur placé sur chauffe-eau, vendu dans le sud des États-Unis), et entre dans la catégorie des pompes à chaleur conventionnelles eau-eau pour les immeubles multi-logements.

Analyse d'égoûts échangeurs de chaleur.

De l'information protégée est disponible.¹⁹

Utilisation avant rejet des eaux usées traitées.

Durant la période d'hiver, les eaux usées et les boues d'épuration sont à une température plus élevée que les eaux réceptrices ou les eaux d'alimentation. Dans le climat du Québec, plusieurs utilisations peuvent être envisagées, par exemple :

- Le chauffage des usines de traitement par pompe à chaleur.
- L'entraînement vers des stations de traitement primaire, de la neige fondue dans des fosses à neige, dans les localités où l'accumulation de neige pose problème.

4.2.4 Mesures visant à réduire la consommation d'eau et indirectement d'électricité.

L'impact énergétique indirect de la surconsommation d'eau par fuites du réseau ou chez les utilisateurs, ou encore par l'utilisation d'appareils inefficaces peut être considérable. À la consommation énergétique s'ajoutent des dépenses en infrastructure souvent surdimensionnées. Nous donnons ici quelques exemples de projets de recherche et développement pouvant être réalisés dans ce secteur.

¹⁹ Contacter TN Conseils.

Réduction de la consommation d'eau

Chasses d'eau performantes. L'exemple des chasses d'eau n'a pas seulement un impact sur la consommation d'eau et la consommation directe d'électricité qui y est rattachée, mais également sur la consommation d'électricité pour le chauffage des résidences. Une étude de l'INRS montre que cette consommation n'est pas négligeable. Elle provient de l'eau froide qui draine la chaleur de la salle de bain en se réchauffant dans les toilettes. Malheureusement, au Québec les chasses d'eau performantes demeurent fort peu attrayantes du point de vue économique.

Recyclage maximal d'eau dans les procédés. Ces technologies sont surtout envisagées pour économiser la ressource naturelle qu'est l'eau. Au Québec c'est moins le cas, mais il y a des économies additionnelles dues au fait que dans beaucoup de procédés (e.g. eaux de lavage), il y a nécessité de préchauffer l'eau froide en hiver (exemple des lave-auto).

Analyse d'appareils aqua-électroménagers énergivores

Analyse de solutions de remplacement aux broyeurs à déchets. On pourrait, à la fois du côté technico-économique et du côté satisfaction et accueil du consommateur, proposer des solutions alternatives, comme les compacteurs à déchets. En cas de résultat positif, une réglementation pourrait interdire la vente ou l'installation de ces appareils.

Analyse de valeur des laveuses à tambour horizontal. Quiconque a voyagé et séjourné en Europe, connaît les performances de lavage supérieures (propreté et usure du linge) de ces machines à laver qui occupent près de 100 % du marché. À ces performances, s'ajoutent des économies importantes d'eau et d'électricité. En effet, au lieu d'agiter le linge dans une grande quantité d'eau qu'il faut ensuite pomper, le tambour horizontal reproduit le principe de la planche à laver : le linge est délicatement battu dans quelques centimètres d'eau dans le fond du tambour. Étant donnée la faible quantité d'eau utilisée, on peut s'offrir à moindre frais le lavage à l'eau chaude indispensable pour le linge très souillé ou à désinfecter. Ces machines sont actuellement étudiées en Californie. Nous pensons qu'avec l'existence de manufacturiers importants au Québec, tels CAMCO, et les relations privilégiées que le Québec entretient avec l'Europe, la possibilité d'un transfert technologique vers le Québec mériterait d'être étudiée de manière attentive. Ce serait une opportunité pour le Québec de devenir une plate-forme de production de ces machines pour le reste du continent.

4.2.5 Chauffage et alimentation des usines de traitement

Durant la saison froide, les déperditions en chaleur dues à l'isolation des bâtiments et à l'opération du procédé doivent être compensées. Or, cela se situe pendant la période de plus forte demande pour Hydro-Québec. Il serait donc probablement de l'intérêt des parties, d'envisager l'utilisation d'un système

de cogénération pendant les mois de plus forte demande. La cogénération consisterait à produire l'électricité à l'aide d'une génératrice Diesel ou au gaz naturel, et à récupérer la chaleur dégagée par le moteur pour les besoins de chauffage du bâtiment ou du procédé.

Dans le cas du gaz naturel, TN conseil a déjà contribué à l'évaluation et au monitoring de plusieurs projets, comme celui de l'hôpital St-Joseph à Trois-Rivières, ou dans le cadre du programme PAIRE. L'optimisation d'un tel projet prend en compte : 1) le nombre d'heures de fonctionnement, 2) l'utilisation de la chaleur générée, et 3) l'utilisation de l'électricité produite.

En général, on dimensionnera le système pour éviter de générer des surplus de chaleur que l'on ne pourrait utiliser intelligemment. L'électricité produite est alors comparée aux besoins de l'usine. Si il y a excès, on doit négocier avec Hydro-Québec l'achat de kWh.

4.2.6 Interconnexion réseau d'aqueduc - minicentrale thermique

Comme on l'a vu, l'interconnexion "réseau d'aqueduc - minicentrale thermique" peut s'avérer une opportunité de premier ordre pour améliorer l'efficacité énergétique. Validation des ordres de grandeurs techniques et économiques citées dans cette présentation. Les projets de R&D pouvant être entrepris porteraient, dans un premier temps, sur l'évaluation précise des échanges de chaleur d'un réseau d'aqueduc avec le sol environnant, en tenant compte des réservoirs éventuels. Ceci pourrait être suivi d'un projet pilote.

4.2.7 Le développement de technologies plus performantes

Le chapitre précédent relevait un ensemble de mesures opérationnelles et technologiques permettant soit de réduire la consommation d'électricité ou la demande de pointe de puissance dans les stations d'épuration municipales. En tenant compte des programmes en efficacité énergétique électrique existant au Québec et à l'étranger et après analyse de la situation particulière québécoise, il ressort que des efforts de R&D seraient souhaitables afin d'améliorer l'efficacité énergétique des stations d'épuration québécoises. Les lignes suivantes présentent donc un aperçu des travaux de R&D prioritaires à réaliser dans le secteur de l'épuration des eaux usées municipales.

Optimisation du contrôle de l'aération des systèmes d'étangs aérés et des digesteurs aérobies des boues

Selon les études effectuées, des travaux devraient porter sur l'optimisation du contrôle de l'aération dans les étangs aérés. En effet, le lagunage aéré est de loin la technologie de traitement des eaux usées la plus employée au Québec. Or, la plupart des recherches qui ont été réalisées sur l'évaluation des systèmes de boucles de contrôle de l'aération par un suivi de l'oxygène dissous, ont porté sur les systèmes de boues activées. Il en est de même, avec la substitution des aérateurs à grosses bulles par des aérateurs à

fines bulles ou à membranes. Si l'on considère que la presque totalité de l'énergie électrique requise pour l'opération des stations d'étangs aérés est dédiée à l'aération des bassins, il est aisé de constater l'impact potentiel que pourrait avoir des mesures visant une réduction de l'aération dans ces systèmes. Des études pilotes devraient être réalisées dans quelques stations d'étangs aérés afin de comparer la performance énergétique et épuratoire combinée des boucles de contrôle de l'aération par un suivi de l'oxygène dissous et du taux de consommation d'oxygène et des diffuseurs à fines bulles ou à membranes. Des recherches similaires devraient également porter sur le contrôle de l'aération dans les systèmes de stabilisation/digestion aérobie des boues d'épuration.

Évaluation du procédé de digestion aérobie-anoxie des boues

Le remplacement du procédé conventionnel de digestion aérobie des boues d'épuration, largement employé au Québec, par d'autres variantes technologiques pourrait également concourir à réduire la consommation électrique. La digestion aérobie-anoxie, développée durant les dernières années, permet de diminuer de presque 50 % les coûts associés à l'aération des boues, sans pour autant affecter significativement la qualité du traitement. Ce procédé se caractérise par l'emploi successif de deux phases; une première étape dans laquelle les boues sont aérées normalement, suivie d'une autre étape dans laquelle l'aération des boues est arrêtée. Lors de cette phase anoxie, les ions nitrates produits lors de la phase aérobie servent d'accepteur d'électrons pour l'oxydation des matières organiques. Par la suite, une autre étape aérobie prend place permettant de continuer la digestion des boues et également la nitrification de l'azote ammoniacal. Des études pilotes devraient donc être menées dans quelques stations d'épuration employant la digestion aérobie conventionnelle, afin d'évaluer la faisabilité de cette variante technologique pour le contexte québécois.

Couplage de la radiation infrarouge et de la déshydratation des boues sur filtres à bandes presseuses

En ce qui concerne l'application des électrotechnologies dans le secteur de l'épuration des eaux usées domestiques, à part la désinfection par ultraviolet qui est de plus en plus employée au Québec, un autre procédé apparaît prometteur. En effet, le couplage de la radiation infrarouge et de la filtration sur bandes presseuses permettrait sans doute d'améliorer les performances très modestes de déshydratation des boues mesurées dans les installations québécoises, tout en entraînant une certaine stabilisation microbiologique des boues d'épuration. Des recherches à l'échelle pilote ou réelle devraient être réalisées afin d'évaluer les coûts et les bénéfices escomptables par cette novation technologique. Il faut mentionner que l'application de cette technologie pourrait peut être permettre d'éliminer l'étape de digestion aérobie ou anaérobie des boues, ce qui entraînerait une réduction appréciable de la consommation électrique globale des stations d'épuration.

4.3 Le secteur des eaux industrielles (SADTEEI)

4.3.1 Situation énergétique de référence

Tout comme pour le secteur des eaux municipales, il s'agit d'établir de manière détaillée la situation énergétique de référence dans les secteurs où des interventions prometteuses sont envisagées à court, comme à plus long terme. La recherche de données effectuées dans le cadre de cette étude a confirmé que des informations complémentaires seraient requises afin d'obtenir un profil plus précis de la consommation électrique pour la gestion de l'eau, dans les divers secteurs industriels québécois.

4.3.2 Système informatique de gestion en efficacité énergétique électrique dans le secteur des eaux industrielles

Il s'agit de développer un système d'aide à la décision visant à *maximiser l'efficacité épuratoire* (de l'approvisionnement et du traitement) et à *minimiser les coûts* (par optimisation des facteurs et conservation de l'eau). La démarche méthodologique proposée est équivalente à celle décrite pour le secteur municipal (section 4.1.2).

4.3.3 Mesures visant à réduire la consommation d'eau et indirectement d'électricité.

Comme discuté précédemment, le pompage constitue la principale source de consommation électrique des systèmes d'approvisionnement en eau et de traitement des effluents. Les principales opportunités d'économies d'énergie électrique viseront donc à améliorer l'efficacité des pompes ou à diminuer leur consommation.

La façon la mieux adaptée de réduire la consommation électrique des systèmes de pompage consiste en une analyse intégrée du mode de gestion de l'eau et de l'utilisation de l'eau dans le procédé industriel et en la formulation d'un programme de réduction des volumes d'eau et d'optimisation des filtres et des aérateurs dans les systèmes de traitement et d'épuration. Les importantes réductions de consommation qui peuvent être réalisées à l'intérieur des usines par la réutilisation ou la fermeture des circuits d'eau contribueront à diminuer la quantité d'eau consommée quotidiennement.

L'eau contaminée pourrait, avant traitement ou après un traitement léger, être affectée à d'autres tâches telles que : a) le lavage, b) le préchauffage des eaux fraîches ou autres devant servir au procédé et c) la réutilisation éventuelle à l'intérieur ou à l'extérieur de l'usine pour les corvées de nettoyage. Cette ségrégation des eaux contaminées devrait permettre de diminuer la consommation d'eau fraîche.

De même, la réutilisation de l'eau clarifiée à l'intérieur du procédé devrait permettre de diminuer la quantité d'eau fraîche consommée par l'usine. Il faut cependant vérifier la qualité de cette eau (degré de contamination résiduel vs besoins du procédé) et l'énergie nécessaire à pomper cette eau versus l'eau fraîche.

Le pompage pourrait également être effectué en fonction des différents cycles de consommation électrique globaux et locaux. Ainsi, plusieurs usines possèdent un réservoir surélevé dans lequel pourrait être emmagasinée une quantité appréciable d'eau durant la nuit ou les périodes de consommation creuses. L'eau ainsi emmagasinée servirait à combler les pointes de consommation instantanées et éviterait les pointes de consommation électrique qui pourraient être causées par une demande instantanée importante.

5. Programmes administratifs en efficacité énergétique dans les industries de l'eau

La notion de programme de gestion²⁰ de la demande réfère à un ensemble de mesures administratives et financières, mis sur pied par un ou plusieurs fournisseurs d'électricité, permettant d'altérer le volume et le patron de demande d'électricité consommée dans le but de maximiser l'efficacité de la production d'électricité et la performance du système de distribution. Les options couramment utilisées sont les mesures d'efficacité énergétique et/ou la modification des structures de tarification. L'expression "programme de gestion de la demande" n'est pas nécessairement utilisée ailleurs. Le terme équivalent américain et canadien anglais est "Demand-Side management (DSM) program" alors qu'en France le terme "programme pour la maîtrise de la demande d'électricité (MDE)" est couramment utilisé. Au Québec, on utilise surtout "programme en efficacité énergétique" bien que l'expression "programme de gestion de la demande" exprime le concept de manière plus appropriée.

La raison d'être des programmes d'efficacité énergétique électrique est de favoriser une optimisation de l'utilisation de l'électricité de façon à minimiser les pertes, et ainsi de réduire la consommation d'énergie. La réduction de la consommation entraîne une réduction à la marge des pertes pour le fournisseur d'électricité et rapproche le marché de son optimum sectoriel. Ces programmes d'efficacité énergétique se destinent à agir sur la demande d'énergie. Ils interviennent dans la rationalité des consommateurs de façon à orienter les choix vers des équipements, des technologies ou des activités de gestion opérationnelle qui seront minimisateurs des coûts de consommation de l'électricité. Ces choix agiront sur le niveau des besoins de puissance et d'énergie électrique, ces deux facteurs étant les déterminants majeurs des coûts marginaux de production.

5.1 Objectifs des programmes de gestion de la demande

En pratique, les programmes de gestion de la demande se traduisent par des programmes de persuasion morale, d'audit énergétique, de tarification, de recherche et développement, de substitution technologique : ils visent à la gestion de la demande de puissance et à la conservation stratégique (permettant la maximisation des profits des fournisseurs, et la conquête d'une part optimale du marché sur la base d'une tarification avantageuse), au développement de nou-

²⁰ Les programmes de gestion de la demande sont aussi perçus comme étant toutes activités qui altèrent la demande d'électricité, tout en réduisant les coûts. Sous cette définition plus large, les programmes regroupent nécessairement plus de possibilités. On parle alors de standard d'efficacité énergétique, de taxes et de subventions incitatives, d'encouragement par la réglementation, de mécanismes de marché plus efficaces, d'éducation auprès du public, etc..

velles technologies plus performantes et moins consommatrices d'électricité, ainsi qu'à la diffusion de nouvelles applications électrotechnologiques.

Ainsi, dans le design et le développement des programmes de gestion de la demande, on se préoccupera de l'étalement de la demande, de l'équilibre entre la consommation et la production d'électricité, de la croissance de la demande, et de la flexibilité structurelle de la demande, ceci tant au plan de la consommation d'énergie qu'à celui de la demande de puissance. Ces programmes visent :

- 1) **L'étalement de la demande :** Il s'agit ici de contrôler les charges qui constituent les pointes de demande de façon à réduire les besoins en équipement de base et en équipements d'appoint. On peut procéder par l'écrêtage des pointes, par le remplissage des creux de demande, ou par le transfert des charges en pointe de demande vers les périodes de faibles demandes. *L'écrêtage des pointes* ("peak clipping") peut se faire, par exemple, par des contrôles directs faisant partie intrinsèque du contrat de vente de l'énergie électrique, ces contrôles limitant les pointes de demande ou encore le niveau moyen de consommation. *Le remplissage des creux* ("valley filling") par diverses techniques devient une approche intéressante lorsqu'il y a perte d'énergie produite en période de faible demande; cette approche peut-être appliquée pour les stations de traitement ou d'épuration où il est possible de réaliser certaines opérations en période de faibles demandes. Le producteur d'électricité peut parvenir à un tel résultat par une structure de tarification incitative. *Le transfert des charges en pointe de demande vers des périodes de faibles demandes* ("load shifting") constitue une méthode classique d'écrêtage; elle devient applicable lorsqu'il est possible d'introduire des systèmes permettant de déphaser les demandes de services par rapport à l'énergie consommée pour les produire, par exemple, par des systèmes de stockage.
- 2) **Le contrôle stratégique de la croissance de la demande :** Cette expression réfère au terme américain "strategic load growth". Le contrôle stratégique de la croissance de la demande consiste, d'un côté, à la réduction stratégique de la pression sur la demande et, d'un autre côté, à la planification stratégique (en fonction de l'optimisation des profits aux conditions socio-économiques qui prévalent sur le marché) et de l'augmentation ou de la réduction de la croissance de la demande pouvant résulter des substitutions des technologies directement ou indirectement consommatrices d'énergie électrique. L'objectif poursuivi par ce type de stratégie de gestion est d'équilibrer le parc d'équipements de production et de distribution d'électricité au parc d'équipements de consommation. On parvient à ces résultats par une planification à

long terme des investissements et par un ensemble d'incitatifs destinés aux clientèles pour contrôler le développement de la demande à l'intérieur des paramètres financiers de la planification stratégique. On parvient ainsi à une augmentation optimale des ventes d'électricité tenant compte de l'équilibre budgétaire des fournisseurs, notamment l'équilibre entre le parc d'équipements de production, le réseau de distribution et la croissance de la demande. De nos jours, dans une perspective de développement durable, la recherche de l'optimum sectoriel impose de maximiser l'efficacité énergétique par la réduction de la demande, ceci intervenant comme paramètre important dans le contrôle stratégique de la croissance de la demande. Il s'agit de la **conservation stratégique de l'électricité**: cette expression réfère au terme américain "strategic conservation" qui signifie : diminution de la consommation totale d'électricité en modifiant les patrons de consommation habituels. L'amélioration de l'efficacité des appareils électroménagers de même que les programmes d'isolation sont des exemples de conservation stratégique.

- 3) **Le maintien d'une flexibilité structurelle de la demande d'énergie électrique²¹** : Il s'agit ici du maintien de la diversité des technologies consommatrices d'énergie ou des sources alternatives d'appoint permettant de minimiser la dépendance absolue envers l'électricité produite par les équipements de base. On peut parvenir à ce résultat par la mise en place de programmes permettant d'offrir des compensations pour la réduction de la consommation ou par la mise hors circuit momentanée des systèmes de production utilisant l'énergie électrique produite par les équipements de base.

5.2 Type de programmes de gestion de la demande

Il existe plusieurs types de programme industriel aux États-Unis répondant à un ou des objectifs de gestion de la demande. Le Tableau 24 permet d'apprécier l'importance relative de ces programmes.

²¹ Certains réfèrent à l'expression *configuration variable de la consommation d'électricité* ("flexible load shape") qui signifie qu'un fournisseur d'électricité est autorisé à modifier la configuration de la charge, afin d'éviter une surcharge de son réseau. La façon de faire est d'offrir des incitatifs financiers à des clients en échange d'une réduction de service. Les programmes de courant interruptibles en sont un exemple.

Tableau 24. Pourcentage relatif des programmes de gestion de la demande aux États-Unis

Type de programme	Pourcentage relatif (%)
1. Analyse énergétique en bâtiment	10.3
2. Chauffage, ventilation et air climatisée	1.4
3. Contrôle de charge	4.8
4. Développement économique	9.5
5. Éclairage	8.6
6. Électrotechnologies	10.8
7. Emmagasinage thermique	6.5
8. Moteur efficace et à vitesse variable	4.6
9. Production d'énergie par le consommateur	4.0
10. Qualité de l'énergie	3.6
11. Tarification spéciale	25.0
12. Technologies multiples	11.0

Source: données pour le calcul des pourcentages tirées de Battelle, 1991.

Sur un total de plus de 400 programmes industriels inventoriés auprès d'environ 150 fournisseurs d'électricité, aucun n'a été spécifiquement développé pour le secteur de l'eau. Le type de programme le plus courant est la tarification spéciale, qui représente 25 % des programmes, suivi des programmes de technologies multiples, d'électrotechnologies, d'analyse énergétique en bâtiment, de développement économique et d'éclairage dont le pourcentage relatif varie de 8 à 11 %. Les programmes les moins développés par les fournisseurs d'électricité dans le secteur industriel, et qui représentent moins de 7 % chacun, sont le stockage thermique, le contrôle de charge, les moteurs efficaces et à vitesse variable, la production d'énergie par le consommateur, la qualité de l'énergie et finalement les programmes concernant les systèmes de chauffage, ventilation et air climatisée.

L'objectif de conservation stratégique apparaît comme une préoccupation majeure auprès des fournisseurs américains d'électricité, tout comme l'écrtage des pics de consommation dont on fait référence dans plus de 70 % de chacun des programmes suivants : chauffage-ventilation-air climatisé, contrôle de charge, tarification spéciale et production d'énergie par le consommateur. Dans le cas des objectifs de remplissage des périodes creuses et d'étalement de la

période de pointe, ce sont surtout les programmes de stockage thermique qui y font référence le plus souvent.

5.2.1 Les programmes administratifs dans le secteur de l'eau

Canada

Une importante étude ontarienne ciblant les opportunités en efficacité énergétique dans le secteur de l'eau en Ontario est présentement en voie de finalisation. Si on en juge par cette étude, les économies d'énergie électrique dans le secteur de l'eau vont devenir un enjeu important dans l'avenir. Par exemple, le remplacement de la chloration par l'ozonisation dans l'épuration des eaux potables fera augmenter la consommation d'électricité, alors que la nitrification dans le traitement des eaux usées aura pour effet d'augmenter de 50 à 75 % les besoins d'aération. Il existe un potentiel important d'amélioration technique dans le secteur de l'épuration des eaux usées. Par exemple, une amélioration de 25 % serait possible grâce à l'installation de diffuseurs à fines bulles combinée au contrôle de l'oxygène dissous. Dans le cas de l'assainissement des eaux potables, une amélioration technique de 10 % serait possible seulement en améliorant les systèmes de pompage par la substitution des vieux équipements d'entraînement par des moteurs efficaces et à vitesse variable.

Il existe un programme du West Kootenay Power Ltd directement applicable aux industries de l'eau municipale. Il s'agit de l'installation d'une minuterie dans l'usine d'épuration municipale dans le but de rendre le courant interruptible et de diminuer les périodes de pointe.

En matière de développement de programmes d'efficacité énergétique électrique applicable au secteur de l'eau, Hydro-Québec détient une certaine avance sur les autres fournisseurs d'électricité nord-américains. La société d'État est en effet le seul fournisseur à offrir un programme de gestion de la demande qui s'adresse spécifiquement à l'industrie de l'eau. Il s'agit du programme concernant les SPVC (systèmes de pompage de ventilation et de compression) qui s'adresse spécifiquement aux stations de pompage et de traitement des eaux ainsi qu'aux entreprises industrielles désireuses d'améliorer leur système de SPVC. Les clients qui y participent peuvent espérer réduire de façon substantielle leur consommation d'énergie. Hydro-Québec s'apprête à ajouter aux programmes de SPVC actuels un volet touchant trois aspects : 1) Le contrôle des fuites dans le réseau de distribution d'air comprimé, 2) les systèmes d'aération dans les effluents industriels et municipaux et 3) les systèmes d'alimentation électrique dans les usines. Outre son programme de SPVC, Hydro-Québec fait actuellement le suivi de la consommation électrique de cinq usines d'épuration municipales dans le but de mesurer la capacité d'oxygénation de leurs systèmes d'aération.

États-Unis

Aux États-Unis, on ne trouve pas de programme de gestion de la demande directement orienté vers les industries de l'eau, sauf des programmes généraux pouvant s'appliquer dans le secteur de l'eau. Certains organismes sont cependant très actifs dans le secteur. L'EPRI réalise des études poussées et procède à l'évaluation de certaines opportunités en efficacité énergétique directement applicable aux industries de l'eau.

Europe

Il ne semble pas exister sur le territoire européen de programmes visant directement la promotion et l'implantation de MEEE dans le secteur de l'eau, au sens propre envisagé dans le cadre de la présente étude. Plusieurs raisons expliquent l'absence de ce type de programme de gestion de la demande. Les fournisseurs d'électricité seraient récalcitrants à se préoccuper de l'efficacité énergétique au niveau des usages de l'électricité. En effet, à cause de coût élevé de l'électricité (qui se rapproche d'une tarification représentant la vérité des coûts de production de l'électricité), on fait souvent l'hypothèse que l'optimisation de son usage est réalisée sur une base routinière dans les entreprises et les municipalités. Par ailleurs, certains mentionnent que les problèmes de gestion de l'eau sont si importants que l'analyse et l'optimisation énergétique vient en deuxième priorité : la ville de Bruxelles, par exemple, ne possède aucun système de traitement de ses effluents. D'autres correspondants sont d'avis que les programmes d'efficacité énergétique électrique dans le secteur de l'eau sont en phase de conception plutôt que d'implantation, et ainsi, qu'ils ne sont pas assortis d'une documentation pouvant être diffusée dans le grand public.

5.2.2 Programmes administratifs applicables aux industries de l'eau²²

Canada

Programme de pompage. Le programme "pumping profit" de BC Hydro vise à améliorer les systèmes de pompage dans le secteur industriel de la

²² EPRI (1992) a recensé plus de 2300 programmes de gestion de la demande d'électricité offerts par 666 entreprises de service d'électricité canadiennes, australiennes et américaines. Dans son étude sur les formes d'aide et les formules potentielles de guichet unique, étude basée en bonne partie sur l'étude d'EPRI (1992), Hydro-Québec (1993), fait état du succès remporté par les divers programmes d'efficacité énergétique. On y rapporte les programmes et les activités les plus pertinents pouvant servir de base d'information ou de comparaison pour l'élaboration d'un programme général d'efficacité énergétique. Cette analyse recoupe en partie les recherches réalisées dans cette étude, mais viennent surtout confirmer la compétence d'Hydro-Québec en matière de connaissance générale des programmes d'efficacité énergétique applicable à l'industrie et, indirectement, aux industries de l'eau.

Colombie-Britannique. Le programme consiste essentiellement en une aide financière offerte par BC Hydro pour : 1) la réalisation d'évaluation énergétique (audits), 2) soutenir la rédaction de propositions de client qui améliorent l'efficacité énergétique de leur système de pompage, 3) pour la substitution d'équipements peu efficaces par d'autres équipements plus efficaces, 4) pour aider l'acquisition d'un logiciel aidant la conception de systèmes de pompes efficaces. Ce programme peut s'appliquer aux industries de l'eau.

Programmes de moteur efficace. Plusieurs grands fournisseurs tels Hydro-Québec, BC Hydro, Ontario-Hydro, TransAlta, Alberta Power et West Kootenay Power Ltd offrent, à leurs clients industriels, un programme de moteur à haut rendement. Ces programmes se traduisent en pratique par une aide financière offerte à l'acheteur et parfois même au vendeur, dont le montant dépend du potentiel d'économie. Ils sont souvent accompagnés d'une aide technique (ligne technique, documentation écrite) ou de cours de formation. Les mesures d'efficacité portant sur les moteurs efficaces sont bien acceptées par les consommateurs et ce type de programme devrait facilement s'appliquer dans les industries de l'eau.

Programmes d'analyse ou d'évaluation énergétique. Les programmes d'analyse énergétique servent surtout à inciter à la réalisation d'études d'ingénierie pour améliorer l'efficacité énergétique dans les secteurs commercial et industriel. Ontario-Hydro exige un minimum de 1 MW de consommation, mais songe à réduire ce critère fort contraignant. Comme on l'a mentionné ci-haut, Hydro-Québec possède aussi un programme d'audit dans le secteur des SPVC applicable au secteur de l'eau. Deux programmes plus généraux sont aussi offerts : 1) le programme d'aide à l'implantation des électrotechnologies, et 2) le programme d'amélioration de l'efficacité énergétique des procédés industriels. Il existe également un programme d'audit chez SaskPower (Baker et Battle, 1992) et en Alberta au "Energy Resources Conservation Bureau" (ERCB) du Ministère de l'Énergie. Le bureau d'efficacité énergétique (BEE), du Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, procède déjà à l'analyse énergétique de stations municipales, dont celle de la Communauté Urbaine de Montréal (Bégin, 1993).

Programmes pour aider les initiatives en efficacité énergétique. Ces programmes permettent aux clients de se faire financer des projets servant à améliorer leur efficacité énergétique dans les secteurs commercial et industriel. Ontario-Hydro (avec son programme "Feasibility Assistance Plan"), BC Hydro (avec ses programmes "Bonus partners" et le "New plant design") et Hydro-Québec (avec son programme d'initiatives en SPVC) sont les leaders canadiens en ce domaine.

États-Unis

Environ une dizaine de programmes potentiellement applicables aux industries de l'eau ont été recensés. Il s'agit principalement de deux types de programme : 1) programmes de courant et taux interruptibles et 2) programmes de cogénération. Le Tableau 25 présente les fournisseurs d'électricité américains qui ont adopté certains de ces programmes. On y retrouve de plus le type de clients-participants appartenant au secteur de l'eau.

Tableau 25. Identification des programmes américains appliqués aux industries de l'eau

Type de programme	Nom du fournisseur	Clients (secteur de l'eau)
Courants et taux interruptibles	Florida Power & Light Co. (Miami, Floride)	8 clients (épuration des eaux potables et usées)
	Sac-Osage Electric Coop. (El Dorado Springs, MO)	Une station municipale de pompage
	Blackstone Valley Electric Company (Lincoln, RI)	2 stations de traitement des eaux usées
	Cobb Electric Membership Corp. (Marietta, GA)	2 stations de traitement des eaux usées
	Connecticut Light & Power Co. (Hartford, CT)	Stations de traitement des eaux usées
	Maui Electric Co. - Molokai Div.) (Kaunakakai, HI)	4 stations de pompage
Cogénération	Iowa Power & Light Co. (Des Moines, IA)	Une station de traitement des eaux usées

Par ailleurs, il existe aux États-Unis quelques programmes industriels d'étalement de la demande, quoique moins nombreux que les programmes d'efficacité énergétique ou d'économie d'énergie. Cet aspect moins populaire des programmes de gestion de la demande s'expliquerait par le peu d'opportunités réelles pour l'étalement des charges, ou encore par la complexité des diagnostics et pronostics ainsi que par les coûts sociaux associés à ce type de mesures d'efficacité.

McRae et Schick ont réalisé en 1990 une étude, pour le compte d'Hydro-Ontario, portant sur les programmes administratifs américains en matière d'étalement de la demande industrielle d'électricité. Au niveau industriel, ce sont surtout les programmes de conservation d'énergie thermique qui ont le plus d'effet sur l'étalement de la demande. Ils ont identifié six compagnies d'électricité qui offrent des incitatifs pour le stockage thermique, notamment par des programmes de tarification : 1) Wisconsin Electric Power Company, 2) New

England Electric System, 3) Pacific Gas and Electric Company, 4) Texas Utilities, 5) Central Maine Power Company, et 6) Niagara Mohawk Power Corporation. Le Tableau 26 synthétise les résultats de cette étude.

Tableau 26. Synthèse des résultats de l'enquête de McRae et Schick (1990) sur les programmes administratifs et techniques dans le secteur de l'atténuation des pointes

Compagnies	Intérêts	Programmes offerts
Wisconsin Electric Power Company	Conservation stratégique, écrêtage des pointes et déplacement de charges.	Rabais standards ou sur mesure, et prêts sans intérêt pour 30 à 40 MEEE, touchant l'éclairage, CAHV, moteurs, procédés de fabrication et autres.
New England Electric System	Conservation stratégique, écrêtage des pointes et déplacement de charges.	Programme d'initiatives énergétiques : Assistance technique et incitatifs pour la réduction de la consommation et pour l'écrêtage des pointes de demande dans les programmes de modernisation ou de remplacement d'équipements désuets. Programme Design 2000 : Assistance technique et incitatifs pour la réduction de la consommation, pour l'écrêtage des pointes de demande et pour le déplacement des demandes de charges pour les nouvelles constructions.
Pacific Gas and Electric Company	Conservation stratégique, écrêtage des pointes et déplacement de charges. Intérêt particulier dans la conservation stratégique pour compenser les déficits de production prévus pour la fin de la décade.	Diagnostic sur la consommation de l'énergie électrique et recommandation de MEEE. Rabais directs et incitatifs pour le respect des standards d'efficacité énergétique. Rabais et incitatifs pour favoriser les initiatives en efficacité énergétique. Programme de taux interruptibles ou de taux selon la période de consommation. Tarification au coût marginal en temps réel. Atténuation de la demande et stockage thermique d'énergie.
Texas Utilities	Remplissage de creux, écrêtage des pointes et déplacement des charges.	Programme d'audits (analyse, diagnostic et recommandations) favorisant l'identification des opportunités de conservation de l'électricité et de gestion de la charge. Programme de stockage thermique de l'énergie. Mise en réserve de calorie négative pour le refroidissement des édifices. Incitatifs pour des techniques plus performantes pour le refroidissement des édifices (expansion directe et pompe à chaleur). Incitatifs pour le recouvrement de la chaleur perdue provenant des systèmes de chauffage. Programme de moteurs efficaces (en développement). Programme d'investissement dans le déplacement des pointes de demande (en développement).

Tableau 26. Synthèse des résultats de l'enquête de McRae et Schick (1990) sur les programmes administratifs et techniques dans le secteur de l'atténuation des pointes (suite)

Central Maine Power Company	Remplissage de creux et déplacement des pointes de demande de charges.	Programme de réduction de deux ans des périodes de retour sur l'investissement (max la moitié du coût) pour des projets réduisant la demande de 500 MWh/an, ou réduisant la demande de 500 kW. Programme d'économie partagée permettant le financement à 100 % par le fournisseur d'électricité, le remboursement à 100 % du financement et la conservation par la suite de l'économie d'énergie par le client industriel. Programme de cogénération. Subventions remboursables pour le développement et l'implantation de programme de gestion de la demande, de réduction des coûts et de réduction de la consommation. Programme d'audits énergétique. Programme d'assistance technique pour informer la clientèle sur les économies d'énergie potentielles. Programmes de rabais sur l'acquisition de nouveaux appareils d'éclairage. Programme d'incitatifs pour l'acquisition de moteurs efficients. Programme de rabais sur l'acquisition d'équipements autres que les moteurs et les appareils d'éclairage négociés ad hoc avec le client. Programme de standards énergétiques donnant des services de design, des incitatifs financiers et des récompenses morales aux industries entreprenant des travaux de rénovation ayant une contribution à la conservation de l'énergie électrique et à la gestion de la demande. Programme de taux interruptibles permettant aux grands clients ayant une charge constante de contrôler leur demande en interrompant la consommation pendant des périodes fixes.
Niagara Mohawk Power Corporation	Tarification marginale appliquée à toute demande de charge.	Programme horaire de prix à la consommation d'énergie électrique en essai en 1990 pour juger de son effet sur la consommation d'énergie, en comparaison avec les autres stratégies de tarification, avec ou sans coût. Programme d'interruption volontaire pour les clients de plus de 500 kW. Programme commercial et industriel d'éclairage couvrant 50 % des coûts d'amélioration de l'efficacité. Programme d'audits commercial et industriel offert par l'État de New York et encourager par le fournisseur. Programme de communication sur la gestion de l'énergie, service offert aux clients pour une meilleure compréhension de leur mode de consommation et du coût de l'énergie, sur la base de logiciel de simulation permettant de vérifier divers scénarios d'utilisation.

Ces auteurs ont réalisé des simulations de l'effet des incitatifs sur l'atténuation de la demande et concluent, sur la base de comparaison avec les programmes américains, à l'intérêt pour Hydro-Ontario de s'engager dans un programme d'atténuation. Par exemple, ils suggèrent d'offrir 500 \$ par kW transféré, de façon permanente, de la période de pointe (7 a.m. à 11 p.m.) à une autre période.

Ils proposent une stratégie pour contrer la résistance à l'implantation du programme d'atténuation : 1) étude générale et approfondie de marché auprès des clientèles industrielles, 2) formation d'équipes de spécialistes dans les divers secteurs industriels impliqués, 3) identification des équipements les plus susceptibles de contribuer à l'atténuation de la demande (stockage thermique, capacité de stockage), 4) projets de démonstration, 5) persuasion morale des intervenants-clé.

Les Communautés Européennes

Les Communautés Européennes sont divisées en plusieurs directions générales (DG). Trois d'entre elles ont été visitées : 1) DG XI, Environnement, 2) DG XII, Science, Recherche et Développement et 3) DG XVII, Énergie. La stratégie générale de développement des technologies de l'énergie inclue la R&D (sous la responsabilité de la DG XII), et comporte ainsi différents programmes de développement (ex. STEP-REWARD, cf. DG XII). Le développement et la démonstration sur sites réels sont alors pris en relais par la DG XVII grâce au programme THERMIE. En cas de succès, l'OPET (Organismes de Promotion des Technologies de l'Énergie) prend la relève pour assurer la dissémination de l'information, publiciser le projet, développer des stratégies de pénétration du marché, etc. L'OPET peut même sortir de l'Europe pour assurer la promotion des technologies européennes hors-Communauté. L'effort le plus important est actuellement mis sur les pays d'Europe de l'Est et il est même envisagé d'implanter un OPET en Amérique du Nord.

Les programmes de la DG XVII (Énergie). Le programme THERMIE, le plus important, est une initiative de Recherche-Développement et Démonstration relevant directement de la direction générale XVII (Énergie). Ce programme permet le financement de projets de démonstration uniques ou à plusieurs unités, activités accompagnées de la dissémination de l'information.

Les programmes de la DG XI (Environnement). La DG XI (Environnement) s'intéresse directement au problème de l'eau sans toutefois être concernée directement par les problèmes de consommation énergétique ou par les procédés relevant du volet industrie. Cette direction se préoccupe de la réglementation à l'échelle communautaire (normes sur les niveaux de salubrité, de pollution, réglementation industrielle, écologie, relations avec les anciens pays de l'Est, etc.).

Les programmes de la DG XII (Science, R et D). Les programmes de recherche qui relèvent de la DG XII (Science, Recherche et Développement) ne

semblent pas se préoccuper de l'efficacité énergétique comme premier objet de R&D. Une seule étude a été recensée où la consommation énergétique est plusieurs fois mentionnée, sans toutefois qu'elle apparaisse comme une préoccupation importante. Certains de ces projets sont rapportés à l'Appendice D du Volume 1.

France

EDF n'a aucune politique de maîtrise de la demande d'électricité dans le secteur de l'eau²³. Au niveau commercial, la société d'État fait la promotion de la compétitivité des usages concurrentiels de l'électricité, bien sûr avec le maximum d'efficacité, ce qui explique la promotion des moteurs à vitesse variable, des moteurs à haut rendement, et des fluorescents compacts qui semblent être les seuls programmes de promotion.

Dans le secteur des industries de l'eau, il faut mentionner que le coût du traitement l'eau a considérablement augmenté²⁴ en France depuis environ cinq ans, ce qui incite à la création des programmes de douches à débit réduit, de comptage de la consommation, de télégestion du réseau avec techniques de détection de fuites.

Pour ce qui est du traitement des eaux usées, les organismes préoccupés par l'efficacité énergétique renvoient la balle aux organismes responsables de l'environnement, où les questions énergétiques ne semblent pas être une priorité, ou encore, au secteur privé, qui veille à optimiser ses frais d'opération d'usines de traitement. De leur côté, les agences de bassin ne considèrent pas les dépenses énergétiques et certaines avouent ne pas tenir de statistiques sur la consommation d'énergie des usines de traitement. Enfin, au niveau industriel, avec l'application du principe du pollueur-payeur, on peut faire l'hypothèse que les dépenses énergétiques sont optimisées, mais sans plus.

Les pouvoirs publics (AFME) ont soutenu les projets de méthanisation des boues, sans toutefois obtenir beaucoup de résultat. De manière générale, comme l'échec des programmes de méthanisation l'illustre, les procédés extensifs, même s'ils dépensent plus d'énergie électrique, sont préférés aux procédés intégrés, car ils ont l'avantage de permettre le contrôle du bon fonctionnement des équipements sans intervention humaine.

²³ Rappelons que l'EDF pratique depuis 20 ans une tarification marginaliste qui s'est avérée avoir un impact significatif sur la demande.

²⁴ Cette augmentation résulte d'une politique de privatisation du secteur et de périodes où alternent sécheresses (creusage de nouveaux puits) et inondations (contamination du réseau). L'industrie privée (essentiellement deux compagnies : la Compagnie Générale des Eaux et la Lyonnaise des Eaux avec sa filiale Degrémont) hérite de réseaux en très mauvais état, négligés par les collectivités publiques.

Allemagne

En Allemagne, dans le secteur industriel, l'innovation la plus poussée actuellement est le recyclage maximum de l'eau dans les procédés. La législation a été adaptée pour encourager de plus en plus cette pratique qui vise les procédés à émission zéro, et la consommation minimale d'eau naturelle. Les procédés étudiés sont le traitement de l'eau à l'ozone, la microfiltration, le pompage efficace et l'élimination des graisses.

Suisse

Le secteur de l'eau est semi-privé en Suisse, sous forme de compagnies à buts non lucratifs, incluant des consortiums de plusieurs municipalités. Il y a un intérêt dans les économies d'énergie si elles permettent la réduction des frais d'opération. L'initiative privée a beaucoup d'importance dans le domaine de l'efficacité énergétique dans le secteur de l'eau. C'est le maître d'oeuvre ou l'ingénieur-conseil qui va montrer son savoir-faire auprès de son client en lui proposant des technologies ou des conceptions qui lui permettent de réduire ses frais d'opération.

Il n'y a pas de programme de financement ou d'aide à l'implantation de MEEE. Les fournisseurs d'électricité, de la même manière qu'EDF, ne semblent pas intéresser à promouvoir les économies d'énergie. Parmi les MEEE dans le secteur de l'eau, on trouve les moteurs à vitesse variable et certaines technologies française ou allemande, ces deux pays possédant un savoir-faire reconnu dans le domaine. Ainsi DEGRÉMONT (de France) et LURGI ou MESSMER (d'Allemagne) proposent des technologies de membranes à micro-bulles, de disques biologiques, qui sont de 20 à 30 % plus efficaces énergétiquement que leurs concurrents.

Les seuls projets qui semblent bénéficier de subventions sont les projets de cogénération (par exemple, les projets de méthanisation des boues). Il existe au niveau du gouvernement fédéral un programme qui s'appelle ÉNERGIE 2000, qui couvre tout le secteur de l'efficacité énergétique. Deux réalisations sont à son actif à l'échelle municipale : 1) un projet de récupération de chaleur sur les eaux usées d'un complexe d'appartements qui seront chauffés par pompe à chaleur et 2) un projet d'optimisation de l'opération des usines d'épuration des eaux usées municipales.

Hollande-Belgique

En Hollande et en Belgique, il a été impossible d'identifier des programmes incitatifs de MEEE applicables au traitement ou à l'épuration de l'eau. Ceci, malgré le fait que le secteur institutionnel des Pays-Bas est très actif dans la recherche-développement en énergie, avec son centre de recherche NOVEM, sa participation à l'Agence Internationale de l'Énergie (e.g. projets d'optimisation des dépenses de pompage dans la distribution d'eau dans les réseaux de chauffage). Le programme "WATER", dans le cadre d'un programme de subventions

appelé "Stimuleringsregeling Milieutechnologie", contient un ensemble d'incitatifs à l'adoption de technologies de l'environnement.

Royaume-Uni

En Angleterre, l'industrie de l'eau est partagée entre 12 compagnies principales. Les domaines d'intervention en efficacité énergétique sont relativement bien identifiés, mais ne suscitent pas un grand intérêt. Les compagnies ont leur propre politique de gestion interne des ressources. D'ailleurs, l'évolution naturelle des procédés a permis une diminution de la consommation unitaire de 7 à 10 %. Il existe un programme du Bureau de l'Efficacité Énergétique (EEO), Division de Soutien des Technologies de l'Énergie (ETSU), Ministère de l'Environnement applicable au secteur de l'eau. Il s'agit du programme "Best Practice Program" qui comprend différents paliers d'interventions :

- "Energy Consumption Guides", données sur équipements et consommation par usages.
- "Good Practice", démonstration, évaluation, dissémination, promotion.
- "New Practice", monitoring et analyse détaillée de projets innovateurs.
- "Future Practice: R&D", financement de projets de R&D multipartites.

On y est sensibilisé à l'efficacité énergétique : par exemple, les études d'optimisation de l'aération de surface des boues activées ont mis en évidence des améliorations technologiques permettant de réduire la consommation d'énergie du procédé jusqu'à 40 % : "Tapered aeration " et "aérateur à vitesse variable". Toutefois, les résultats de l'analyse économique ne justifient pas l'adoption de la mesure que lors du remplacement d'équipements en fin de cycle de vie.

Il existe également un "Energy Saving Trust" formé par les producteurs d'énergie qui se concentre sur des technologies pour l'économie d'énergie et qui permet aux grands consommateurs de négocier avec le fournisseur de leur choix et d'obtenir le meilleur prix possible sur le marché. Les fournisseurs tendent, pour s'attirer une clientèle, à promouvoir les technologies les plus efficaces en termes énergétiques. En 1993, il fallait consommer au moins 1 MW pour être éligible au programme. En 1994, il faudra 100 KW de puissance souscrite et, pour le futur, on envisage de ramener la barre à 0 W, donnant ainsi l'accès au marché domestique. Ainsi, les individus pourront négocier avec le fournisseur de son choix. La pression du marché devrait favoriser l'adoption des technologies les plus efficaces.

Norvège

Il n'y a pas de programme administratif spécifique, ni de programme général applicable au secteur du traitement des eaux en Norvège. Quelques programmes résidentiels ont été lancés, mais d'importantes coupures budgétaires auraient mis les dossiers en veilleuse.

Suède

Aucun programme n'a été recensé en Suède. Il y existe probablement des efforts institutionnels déployés pour améliorer l'efficacité énergétique, mais pas dans le domaine du traitement des eaux. Le coût peu élevé de l'électricité en Suède n'incite pas à la mise en forme de tel programme. Dans un cadre plus général, les mesures d'efficacité énergétique sont évidemment de mise en Suède, mais on n'y retrouve pas de mesure incitative financière de la part des gouvernements ou des producteurs d'électricité. Certains programmes, surtout résidentiels, ont été lancés au début des années 80, mais ne seraient plus en fonction. La décision d'utiliser ou non des MEEE relèverait de l'individu, le rôle des institutions se limitant à promouvoir l'efficacité par le biais de commercialisation.

5.3 La conception des programmes de gestion de la demande dans le secteur de l'eau

La structure chronologique du développement et de la mise en oeuvre de ces programmes est bien connue (EPRI, 1984) : 1) établissement des objectifs, 2) identification des différentes possibilités d'intervention, 3) choix des possibilités d'intervention les plus conformes au cadre opérationnel et les plus intéressantes en termes coûts-efficacité, 4) évaluation des bénéfices des scénarios d'intervention, 5) choix et mise en oeuvre des stratégies d'opérationnalisation, 6) suivi à l'implantation et à la mise en route.

Hydro-Québec (1993) possède sa propre stratégie de planification des interventions en efficacité énergétique. La méthodologie s'articule autour de deux domaines principaux d'activités : la planification et la conception-réalisation des mesures d'économie d'énergie (voir Tableau 27).

Tableau 27. Processus de planification des programmes d'efficacité énergétique adopté par Hydro-Québec

Planification et suivi de la MEEE	Conception et réalisation de la MEEE
1. Formulation des objectifs	
2. Potentiel technique des MEEE	
3. Potentiel technico-économique	
4. Potentiel commercial	
	5. Étude de faisabilité des MEEE
	6. Développement de l'intervention
	7. Mise en oeuvre de l'intervention
	8. Suivi
9. Évaluation du programme de MEEE	

Abordons ici quelques unes des dimensions de ce cheminement.

Potentiel technique. À cette étape de la démarche, il s'agit d'établir les possibilités d'amélioration de l'efficacité énergétique par des mesures accessibles pouvant être adoptées par le consommateur, ceci sans égard à leur coût. Il existe deux grandes catégories de mesures : 1) Les mesures qui s'appuient sur l'adoption de technologies, produits ou procédés, dont l'efficacité énergétique intrinsèque est prévisible pendant toute leur durée de vie, même avec une maintenance réduite, (ex. pompes, moteurs à rendement plus élevés, technologies d'aération diffuse à fines bulles, etc.). 2) Les mesures qui reposent sur le contrôle d'un procédé, ou sur une modification du comportement humain (ex. méthodes de gestion du procédé, adoption d'un logiciel de contrôle, etc.).

L'efficacité dans le temps de ces dernières mesures dépend, d'un côté, de l'évolution de l'utilisation des équipements (modification des profils de charge, des volumes à traiter, etc.) et, d'un autre côté, de la tendance au relâchement de la surveillance de la qualité des opérations nécessitant une intervention humaine. Ainsi, les mesures administratives qui accompagnent les MEEE doivent se soucier de la pérennité des effets des mesures si l'on souhaite en conserver l'impact bénéfique. Pour assurer la pérennité des mesures de la deuxième catégorie, il est nécessaire de leur associer des plans de maintenance et de révisions périodiques, et de prévoir des campagnes régulières de sensibilisation.

Potentiel technico-économique. Une fois réalisé l'inventaire des mesures en efficacité énergétique, il s'agit d'évaluer celles qui sont économiquement viables. La méthode adoptée par Hydro-Québec repose sur le critère du coût total en ressources. On cherche à comparer le coût d'adoption d'une mesure d'économie d'énergie (ou de puissance) à la fois pour Hydro-Québec et pour le client, aux coûts évités en infrastructures nouvelles et en frais d'opération de ces nouveaux équipements pour Hydro-Québec.

On établit donc les coûts évités d'une mesure en efficacité énergétique en fonction du coût des équipements additionnels de production, transport, et distribution d'électricité qu'elles permettent de différer dans le temps. Ces coûts changent selon la période de charge du réseau (pointe, intermédiaire, hors-pointe). Ainsi, par exemple, une mesure visant à réduire la demande et la consommation électrique de pompes qui n'entrent en opération que pour répondre à la demande de pointe saisonnière en eau peut être d'un intérêt discutable. En effet, ces pompes sont en opération pendant la période estivale lorsque les infrastructures d'Hydro-Québec sont sous-utilisées. En revanche, disposer de moyens de réduire la demande électrique d'équipements qui doivent combler la demande accrue d'eau aux heures de début de matinée et de soirée, y compris en hiver, a une valeur beaucoup plus grande pour Hydro-Québec.

Comment juger de la rentabilité technico-économique d'une mesure d'efficacité énergétique? Par exemple, pour la MEEE proposée, on peut calculer, pour les 300 heures de plus forte demande et pour les 1 200 heures suivantes de plus forte demande, la composante "énergie" de l'économie, c'est-à-dire, le nombre de kWh économisés. Pour chacune de ces tranches de temps, on calcule le total des kWh économisés, et le minimum de kWh économisés par heure pendant plus de 95 % de cette tranche de temps. Cette dernière valeur nous donne la puissance coïncidente équivalente économisée que l'on peut garantir au réseau pendant la période de pointe étudiée. On peut alors évaluer les coûts annuels évités grâce à la MEEE, en utilisant le tableau suivant :

Tableau 28. Exemple du calcul du coût marginal de l'électricité par tranches de facteurs de charge

Heures de plus forte demande électrique	Coût de l'énergie ¢/kWh	Coût en puissance ¢/kWh	Total ¢/kWh
1 - 300	6	54	60
301 - 1500	4	2	6
1501 - 8760	4	0	4
Moyenne	-	-	6

La détermination du potentiel technico-économique de mesures d'efficacité énergétique nécessite une connaissance approfondie des composantes suivantes :

- Le mode d'opération (ou de l'usage) des équipements ou procédés que l'on se propose de modifier, incluant la connaissance réelle des volumes à traiter, et les réductions potentielles.
- Les caractéristiques de ces équipements ceci nécessitant :
 - ⇒ l'évaluation du parc ou du stock existant,
 - ⇒ l'établissement de la durée de vie,
 - ⇒ la nécessité ou non d'un entretien et son influence sur les performances,
 - ⇒ le contexte d'application et l'analyse des facteurs qui peuvent modifier les performances attendues.
- L'évolution des tendances du marché (accroissement de la demande pour l'usage identifié mais aussi, évolution de la consommation unitaire des équipements répondant à cette demande). Cette bonne connaissance du marché est nécessaire pour établir la situation énergétique de référence (base de calculs des impacts énergétiques).

On doit également procéder à l'évaluation des économies tendancielle (voir glossaire) pour bien distinguer "l'impact net" de "l'impact brut" des MEEE proposées. En effet, plusieurs améliorations technologiques peuvent être introduites dans les SATDEEM et les SATDEEI en l'absence de programme de gestion de la demande. De façon générale, le remplacement des équipements dans les stations de pompage se traduiront par une diminution de la consommation unitaire (kWh par m³), simplement par le fait de l'amélioration des technologies disponibles sur le marché. L'évaluation de l'impact net d'un programme d'implantation de ces mêmes technologies doit prendre en considération ces économies tendancielle du marché.

Avant l'implantation d'un programme d'efficacité énergétique dans le secteur de l'eau, il est donc nécessaire de mettre sur pied des mécanismes de contrôle qui faciliteront l'évaluation ultérieure de la performance économique du programme et de pouvoir optimiser les investissements réalisés dans un tel programme. Parmi ces mécanismes, on doit inévitablement mettre en forme une banque de données sur le parc de systèmes de traitement des eaux au Québec, incluant la consommation unitaire des différents types d'équipements qui y sont utilisés.

Le potentiel commercial. Il s'agit d'évaluer la proportion du potentiel technico-économique qui peut être couverte par la mesure, notamment par la prise en compte des facteurs humains et des structures tarifaires appliquées. Pour avoir un potentiel commercial élevé, il faut que les MEEE s'intègrent aux habitudes acquises et soient en mesure de minimiser la perception négative toujours associée à l'efficacité énergétique. On doit éviter les tarifs élevés qui démotivent la clientèle, ainsi que les temps de retour sur investissement trop long. Ces mesures doivent tenir compte du réseau de distribution et du service après-vente, prévoir le soutien technique à l'implantation et à l'utilisation, et démontrer un sens civique ou environnemental.

L'évaluation. L'évaluation des programmes d'efficacité énergétique revient à répondre essentiellement à deux questions : 1) "Si on n'avait pas implanté ce programme, quelle serait la situation énergétique de ce secteur?" 2) "Les investissements réalisés donnent-ils un retour acceptable?" Ainsi, dès la phase de planification du programme de MEEE, il est important de concevoir les protocoles d'évaluation. Ceci permet de réunir les outils pour juger de la performance économique et technique du programme, et d'en recommander la poursuite ou l'abandon. Il ne s'agit pas simplement de colliger des données sur un programme en cours d'implantation, mais aussi de circonscrire la situation énergétique de référence. Un programme de monitoring permettra un suivi régulier des performances des équipements installés, avec leurs paramètres d'opération, et facilitera grandement le processus d'évaluation en cours de programme.

Parmi les résultats importants du programme d'évaluation, il faut mentionner l'établissement de la matrice d'impact des MEEE sur la demande d'électricité, et la demande d'eau, ainsi que la détermination et possiblement, la monétarisation des bénéfices sociaux en résultant. Le Tableau 29 montre sommairement, à titre d'exemple, l'information de gestion que pourrait entraîner un tel effort. En colonne de gauche, on donne la liste de quelques exemples de MEEE. En tête de grille, on présentera les types d'impacts que ces MEEE peuvent avoir sur la demande d'électricité (énergie et puissance selon la classification d'Hydro-Québec), ainsi que sur la demande d'eau, de même que les bénéfices indirects pour les utilisateurs et l'environnement. Ce type de suivi par les impacts permettra aux dirigeants d'Hydro-Québec de juger, en un seul coup d'oeil, l'intérêt des diverses MEEE, ceci en fonction des priorités et des orientations stratégiques de la société d'État.

Tableau 29. Exemple de matrice d'impact

MEEE	Impacts sur la demande électrique			Impacts sur la demande d'eau			Bénéfices
	écrêtage	déplacement	réduction	réduction	accroissement	autres	Bénéfices sociaux des MEEE
réparer les fuites du réseau			-30%	-30%			
réparer les fuites chez le consommateur			-10%	-10%			
interdiction climat./eau potable			x	x	x	DBO ₅ ↑	
chasses d'eau perf.			x	x		DBO ₅ ↑	
interdiction des broyeurs			x	x		DBO ₅ ↓	élimination de bruit, réduction des boues
recupérer la chaleur des eaux grises		x	x				
recyclage des eaux de procédés			x	x	x		économies de chauffage d'eau
lave-linge à tambour horizontal			x				meilleur lavage, plus faible encombrement
cogén. dans usines de traitement d'eau	x						réduction des frais d'opération
cogén. sur le réseau eau/élec.	x		x				économies de chauffage d'eau (14 \$/an), confort accru, risque de gel réduit
(résultats 5000 res.)	5.5 MW		1 250 MWh				
Aération efficace		x	x				
Pompage efficace		x	x				
Réservoirs		x					sécurité de l'approvisionnement.

5.4 La structure du programme d'efficacité énergétique

La conception d'un programme d'efficacité énergétique dans le secteur de l'eau portera sur plusieurs rubriques d'intérêt. À terme, par exemple, un programme performant devra avoir circonscrit, de façon cohérente, l'ensemble des sujets suivants :

- **La structure de l'organisation** pilotant le programme et la péri-organisation : Structure interne à Hydro-Québec, mode d'association avec les institutions coparticipantes (BEE, MAM, MEF, SQAÉ, MICT, CUM, CUQ, CUO, Communauté régionale de compté, diverses associations municipales et commerciales, EPRI).
- **Les objectifs du programme** ou des sous-programmes en termes d'économies d'énergie, de substitutions technologiques, de coûts et de bénéfices escomptables, notamment au plan de l'étalement de la demande, du contrôle stratégique de la croissance de la demande ou encore de la conservation stratégique, ainsi que du maintien de la flexibilité structurelle de la demande (par substitution énergétique).
- **Les MEEE**, leurs domaines d'application et le type de clientèle dans le secteur du transport, du traitement et de l'épuration des eaux municipales et industrielles, notamment en déterminant d'un côté les types d'équipements et de procédés et, d'un autre côté, les diverses MEEE applicables; le niveau d'atteinte des objectifs, ainsi que les types de stations de traitement et d'épuration, et les types d'usine susceptibles de bénéficier des programmes. En fait, il s'agit de la définition du marché et de l'analyse de ses règles de fonctionnement.
- **La stratégie d'application**, par exemple, sur la base du marché des MEEE, la détermination des stratégies touchant la persuasion morale sur l'importance des économies d'énergie électrique, l'incitation à la substitution technologique (les subventions, les prêts sans intérêts ou à intérêts réduits, les prêts participatifs, les risques partagés, les bénéfices partagés), les délais de mise en oeuvre, les obligations des bénéficiaires, les techniques générales de suivi, les ressources informatiques, etc.
- **Les modalités d'application** touchant l'ensemble des règles de promotion, d'implantation, d'application, de suivi, et

d'évaluation des résultats socio-économiques, plus particulièrement :

- ⇒ les critères d'admissibilité au programme : sociétés ou corporations admissibles, équipements, systèmes de contrôle, niveau de la participation financière du proposeur, économie d'énergie anticipée, type d'action sur la demande, MEEE standard, MEEE spécialement conçues, etc.;
 - ⇒ les clientèles cibles, c'est-à-dire la liste des clients potentiels sur base de données relationnelles, le potentiel de contribution aux objectifs, les types de MEEE et de stratégie de gestion des équipements, des procédés, de la main d'oeuvre, et des services aux clientèles pouvant être d'intérêt;
 - ⇒ les méthodes de calcul des incitatifs, sur la base coûts-efficacité et coûts-bénéfices;
 - ⇒ les modalités contractuelles et la documentation officielle du programme incluant les formulaires pour l'inscription;
 - ⇒ les délais d'application en terme d'admissibilité et de temps de réponse;
 - ⇒ l'encadrement technique, les services et les méthodes de diagnostics;
 - ⇒ la séquence d'implantation (les études préliminaires technico-économique, la recherche et développement, la formation, etc.);
 - ⇒ le programme de promotion ou de commercialisation;
 - ⇒ les méthodes de suivi et la base de données relationnelles permettant le suivi des opérations de diagnostic, de calcul coûts-bénéfices, des décisions d'implantation des MEEE, les gains en efficacité, les coûts réels, etc.;
- Les budgets affectés aux programmes (les ressources humaines, les budgets opérationnels, le volume et les modalités financières des incitatifs pécuniaires, etc.).

- Les critères de performance du programme (satisfaction des clientèles, taux de pénétration du programme, développement et transferts technologiques, situation de référence, économies d'énergie à date et projetées, indicateurs de performance, etc.).
- Les difficultés prévues dans l'implantation du programme et les moyens de les contourner (difficultés institutionnelles, difficultés opérationnelles, résistance de la clientèle, coûts de transaction non prévus, échec de certaines technologies, etc.).

5.5 Organisation porteuse

Comme on l'a vu dans ce volume, et plus en détail dans les volumes 1, 2, 3 et 4, il existe une panoplie de *programmes financiers ou de promotion, de mesures d'efficacité* énergétique électrique ou encore de *services de diagnostics ou de suivi* applicables à la gestion de la demande d'électricité dans les secteurs des eaux municipales et industrielles. On distingue généralement la notion de programme administratif d'efficacité de celles de service de soutien à l'efficacité ou de mesures d'efficacité. La notion de programme administratif référant en un ensemble structuré de mesure administrative, financière et légales pris en charge par une division ou un bureau et destiné à offrir des services de soutien aux clientèles dans l'adoption de mesures d'efficacité ou à implanter directement des mesures standards d'efficacité. La notion de mesures d'efficacité énergétique électrique réfère à une technique ou un équipement dont l'adoption conduit à l'étalement de la charge, au contrôle stratégique de la demande ou à la diversification de la structure de la demande énergétique. Quant à eux, les services réfèrent à la fourniture de conseils techniques, ou au prêt d'équipements ou de logiciel de diagnostic.

Ces notions sont souvent utilisées indifféremment pour référer au programme ou à la mesure d'efficacité. Par exemple, on crée un "programme de moteurs efficaces" avec sa structure administrative propre, mais on crée aussi des programmes de subventions permettant l'acquisition de MEEE telles les moteurs efficaces.

L'Hydro-Québec doit-elle créer des programmes administratifs centrés sur les mesures, tels des programmes de pompage efficace, ou des programmes centrés sur les incitatifs, tels des programmes à frais partagés, laissant au marché le choix des mesures d'efficacité, ou encore des programmes spécialisés destinés à des clientèles spécifiques comme les industries des pâtes et papiers ?

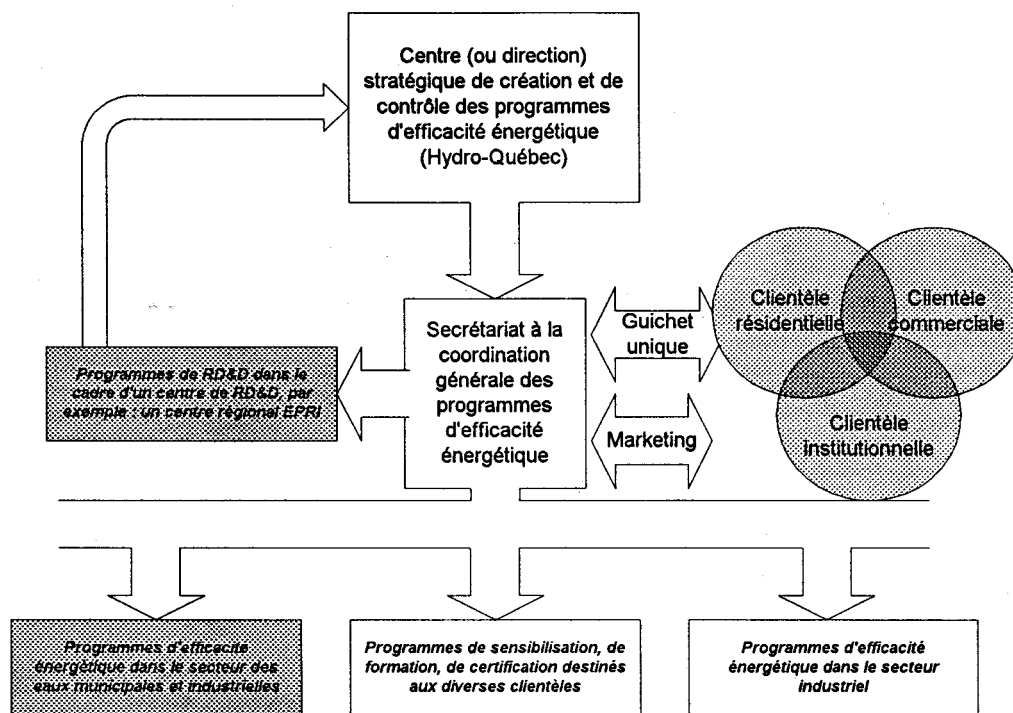
Cette question préoccupe Hydro-Québec si on en juge par l'étude qu'elle a réalisée sur les formes d'aide et les formules potentielles de guichet unique (Hydro-Québec, 1993). L'examen de la littérature n'offre d'ailleurs pas une réponse immédiate à ce genre d'interrogation : "guichet unique *versus* guichets multiples", "programmes généraux sur la tarification, les subventions, la

persuasion morale, les mesures d'aides, ... *versus* programmes spécialisés portant sur les MEEE ou encore sur les clientèles". Bien que les auteurs du présent rapport ne connaissent pas les recommandations de l'étude d'Hydro-Québec concernant ce sujet, ni d'ailleurs l'intention sans doute déjà arrêtée de la société d'État, ils sont tentés de proposer une orientation générale dans le secteur de l'eau et de l'environnement qui obéisse aux principes suivants :

- **Un seul centre stratégique** de création et de contrôle des programmes d'efficacité énergétique ou de gestion de la demande situé à **Hydro-Québec** où a) sont créés, administrés et évalués les programmes administratifs touchant les diverses clientèles, b) sont gouvernés les centres opérationnels y inclut les centres de recherche et développement oeuvrant dans le secteur de l'efficacité énergétique, c) est géré le service à la clientèle pour l'efficacité énergétique.
- **Quelques centres opérationnels parapublics et privés**, chacun avec ses clientèles (les clients étant affectés de façon centrale), opérant des programmes sur : la tarification, les rabais, les subventions, les prêts, les ententes de coûts et de profits partagés, en regard de mesures d'efficacité standards ou négociées, ou encore pour soutenir la réhabilitation, la substitution, la construction d'équipements porteurs d'efficacité, la RD&D en efficacité énergétique...
- **Un seul centre opérationnel dans les industries de l'eau**, opérant ces programmes, établissant ses relations avec les intervenants (MEF, MAM, SQAÉ, MIC, etc.) et indirectement avec ses clientèles (industrielles, institutionnelles, commerciales et résidentielles), avec coordination et programmes intégrés d'efficacité pour éviter que le même client doivent s'adresser à plusieurs centres de décision.
- **Un seul centre de promotion par clientèle**, en soutien aux centres opérationnels.

De l'avis des auteurs, il apparaît clairement qu'il vaudrait mieux, au niveau de chaque centre (ou département) opérationnel, privilégier les disciplines (comme l'efficacité énergétique dans le secteur du traitement et de l'épuration de l'eau), aux dépens de la sectorialisation par clientèle (commerciale, institutionnelle, industrielle), sauf pour la RD&D qui doit intégrer la totalité des préoccupations dans ce secteur. En effet, il semble bien que l'intégration des MEEE, ainsi que la coordination et le suivi des programmes sont plus faciles à réaliser sur cette base, alors qu'il est possible de centraliser la "promotion" de l'efficacité énergétique et le "guichet d'accès" aux divers programmes, en respectant la spécialisation par thème technologique, comme c'est le cas pour le traitement et l'épuration des eaux municipales et

industrielles. Le schéma suivant présente le concept général d'une telle structure.



De façon générale, le service s'occupant de l'efficacité énergétique dans les industries de l'eau occuperait le créneau commercial créé par l'intérêt des divers intervenants de *maximiser l'efficacité épuratoire* (du traitement et de l'assainissement), de *minimiser les coûts* des traitements (par minimisation des pertes inutiles d'énergie, ainsi que par l'optimisation des facteurs et la conservation de l'eau).

De plus, il faudrait soutenir la structure organisationnelle par un système d'information permettant le suivi des opérations, les diagnostics, les progrès technologiques, l'analyse des MEEE, les calculs coûts efficacité des MEEE, ainsi que les activités de RD&D rattachées au programme d'efficacité énergétique électrique. Un tel système peut s'inspirer en partie du *système d'information et de communication mise en place par EPRI (EPRINET)*, qui a été mis en service en 1990. L'objectif de ce système est de communiquer l'information et la connaissance résultant des activités de R&D (plus de 8 gigabytes) auprès de 400 000 employés faisant partie des organisations membres. Il s'agit d'un système à interface usager permettant l'accès direct à l'information, un système expert qui contient la connaissance des experts de l'EPRI, un système de communication électronique interpersonnel, et un système de communication image permettant des téléconférences (Sprague et McNurlin; 1993). Le système est

maintenant fort populaire : 350 experts de EPRI, 1000 usagers, 258 compagnies et 248 sous-traitants.

Parmi les produits utiles pouvant être issus d'un tel système informatique de gestion de l'efficacité technologique (efficacité sectorielle, efficacité énergétique et épuratoire), on compte certainement :

- Une meilleure maîtrise de la demande d'énergie électrique et une réduction marquée de la consommation globale.
- Une réduction substantielle des coûts d'épuration.
- Le maintien ou l'accroissement de l'efficacité épuratoire (traitement et assainissement).
- Un accroissement de la capacité de planification stratégique des divers intervenants pour l'entretien.
- Le remplacement ou la substitution technologique, ainsi que la diffusion des électrotechnologies.

6. Conclusions et recommandations générales

Les analyses effectuées dans le cadre de cette étude ont permis d'établir la consommation électrique globale associée aux industries de l'eau à $2\,302 \pm 550$ GWh/an. En considérant une augmentation de 25 % (298 ± 138 GWh/an) de la consommation énergétique pour la gestion des eaux industrielles, une hausse de 248 GWh/an pour l'épuration des eaux usées municipales attribuable à la poursuite du PAEQ, ainsi qu'une hausse de 10 % (72 GWh/an) de la dépense électrique pour la gestion de l'eau de consommation, il appert que la consommation électrique dédiée aux industries de l'eau sera d'environ $2\,920 \pm 688$ GWh/an à la fin du siècle, soit environ $1.65 \% \pm 0.39 \%$ de l'énergie qui sera consommée à ce moment (177 TWh en l'an 2000).

En utilisant la valeur moyenne de 5.6 ¢/kWh pour le traitement des eaux et sa consommation et une valeur moyenne de 6.10 ¢/kWh pour l'épuration des eaux usées et pour les SATDEEI, il résulte que les coûts en énergie électrique associés aux industries de l'eau, peuvent être estimés à environ 137 ± 33 M \$/an. Si l'on considère, une hypothèse d'augmentation de 618 GWh/an ($2\,302 + 618 = 2\,920 \pm 688$ GWh/an), il appert qu'une somme de 175 ± 41 M \$/an sera consacrée, à la fin du siècle, à l'utilisation de l'énergie électrique dans les industries de l'eau. Cet estimé est basé sur un coût unitaire de 6.0 ¢/kWh, en valeur de 1994. Si l'on pose que la mise en application de diverses mesures d'économie d'énergie puisse résulter en une réduction d'environ 20 % de la dépense électrique globale dans les industries de l'eau, il ressort que l'impact économique de cette pratique serait d'environ 584 ± 138 GWh/an ou encore, en terme monétaire, de 35 ± 8 M \$/an au début du 21^{ème} siècle. Ceci correspond à environ $6.2 \pm 1.4 \%$ de la baisse totale de la demande que Hydro-Québec compte réaliser au sortir de son programme d'efficacité énergétique en l'an 2000.

Cet estimé correspond au potentiel économique des mesures d'efficacité énergétique dans le secteur de l'eau au Québec. Si l'on considère qu'avec $1.65 \% \pm 0.39 \%$ de la consommation totale attribuable à la gestion des eaux municipales et industrielles, le potentiel d'économie d'énergie se situe à environ $6.2 \% \pm 1.4 \%$ de la baisse totale de la demande escomptable par Hydro-Québec, on réalise la richesse de l'opportunité que présente la gestion de la demande dans les industries de l'eau.

La demande d'énergie électrique dans les SADTEEM et les SATDEEI est relativement bien structurée. Dans les SADTEEM, par exemple, les pointes de consommation sont souvent en phase avec les pointes de demandes, ceci se distinguant des SATDEEI, où la consommation est en général plus régulière, avec un léger relâchement au cours des fins de semaines, et quelques pointes occasionnées par des opérations de nettoyage. Les pourcentages de contribution au bilan global de consommation de chaque étape de traitement et

de chaque type d'équipement sont relativement bien connus, le pompage et l'aération contribuant pour une proportion marquée de la consommation. Ces exemples laissent entendre que l'on peut cibler avec circonspection les mesures d'efficacité les plus performantes en termes de coûts-avantages. Cependant, il faut compter avec l'obligation de mettre de l'avant une panoplie de mesures d'efficacité si l'on veut exploiter à fond les opportunités d'économie disponibles dans les procédures et technologies en opération actuellement. De plus, par une programmation administrative adéquate, il faut intégrer les facteurs qui interviennent dans les choix des décideurs, d'un côté, en regard de la performance technologique des SADTEEM et les SATDEEI et, d'un autre côté, en regard de leur intérêt pour adopter des mesures d'efficacité coûteuses et contraignantes, dans un contexte de resserrement budgétaire.

Il existe dans la littérature plusieurs approches à la gestion de la demande où s'entrelacent *des mesures d'efficacité*, basées sur la substitution technologique, l'amélioration des équipements ou la configuration des procédés, et *des stratégies administratives* regroupant des programmes de persuasion morale, d'audit énergétique, de tarification, de rabais, de subvention remboursables ou à risques partagées, d'investissements, de recherche et développement, de substitution technologique, Ces approches visent à la gestion de la demande de puissance et à la conservation stratégique (permettant la maximisation des profits des fournisseurs, et la conquête d'une part optimale du marché sur la base d'une tarification avantageuse), au développement de nouvelles technologies plus performantes et moins consommatrices d'électricité, ainsi qu'à la diffusion de nouvelles applications électrotechnologiques.

Pour illustrer ce tissu complexe de programmes et de mesures, mentionnons, à titre d'exemple,

pour les mesures d'efficacité :

Analyse énergétique en bâtiment : éclairage, chauffage, ventilation et climatisation

- Remplacement du système de refroidissement à air avec une pompe à chaleur dans la source d'eau
- Mise en place d'une surveillance rigoureuse du contrôle du système d'éclairage
- Installation de tubes fluorescents économiseurs d'énergie
- Remplacement des ballasts des divers systèmes d'éclairage fluorescent par des ballasts économiseurs d'énergie
- Substitution de lampes à incandescence par un nouveau type de fluorescent à ballast intégré
- Rationalisation des besoins en chauffage des bâtiments (par exemple, diminution, lorsque possible de 3 à 2 changements d'air frais par heure)
- Réduire le chauffage et la climatisation pendant les fins de semaine et les jours de congé dans les bâtiments inoccupés
- Établissement des températures d'exploitation minimales l'hiver et maximales l'été en fonction de l'utilisation des locaux
- Installation d'un système informatisé de régulation centrale assurant la commande et la surveillance des installations de chauffage, de ventilation et d'air climatisé dans les ouvrages d'assainissement ou de traitement de l'eau

Contrôle de charge

- Installation d'un système de contrôle pour corriger le facteur de puissance
- Installation d'un moniteur de puissance sur le système de distribution pour réduire la demande de charges
- Installation d'un réservoir d'égalisation entre les flux de charges provenant du conduit principal et ceux des conduites secondaires pour contrôler les augmentations soudaines de pression et de charges
- Contrôle de la consommation**
 - Remplacement de la soupape de contrôle de pression en vue de la récupération de l'énergie
 - Installation de moniteurs pour le contrôle de l'O₂ dans le système d'aération
 - Installation d'un système de contrôle de la nitrification par ordinateur dans les soufflantes
 - Augmentation de fréquences de soufflage dans le filtre de nettoyage
 - Céduler le nombre de clarificateurs basés sur la charge et le débit
 - Installer des chronomètres sur le pompage des boues primaires
 - Équilibrer la distribution d'air au niveau des bassins d'aération
 - Installer un système d'ajustement automatique du débit d'air
 - Réduire le taux de pompage des boues
 - Maximiser l'opération dans les filtres à vide durant les heures de pointe
 - Remplacer les moteurs des mélangeurs par des moteurs efficaces
- Électrotechnologies**
 - Installation de diffuseurs à fines bulles combinée au contrôle de O₂
 - Installation de diffuseurs à membranes poreuses
 - Mise en place des procédés de digestion aérobie ou anaérobie thermophile pour stabilisation microbienne des boues
 - Mise en place de la combinaison de procédés thermophiles et mésophiles
 - Installation pour le traitement des boues des électrotechnologies émergentes: des centrifugeuses à teneurs élevées en solides; des presses électroacoustiques; des presses verticales à auge; des lits de séchage sous vide; des filtres-presses rotatifs à vis; des filtres-presses tubulaires; des membranes filtrantes à courant longitudinal; des déshydratateurs à micro-ondes; systèmes de séchage des boues à la vapeur ou par infra-rouge, etc
- Déplacement de la charge**
 - Implantation d'un système de production d'énergie par le consommateur ou cogénération
 - Emmagasiner thermique
 - Création de réservoir ou gestion des débits dans les réseaux d'égouts
 - Création de réservoirs d'eau fraîche
- Moteur efficace et à vitesse variable**
 - Installation des moteurs à fréquence variable (VFD) pour le contrôle des pompes
 - Installation des moteurs à vitesse variable sur les systèmes de pompage des eaux usées
 - Installation des moteurs à vitesse ajustable (ASD) sur les soufflantes d'air
 - Installation des moteurs à vitesse ajustable (ASD) sur les pompes
 - Installation des moteurs à fréquence variable (VFD) sur une des surfaces d'aérateur dans chaque bassin d'aération de deuxième stage
 - Installation des pompes à débit variable dans le système de pompage
- Production d'énergie par le consommateur**
 - Cogénération
 - Bi- ou multi-énergie
- Tarification spéciale**
 - Tarification au coût marginal en temps réel
 - Mise en place d'un programme de taux interruptibles ou de taux selon la période de consommation
 - Atténuation de la demande et stockage thermique d'énergie

et pour les programmes d'efficacité énergétique :

- **Programme d'audits**
 - Diagnostic, simulation et recommandation de MEEE applicable au chauffage, éclairage, ventilation et air climatisé favorisant l'identification des opportunités de conservation de l'électricité et de gestion de la charge
 - Diagnostics sur les systèmes d'alimentation électrique dans les usines
 - Analyse énergétique en procédé
- **Programmes de substitution et d'amélioration technologique**
 - Promotion d'électrotechnologies efficaces
 - Installation de diffuseurs à fines bulles combinée au contrôle de l'oxygène dissous
 - Programme de pompage
 - Moteur efficace et à vitesse variable (systèmes de pompage de ventilation et de compression)
- **Programmes de recherche, développement et démonstration**
 - Valorisation des biogaz
 - Recompression mécanique de la vapeur
 - Méthanisation des résidus
 - Récupération de l'énergie hydraulique
 - Récupération de l'énergie thermique des eaux usées
 - Refroidissement de procédés industriels par des sources alternatives
 - Utilisation de pompes à chaleur
 - Transfert d'oxygène et de masse
- **Programmes de promotion de l'efficacité énergétique**
 - Guides de conservation de l'énergie électrique
 - Programme de communication sur la gestion de l'énergie, service offert aux clients pour une meilleure compréhension de leur mode de consommation et du coût de l'énergie, sur la base de logiciel de simulation permettant de vérifier divers scénarios d'utilisation
 - Programme de bonnes pratiques : économies d'eau en contrôlant le débit par modulation de la pression, aération, recyclage maximal d'eau, digestion anaérobie
 - Programme d'assistance technique pour informer la clientèle sur les économies d'énergie potentielles
 - Programme de standards énergétiques + donnant des services de design, des incitatifs financiers et des récompenses morales aux industries entreprenant des travaux de rénovation ayant une contribution à la conservation de l'énergie électrique et à la gestion de la demande
- **Programme favorisant les associations de clientèles**
 - Programme formation de consortium ou trust de consommateurs d'énergie électrique
- **Programmes de tarification**
 - Programme de taux interruptibles permettant aux grands clients ayant une charge constante de contrôler leur demande en interrompant la consommation pendant des périodes fixes
 - Programme de taux interruptibles ou de taux selon la période de consommation
 - Programme horaire de prix à la consommation d'énergie électrique en essai en 1990 pour juger de son effet sur la consommation d'énergie, en comparaison avec les autres stratégies de tarification, avec ou sans coût pour accéder
 - Programme d'interruption volontaire pour les clients de plus de 500 kW
 - Tarification au coût marginal en temps réel
 - Rabais standards ou sur mesure, et prêts sans intérêt pour 30 à 40 MEEE, touchant l'éclairage, CAHV, moteurs, procédés de fabrication et autres
 - Rabais directs et incitatifs pour le respect des standards d'efficacité énergétique
 - Rabais et incitatifs pour favoriser les initiatives en efficacité énergétique
- **Programme d'initiatives énergétiques**
 - Assistance technique et incitatifs pour la réduction de la consommation et pour l'écrêtage des pointes de demande dans les

programmes de modernisation ou de remplacement d'équipements désuets

- Assistance technique et incitatifs pour la réduction de la consommation, pour l'écrêtage des pointes de demande et pour le déplacement des demandes de charges pour les nouvelles constructions
- Incitatifs pour des techniques plus performantes pour le refroidissement des édifices (expansion directe et pompe à chaleur)
- Incitatifs pour le recouvrement de la chaleur perdue provenant des systèmes de chauffage

Programme d'investissement

- Programme commercial et industriel d'éclairage couvrant 50 % des coûts du rehaussement de l'efficacité
- Programmes de rabais sur l'acquisition de nouveaux appareils d'éclairage
- Programme de rabais sur l'acquisition d'équipements autres que les moteurs et les appareils d'éclairage négociés ad hoc avec le client
- Subventions remboursables pour le développement et l'implantation de programme de gestion de la demande, de réduction des coûts et de réduction de la consommation
- Programme d'économie partagée permettant le financement à 100 % par le fournisseur d'électricité, le remboursement à 100 % du financement et la conservation par la suite de l'économie d'énergie par le client industriel
- Programme de réduction à deux ans des périodes de retour sur l'investissement (max. la moitié du coût) pour des projets réduisant la demande de 500 MWh/an, ou réduisant la demande de 500 kW
- Programme de déplacement des pointes par des investissements pour l'emmagasiner thermique, la création de réservoir ou la production d'énergie par le consommateur ou cogénération

Le choix de mesures efficaces et de programmes efficaces parmi cet ensemble complexe de relations "MEEE - Programme administratif" peut être considérablement simplifié si l'on procède par structuration progressive du plan d'intervention en efficacité énergétique, au fur et à mesure que se développeront les connaissances sur l'impact des mesures, la façon de les implanter, leur efficacité économique, leur équité et leur acceptabilité par les clientèles. Ceci exige la mise en place d'une organisation porteuse, structurée sous forme de centre d'activités : l'unité d'intervention en matière d'initiatives d'efficacité dans les industries de l'eau devraient englober des responsabilités pour les eaux urbaines et industrielles. Elle devrait se coordonner avec une unité d'intervention dans le secteur des procédés industriels, et vraisemblablement avec une unité d'intervention au niveau des clientèles résidentielles et commerciales. La recherche, développement et démonstration (RD&D) devrait aborder la problématique de l'efficacité énergétique dans sa globalité. Sur ce sujet, il faut considérer l'opportunité de créer un centre régional en collaboration avec EPRI, dont la responsabilité en matière d'efficacité énergétique pourrait dépasser le cadre environnemental. Par ailleurs, il faut nécessairement un centre de coordination, ce dernier pouvant être articulé sur la base d'un système d'information et de communication moderne. La formule du guichet unique, à cause de la complexité intrinsèque du marché de l'efficacité énergétique, est la seule qui apparaît en mesure de dynamiser le programme d'efficacité. De même, un organe de promotion et commercialisation devrait être positionné en soutien. Enfin, un organe de gouverne et de planification stratégique doit voir à impartir les budgets de développement et de commercialisation, de même que

l'ensemble des règles devant aboutir aux choix des programmes et des mesures d'efficacité énergétiques.

Bibliographie

- Andersson, L.G. (1980). *Energy Savings at Wastewater Treatment Plants*, Luxembourg: Commission des Communautés Européennes.
- Barakat Associates (1985). *Demand-Side Management Programs, Vol. 1 : Planning Methodology*, 2150 Shattuck Avenue, Berkeley, CA.
- Bégin, G. (1993). *Programme de gestion de l'énergie à la station d'épuration des eaux usées de la communauté urbaine de Montréal*. Montréal: CUM. 19 pages.
- Bernard, J.T. (1994). L'efficacité énergétique chez Hydro-Québec : pourquoi oublier la substitution électricité/gaz naturel? *Canadian Public Policy - Analyse de Politiques*, XX (1) : 26-33.
- Bélanger, G. et J.-T. Thomas (1992). *La tarification de l'électricité au Canada*, Cahier de recherche No. 92-14 du Groupe de Recherche en Économie de l'Énergie et des Ressources Naturelles (GREEN). Université Laval.
- Blais, J.F., R.D. Tyagi et J.C. Auclair (1992a). Bioleaching of metals from sewage sludge by indigenous sulfur-oxidizing bacteria. *Journal of Environmental Engineering - ASCE*, 118 (5): 690-707.
- Blais, J.F., R.D. Tyagi, C.P. Huang et J.C. Auclair (1992b). Comparison of acid and microbial leaching for metal removal from municipal sludge. *Water Science and Technology*, 26 (1/2): 197-206.
- Blais, J.F., R.D. Tyagi, J.C. Auclair et M.C. Lavoie (1992c). Indicator bacteria reduction in sewage sludge by a metal bioleaching process. *Water Research*, 26 (4): 487-495.
- Boileau & Associés Inc., R. Gauthier et CQVB (1989). *Étude des coûts d'immobilisation et d'exploitation concernant les techniques de traitement des boues et des modes d'élimination finale*, (+C-Q/E37V34A31/A83). Québec: Centre Québécois de Valorisation de la Biomasse.
- Burton Environmental Engineering, RCG/Hagler, Bailly, Inc., Metcalf & Eddy, Inc. (1993). *Water and Wastewater Industries : Characteristics and DSM Opportunities*, (EPRI TR-102015, Projects 2662-10, 3046-03). Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute.
- Cliff, R.C. et J.F. Andrews (1981). Aeration control for reducing energy consumption in small activated sludge plants. *Water Science and Technology*, 13 (7): 371-379.

- CRIQ (1993a). *Impacts technologiques et énergétiques des normes environnementales sur les secteurs des pâtes et papiers et des produits forestiers à l'horizon 2006*. Québec: CRIQ.
- CRIQ (1993b). *Impacts technologiques et énergétiques des normes environnementales sur le secteur fonte et affinage des métaux à l'horizon 2006*. Québec: CRIQ.
- CRIQ (1993c). *Impacts technologiques et énergétiques des normes environnementales sur le secteur des mines à l'horizon 2006*. Québec: CRIQ.
- CRIQ (1993d). *Influence de la réglementation environnementale sur la consommation d'électricité par l'industrie chimique québécoise d'ici l'an 2006*. Québec: CRIQ.
- Coté, P.L. et M. Pineau (1983). *Évaluation de CAPDET- Estimation des coûts d'entretien et d'opération. Rapport technique*, Burlington: Environnement Canada, Centre technique des eaux usées.
- Dartois, J. (1992). *Rapport d'évaluation des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux du PAEQ. Année 1991*, (QEN/AE-59/1). Québec: Ministère de l'Environnement, Direction de l'assainissement urbain, Service du suivi de l'exploitation, xi, 84 p., 8 annexes.
- Degrémont et Lyonnaise des Eaux (1989). *Mémento technique de l'eau*, 2 tomes. Paris: Degrémont.
- Desjardins, B. et P. Lessard (1992). Digestion aérobie des boues : principes, modélisation et contrôle. *Sciences et Techniques de l'Eau*, 26 (3): 209-226.
- DeWolf, G., P. Murin, J. Jarvis et M. Kelly (1984). *The Cost Digest : Cost Summaries of Selected Environmental Control Technologies*, (EPA-600/8-84-010). Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency (EPA). xii, 92 pages.
- Eckenfelder, W. (1982). *Gestion des eaux usées urbaines et industrielles. Caractérisation - Techniques d'épuration - Aspects économiques*, L. Vandevenne, (trad.) xiv, 503 pages. Paris: Lavoisier.
- Electric Power Research Institute (1993a). Electrotechnologies for water and wastewater disinfection. *TechCommentary*, 1 (4): 1-6.
- Electric Power Research Institute (1993b). Energy-efficient aeration systems for wastewater treatment. *TechCommentary*, 1 (3): 1-6.

- Electric Power Research Institute (1993c). Energy efficiency in wastewater treatment. *TechCommentary*, 1 (2): 1-6.
- Énergie, Mises et Ressources Canada (1991). *L'énergie électrique au Canada 1991*, Ministère des Approvisionnements et Services Canada.
- Environnement Canada (1980). *Coûts d'exploitation et d'entretien des installations de traitement des eaux usées municipales*, Rapport SPE 5/UP/1. Service de la Protection de l'Environnement, Environnement Canada.
- EPRI (1984). *Demand-Side Management, Volume 1 : Overview of Key Issues*, EA-EM 3597.
- EPRI (1986-87). *"TAGTM Technical Assessment Guide". Volume 1 : Electricity supply (1986). Volume 2 : Electricity End Use (1987). Volume 3 : Fundamentals and Methods, Supply (1986). Volume 4 : Fundamentals and Methods, End Use, (EPRI P-4463-SR).*
- EPRI (1992). *Survey of Utility demand-side management programs*. EPRI, volume 1 and 2.
- EPRI (1994). *EPRI Industrial R&D Centers and Offices. 1993 Annual Operating Report and Plan for 1994*, EPRI-AMP.
- Gauthier, R. et J.-M. Jalbert (1991). Les coûts de gestion des boues de stations d'épuration. *Sciences et Techniques de l'Eau*, 24(3): 269-276.
- Gouja, M. (1993). Les limites de la tarification marginaliste comme instrument de gestion de la demande d'électricité. *Revue de l'énergie*, 449: 365-376.
- Gould, M.S. et R.F. Drnevich (1978). Autothermal thermophilic aerobic digestion. *Journal of Environmental Engineering - ASCE*, 104 (EE2): 259-270.
- Hao, O.J. et M.H. Kim (1990). Continuous pre-anoxic and aerobic digestion of waste activated sludge. *Journal of Environmental Engineering - ASCE*, 116 (5): 863-879.
- Hydro-Québec (1992). *Projet d'efficacité énergétique, approche proposée. Vol. I, Plan d'ensemble*, Montréal, janvier.
- Hydro-Québec (1993a). *Plan de développement*.
- Hydro-Québec (1993b). *Étude exploratoire sur les formes d'aide et les formules potentielles de guichet unique pour la clientèle industrielle. Service conception de programmes. Marché industriel, Vice-présidence - efficacité énergétique. Rapport final, décembre.*

- Jenkins, C.J. et D.S. Mavinic (1989a). Anoxic-aerobic digestion of waste activated sludge : Part I - Solids reduction and digested sludge characteristics. *Environmental Technology Letters*, 10: 350-370.
- Jenkins, C.J. et D.S. Mavinic (1989b). Anoxic-aerobic digestion of waste activated sludge : Part II - supernatant characteristics, ORP monitoring results and overall rating system. *Environmental Technology Letters*, 10: 371-384.
- Kelly, H.G., H. Melcer et D.S. Mavinic (1993). Autothermal thermophilic aerobic digestion of municipal sludges : A one-year, full-scale demonstration project. *Water Environment Research*, 65 (7): 849-861.
- Lalumière, A. et G. Gagnon (1991). Valorisation agricole des boues d'épuration à Jonquière. *Sciences et Techniques de l'Eau*, 24 (3): 245-251.
- Levy, D. (1990). La tarification de l'électricité dans le monde : place de la tarification au coût marginal. *Économie et Sociétés*, 24 (1).
- McGhee, T.J., P. Mojgani et F. Vicidomina (1983). Use of EPA's CAPDET program for evaluation of wastewater treatment alternatives. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 55 (1): 35-43.
- McRae, M.R. et H. Schick (1990). *U.S. Utility Experience with Load Shifting Program for the Industrial Sector and Implication for Ontario Hydro. Submitted by Barakat ? Chamberlin, Inc. to Hydro Ontario, PTA-90-13.*
- Metcalf & Eddy, Inc. (1992a). *Opportunities for Energy Conservation and Demand-Side Management in Pumping and Aeration Systems*, (EPRI TR-101599, Project 2662-10). Palo Alto, CA: EPRI. 138 pages.
- Metcalf & Eddy, Inc. (1992b). *Opportunities for Energy Conservation and Load Shaping in Sludge Management Systems*, (EPRI TR-101026, Project 2662-10). Palo Alto, CA: EPRI.
- Metcalf & Eddy, Inc. (1992c). *Review of electrotechnologies used in the disinfection of water and wastewater*, (EPRI TR-100977, Project 2662-10). Palo Alto, CA: EPRI.
- Middlebrooks, E.J., C.H. Middlebrooks et S.C. Reed (1981). Energy requirement for small wastewater treatment systems. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 53 (6): 1172-1197.
- Ontario-Hydro (1993a). *Fine-Bubble Aeration : Wastewater Treatment Facility Retrofits.*

- Ontario-Hydro (1993b). *Municipal Water and Wastewater Treatment Facilities in Ontario. An Assessment of Electricity Use and the Impact of Environmental Regulations*.
- Owen, W.F. (1982). *Energy in wastewater treatment*, Toronto: Prentice-Hall.
- Peddie, C.C. et D.S. Mavinic (1990). A pilot-scale evaluation of aerobic-anoxic sludge digestion. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 17 (1): 68-78.
- Pineau, M., P. Côté et J.P. Villeneuve (1985). Estimation of wastewater treatment costs : Evaluation of the CAPDET model for Canadian conditions. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 12: 483-493.
- Reid, Crowther & Partners, Ltd (1978). *Conservation Measures in Waste Water Treatment Plants: A Feasibility Study*, 70 pages. Toronto: Ontario Ministry of Energy: Ontario Ministry of the Environment.
- Ross, S.A., M.G. Boivin et D.L. Caverson (1984). *Coûts d'exploitation et d'entretien des installations de traitement des eaux usées municipales -1980, (SPE 5/UP/1)*. Ottawa: Ministère des approvisionnements et services Canada. 31 pages.
- Saint-Yves, A. (1989). La valorisation agricole des boues de stations d'épuration : la question économique. *Sciences et Techniques de l'Eau*, 22 (3): 241-245.
- SCS Engineers Inc. (1985). *Handbook - Estimating Sludge Management Costs*, (EPA 625/6-85/010). Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency (EPA). xx, 540 pages.
- Société Québécoise d'Assainissement des Eaux (1993). *Rapport annuel 1992-1993*, Montréal: SQAE.
- Sprague, R.H. Jr. et B. C. McNurlin (1993). *Information Systems Management Practice*. 3ième édition. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Tyagi, R.D. et D. Couillard (1990). Bacterial leaching of metals from sludge. dans: *Encyclopedia of Environmental Control Technology*, P.N. Cheremisinoff (ed.), pp. 557-590. Houston: Gulf.
- Tyagi, R.D., J.F. Blais, J.C. Auclair et N. Meunier (1993a). Bacterial leaching of toxic metals from municipal sludge : Influence of sludge characteristics. *Water Environment Research*, 65 (3): 196-204.
- Tyagi, R.D., J.F. Blais, N. Meunier et D. Kluepfel (1993b). Biolixiviation des métaux lourds et stabilisation des boues d'épuration. Essai en bioréacteur opéré en mode cuvée. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 20 (1): 57-64.

- U.S. Environmental Protection Agency (1979). *Sludge treatment and disposal - Process design manual*, (EPA-625/1-79-011). Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. Environmental Protection Agency (1981). *Computer Assisted Procedure for the Design and Evaluation of Wastewater Treatment Systems (CAPDET). Program User's Guide*, Vicksburg, MS: Environmental Protection Agency, U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station, Environmental Engineering Division.
- U.S. Environmental Protection Agency (1989). *Annual Volume of Sludge in the U.S. Standards for the Disposal of Sewage Sludge; Proposed rule*, Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency.
- Vismara, R. (1985). A model for autothermic aerobic digestion. Effects of scale depending on aeration efficiency and sludge concentration. *Water Research*, 19 (4): 441-447.
- Water Pollution Control Federation (WPCF) et American Society of Civil Engineers (ASCE) (1988). *Aeration a Wastewater Treatment Process*, New York: WPCF/ASCE.
- Water Pollution Control Federation (WPCF) et Association Québécoise des Techniques de l'Eau (AQTE) (1985). *Exploitation des stations d'épuration des eaux usées*, Ottawa: Environnement Canada.
- Wesner, G., G. Culp, T. Lineck, et D. Hinrichs (1978). *Energy Conservation in Municipal Wastewater Treatment*, (EPA-430/9-77-011). Washington, DC.: U.S. Environmental Protection Agency.
- Young, D.F. et B. Koopman (1991). Electricity use in small wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Engineering - ASCE*, 117 (3): 300-307.