

Université du Québec
l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-Eau)
2800, rue Einstein, Case postale 7500, Sainte-Foy (Québec), Canada, G1V 4C7

**RATIONALISATION DE LA CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ DANS
L'ÉPURATION DES EAUX MUNICIPALES : UNE MODÉLISATION
MULTICRITÈRE**

Par

Nlombi Kibi

Thèse présentée
pour l'obtention
du grade Philosophiae doctorat (Ph.D.)
en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Président du jury et
examineur externe

Prof. Jean-Marc Martel
Département opérations et systèmes de décision, Faculté des
sciences de l'administration, Université Laval

Examineurs externes

Prof. Gaétan Lafrance
Institut National de la Recherche Scientifique (INRS- Énergie
et Matériaux)

Prof. Laszlo Nandor Kiss
Département Opérations et Systèmes de décision, Faculté des
sciences de l'administration, Université Laval

Examineur interne

Prof. Denis Couillard, codirecteur de recherche
Dr. Jean-François Blais

Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-Eau)

Directeur de recherche

Prof. Jean-Louis Sasseville
Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-Eau)

Thèse soutenue le 12 Juin 1997

©Droits réservés de Nlombi Kibi

RÉSUMÉ

Au Québec, la consommation d'électricité dans les stations d'épuration des eaux usées municipales est d'environ 400 GWh/an. La partie des coûts totaux d'opération imputables à la consommation d'électricité dans l'épuration des eaux usées, varie entre 10 % et 30 %, selon le type de station. On estime qu'au cours des 20 prochaines années, à l'instar des autres états d'Amérique du Nord, la croissance de la demande d'électricité sera d'environ 40 %. En effet, d'une part, le nombre de stations d'épuration est en progression constante et, d'autre part, les nouvelles législations et directives en matière de contrôle de la pollution entraînent une nette progression des investissements dans les procédés énergivores : par exemple les systèmes de nitrification/dénitrification, de désinfection par U.V., d'ozonisation, de séparation solide-liquide, etc. sont de plus en plus populaires.

Avec, d'un côté, des économies possibles dans la consommation de plus de 20 % et d'un autre côté, un accroissement rapide de la consommation électrique, la rationalisation de la consommation d'électricité (énergie consommée et puissance appelée) dans ce secteur pose au producteur et au consommateur d'électricité un nouveau problème de gestion.

On cherche ici à gérer le niveau de la consommation électrique générale et de la consommation de pointe dans les systèmes d'épuration des eaux usées par des moyens administratifs et techniques, tout en ne faisant pas obstacle à l'utilisation de l'énergie électrique comme substitut à des méthodes physico-chimiques moins performantes. Il s'agit, plus particulièrement, pour le producteur d'électricité de mettre en place des mesures d'efficacité énergétique électrique (MEEE) pour inciter à une consommation plus

efficace de l'électricité, et pour les municipalités consommatrices, de choisir diverses mesures visant à augmenter l'efficacité énergétique et épuratoire des stations d'épuration.

Cette thèse propose une solution à ce problème de gestion. Elle comporte deux principaux volets. Le *premier volet* porte sur le choix des MEEE pouvant être avantageusement utilisées pour améliorer l'utilisation de l'énergie électrique dans les stations existantes. Le *second volet* concerne l'intégration, dans ces stations, des connaissances sur les MEEE choisies, de façon à guider le choix technologique dans la construction de nouvelles stations d'épuration efficaces du point de vue énergétique, et plus globalement performantes. La solution proposée consiste à élaborer un mécanisme d'aide à la décision susceptible de satisfaire à la fois les exigences de l'offreur de ces MEEE, le producteur d'électricité, et celles du consommateur de celles-ci, les municipalités, ces dernières cherchant à minimiser les coûts d'épuration des eaux, tout en maintenant un niveau de performance adéquat dans les biens livrables à la population. En plus de satisfaire ces deux exigences, le mécanisme d'aide à la décision tient compte des contraintes environnementales et de fonctionnement auxquelles sont astreintes les ouvrages d'assainissement municipaux. Cette approche d'analyse permet de respecter la nature multidimensionnelle de ce problème, alors que les méthodes traditionnelles d'aide à la décision se limitent à l'optimisation unicritère ou encore à des calculs économiques. En effet, ces méthodes cherchent souvent à établir un unique critère autour d'un point de vue prenant en compte l'ensemble des aspects du problème.

Dans le mécanisme d'aide à la décision proposé, le premier volet du problème est solutionné à l'aide d'une analyse conjonctive. Elle consiste à évaluer les diverses solutions

à un problème, sur la base de conditions limites d'acceptabilité fixées au niveau de chaque critère. Ensuite, on rejette celles ne remplissant pas les conditions prescrites.

Vingt-huit MEEE sur un total d'une cinquantaine ont été retenues à l'aide de cette analyse. Ces MEEE sont considérées comme performantes et susceptibles d'être utilisées avantageusement pour augmenter l'utilité de l'électricité et diminuer la consommation de pointe dans les stations d'épuration des eaux usées existantes. Elles possèdent un bon potentiel d'économie d'énergie et leur comportement vis-à-vis les autres paramètres décisionnels est satisfaisant.

Six systèmes d'épuration (chaînes d'épuration) existantes sont considérés au départ dans l'analyse. Il s'agit des systèmes de type : 1) Biofiltration, 2) Physico-chimique, 3) Réacteurs Biologiques Séquentiels (R.B.S.) type I, 4) Réacteurs Biologiques Séquentiels (R.B.S.) type II, 5) Boues activées conventionnelles et 6) Étangs aérés facultatifs. Dans le cas, par exemple, de la quatrième chaîne d'épuration (Réacteurs Biologiques Séquentiels, type II) traitant un débit hydraulique de $19,700 \text{ m}^3/\text{d}$, suivant les résultats de l'analyse conjonctive, l'amélioration de la consommation énergétique hydraulique et de la consommation énergétique épuratoire se réaliseraient à l'aide des MEEE intervenant directement dans les procédés. Au niveau du traitement secondaire, c'est principalement le débit d'air ou d'oxygène et les caractéristiques du système d'alimentation, notamment la vitesse d'alimentation en air, qui déterminent la quantité d'énergie électrique consommée. Ainsi, l'implantation des MEEE suivantes : 1) *des diffuseurs à fines bulles*, 2) *un moniteur pour le contrôle de l'oxygène dissous dans le système d'aération* et 3) *un système d'ajustement automatique du débit d'air*, au niveau du bassin d'aération, permettront de

contrôler 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 devient ainsi réalisable. Dans ce cas, l'optimisation du système d'aération, se fera généralement sans compromettre pour autant le rendement épuratoire de la station, en maintenant l'oxygène dissous aux environs de 2 mg/L partout dans le bassin d'aération.

Le second volet du problème est résolu via un modèle multicritère d'aide à la décision. Ce modèle, élaboré sur la base des méthodes ELECTRE III et PROMETHEE II, ainsi que des travaux de Dérot *et al.* (1994), permet d'agréger les performances des six chaînes d'épuration des eaux usées municipales modifiées et améliorées artificiellement par l'intégration des MEEE et d'autres procédés, suivant quatorze critères de décision, afin de les classer de la meilleure à la moins bonne.

Les MEEE retenues par l'analyse conjonctive sont d'abord intégrées par simulation dans les chaînes d'épuration existantes et modifiées, le cas échéant. Ce qui donne de nouvelles chaînes d'épuration artificielles construites sur la base de chaînes existantes suivantes : chaîne 1 : **Biofiltration modifiée** (construite à partir de la chaîne d'épuration Biofiltration existante); chaîne 2: **Physico-chimique modifiée** (construite à partir de la chaîne d'épuration Physico-chimique existante); chaîne 3: **Réacteurs Biologiques séquentiels-R.B.S.** (construite à partir de la chaîne d'épuration, R.B.S. type I existante); chaîne 4: **Boues activées conventionnelles** (construite à partir de la chaîne d'épuration, R.B.S. type II existante); chaîne 5 : **Boues activées à aération prolongée** (construite à partir de la chaîne d'épuration Boues activées conventionnelles existante) et chaîne 6: **Étangs aérés** (construite à partir de chaîne d'épuration Étangs aérés facultatifs existante). On évalue par

la suite la performance globale de celles-ci, à partir des critères techniques, énergétiques, économiques, environnementaux et socio-ergonomiques, pour enfin appliquer la méthode d'agrégation multicritère.

Les résultats obtenus montrent que, parmi les six chaînes d'épuration artificielles analysées, les trois premières positions sont occupées respectivement par les chaînes de type 1) Réacteurs Biologiques Séquentiels (R.B.S.), 2) Biofiltration modifiée et 3) Boues activées conventionnelles. Dans le cadre de l'expansion du parc québécois des ouvrages d'assainissement des eaux usées municipales, lorsqu'il s'agit de choisir des technologies efficaces sur le plan électrique, ces trois premières seront considérées comme les meilleures dans la fourchette de débits d'eau considérés. Les deux volets du problème utilisent des données provenant de six stations d'épuration des eaux usées municipales du Québec. Il s'agit des stations de Châteauguay (Biofiltration), de Laval-Fabreville (Physico-chimique), de Black Lake (Réacteurs Biologiques Séquentiels type I), de Saint Georges (Réacteurs Biologiques Séquentiels type II), de Victoriaville (Boues activées conventionnelles) et de Varennes (Étangs aérés facultatifs).

Les annexes 4 et 5 présentent deux articles scientifiques qui donnent le détail sur ce premier volet du problème. Le premier article intitulé *"Applicabilité des mesures d'efficacité énergétique électrique dans les ouvrages d'épuration des eaux municipales"*, établit un ensemble des mesures d'efficacité énergétique électrique technique potentiellement applicables dans les stations d'épuration des eaux usées municipales. Le deuxième article intitulé *"Modélisation multicritère pour l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les stations d'épuration des eaux usées municipales"*, présente l'analyse

conjonctive comme approche d'analyse dans le choix des MEEE susceptibles d'être utilisées dans les systèmes d'épuration des eaux usées existantes en vue d'en minimiser le niveau de la consommation électrique.

L'annexe 6 présente l'article décrivant la démarche utilisée au niveau de l'analyse multicritère appliquée aux six chaînes d'épuration modifiées et améliorées par l'intégration des MEEE et d'autres procédés. L'article, intitulé *"Évaluation multicritère de la performance globale de procédés d'épuration des eaux usées améliorées par l'intégration de mesures d'efficacité énergétique"*, propose une classification multicritère de six différentes chaînes d'épuration modifiées et améliorées par l'intégration des MEEE et d'autres procédés.

AVANT PROPOS

La réalisation de cette thèse de doctorat n'aurait pas été possible sans le soutien et le concours de plusieurs personnes et organisations.

Il m'échoit tout d'abord de remercier très sincèrement le professeur Jean-Louis Sasseville, mon directeur de thèse, qui par sa rigueur scientifique, sa générosité, sa grande disponibilité, son ouverture d'esprit, ses encouragements, ses suggestions, son souci du travail bien fait, a su imprégner une touche spéciale à cette thèse de doctorat. C'est lui qui m'a suggéré de faire une thèse par articles. Je l'en remercie très profondément.

Mes pensées et un profond remerciement vont aussi directement au professeur Denis Couillard, co-directeur de cette thèse. Il a su par ses conseils, ses suggestions, sa disponibilité, ses encouragements et sa rigueur apporter une dimension importante à cette thèse. Le professeur Couillard, qui nous a quitté cette année, savait me dire directement ce qu'il fallait corriger avant d'aller plus loin. Sa contribution à la réalisation de cette thèse et à la rédaction des articles m'est très chère et appréciée.

Je tiens également à remercier très sincèrement le professeur Jean-Marc Martel de l'Université Laval à qui je dois mon intérêt à l'approche multicritère d'aide à la décision, pour ses conseils, ses encouragements, sa générosité et sa disponibilité dans la réalisation de cette thèse. Ses critiques constructives au niveau du développement et de l'application de l'approche multicritère et sa participation à la rédaction des articles sont très appréciées. Je le remercie également d'avoir accepté d'agir comme président du jury de

cette thèse. Qu'il trouve à travers ces lignes, l'expression de ma profonde gratitude depuis que j'ai fait sa connaissance il y a maintenant six ans.

Dans la même lignée que les trois professeurs, je tiens aussi à remercier très profondément le docteur Jean-François Blais, associé de recherche à l'INRS-Eau. Ses encouragements, sa disponibilité, son amitié, sa générosité et son implication au niveau de la rédaction des articles, de l'orientation et de la correction de la thèse sont aussi grandement appréciés. Je tiens également à remercier le docteur Blais d'avoir accepté d'agir comme membre du jury de cette thèse.

Mes remerciements vont également au professeur Gaétan Lafrance de l'INRS-Énergie & Matériaux et au professeur Laszlo Nandor Kiss du département Opérations et Systèmes de décision de l'Université Laval, qui malgré les multiples occupations, m'ont fait l'honneur d'agir comme membres du jury.

Pour réaliser cette thèse, j'ai bénéficié de la bourse de l'Institut National de la Recherche Scientifique. J'exprime ici ma reconnaissance et ma gratitude à cette institution Universitaire de l'Université du Québec, qui durant les quatre années que je viens de passer à l'INRS-Eau a su mettre à ma disposition les professeurs, assistants de recherche, chercheurs et le personnel de soutien compétents et attentionnés, un excellent climat de travail et les outils nécessaires pour un bon fonctionnement.

Dans le même ordre d'idée je tiens à remercier la société Hydro-Québec, plus particulièrement le département de planification des marchés industriels, pour sa participation financière au niveau de l'enquête auprès des stations d'épuration des eaux

usées et des usines de traitement d'eau potable. J'adresse aussi mes remerciements aux municipalités, aux Ministères et aux bureaux de génie conseil qui ont participé à l'enquête et à la table ronde organisés dans le même cadre. Les données recueillies durant cette enquête ont permis de valider le mécanisme d'aide à la décision développé dans cette thèse.

Je remercie aussi tous mes amis du Canada, de la République Démocratique du Congo (ex Zaïre) et tous ceux qui de près ou de loin, ont facilité la réalisation de cette thèse, et que je ne peux nommer ici par manque d'espace.

Enfin, si cette thèse a pu arriver à terme, c'est sans aucun doute grâce à mon épouse Jeanne Puya Onokoko et à mes deux enfants Eric-Mania Kibi et Patricia Dembo Kulela Kibi, mes parents, mes frères et soeurs, ma belle soeur, qui durant toutes ses années difficiles, m'ont soutenu moralement et ont dû faire preuve d'énormes sacrifices et privation. Je dédie à tout ce monde extraordinaire pour moi cette thèse de doctorat, en reconnaissance de leur amour et fidélité.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	I
AVANT PROPOS.....	VII
TABLE DES MATIÈRES.....	XI
LISTE DES TABLEAUX	XV
LISTE DES FIGURES.....	XVIII
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1	9
LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS LES OUVRAGES D'ASSAINISSEMENT DES EAUX USÉES MUNICIPALES.....	9
1.1 Description générale des technologies et procédés d'assainissement des eaux usées municipales	9
1.1.1 Prétraitement.....	10
1.1.2 Traitement primaire	11
1.1.3 Traitement secondaire	12
1.1.4 Traitement tertiaire	12
1.1.5 Traitement et élimination des boues.....	13

1.2 Profil de la demande et de la consommation d'électricité dans les stations d'épuration des eaux usées municipales.....	16
1.3 Fluctuation de la consommation d'électricité	22
1.4 Définition de la problématique de recherche.....	27
CHAPITRE 2.....	33
L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DANS LE SECTEUR DE L'EAU.....	33
2.1 Théorie de l'efficacité énergétique dans le secteur de l'eau.....	33
2.1.1 Concept de l'efficacité économique concernant l'utilisation des ressources énergétiques...	35
2.1.2 Programme d'efficacité énergétique.....	40
2.2 Lien entre le programme d'efficacité énergétique électrique et la protection de l'environnement	42
2.3 Lien entre le programme d'efficacité énergétique électrique et les aspects portant sur le développement technologique, le marché, les ressources humaines et l'ergonomie.....	44
2.4 Efficacité énergétique et le marché politique.....	47
2.5 Efficacité énergétique et le concept d'équité	48
2.6 Relation entre le programme d'efficacité énergétique et le contrôle de prix à la consommation	50
CHAPITRE 3.....	51
LE MÉCANISME D'AIDE À LA DÉCISION.....	51

3.1	Considérations théoriques et méthodologiques	52
3.1.1	Méthode d'analyse.....	53
3.1.2	Modélisation multicritère d'aide à la décision.....	57
3.2	Modélisation du cas d'application.....	60
3.2.1	Analyse conjonctive.....	61
3.2.2	Analyse multicritère d'aide à la décision	62
CHAPITRE 4.....		76
LE CAS D'APPLICATION.....		76
4.1	Présentation de l'étude du cas.....	76
4.2	Méthodologie de l'étude de cas.....	77
4.2.1	Première étape : Élaboration du questionnaire	77
4.2.2	Deuxième étape : Administration de l'enquête.....	78
4.2.3	Troisième étape : Récolte des données	79
4.2.4	Quatrième étape : Réalisation des entrevues.....	81
4.2.5	Cinquième partie : Organisation d'une table ronde.....	81
4.2.6	Sixième étape : Traitement des données et analyse	81
4.3	La procédure de traitement des données.....	82
4.3.1	Le traitement des données par l'analyse conjonctive	82
4.3.2	Le traitement des données par l'analyse multicritère.....	88
4.4	Analyse des résultats obtenus pour les deux volets du problème.....	93
CHAPITRE 5.....		97

DISCUSSION GÉNÉRALE	97
5.1 Approche multicritère et conception d'une stratégie globale « offre - demande ».....	98
5.2 Méthodes d'analyse utilisées	102
5.2.1 Analyse conjonctive.....	102
5.2.2 Analyse multicritère d'aide à la décision utilisée	103
5.3 Interprétation des résultats obtenus.....	107
CONCLUSION	113
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	117

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 :	BILAN DE LA CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ GLOBALE DE L'ÉPURATION DES EAUX USÉES MUNICIPALES AU QUÉBEC EN FONCTION DE LA CHARGE HYDRAULIQUE.....	21
TABLEAU 2 :	BILAN DE LA CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ GLOBALE DE L'ÉPURATION DES EAUX USÉES MUNICIPALES AU QUÉBEC EN FONCTION DE LA CAPACITÉ ÉPURATOIRE.....	21
TABLEAU 3 :	LES MEEE APPLICABLES DANS LES CHAÎNES D'ÉPURATION DES EAUX USÉES MUNICIPALES	84
TABLEAU 4 :	LES CRITÈRES D'ACCEPTABILITÉ UTILISÉS DANS L'ANALYSE CONJONCTIVE.....	85
TABLEAU 5 :	LES CONDITIONS LIMITES D'ACCEPTABILITÉ FIXÉES AU NIVEAU DE CHAQUE CRITÈRE.....	86
TABLEAU 6 :	BILAN DE MEEE POUVANT ÊTRE IMPLANTÉES.....	87
TABLEAU 7 :	LES CHAÎNES ÉPURATOIRES COMPRENANT LES MEEE CHOISIES	89
TABLEAU 8 :	LES CRITÈRES DE DÉCISION UTILISÉS AU NIVEAU DE L'ANALYSE MULTICRITÈRE	90
TABLEAU 9 :	TABLEAU MULTICRITÈRE.....	92
TABLEAU 10:	RANGEMENT MULTICRITÈRE DE DIFFÉRENTES CHAÎNES D'ÉPURATION	93

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1	CHAÎNE DE TRAITEMENT TYPE INCLUANT UNE BIOFILTRATION AÉROBIE.....	15
FIGURE 2	PROFIL HEBDOMADAIRE DU DÉBIT HYDRAULIQUE ET DE LA CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ À LA STATION D'ÉPURATION DE LA CUM	24
FIGURE 3	PROFIL MENSUEL DU DÉBIT ET DE LA CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ DE LA STATION D'ÉPURATION DE LA CUM.....	24
FIGURE 4	VARIATION DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE HYDRAULIQUE (CEH) DES STATIONS QUÉBÉCOISES EN FONCTION DE LA CHARGE HYDRAULIQUE	25
FIGURE 5	PROFIL GLOBAL DE LA CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ DES STATIONS QUÉBÉCOISES EN FONCTION DE LA CHARGE HYDRAULIQUE	26

INTRODUCTION

L'application de diverses législations encadrant le contrôle de la pollution de l'eau entraîne une augmentation rapide de la consommation d'énergie électrique pour les municipalités. Une étude d'Ontario-Hydro (1993) montre que, pour les vingt prochaines années, la nouvelle législation, les nouvelles politiques et directives en matières environnementales et la construction de nouvelles stations occasionneront une augmentation d'environ 481 millions de kWh par année pour l'opération des stations d'épuration des eaux usées municipales en Ontario. Cela représente 61 % de plus par rapport à la consommation actuelle (788 millions kWh par année). Selon les études de l'Electric Power Research Institute (Metcalf & Eddy Inc., 1993a; b), la croissance de la demande d'électricité pour le traitement des eaux usées au cours des 20 prochaines années sera d'environ 40 % aux États-Unis. Les investigations menées à l'INRS-Eau (Sasseville *et al.*, 1994) permettent de constater qu'à cet égard, la situation du Québec est semblable à celles de l'Ontario et des États-Unis¹.

¹ Les analyses effectuées à l'INRS-Eau (Sasseville *et al.*, 1994) ont permis d'établir une approximation de la consommation d'électricité globale associée à l'industrie de l'eau pour le Québec à 716 GWh/an pour les eaux de consommation, 393 GWh/an pour les eaux usées municipales et 1200 ± 550 GWh/an pour les eaux industrielles, soit une consommation annuelle totale estimée à 2200 ± 550 GWh. En estimant une augmentation moyenne se situant entre 10 et 25 %, dans les ouvrages d'assainissement des eaux usées municipales, la consommation d'électricité globale évaluée à 393 GWh/an, sera de 641 GWh/an en l'an 2000 avec la poursuite du programme d'assainissement des eaux du Québec. Ainsi, sur la base d'un tarif moyen d'électricité de 6.10 ¢/kWh, il ressort que les coûts d'électricité associés à l'épuration des eaux usées municipales au Québec pouvant être estimés actuellement à environ 23.9 millions \$/an, augmenteront à plus de 39.1 millions \$/an à la fin du siècle, si le système de tarification demeure inchangé.

En effet, non seulement le nombre de stations d'épuration est-il en progression, mais l'on assiste également à une prolifération de procédés énergivores, comme la nitrification/dénitrification au niveau du traitement secondaire², la désinfection par ultraviolet, l'ozonation et les technologies membranaires dans la désinfection de l'eau, la déshydratation sur filtre, sur centrifugeuse ou par conditionnement électroacoustique dans le traitement des boues d'épuration, etc. (Metcalf & Eddy Inc., 1993b). En plus de cet aspect, les coûts imputables à la consommation d'électricité dans l'épuration des eaux usées peuvent varier de 10 à plus de 30 % de coûts totaux d'opération (Owen, 1982; EPRI, 1993), ce qui est énorme dans la situation actuelle des milieux municipaux.

Les travaux de recherche et développement menés aux États-Unis, au Canada et en Europe (Burton Environmental Engineering, RCG/Hagler, Bailly, Inc., Metcalf & Eddy Inc., 1993; Anderson, 1980; EPRI, 1992; 1993; Fosberg et Mukhopadhyay, 1981; Middlebrooks *et al.*, 1981; Owen, 1982; Water Pollution Control Federation et American Society of Civil Engineers, 1988), démontrent que la consommation d'électricité dans les systèmes d'approvisionnement, de traitement, de distribution et d'épuration des eaux municipales dépasse leurs besoins de base.

Ainsi, peut-on penser qu'une rationalisation de l'utilisation d'électricité dans ces systèmes pourrait entraîner une réduction de la consommation et une modification avantageuse pour

² Ceci aura pour effet, d'après Ontario-Hydro (1993), d'augmenter de 50 à 75 % les besoins d'aération et possiblement une augmentation de la consommation électrique dans ses systèmes.

les fournisseurs de sa structure. Cette situation a incité la mise sur pied de programmes d'efficacité énergétique dans le secteur de l'eau.

Il existe cependant très peu de programmes d'efficacité énergétique s'appliquant directement au secteur de l'eau, ceci malgré que les premiers programmes d'efficacité énergétique lancés aux États-Unis datent des années 70, à la suite de la crise du pétrole. Depuis cette période, la structure et la portée de ces programmes ont connu une nette progression : aux États-Unis seulement, les études de l'EPRI ont inventorié un total de 500 fournisseurs d'électricité possédant des programmes de gestion de la demande, regroupant 1000 programmes résidentiels et 400 programmes commerciaux et industriels (Blevins et Miller, 1991). Sasseville *et al.* (1994) ont inventorié à l'échelle du Canada une centaine de programmes de gestion de la demande industrielle.

Cependant, depuis la fin des années 80, l'intérêt s'est progressivement porté vers le secteur de la consommation et du traitement de l'eau. Plusieurs études sur ce sujet ont été réalisées aux États-Unis, au Canada, principalement en Ontario, en Alberta et au Québec (MacRae, 1989; Electric Power Research-American Water Works Association Research Foundation-Water Works Association Research (dans: Metcalf & Eddy Inc., 1993a); Baker et Battle, 1992; Metcalf & Eddy Inc., 1993b; Ontario-Hydro, 1993; Sasseville *et al.*, 1994; Blais *et al.*, 1995; Ton-That et Desjardins, 1995; Gest-eau, 1995; Létourneau et Pouliot, 1995; Bouchard, 1995). Ces études visaient à établir la solution actuelle de référence et d'apprécier le potentiel d'efficacité énergétique dans les industries municipales

de l'eau. Selon ces travaux, les économies d'énergie réalisables³ dans l'implantation des programmes d'efficacité énergétique peuvent atteindre 10 à 30 %, parfois plus. Ceci montre bien l'intérêt, au Québec comme ailleurs dans le monde, de se doter de stations d'épuration des eaux usées qui soient efficaces au plan de la consommation énergétique.

On cherche ici à gérer le niveau de la consommation électrique générale et de la consommation de pointe dans les systèmes d'épuration des eaux usées municipales, principalement par des moyens techniques, tout en ne faisant pas obstacle à l'utilisation de l'énergie électrique comme substitut à des méthodes physico-chimiques moins performantes. Il s'agit, plus particulièrement, pour le producteur d'électricité de mettre en place des mesures d'efficacité énergétique électrique (MEEE) pour inciter à une consommation plus efficace de l'électricité, et pour les municipalités consommatrices, de choisir diverses mesures visant à augmenter l'efficacité énergétique et épuratoire des stations d'épuration.

En pratique, les gains d'efficacité énergétique se traduiront par l'implantation de MEEE dans les stations existantes et, en ce qui a trait à l'expansion du parc actuel de stations, par l'implantation de systèmes d'épuration des eaux usées plus performants globalement, notamment en y intégrant des techniques qui maximisent l'utilité de l'énergie électrique. Il s'agit ici d'un problème de gestion qui comporte *deux volets*. Le *premier volet* porte sur le choix des MEEE appropriées pouvant améliorer l'efficacité énergétique des stations

³ Par exemple, une économie d'énergie de 25 % serait plausible avec l'installation de diffuseurs à fines bulles combinée au contrôle de l'oxygène dissous dans le traitement

existantes. Le *second volet* concerne l'intégration des connaissances sur les MEEE susceptibles d'être implantées dans les stations existantes de façon à guider le choix technologique dans la construction de nouvelles stations d'épuration efficaces du point de vue énergétique. Ces connaissances portent entre autres sur le potentiel d'économie d'énergie de chaque MEEE et sur leur contribution à l'efficacité épuratoire.

Cette thèse par articles propose une solution à ce problème de gestion. Le chapitre 1 présente l'état de la consommation d'électricité dans les ouvrages d'assainissement des eaux usées municipales : on y décrit les technologies et les procédés d'épuration des eaux usées existants, le profil de la demande et de la consommation d'électricité, la fluctuation du niveau de consommation dans ses ouvrages. C'est aussi à ce chapitre que la problématique de la recherche est présentée.

Le chapitre 2 porte sur les aspects théoriques de l'efficacité énergétique dans le secteur de l'eau, notamment le lien entre le programme d'efficacité énergétique électrique et les aspects suivants : la protection de l'environnement, le développement technologique, le mécanisme de marché, les ressources humaines et l'ergonomie, l'équité entre les consommateurs de la ressource énergétique, ainsi que le contrôle de prix à la consommation.

Le chapitre 3 décrit la méthode d'aide à la décision mise en forme pour aider à solutionner le problème de gestion. Dans ce chapitre, le premier volet du problème est résolu à l'aide

de l'analyse conjonctive. C'est une analyse multicritère basée sur des conditions limites d'acceptabilité fixées au niveau de chaque critère. Le deuxième volet du problème est résolu à l'aide d'un modèle d'agrégation multicritère développé sur la base des méthodes ELECTRE III (Roy, 1978) et PROMETHEE II (Brans *et al.*, 1984), ainsi que des travaux de Dérot *et al.* (1994).

Le chapitre 4 porte sur le cas d'application. Il contient une présentation générale de l'étude de cas, la méthodologie utilisée dans cette étude et la présentation des résultats obtenus.

Le chapitre 5 porte sur la discussion générale, et est suivi de la conclusion.

Les annexes 4 et 5 présentent deux articles scientifiques réalisés dans le cadre de cette thèse par article⁴. Ces articles donnent le détail sur le premier volet du problème. Le premier article intitulé "*Applicabilité des mesures d'efficacité énergétique électrique dans les ouvrages d'épuration des eaux municipales*", établit un ensemble des mesures d'efficacité énergétique électrique technique potentiellement applicables dans les stations d'épuration des eaux usées municipales. Le deuxième article intitulé "*Modélisation multicritère pour l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les stations d'épuration des eaux usées municipales*", présente l'approche utilisée pour choisir les mesures d'efficacité énergétique susceptibles d'être utilisées avantageusement dans les systèmes d'épuration des eaux usées existantes.

⁴ Cette thèse comprend au total huit annexes directement liés à sa réalisation. Ces annexes sont cités suivant un ordre d'utilisation et non d'importance.

L'annexe 6 présente l'article scientifique, réalisé aussi dans le cadre de cette thèse par article, décrivant en détail la démarche utilisée au niveau de l'analyse multicritère appliquée aux six chaînes d'épuration améliorées. L'article, intitulé "*Évaluation multicritère de la performance globale de procédés d'épuration des eaux usées améliorées par l'intégration de mesures d'efficacité énergétique*", propose une classification multicritère de six différentes chaînes d'épuration en opération au Québec modifiées et améliorées par l'intégration des MEEE et d'autres procédés, le cas échéant, susceptibles d'augmenter principalement l'utilité de l'électricité dans ces systèmes d'épuration.

Enfin la thèse *conclut* aux possibilités d'améliorer sensiblement l'efficacité énergétique du parc des ouvrages d'assainissement des eaux usées municipales en développement au Québec.

CHAPITRE 1

LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS LES OUVRAGES D'ASSAINISSEMENT DES EAUX USÉES MUNICIPALES

Ce premier chapitre de la thèse présente la situation énergétique de référence. Une brève description des technologies et procédés d'assainissement des eaux usées municipales sera suivie par la présentation du profil de la demande et de la consommation d'électricité dans les systèmes d'épuration des eaux usées municipales. La problématique de la recherche fait l'objet de la dernière section de ce chapitre.

1.1 Description générale des technologies et procédés d'assainissement des eaux usées municipales

De manière générale, les ouvrages d'assainissement des eaux réfèrent aux infrastructures d'acheminement et d'épuration des eaux usées municipales. Ces différents systèmes sont généralement énergivores avec une consommation d'électricité représentant environ la moitié de la consommation électrique des industries municipales de l'eau (asservissement et traitement de l'eau potable, des eaux de ruissellement et des eaux usées domestiques et industrielles acheminées aux infrastructures collectives), ceci pouvant atteindre 1 à 2 % de l'électricité utilisée à l'échelle nationale (Burton Environmental-Metcalf & Eddy, 1993).

Les ouvrages d'assainissement municipaux comportent une station d'épuration des eaux, ainsi que le réseau d'égouts de collecte et d'interception (incluant les postes de pompage, les régulateurs de débit et les ouvrages de surverse). En général, ils desservent sur un

territoire administratif donné la population résidentielle, les commerces, les institutions et certaines industries raccordées au réseau d'égouts. Différents types de traitement ont été installés dans les municipalités. Le choix d'un type spécifique d'équipement est fonction de la taille de la municipalité, de la nature des eaux usées à traiter, des contraintes physiques de localisation, des objectifs environnementaux, etc. (Eckenfelder, 1982).

Une station d'épuration des eaux usées municipales est normalement composée d'une série de procédés, chacun accomplissant une fonction déterminée dans le processus d'épuration. De façon générale, on retrouve les unités suivantes : 1) le *prétraitement* des eaux usées, 2) le *traitement primaire* (chimique ou physique), 2) le *traitement secondaire* (destiné à l'élimination des matières organiques dissoutes ou à l'élimination des matières en suspension), 3) le *traitement tertiaire ou traitement de finition*, et finalement, 4) le *traitement et l'élimination des boues*.

Une description plus détaillée est contenue dans les ouvrages d'assainissement des eaux (Degrémont et Lyonnaise des Eaux, 1989; Eckenfelder, 1982; Water Pollution Control Federation, WPCF, 1985).

1.1.1 Prétraitement

Les différents procédés utilisés pour le prétraitement des eaux usées varient d'une station à une autre. Ils dépendent des caractéristiques des eaux et des usages ultérieures qu'on fera de l'effluent et/ou des boues. Dans une séquence normale, on retrouve généralement les opérations suivantes:

- a) le *dégrillage* et le *tamissage*, utilisés pour débarrasser les eaux usées des matières en suspension de grandes dimensions avant tout autre procédé de traitement;
- b) le *déchiquetage*, *broyage* ou *dilacération*, réduisant la granulométrie des détritiques flottants de façon à rendre possible le rejet de ces derniers dans les eaux usées ou à les conditionner avant incinération;
- c) le *dessablage*, permettant l'enlèvement des matières sablonneuses présentes dans les eaux usées.

Les autres étapes sont constituées de la flottation et de l'écumage; de l'égalsation et de la neutralisation des eaux usées.

1.1.2 Traitement primaire

Le traitement primaire des eaux usées consiste principalement en une étape de *sédimentation*, appelée également *décantation primaire*. Ce traitement simple élimine les matières solides finement dispersées par formation d'un floc avec des particules plus grosses. Cette étape permet également l'élimination des matières colloïdales par adsorption sur des particules grossières et aussi l'enlèvement des matières flottantes. La décantation primaire permet de plus à équilibrer la charge des eaux usées en les faisant séjourner dans un bassin. Ce traitement est parfois précédé d'une étape de pré-aération ou floculation (mécanique ou chimique) afin d'améliorer l'efficacité du décanteur primaire.

1.1.3 Traitement secondaire

Le traitement secondaire consiste en une réduction de la concentration de matières organiques colloïdales et dissoutes dans les eaux usées. La majorité des procédés de traitement secondaire au niveau municipal sont de nature biologique. Deux grandes catégories de traitement biologique sont utilisées. Il s'agit des procédés sur pellicule fixe et des procédés en boues. Dans les systèmes à pellicule fixe, dont le lit bactérien et les disques biologiques, les microorganismes sont fixés à un support solide. Par contre, dans le cas de procédés en boues, tels que les divers systèmes de boues activées et de lagunage, une population hétérogène et indigène de microorganismes emploie, en présence d'oxygène moléculaire, la matière organique et les éléments nutritifs retrouvés dans les eaux usées. Ils assurent ainsi leur survie et leur reproduction. Les principaux types de traitement secondaire des eaux usées municipales et domestiques sont donc les Boues activées; les Biodisques; la Biofiltration; le Lagunage (sur bassins de stabilisation ou sur étangs aérés).

On peut aussi faire référence aux procédés Physico-chimiques qui sont au fait un traitement primaire prolongé.

1.1.4 Traitement tertiaire

Le traitement tertiaire est employé pour améliorer la performance épuratoire des systèmes de traitement primaire et secondaire. La désinfection des eaux épurées constitue la technique la plus couramment employée. Traditionnellement, l'ajout de chlore a été employé pour la désinfection des eaux épurées, parce que celui-ci est efficace et peu coûteux. Toutefois, la production de substances organochlorés cancérigènes, a fait en

sorte de privilégier l'emploi de l'ozone (Jacobs Engineering Group. R. Rice & Browning, 1994), mais surtout de la radiation ultraviolet (UV) pour l'élimination des germes pathogènes. D'autres procédés peuvent également être utilisés à l'occasion comme la déphosphoration chimique, la filtration tertiaire, l'échange d'ions et l'élimination des oxydants résiduels. Ces traitements, souhaitables du point de vue environnemental, entraînent cependant une augmentation de la consommation électrique à la station d'épuration.

1.1.5 Traitement et élimination des boues

La majorité des procédés utilisés dans le traitement des eaux usées municipales produisent des boues provenant du procédé de séparation solide-liquide (décantation, flottation, etc.) ou résultant d'une réaction chimique (coagulation), biochimique ou encore biologique. Ces boues subissent une série de traitement comprenant l'épaississement, le conditionnement et la déshydratation des boues et finalement l'évacuation finale. Les boues organiques peuvent aussi subir des traitements visant la réduction de la fraction organique ou de la teneur en matières volatiles avant leur disposition finale.

Plusieurs développements technologiques ont été réalisés dans le traitement des boues au cours des dernières années. Il s'agit de diverses techniques de conditionnement, de déshydratation et de valorisation des boues comme la décontamination biologique, la digestion thermophile autothermique couplée à la digestion anaérobie mésophile, la digestion anoxie-aérobie, la déshydratation sur filtre ou centrifugeuse ou par conditionnement électro-acoustique (Couillard, 1994; 1989; Blais *et al.*, 1992; Couillard et

Mercier, 1993; 1991; Tyagi *et al.*, 1993; Couillard et Zhu, 1992; USEPA, 1980; 1989; Vismara, 1985).

La Figure 1, tirée de Blais *et al.* (1994), montre un exemple de chaîne de traitement (celle de la CUQ). Dans ce cas, on retrouve en pré-traitement des étapes de dégrillage et de dessablage; le traitement primaire comprend une décantation primaire alors que le traitement secondaire est constitué d'une étape de biofiltration aérobie; une étape de désinfection par radiation U.V. est ajoutée en traitement tertiaire, la gestion des boues s'effectue par un épaissement des boues, suivie d'un conditionnement chimique, une déshydratation des boues sur filtres à bandes presseuses et un séchage des boues avant incinération et/ou enfouissement sanitaire.

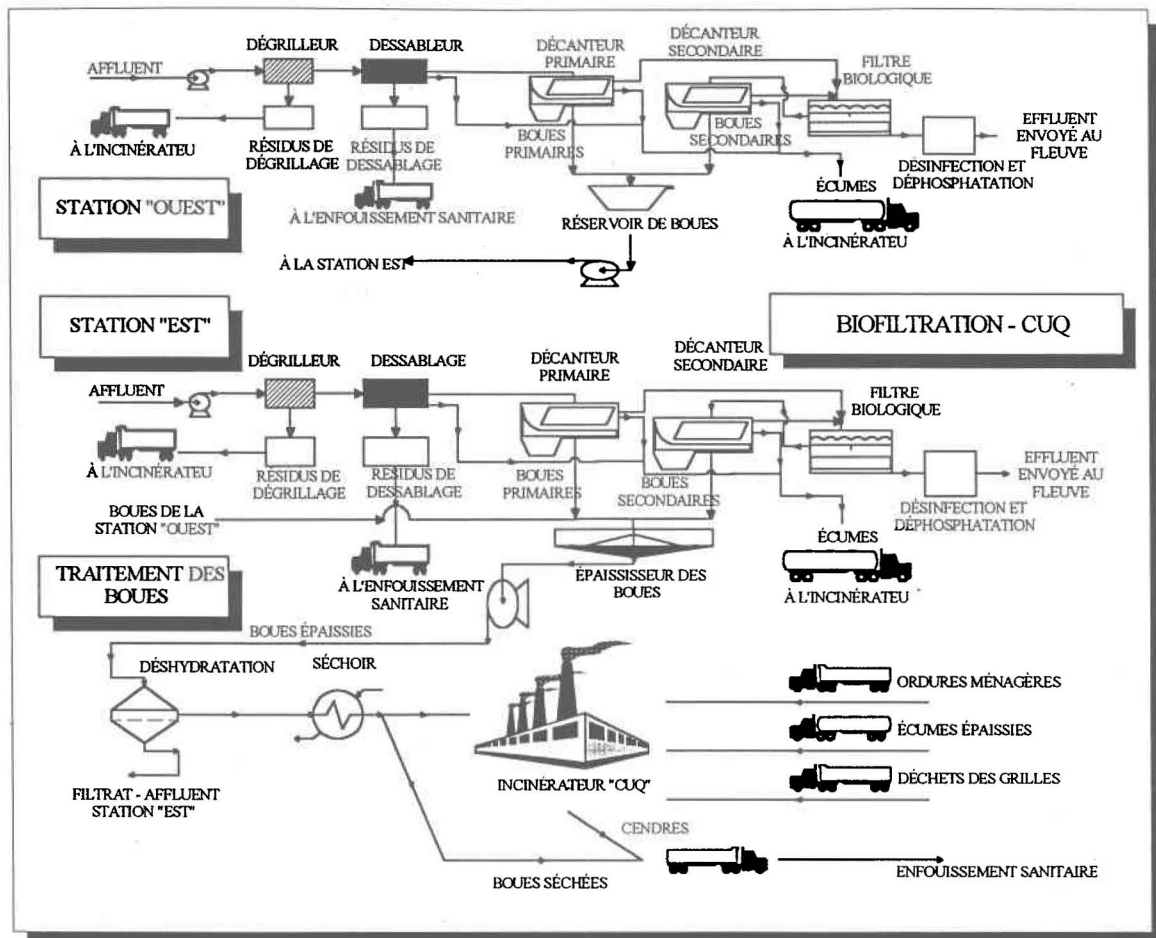


Figure 1 Chaîne de traitement type incluant une biofiltration aérobie

1.2 Profil de la demande et de la consommation d'électricité dans les stations d'épuration des eaux usées municipales

La demande d'électricité dans les stations d'épuration des eaux usées municipales dépend de la technologie d'épuration utilisée, de la fluctuation du débit à traiter, de la charge polluante dans l'affluent, ainsi que des cycles horaire, journalier, hebdomadaire et mensuel au cours d'une année. La variabilité de ces caractéristiques physiques et technologiques influe directement sur la consommation d'électricité et la demande de puissance dans ces stations.

La consommation énergétique hydraulique (CEH), la consommation énergétique épuratoire (CEE) et l'appel de puissance sont les paramètres de gestion du niveau de la demande et de la consommation d'électricité permettant d'évaluer la performance énergétique d'un procédé d'épuration. Ils permettent de porter un diagnostic sur d'éventuelles améliorations donnant lieu à diverses mesures d'efficacité énergétique électrique susceptible d'améliorer l'efficacité énergétique dans les stations d'épuration en opération.

La consommation électrique varie principalement d'une étape de traitement à une autre, à l'intérieur d'une technologie d'épuration donnée. Selon Burton Environmental Engineering *et al.* (1993), dans les stations américaines, le pompage des eaux consomme entre 0.031 et 0.045 kWh/m³, représentant 5 à 18 % de la demande totale pour les stations traitant 3 786 à 378 600 m³/j. Pour les stations de petites dimensions, par exemple, la consommation électrique est établie entre 0.013 et 0.017 kWh/m³ (Middlebrooks *et al.*, 1981) et à 0.051 kWh/m³ par Owen (1982). Pour les mêmes auteurs, la consommation imputable au

dégrillage des eaux varie entre 0.01 et 0.09 % de la demande totale (jusqu'à 1.2 % pour le cas des systèmes d'épuration utilisant les boues activées) dans les stations de moyenne et forte dimensions. Elle varie de 0.8 à 2.7 % pour le dessablage, ceci pouvant aller jusqu'à 27.6% pour les stations de type boues activées des stations de moyenne et forte capacités de traitement. Owen (1982) l'établit à environ 0.003 kWh/m³.

Le traitement primaire consomme environ 0.004 kWh/m³, ce qui représente entre 0.5 et 2.3 % de la consommation électrique dans les stations de moyenne à forte capacités (Burton Environmental Engineering *et al.*, 1993). Elle est estimée à 0.002 kWh/m³ (pour une capacité de traitement de 18 925 m³/j) et à 0.037 kWh/m³ (pour une capacité de 189 m³/j) (Middlebrooks *et al.*, 1981). Elle est aussi estimée par d'autres études entre 0.0311 et 0.007 kWh/m³ (pour les stations traitant entre 379 et 378 600 m³/j) (Wesner *et al.*, 1978) et à 0.0025 kWh/m³ (Owen, 1982).

Les systèmes de traitement secondaire consomment une quantité importante d'électricité dans une chaîne d'épuration des eaux usées municipales. L'électricité consommée varie d'une technologie à une autre. D'après les différents travaux réalisés dans ce secteur, elle peut atteindre dans le cas d'une boue activée, 51.7 % de l'énergie totale consommée dans certains types de bassins d'aération de stations de moyenne à forte capacité (Burton Environmental Engineering *et al.*, 1993). Toutefois il existe dans le cas du traitement biologique des nuances, selon qu'il s'agisse d'un traitement de nitrification biologique, d'une décantation secondaire, du pompage de retour, de l'aération à fines bulles ou à grosses bulles, etc. (Owen, 1982, Middlebrooks *et al.*, 1981, Clift et Andrews, 1981). La

consommation d'électricité dans les étangs aérés des stations américaines a été estimée par Wesner *et al.* (1978) à 0.195 kWh/m³. Des niveaux de consommation variables ont aussi été estimés dans les biodisques, la biofiltration, les étangs aérés facultatifs (Wesner *et al.*, 1978; Owen, 1982; Middlebrooks *et al.*, 1981; Burton Environmental Engineering *et al.*, 1993).

En ce qui concerne le traitement tertiaire, c'est surtout au niveau de la radiation ultraviolet et de l'ozonisation que les impacts de la consommation d'électricité se font sentir. EPRI (1993) estime la consommation énergétique imputable au traitement des eaux usées par la radiation ultraviolet entre 0.0177 et 0.0216 kWh/m³ et à l'ozonisation à 0.0290 kWh/m³ dans le cas des mêmes stations américaines étudiées.

Les systèmes de traitement et d'élimination des boues d'épuration consomment une proportion importante d'énergie dans la consommation totale d'une station. Des estimations sur la consommation électrique ont été réalisées pour les diverses étapes de traitement des boues par Wesner *et al.* (1978); Middlebrooks *et al.* (1981); Owen (1982) et Burton Environmental Engineering *et al.* (1993). Au niveau de l'épaississement gravitaire, par exemple, la consommation d'électricité a été estimée à 0.0004 à 0.0016 kWh/ m³, ce qui correspond à environ 0.09 à 0.33 % de la demande totale pour les moyennes et grosses stations (Burton Environmental Engineering *et al.*, 1993).

Dans le cas des stations du Québec, Blais *et al.* (1995) extrapolent la consommation d'électricité totale pour le traitement des eaux usées municipales à environ 889 780 kWh/j,

cela correspondrait à une consommation électrique annuelle de 324 770 MWh⁵. Selon les mêmes auteurs, 45.4 % d'électricité est utilisée dans les stations de type physico-chimique. 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 d'épuration (biodisques, fosses septiques communes et étangs non-aérés) ne représentent qu'une très faible portion (< 0.5 %) de la demande énergétique électrique.

La consommation énergétique hydraulique globale de l'ensemble des stations considérées (165 stations au total) dans l'étude de Blais *et al.* (1995) est estimée entre 0.203 et 0.749 kWh/m³. Dans le cas de la consommation énergétique épuratoire (CEE) pour l'ensemble des systèmes d'épuration, la moyenne⁶s'établit à 4.13 kWh pour l'enlèvement de chaque kilogramme de DBO₅. La CEE moyenne par station, pour toutes les technologies d'épuration considérées est de 8.02 ± 5.29 kWh/kg de DBO₅ enlevée. La valeur moyenne de la CEE par station de type étang aéré est de 8.37 ± 5.38 kWh/kg de la DBO₅ enlevée, alors que la moyenne pondérée est de 4.95 kWh/kg de la DBO₅ enlevée. Les petites stations présentent une performance énergétique épuratoire moins bonne que les stations

⁵ 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. Les données considérées ici proviennent d'une étude réalisée pour le compte d'Hydro-Québec dans le cadre du programme d'efficacité énergétique appliquée au secteur de l'eau.

⁶ 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).

de dimensions plus importantes. Par exemple, la valeur moyenne de la CEE par station de type boues activées est de $6.79 \pm 4.69 \text{ kWh/kg de la DBO}_5 \text{ enlevée}$ alors que la moyenne pondérée est de $3.64 \text{ kWh/kg de la DBO}_5 \text{ enlevée}$. Le même phénomène est observé pour les autres systèmes avec des valeurs moyennes respectives de 2.90 ± 0.63 et $5.85 \pm 1.23 \text{ kWh/kg de la DBO}_5 \text{ enlevée}$ pour les stations de types biofiltration et physico-chimique (voir Tableaux 1 et 2).

Dans la gestion de la consommation électrique, la puissance appelée constitue une donnée très importante. Dans le cas des stations du Québec, 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. 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 1 : Bilan de la consommation d'électricité globale de l'épuration des eaux usées municipales au Québec en fonction de la charge hydraulique

Type de traitement	Nb de stations	POP (personnes)	DH (m ³ /jr)	CE (MWh/jr)	CEH (kWh/m ³)
Boues activées	31	661 000	513 000	169	0.33
Biodisques	5	4 710	3 510	2.63	0.75
Biofiltration	5	567 000	430 000	107	0.25
Étangs aérés	150	498 000	402 000	143	0.36
Fosses septiques	3	669	309	0.18	0.57
Physico-chimiques	2	1 235 000	1 727 000	351	0.20
Total	196	2 966 000	3 075 000	773	0.25

Tableau 2 : Bilan de la consommation d'électricité globale de l'épuration des eaux usées municipales au Québec en fonction de la capacité épuratoire

Type de traitement	Nb. de stations	POP (personnes)	DBO ₅ enl. (kg/jr)	CE (MWh/jr)	CEE (kWh/kg)
Boues activées	27	617 000	44 300	161	3.64
Biodisques	4	3 860	207	2.63	12.69
Biofiltration	4	559 000	40 490	103	2.56
Étangs aérés	135	438 000	27 110	134	4.95
Physico-chimiques	2	1 235 000	70 150	351	5.01
Total	172	2 852 000	182 000	753	4.13

Dans l'analyse du niveau de la demande et de la consommation énergétique électrique, il est aussi important de statuer sur la fluctuation des charges hydrauliques et organiques de celle-ci dans le temps. Ces informations sont très utiles au niveau du choix des MEEE à considérer. C'est l'objet de la section suivante.

1.3 Fluctuation de la consommation d'électricité

Les ouvrages d'assainissement des eaux usées opèrent de façon continue. De là, ils sont soumis à d'importantes fluctuations de charges hydraulique et organique. Ces variations de charges se rencontrent aussi bien sur une base diurne, hebdomadaire ou mensuelle/saisonnière, ce qui se répercute inévitablement sur la demande et la consommation d'électricité. Ainsi, les divers systèmes d'épuration 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 la majorité des cas, surdimensionnés en terme de puissance installée.

Une variation journalière appréciable de la charge organique et hydraulique de l'affluent est observable dans les stations d'épuration. Les travaux de l'EPRI (1993) montrent que le débit d'eau à traiter ainsi que la charge en matière organique (DBO_5) atteignent leurs maximums dans le milieu de la 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. Cette tendance s'observe aussi dans le cas des stations du Québec.

Les activités domestiques et industrielles n'ont toutefois pas toutes la même intensité chaque semaine, voire chaque mois. La figure 2 (de Sasseville *et al.*, 1994) compare les débits moyens des eaux usées traitées à la station d'épuration de la Communauté Urbaine de Montréal (CUM), ainsi que la consommation d'électricité au cours de l'année 1993 pour les divers jours de la semaine. Cette figure montre que le profil de charge hydraulique se reflète en partie au niveau de la consommation d'électricité de la station. On y note aussi que la consommation d'électricité moyenne des vendredis est supérieure aux lundis et aux mardis. Ces deux jours se caractérisent par une charge hydraulique plus élevée.

En ce qui concerne le profil mensuel, la figure 3 (de Sasseville *et al.*, 1994), tirée des données de la station d'épuration de la Communauté Urbaine de Montréal (C.U.M) montre une consommation d'électricité plus élevée pour les mois d'hiver comparativement aux mois d'été. Ceci est naturellement dû en bonne partie aux besoins de chauffage durant les mois froids d'hiver.

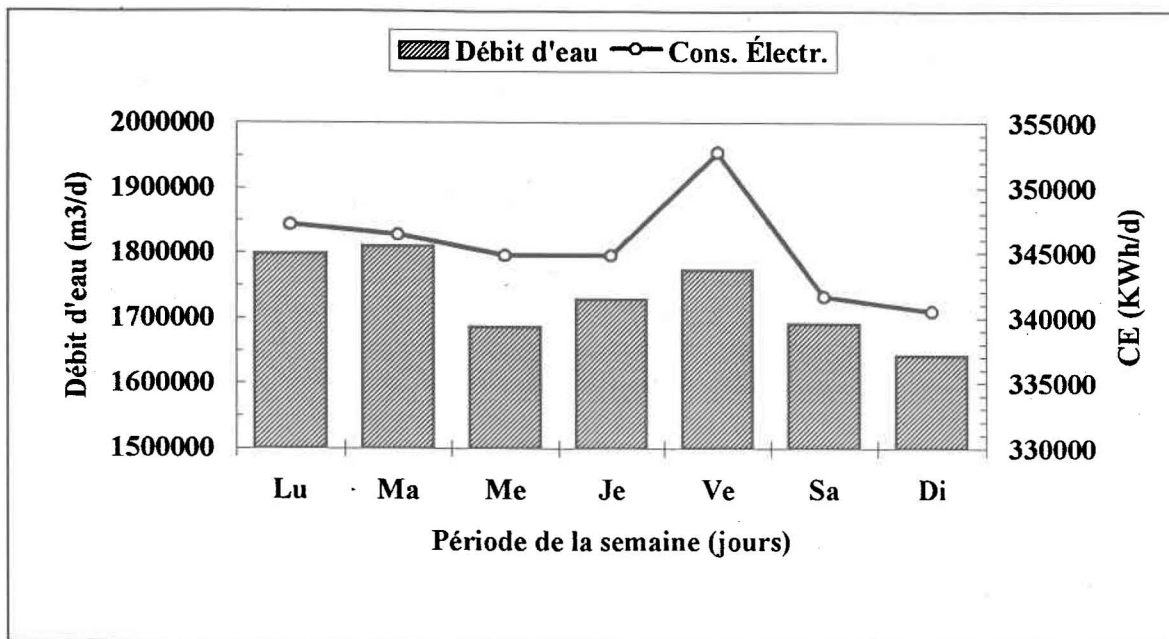


Figure 2 Profil hebdomadaire du débit hydraulique et de la consommation d'électricité à la station d'épuration de la CUM

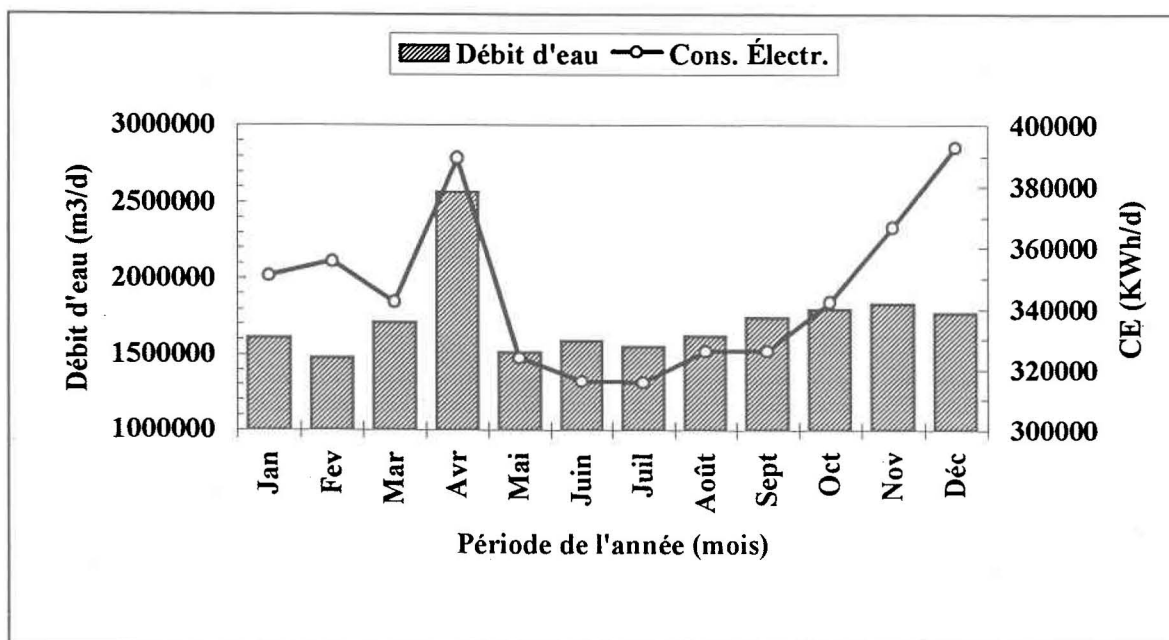


Figure 3 Profil mensuel du débit et de la consommation d'électricité de la station d'épuration de la CUM

Au niveau des stations d'épuration du Québec, on peut également noter une forte variabilité de la consommation énergétique hydraulique et épuratoire en fonction de la charge hydraulique, ce qui influe grandement sur les interventions à réaliser au niveau du choix des MEEE dans le cadre d'un programme d'efficacité énergétique (voir Figure 4 pour la relation entre la CEH et le débit).

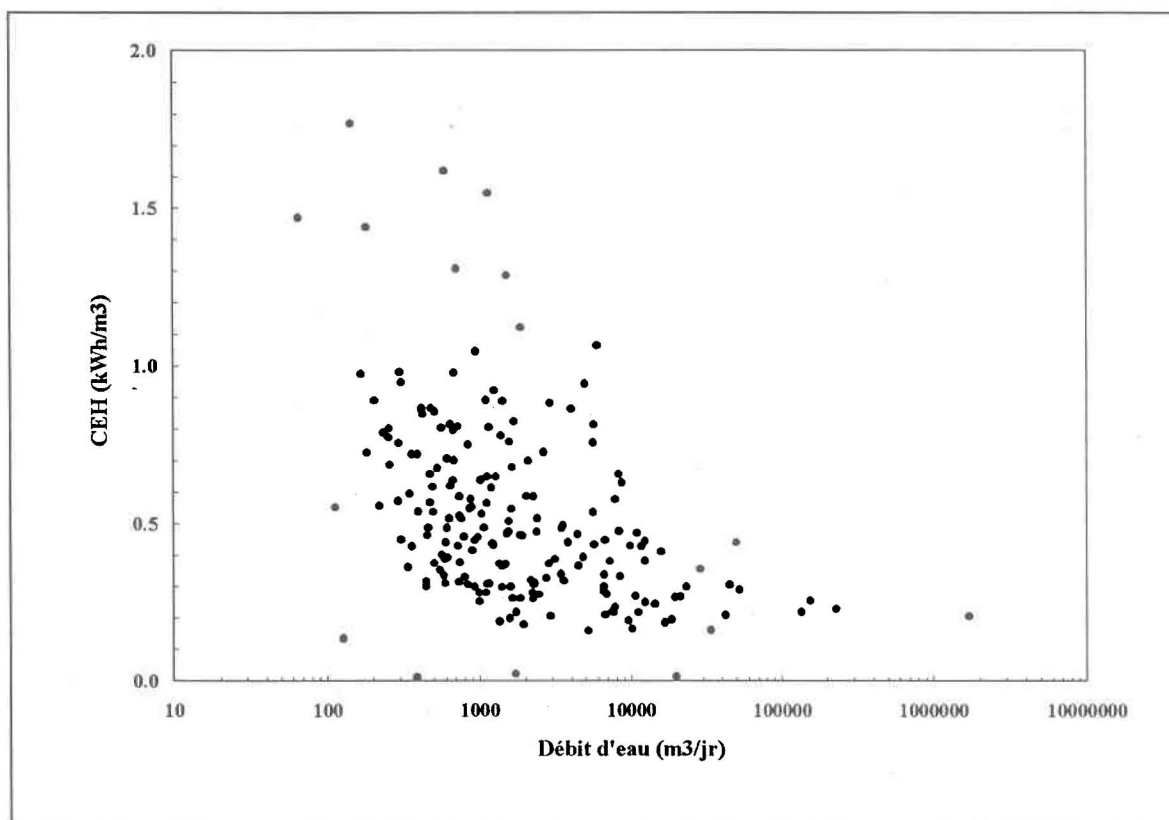


Figure 4 Variation de la consommation énergétique hydraulique (CEH) des stations québécoises en fonction de la charge hydraulique

Par contre, dans la figure 5, bien que des différences significatives soient observées entre les valeurs de CEH des diverses stations d'épuration, une bonne corrélation ($r^2 = 0.813$) est mesurée pour l'ensemble des 196 stations d'épuration en ce qui concerne la consommation d'électricité (CE) en fonction du débit hydraulique (DH). La relation mathématique suivante est ainsi obtenue:

$$CE = 1.618 \times DH^{0.826} \quad (1)$$

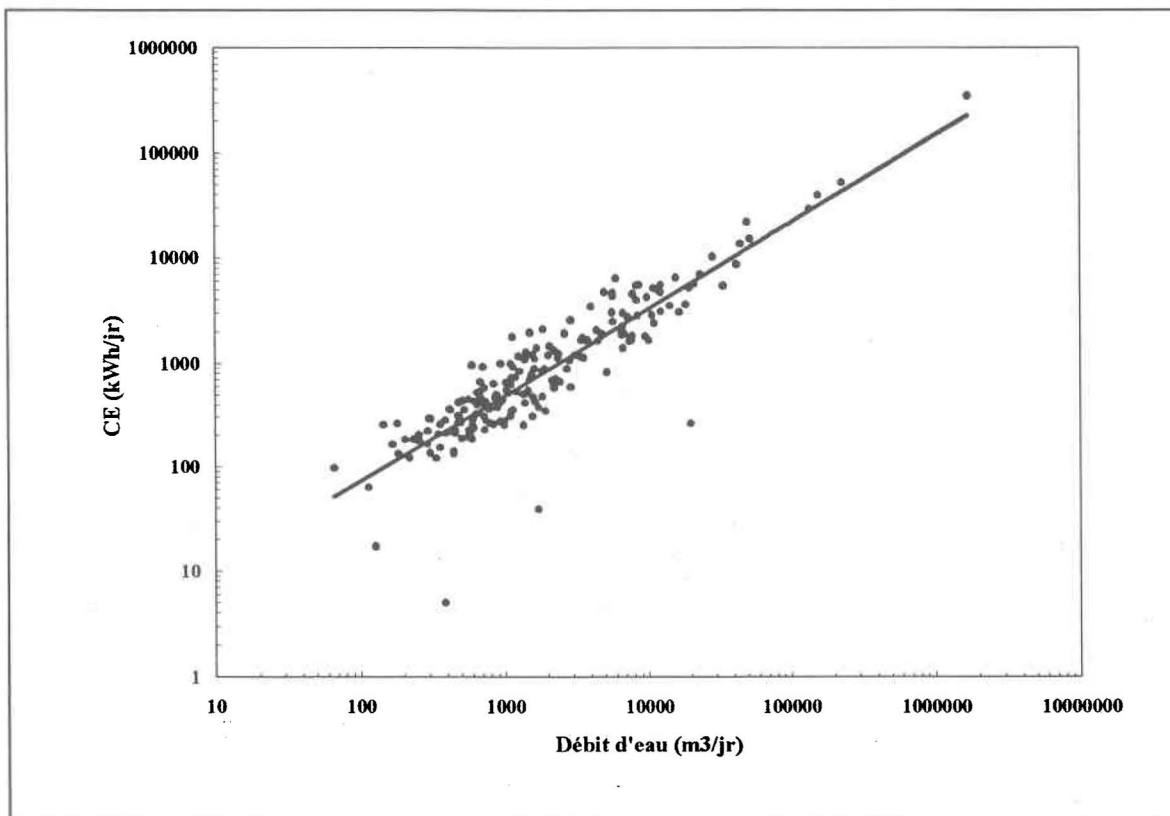


Figure 5 Profil global de la consommation d'électricité des stations québécoises en fonction de la charge hydraulique

Dans l'ensemble du parc de stations d'épuration des eaux usées municipales, on vient de remarquer que la diversité de technologies d'épuration en opération, la taille des stations faisant partie de ce parc, le profil de la demande et de la consommation d'électricité au niveau de chacune des étapes d'épuration d'une chaîne ainsi que la fluctuation de celle-ci constituent d'importants facteurs notamment pour l'intégration de différentes MEEE dans les systèmes d'épuration. Comment peut-on alors configurer efficacement l'intégration des MEEE dans les stations d'épuration de l'ensemble du parc afin d'optimiser le niveau de la demande et de la consommation d'électricité ?

La définition de la problématique de recherche intègre les principaux aspects à considérer dans un tel processus.

1.4 Définition de la problématique de recherche

Depuis la dernière décennie, les nouvelles directives et législations environnementales dans le secteur municipal ont eu pour effet immédiat entre autre, l'augmentation du nombre de stations d'épuration des eaux usées municipales. Selon les travaux de l'Electric Power Research Institute (Metcalf & Eddy Inc., 1993), on assiste également à une prolifération de procédés énergivores, comme par exemple, la nitrification/dénitrification au niveau du traitement secondaire. Ceci a un effet direct sur l'accroissement de la demande électrique dans ce secteur.

Les travaux de recherche et développement menés aux États-Unis, au Canada et en Europe (Anderson, 1980 ; Middlebrooks *et al.*, 1981; Clift et Andrews, 1981; Owen, 1982; Burton Environmental Engineering, RCG/Hagler, Bailly, Inc., Metcalf & Eddy Inc,

1993; EPRI, 1993, Ontario-Hydro, 1993), démontrent que la consommation d'électricité dans les systèmes d'épuration des eaux municipales est peu rationalisée. D'où la prolifération, au cours des deux dernières décennies, de différents programmes d'efficacité énergétique dans le secteur de l'eau.

Sur le plan des opérations d'épuration des eaux municipales particulièrement, les coûts imputables à la consommation d'électricité peuvent varier de 10 à plus de 30 % de coûts totaux des opérations (EPRI, 1992, 1993), ce qui représente une part importante dans les coûts des opérations dans les ouvrages d'assainissement municipaux.

Face à cette situation, comment peut-on alors améliorer l'efficacité énergétique électrique dans les stations d'épuration des eaux usées municipales ?

Selon les travaux en efficacité énergétique consultés, les technologies d'épuration des eaux municipales, le volume d'eau à traiter, la charge polluante contenue dans l'affluent, la période de consommation d'électricité, ainsi que la croissance du niveau de la demande d'électricité notée au cours de dernières années sont les principaux facteurs à considérer au niveau du choix, de la configuration et de l'intégration des MEEE dans les stations d'épuration des eaux usées municipales. La mise en place d'un mécanisme permettant l'intégration efficace des MEEE dans les systèmes d'épuration des eaux usées devient alors impératif pour arriver à palier les difficultés liées à la question de la rationalisation du niveau de la demande et de la consommation d'électricité dans ces systèmes.

Dans l'hypothèse que l'intégration des MEEE dans les stations d'épuration des eaux usées municipales contribuerait, d'une part à l'augmentation de l'utilisation de l'électricité dans

les systèmes d'épuration des eaux municipales, et d'autre part, à la diminution de la consommation électrique générale et particulièrement de la consommation de pointe, la question de recherche soulevée ici touche principalement le problème de la gestion de l'offre et de la demande de ces MEEE. Ceci débouche alors sur la question de l'intégration efficace des MEEE dans les chaînes d'épuration des eaux municipales. Il s'agit d'un problème de gestion qui comporte *deux principaux volets*. Le *premier volet* porte sur le choix des MEEE pouvant être utilisées avantageusement pour améliorer l'efficacité énergétique des stations d'épuration des eaux usées existantes. Le *second volet* porte sur l'intégration des connaissances sur ces MEEE dans les stations existantes de façon à guider le choix technologique dans la construction de nouvelles stations d'épuration efficace du point de vue énergétique.

Ainsi, sur la base de la complexité entourant le choix et l'intégration des MEEE dans les stations d'épuration des eaux usées municipales, la gestion de l'offre et de la demande des MEEE axée sur la multidimensionalité du problème demeure une avenue non explorée jusque-là.

Les approches classiques utilisées pour solutionner ce problème, proposent un calcul de minimisation des coûts de consommation basé sur l'étalement de la demande d'électricité ou le maintien d'une flexibilité structurelle dans la demande d'électricité (EPRI, 1992; Reid, Crowther & Partners, 1978; Hydro-Québec, 1993b). D'autres approches se concentrent sur la minimisation des coûts d'implantation ou d'exploitation de divers facteurs de production (Ton-That et Desjardins, 1995; Hydro-Québec, 1992; Kirkpatrick,

1991; Gasso *et al.*, 1989; Lessard, 1989; Pineau, 1985; Pineau *et al.*, 1985; Côté, 1981; Harris *et al.*, 1982; Tyteca *et al.*, 1977; Wang et Wang, 1979). Dans l'approche d'Hydro-Québec (1992), par exemple, on compare le coût d'adoption d'une MEEE à la fois pour Hydro-Québec et pour le consommateur, aux coûts évités en infrastructures nouvelles et en coûts d'opération de ces nouveaux équipements pour Hydro-Québec. Il existe aussi des stratégies plus générales axées sur l'innovation ou la substitution technologique réalisée à l'aide des analyses structurelles de remplacement (MacRae, 1989).

Généralement, les résultats de ces différentes approches sont insuffisants pour s'assurer que les MEEE pourront être efficacement implantées, ou encore qu'elles résulteront en un accroissement significatif de l'utilité de l'énergie électrique ou de l'efficacité des procédés de traitement. Par exemple, les comparaisons faites entre les différentes MEEE proposées dans un programme d'efficacité énergétique s'interprètent souvent en termes de préférence globale, alors qu'en pratique il est difficile de juger de l'acceptabilité ou de comparer les MEEE entre elles sur la base d'un critère unique.

L'approche multicritère d'aide à la décision peut palier à cette difficulté; il s'agit d'une démarche qui compare entre elles les diverses solutions à un problème en intégrant l'ensemble des facteurs qui interviennent dans la décision, même si ceux-ci sont conflictuels ou encore difficilement comparables entre eux.

Dans le cas de cette étude, le mécanisme de gestion de l'offre et de la demande des MEEE proposé tient compte de la double rationalité en présence, à savoir : celle du producteur d'électricité et celle du consommateur, sans oublier l'obligation de respecter les normes

environnementales et les critères de performance nécessitant la prise en compte des facteurs intrinsèques au fonctionnement des ouvrages d'assainissement des eaux usées municipales.

De cette manière, pour le producteur d'électricité, le choix d'offrir une MEEE sur le marché repose sur sa capacité de contribuer de façon significative à la rationalisation de ses systèmes de production et de distribution, le tout étant destiné à maximiser ses profits, à minimiser ses coûts de production (internes et externes) et à planifier ses investissements à court et moyen termes en vue d'équilibrer ses capacités de produire à la demande réelle l'électricité⁷, tout en s'assurant que toutes les municipalités sont traitées de manière équitable en regard des incitatifs et des règles lui permettant de procéder à une transaction.

Pour le consommateur (les municipalités), la décision de procéder à une transaction, c'est-à-dire à l'adoption d'une MEEE, repose sur l'évaluation de l'apport (et le surplus d'apport) rattaché à l'acquisition de celle-ci telles : la contribution financière de l'offreur de la MEEE, l'assurance de réaliser le projet avec un « pay-back⁸ » court, la réduction des coûts d'exploitation et de maintenance (notamment la facture d'électricité, le coût des produits chimiques, des services, etc.) et la possibilité de rencontrer les normes de rejets, ou encore d'améliorer la performance des équipements. De plus, la décision de procéder à une transaction fait partie intégrante d'une rationalité électoraliste des élus (le cas

⁷ À ce niveau, on doit tenir compte des potentiels technique, technico-économique et commercial de diverses mesures envisagées.

⁸ Période de remboursement de l'investissement.

échéant), ces derniers devant tenir compte de plusieurs facteurs tels l'équité fiscale, la transparence administrative, le lobby des groupes de pression, la réglementation municipale, ainsi que de nombreux facteurs touchant l'économie locale tels les retombées économiques, ainsi que les facteurs liés aux risques technologiques encourus dans les décisions envisageables. Parvenir à mettre en place un mécanisme qui intégrerait cette double rationalité dans le processus décisionnel équivaldrait à apporter les éléments de solution à la problématique de recherche.

Ainsi, sur la base de ces considérations, le principal objectif poursuivi par cette thèse est d'élaborer un mécanisme d'aide à la décision destiné d'une part à procéder au choix des MEEE susceptibles soit d'augmenter l'utilité de l'électricité, soit de minimiser la consommation d'électricité. D'autre part ce mécanisme devrait également résoudre le problème de la gestion de l'intégration de ces MEEE dans les systèmes d'épuration des eaux usées municipales existantes. De cette manière, l'on obtiendrait l'information pouvant guider le choix technologique dans la construction de nouvelles stations d'épuration efficaces du point de vue énergétique.

Avant la description du mécanisme d'aide à la décision proprement-dit, nous présentons avant tout les considérations théoriques concernant principalement le concept de l'efficacité énergétique dans le secteur de l'eau. Elles sont utiles au processus de modélisation, lorsqu'il s'agit de prendre en compte la multidimensionalité du problème posé dans l'offre et la demande des MEEE. C'est l'objet du deuxième chapitre de la thèse.

CHAPITRE 2

L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DANS LE SECTEUR DE L'EAU

Le premier chapitre vient de montrer que le niveau de la demande et de la consommation d'électricité dans les systèmes d'épuration des eaux usées municipales dépendent essentiellement de la technologie d'épuration utilisée, de la fluctuation du débit et de la charge polluante dans l'affluent à traiter, ainsi que des cycles horaire, journalier, hebdomadaire et mensuel au cours d'une saison. La variabilité de ces paramètres techniques, environnementaux et temporels influe sur le niveau de la demande et de la consommation d'électricité dans les systèmes concernés. Toute action visant à augmenter l'utilité de l'énergie électrique dans ses systèmes devra nécessairement tenir compte de ces aspects.

Quelles sont les principales considérations théoriques du processus de l'efficacité énergétique dans le secteur de l'eau susceptibles d'apporter des réponses au problème posé ?

2.1 Théorie de l'efficacité énergétique dans le secteur de l'eau

Dans le secteur de l'eau, le niveau de la consommation électrique procède, d'une part, par de grands programmes de conservation des ressources naturelles mis en place progressivement au cours des vingt dernières années par les gouvernements et d'autre part, par des efforts des producteurs et fournisseurs d'électricité au niveau de la planification et

du contrôle de la demande d'électricité dans un contexte de contingentement des sources de production.

L'inefficacité dans l'utilisation d'électricité au niveau de ces systèmes, l'accroissement du nombre et de la capacité des stations d'épuration, la présence de procédés plus énergivores sont les prémisses de la mise en place de quelques programmes d'efficacité énergétique électrique un peu partout⁹ (Burton Environmental Engineering, RCG/Hagler, Bailly, Inc., Metcalf & Eddy Inc., 1993; Anderson, 1980; EPRI, 1992; Middlebrooks *et al.*, 1981; Owen, 1982; Ontario-Hydro, 1993; Sasseville *et al.*, 1994).

Quels sont les aspects les plus propices à considérer ?

Sur le plan théorique, il est indispensable d'analyser le lien causes à effets entre un programme d'efficacité énergétique électrique et les aspects portant sur les efficacités économiques, politiques, sociales, etc., concernant l'utilisation des ressources énergétiques dans le secteur de l'eau tels que : la protection de l'environnement, le développement technologique, le marché de l'efficacité énergétique, les ressources humaines, l'ergonomie, le marché politique, l'équité et le prix à la consommation (Sasseville *et al.*, 1994; Batchelor *et al.*, 1991; Brooks, 1988; Holdren, 1987; Crowley *et al.*, 1986; Brockton, 1987; Foell,

⁹ Les programmes d'efficacité énergétique électriques destinés au secteur de l'eau les plus en vue sont ceux d'Electric Power Research Institute (EPRI), en collaboration avec l'American Water Works Association Research Foundation (AWWARF) et le Water Environment Research Fondation (WERF), d'Ontario-Hydro, d'Hydro-Québec et d'Hydro-Alberta (voir, Sasseville *et al.*, 1994).

1979; Coomber et Biswos, 1972; Dasgupta et Pearce, 1972; Fisher *et al.*, 1972; Bohm, 1971).

2.1.1 Concept de l'efficacité économique concernant l'utilisation des ressources énergétiques

Le concept de l'efficacité économique dans la production et l'utilisation des ressources énergétiques, et ses implications théoriques, sont considérés ici dans le sens d'une répartition optimale, si possible, des coûts de production et des bénéfices que l'on peut obtenir de cette ressource. Dans cette perspective, l'optimum est atteint, pour une période donnée, quand le prix de la ressource reflète véritablement la totalité des coûts internes (coûts d'immobilisations et coûts d'exploitation et de maintenance) et externes (dommage à l'environnement) et lorsque le prix est établi en regard du coût marginal de production.

Cette considération soulève alors des questions, par exemple, sur les systèmes de tarification de l'électricité versus les coûts de production et les externalités, sur l'efficacité des systèmes de production et de consommation d'électricité, ceci débouchant directement sur la problématique de gestion de la demande d'électricité (Barbet, 1983; Bernard, 1980; Lemelin, 1984; Monnier, 1983; Turvey, 1966; Turvey et Anderson, 1977). Cependant, il faut noter ici que Hydro-Québec, par exemple, a le mandat de fournir l'électricité au plus bas coût possible. La question des externalités environnementales, sociales et économiques dépasse le cadre de la société d'état. C'est un point de vue de société, qui n'est pas abordé ici de manière explicite. Dans le cadre de cette thèse, nous nous limitons à l'analyse des modules de décision ou de trois rationalités définies : celles de l'offreur, Hydro-Québec; du consommateur, les municipalités et les contraintes environnementales comme moyen

efficace dans la mise en place d'un programme d'efficacité énergétique. Cette partie est décrite dans l'article « *Modélisation multicritère pour l'amélioration de l'efficacité énergétique électrique dans les stations d'épuration des usées municipales* » (voir annexe 5).

En ce qui concerne la tarification, Hydro-Québec, comme toutes les compagnies d'électricité du monde, vend l'électricité au coût historique moyen à leur clientèle régulière. La tarification marginale n'est susceptible d'être utilisée que pour des marchés spécifiques comme le marché d'exportation. 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 d'électricité, le producteur d'électricité tente par des mesures d'efficacité énergétique électrique, de minimiser la consommation générale et la consommation de pointe, les coûts de production, ainsi que de planifier les investissements à moyen terme dans une perspective de développement durable. C'est l'idée maîtresse véhiculée dans les travaux sur l'économie d'énergie de Berthomieu (1968), de Turvey et Anderson (1977), de Barbet (1982), de Percebois (1989), de Bernard (1980, 1994) et de Gouja (1993).

Selon Bernard (1994) si la société d'État (Hydro-Québec) 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 payé, 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. Normalement, 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 (Bernard, 1994; Gouja, 1993; Hydro-Québec, 1993a). Dans ce contexte, l'objectif poursuivi par Hydro-Québec est de minimiser ses coûts d'opération. Pour réaliser cet objectif, la société d'état possède un portefeuille de ressources basé sur l'hydroélectricité, le thermique ou la gestion de la demande qui inclut les négawatts¹⁰. Tout en tenant compte des contraintes de demande et de production, des contraintes financières et des risques afférents, la filière de production qui sera la moins chère sera celle choisie.

Dans le cas spécifique des industries de l'eau, les travaux portant sur les considérations théoriques en efficacité économique dans l'utilisation de l'électricité sont peu rares. Cependant, il en existe quelques uns touchant indirectement ce secteur et qui portent sur les évaluations des aspects environnementaux de certaines activités économiques (Dasgupta et Pearce, 1972; Dorfman et Dorfman, 1972; Coomber et Biswos, 1972; Bishop et *al.*, 1983; Harris, 1984).

Les travaux portant sur l'économie de l'énergie en général (Boiteux, 1956; Berthomieu, 1968; Percebois, 1989; Gouja, 1993; Barbet, 1983; Hohmeyer, 1988), montrent que si les mécanismes de marché étaient parfaitement opérant, l'allocation des ressources serait optimale sur le plan de la production, de la distribution et de la consommation de certaines

¹⁰ terme défini par les écologistes, correspond à la notion de la décroissance uniforme de la charge (planification stratégique en anglais).

formes d'énergie dont l'électricité. Cette allocation des ressources énergétiques traduirait un niveau optimal où, en tout temps, se consomme la quantité d'électricité requise pour produire un maximum de bien-être. Malheureusement, on observe facilement qu'en pratique, les systèmes de consommation sont loin d'atteindre cet optimum, poussant ainsi les opérateurs économiques à inciter les consommateurs à une meilleure efficacité dans l'usage de l'électricité. Cet état de chose réduit ainsi la pression sur la demande d'énergie, ainsi que les tendances aux augmentations du coût de l'énergie et du gaspillage des ressources naturelles.

Les travaux de Bohm (1971), Pearce (1971), Barbet (1983), Lemelin (1984), Percebois (1989) au cours de dernières décennies montrent que l'efficacité économique des ressources énergétiques est un concept qui consiste à utiliser ces ressources, souvent limitées, là où elles ont le plus de valeur pour la société. La valeur d'une unité de ressource dans une utilisation donnée étant la valeur de ce que permet de produire la toute dernière unité de la ressource affectée à cette utilisation. À l'optimum, chaque ressource doit être répartie de telle façon que la dernière unité affectée à chacune des utilisations possibles ait la même valeur que dans toute autre utilisation. Ainsi, utiliser efficacement l'énergie, c'est l'utiliser à bon escient, sans la gaspiller, en diminuant les besoins associés aux activités courantes et en choisissant les technologies qui conviennent le mieux aux activités nouvelles. On retrouve donc dans cette notion, le concept d'économie d'énergie destinée à rationaliser les besoins actuels, mais aussi l'idée d'utiliser rationnellement une énergie qui répond aux besoins de croissance et de développement.

Pour contrer cette tendance à la surutilisation des ressources énergétiques, les producteurs de l'électricité, souvent assistés des autorités législatives, mettent en place des programmes d'efficacité énergétique. Dans ce sens, des mesures concernant la production, le transport et la distribution d'électricité sont susceptibles de contribuer à une utilisation efficace de l'électricité.

Un des volets de ce programme global est le programme d'efficacité énergétique électrique s'appliquant directement au niveau de la demande, appelé aussi programme de gestion de la demande. Théoriquement (Percebois, 1989), c'est au niveau de la demande que l'efficacité énergétique électrique est à la fois plus prometteuse et peut-être plus complexe à opérationnaliser. Au stade de la consommation, l'efficacité énergétique électrique est du ressort de l'acteur final du circuit. Elle fait intervenir des problèmes d'information, de sensibilisation, de financement et vise une multitude d'équipements consommateurs d'électricité, sans perdre de vue le comportement des utilisateurs.

Plusieurs questions peuvent alors être soulevées lorsqu'on aborde la question d'un programme d'efficacité énergétique. Il y a tout d'abord la question de la définition du concept, de la catégorisation, de la structuration, des objectifs poursuivis et des visées spatio-temporelles de chaque programme mis en place. La section suivante porte justement sur ce qu'est un programme d'efficacité énergétique.

2.1.2 Programme d'efficacité énergétique

Selon MacRae (1989), un programme d'efficacité énergétique réfère à un ensemble de mesures techniques, administratives et financières, mis sur pied par le(s) fournisseur(s) d'énergie pour permettre d'altérer le volume et le patron de la demande d'énergie consommée dans le but, d'une part, de maximiser l'efficacité de la production d'énergie et la performance du système de distribution et, d'autre part, de rationaliser les systèmes de consommation, de façon à minimiser les pertes, et le cas échéant, de réduire la consommation à un niveau acceptable. La majorité des programmes d'efficacité énergétique interviennent dans la rationalité des consommateurs de façon à orienter leur choix vers des équipements, des technologies ou des activités minimisateurs de la consommation d'énergie. Certains auteurs y incluent aussi des programmes de persuasion morale, d'audit énergétique, de tarification et de recherche et développement (EPRI, 1992; Hydro-Québec, 1993a; MacRae, 1989).

Les programmes d'efficacité énergétique peuvent aussi viser à remplacer certaines technologies traditionnelles par des technologies émergentes dont les électrotechnologies, ceci pouvant éventuellement résulter en une augmentation de la demande et une certaine maîtrise par les fournisseurs de leur part de marché (Burton Env. & Eddy Inc., 1993; Young et Koopman, 1991; Ouellette *et al.*, 1990; EPRI, 1984; Reid et Culshaw, 1984; Hydro-Québec, 1985).

Selon Baker et Battle (1992), la conception, le développement et la réalisation des programmes d'efficacité énergétique sont souvent focalisés sur la croissance stratégique de la charge, la conservation stratégique, la gestion de la charge et la configuration

variable de la charge. Ces considérations touchent directement l'étalement de la demande, l'équilibre entre la consommation et la production d'électricité, la croissance de la demande, et la flexibilité structurelle de la demande, tant au plan de la consommation d'énergie qu'à celui de la demande de puissance.

En gestion de la demande, on peut définir six objectifs : écrêtement de; remplissage des périodes creuses ou égalisation des périodes creuses; étalement de la période de pointe; stimulation de charge autant en pointe que hors pointe pour augmenter les profits; décroissance uniforme de la charge et déplacement de la charge. Cependant lorsqu'il s'agit de la configuration variable de la charge, un des aspects le plus importants dans un programme d'efficacité énergétique électrique, trois principaux objectifs sont poursuivis. Il s'agit de l'écrêtage des pics, le remplissage des périodes creuses et l'étalement de la période de pointe¹¹ (Baker et Battle, 1992).

La mise en place d'un programme d'efficacité énergétique touche également des considérations d'ordre environnementale, d'où le lien entre celui-ci et la protection de

¹¹ Écrêtage des pics (*Peak clipping*): vise une réduction de la charge en période de pointe se faisant par un contrôle direct. Les techniques utilisées consistent à diminuer la charge nécessaire au fonctionnement de certains équipements électriques. Il peut s'agir aussi de restreindre l'utilisation d'autres équipements durant les périodes de pointe.

Remplissage des périodes creuses (*Valley filling*). Cette stratégie de gestion de la consommation d'électricité consiste à orienter certains marchés de consommation de manière à ce qu'ils utilisent la charge disponible aux périodes creuses. Cela permet de réduire le coût moyen d'électricité pour tous les consommateurs, puisqu'on améliore le rapport entre la demande moyenne d'électricité et la demande maximale.

Étalement de la période de pointe (*Load shifting*): cette stratégie consiste à transférer la charge de pointe vers les périodes creuses sans nécessairement modifier la consommation totale d'électricité.

l'environnement dans une perspective de développement durable. C'est l'objet de la section suivante.

2.2 Lien entre le programme d'efficacité énergétique électrique et la protection de l'environnement

L'un des buts poursuivis par les nouvelles stratégies de mise en place de programmes d'efficacité énergétique visant les grands systèmes de production et de consommation est de contribuer à protéger et à respecter l'environnement dans une perspective de "développement durable". Le concept de développement durable suppose d'abord qu'il y ait développement et croissance économique, en privilégiant cependant les politiques qui favorisent le recours aux solutions de moindre impact environnemental. En mettant l'emphase sur une efficacité accrue dans l'utilisation de l'énergie, il y aura des impacts multiples sur les équilibres environnementaux, permettant une amélioration significative par rapport à une situation sans économies d'énergie (Bourbonnais, 1992; Foell, 1979; Bernard, 1992; Brockton, 1987; Hydro-Québec, 1992; Bardera et McConnel, 1990).

Le projet d'efficacité énergétique d'Hydro-Québec (Hydro-Québec, 1992), a été lancé pour diminuer la croissance de la demande québécoise d'électricité qui peut avoir plusieurs répercussions économiques et environnementales. En effet, la croissance de la demande d'électricité a une incidence sur la protection de l'environnement, puisque, pour répondre à la hausse de la demande d'électricité, le producteur d'électricité est souvent obligé de construire d'autres installations de production d'électricité dont les plus plausibles économiquement sont les barrages hydro-électriques. Selon Bernard (1992), les préoccupations les plus pressantes à l'égard de la protection de l'environnement réduisent

la flexibilité associée à la réponse traditionnelle pour accommoder une hausse prévue de la demande d'électricité, à savoir la construction d'équipements de production afin de satisfaire la demande anticipée. Les délais qui précèdent la mise en place de certains aspects d'un programme d'efficacité énergétique et la baisse permanente anticipée de la croissance de la demande sont les deux principales caractéristiques positives d'un tel programme sur le plan environnemental.

En effet, l'incidence de la construction des barrages hydro-électriques sur la qualité de l'environnement ou mieux sur la qualité de la ressource eau ont fait l'objet de plusieurs études (Foell, 1979; Plan Vert du Canada, 1991). Le Plan vert du Canada (1991) présente quelques effets des barrages et des réservoirs sur les habitats naturels. On y souligne notamment que la retenue d'énormes volumes d'eau par les barrages hydro-électriques entraîne la réduction en eaux courantes des habitats des plantes et des animaux, et dans la vallée, l'inondation de terres précieuses pour l'agriculture et pour les espèces sauvages. L'étude signale aussi une augmentation de la concentration de mercure dans les tissus des organismes aquatiques et terrestres des secteurs inondés et des environs.

Dans cette perspective, un programme d'efficacité énergétique visant une diminution de la demande d'électricité contribuerait donc à une réduction de nouvelles installations hydro-électriques et protégerait l'environnement.

En plus du lien avec l'environnement, la section suivante décrit les attaches possibles d'un programme d'efficacité énergétique avec les autres assises qui ont trait au marché de l'efficacité énergétique, au développement technologique (substitution technologique et

innovation technologique), à l'intervention de l'état en rapport avec la sécurité énergétique et le concept de l'équité.

2.3 Lien entre le programme d'efficacité énergétique électrique et les aspects portant sur le développement technologique, le marché, les ressources humaines et l'ergonomie

Théoriquement, dans la mise en place d'un programme d'efficacité énergétique électrique, le développement technologique (substitution technologique ou innovation technologique) occupe une place importante dans la mesure où plusieurs interventions ayant trait à l'adoption de nouvelles idées, de nouveaux procédés de traitement ou l'amélioration des pratiques et des procédés en place, touchent directement ou indirectement à la technologie (Brockton, 1987; Burton Env. et Eddy Inc., 1993; Eckenfelder, 1982; EPRI, 1993; Roy, 1990; Sasseville, 1986; Brooks, 1988, Anonyme, 1976; Klemetson et Grenney, 1976; Holdren, 1987; Hydro-Québec, 1992; Crowley *et al.*, 1986).

Selon Brooks (1988), le progrès technique, qu'il provienne d'une amélioration graduelle des techniques existantes ou de l'introduction d'un nouveau procédé, permet généralement de faire plus avec moins, c'est-à-dire à accroître l'efficacité des systèmes de production en place. C'est en quelque sorte, ce que vise un quelconque programme d'efficacité énergétique.

Ainsi, comme le confirme les travaux de USEPA (1980) et de Wesner *et al.* (1978), les nouveaux créneaux de l'innovation technologique en contrôle de la pollution doivent s'orienter vers la récupération des ressources (matières premières), des économies d'énergie, une plus grande efficacité des procédés industriels et une plus grande quantité

de déchets à éliminer. De leur côté, Charles River Associates (1977) soulignent que le développement de nouvelles technologies entraîne habituellement une hausse dans l'efficacité de l'effort de dépollution, en réduisant les coûts d'immobilisations, en augmentant la performance des procédés, en intégrant des stratégies modernes de gestion et en diminuant les coûts d'opérations (énergie, produits chimiques, etc.).

Dans la même articulation, l'efficacité énergétique en soit, peut constituer un puissant stimulant pour la recherche et le développement technologique, comme c'est le cas de plusieurs programmes développés en Europe. L'amélioration des rendements énergétiques est ainsi liée à la conception et à l'adaptation des technologies plus performantes (Metcalf & Eddy Inc., 1993b; EPRI, 1993).

L'incitation à l'innovation technologique, par exemple, la substitution par des MEEE au moyen des subventions, des prêts sans intérêts ou à intérêts réduits, est une stratégie de plus en plus utilisée par les producteurs et le pouvoir public pour permettre aux consommateurs d'y souscrire.

Outre le développement technologique, dans un marché libre, la mise en place d'un programme d'efficacité énergétique ne peut passer outre mesure quelques aspects du marché comme la concurrence entre diverses sources d'énergie, l'offre et la demande des MEEE et le cas échéant les électrotechnologies. Parmi les autres aspects figurent le marché des équipements à promouvoir, les modalités d'application touchant un ensemble des règles de promotion, d'implantation, d'application, de suivi, et d'évaluation des résultats socio-économiques comme les critères d'admissibilité des municipalités au

programme, les délais d'application en terme de temps réponse par exemple, l'encadrement technique, les services et les méthodes de diagnostics, les ressources humaines et les budgets disponibles pour la promotion, la satisfaction des clients, le taux de pénétration du programme, le développement et le transfert technologique, les données sur la situation de référence, les difficultés prévues dans l'implantation du programme et les moyens d'y faire face. Tous ces aspects ont un poids non négligeable au niveau de la constitution d'un ensemble des mesures à considérer dans l'implantation d'un programme de gestion de la demande de l'électricité.

De là, les aspects ayant trait à la main d'oeuvre, à l'intervention de l'État, à la sécurité énergétique, sont aussi importants dans la mise en place d'un programme d'efficacité énergétique (Brockton, 1987; Crandall, 1983; Gammill, 1993, Roy, 1990). En effet, tout changement technologique ne s'opère pas en vase clos. Non seulement les mesures mises en place modifient-elles la façon habituelle de faire, mais elles peuvent avoir des incidences sur la santé et la sécurité des travailleurs, sur les techniques de travail, sur leur acceptabilité par les opérateurs, etc. Sur ce plan, dans la mise en place d'un programme d'efficacité énergétique, il faut plus qu'implanter les équipements, on doit aussi instaurer un climat novateur, permettant de dynamiser une main-d'oeuvre qui devra en principe posséder des aptitudes professionnelles solides.

Si, dans la mise en place d'un programme d'efficacité énergétique, les aspects portant sur la protection de l'environnement, sur le développement technologique, sur le marché et ceux ayant trait à la santé et sécurité au travail doivent être pris en considération, il en va de même pour les facteurs politiques qui sont tout aussi importants. En effet, dans la

gestion des activités municipales, la dimension politique occupe une place déterminante dans la logique décisionnelle. L'ensemble du processus entourant la démarche est ce que l'on appelle communément *le marché politique*. La section suivante présente quelques considérations politiques dans la mise en place d'un programme d'efficacité énergétique dans le secteur du traitement et de l'épuration des eaux municipales.

2.4 Efficacité énergétique et le marché politique

Le contrôle impliquant l'État par le biais des politiques publiques et les procédures juridico-administratives nécessitent la participation de quelques acteurs dont les élus, les électeurs, les groupes de pression et les fonctionnaires. Ces acteurs interviennent sur un « marché politique » soit du côté de la demande de politiques (les électeurs, les groupes de pression), soit du côté de l'offre des politiques (les élus et les fonctionnaires) [Crowley (1991), Tullock (1978) et Trebilcock *et al.* (1982) dans Crowley, 1991]. Dans ce marché, les acteurs qui y évoluent ont un comportement utilitariste, c'est-à-dire qu'ils agissent rationnellement de manière à ce que les résultats attendus de leurs actions ou décisions soient conformes à leurs intérêts pécuniaires, idéologiques ou autres (Crowley, 1991).

De la même manière, les actions ou politiques publiques sont la résultante des échanges entre ces différents acteurs sur le marché politique. Elles sont, naturellement, fonction d'une part de ce que les acteurs veulent se procurer en se servant de cet instrument, et d'autre part, de ce qu'ils peuvent offrir, en vertu de leur rôle ou position de force sur le marché, en paiement pour ce qu'ils désirent. Ainsi, comme le soutient Goldberg (1974: dans Crowley, 1991), les acteurs tentent toujours de maximiser les bénéfices et de

minimiser les coûts inhérents à une intervention en regard de ce qu'ils perçoivent comme étant leurs intérêts et non pas nécessairement par rapport à ce que préconise la norme¹².

En ce qui concerne spécifiquement la question de l'implantation d'un programme d'efficacité énergétique, c'est surtout la rationalité électoraliste des élus municipaux qui primeront dans la mesure où ce sont eux, avec la participation des gestionnaires et ingénieurs des stations qui transigeront avec le producteur. Toute action ou décision sera donc conforme à leur visé de maintien au pouvoir, en tenant compte des autres acteurs et interactions du marché, comme les groupes de pression, les arrangements régionaux dans le cadre de la régie intermunicipale, la réglementation municipale (en faisant référence, par exemple, aux objectifs du programme d'assainissement des eaux du Québec), les retombées économiques et politiques, en rapport avec la contribution financière du producteur, le temps de retour sur l'investissement, les incitations à l'adoption des MEEE, des électrotechnologies, la réduction des coûts d'exploitation et de maintenance, etc.

On ne peut toutefois pas aussi perdre de vue que les municipalités ne sont pas de même taille, ce qui amène le problème d'équité entre les différentes municipalités dans le cas de la mise en place d'un programme d'efficacité énergétique. La section suivante élabore sur l'efficacité énergétique en fonction du concept de l'équité.

2.5 Efficacité énergétique et le concept d'équité

¹² *Le fonctionnement du marché politique a été bien analysé dans la thèse de Crowley (1991), où la rationalité de chaque acteur est bien cernée.*

La mise en place d'un programme d'efficacité énergétique doit aussi prendre en compte l'équité vis-à-vis les clients individuels, municipaux et industriels, et considérer la sécurité énergétique vis-à-vis les populations desservies. L'équité constitue en effet une notion morale à la base de l'intervention gouvernementale et contraint le comportement des sociétés d'état. Ainsi, selon Sasseville *et al.* (1994), l'équité est une assise importante sur laquelle s'échafaude les relations entre la clientèle et le fournisseur, et par rapport à laquelle les autorités de contrôle sont sensibles. Le programme d'efficacité énergétique doit en principe minimiser les effets délétères au bien-être des populations.

Le cas de grandes et de petites municipalités dans le Programme d'Assainissement des Eaux du Québec (P.A.E.Q.) est révélateur à ce sujet. En effet au Québec, près de 70 % de la consommation d'électricité des 289 stations d'épuration des eaux usées est concentrée dans trois stations : celles de la Communauté Urbaine de Montréal (C.U.M.), de la Communauté Urbaine de Québec (C.U.Q.) et de la Communauté Urbaine de l'Outaouais (C.U.O.). En limitant son programme d'efficacité énergétique à ces trois ouvrages majeurs, la société d'État pourrait limiter considérablement les coûts de son programme, tout en s'assurant d'un maximum de résultats, puisqu'il est clair que les retombées pour la société d'État ne sont aucunement comparables entre les grandes municipalités et les petites municipalités.

La question est alors celle de savoir comment la société d'État devra mettre en pratique ce concept d'équité dans le choix des MEEE à implanter et dans quelle municipalité ? Doit-on mettre en place les mesures qui intègrent toutes les municipalités peu importe les coûts

et les bénéfices pour la société d'État, 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? C'est à ce genre de questions auxquelles s'attaqueront le processus de gestion à mettre en place.

2.6 Relation entre le programme d'efficacité énergétique et le contrôle de prix à la consommation

Durant les dernières décennies, sous la pression des citoyens, plusieurs gouvernements ont accru considérablement les normes de performances sociales dans la mise en oeuvre et l'opération des installations de production d'électricité, ceci se traduisant par une augmentation sensible des coûts de développement de nouvelles installations de production, coûts devant éventuellement se traduire par une élévation du prix à la consommation.

Le contrôle des prix à la consommation, attribuable au gouvernement à cause de la nature et de l'importance de ce service pour la population, devient de plus en plus une composante essentielle de la sécurité énergétique, puisque les entreprises de production et de distribution d'électricité exercent un pouvoir de quasi monopole. Les gouvernements fixent ainsi les tarifs auprès des clientèles captives. Lorsqu'il s'agit d'une entreprise publique, ce contrôle déborde sur tous les segments de clientèle et s'avère un levier important dans la production du bien-être et la répartition des richesses.

Toutes ces considérations théoriques sont utilisées dans le processus de modélisation à proposer pour l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les systèmes d'épuration des eaux usées municipales. C'est l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE 3

LE MÉCANISME D'AIDE À LA DÉCISION

Comme souligné dans la définition de la problématique de recherche, le problème étudié dans cette thèse est celui de la gestion de l'offre et de la demande des mesures d'efficacité énergétique électrique susceptibles d'être intégrées dans les chaînes d'épuration des eaux usées municipales. Ceci permettrait soit d'augmenter l'utilité de l'électricité¹³, soit de diminuer le niveau de la consommation d'électricité dans les stations municipales. La solution proposée consiste à développer un mécanisme d'aide à la décision destiné d'une part au choix des MEEE appropriées et d'autre part à l'intégration de celles-ci dans les chaînes d'épuration des eaux usées municipales. Ce mécanisme d'aide à la décision est validé par les données provenant de stations d'épuration des eaux usées du Québec.

Ce chapitre porte sur : (1) les considérations théoriques et méthodologiques entourant le mécanisme d'aide à la décision, axées sur le choix de la méthode d'analyse et sur la modélisation multicritère d'aide à la décision; (2) la modélisation du cas d'application, axée ici sur l'analyse conjonctive et sur l'analyse multicritère d'aide à la décision. Cette dernière est utilisée comme outil d'analyse dans l'évaluation de la performance globale de

¹³ *L'utilité de l'électricité est prise ici dans le sens d'une consommation efficace de cette ressource.*

chaînes d'épuration modifiées et améliorées par l'intégration des MEEE retenues au niveau de l'analyse conjonctive.

3.1 Considérations théoriques et méthodologiques

Compte tenu de la nature multidimensionnelle du problème posé et contrairement aux approches d'optimisation unicritères et aux méthodes d'évaluations économiques qui simplifieraient ce problème en un seul axe de signification (valeur monétaire), l'approche de solution proposée dans cette thèse, tient compte simultanément des caractéristiques significatives du problème qui les rendent acceptables à l'offreur et au consommateur des MEEE. Il s'agit des facteurs du marché, des facteurs techniques, énergétiques, environnementaux, des aspects économiques et financiers, des facteurs humains, ergonomiques et socio-politiques.

La complexité du choix des MEEE due principalement à la multidimensionalité du problème, ainsi que leur intégration dans les chaînes d'épuration sur lesquels s'appuient la problématique de recherche, nous amènent à considérer la modélisation comme étant une méthodologie appropriée pour solutionner le problème.

La modélisation, à savoir, la construction, l'étude et l'utilisation de modèles, principalement de modèles mathématiques, fait apparaître les voies de la recherche, de la codification des résultats et a acquis au cours des ans un statut de méthode. Avec la pratique des modèles se manifestent certaines des conditions les plus actuelles de la construction du savoir : elle met en lumière le rôle principal des figures et des signes dans l'utilisation de la connaissance (Mouloud, 1980; Legay, 1973).

3.1.1 Méthode d'analyse

Selon Schärli (1985) et Brans (1982), un modèle peut être vu comme une image ou encore une simplification de la réalité où sont pris en compte un certain nombre de facteurs d'influence. Il permet d'obtenir des propositions de décisions. Si, pour un problème particulier, le modèle reflète correctement la réalité, les décisions proposées par celui-ci conviendront et seront susceptibles d'être retenues par le décideur.

La construction d'un modèle permettant de structurer un problème de décision nécessite trois démarches:

- l'identification des décisions possibles ou actions potentielles;
- la différenciation de ces actions en modélisant les préférences du décideur;
- l'opérationnalisation d'un processus d'investigation ou de traitement mathématique permettant de fournir des éléments de réponse au problème de décision.

Les modèles ainsi obtenus peuvent être de nature très différente selon les résultats de ces trois étapes.

La présente recherche s'inscrivant dans un champ de la gestion se limite à explorer les modèles les plus appropriés pour solutionner le problème posé. Le mécanisme de modélisation par excellence dans la problématique identifiée est la recherche opérationnelle. Selon Dantzig (1966), la plupart des problèmes nécessitant un

choix parmi plusieurs alternatives peuvent être considérés comme des problèmes de recherche opérationnelle. Selon le même auteur, la caractéristique de l'approche est le développement d'un modèle scientifique du système avec lequel on tente de prévoir et de comparer les résultats de diverses décisions ou stratégies. Le but est d'aider à déterminer une politique de manière "scientifique".

Il existe plusieurs méthodes et approches dans cette grande entité qu'est la recherche opérationnelle, permettant de modéliser toujours avec plus de précision et de réalisme les problèmes à résoudre. La mission que s'était fixée la Recherche Opérationnelle à ses origines fait d'elle une tâche interdisciplinaire. Cette interdisciplinarité dans le contexte unicritère (utilisation d'un seul critère de décision) est non seulement peu perceptible, mais elle tend à une unidisciplinarité qui explique généralement son adhésion à la théorie de l'optimisation qu'elle utilise d'ailleurs à outrance pour résoudre différents problèmes de gestion. L'optimisation unicritère est en réalité un parti pris qui se justifie en imposant à la modélisation mathématique trois contraintes fondamentales: globalité, stabilité et complète comparabilité transitive (Roy, 1977).

- *La contrainte de globalité* suppose la possibilité de dégager une action (une solution) unique comme la meilleure (optimale) parmi toutes les actions potentielles; en vertu de cette contrainte, chaque action englobe la totalité des aspects de la réalité en cause et deux actions sont par construction mutuellement exclusives.

- *La contrainte de stabilité* impose, quant à elle, que l'ensemble des actions soit trivial et ait un caractère exhaustif. Par trivialité, il faut comprendre que, quelle que soit l'action imaginable considérée, celle-ci ne peut être déclarée que potentielle ou impossible, d'où la nécessité de la définition d'une frontière précise entre les actions possibles et les actions impossibles.
- Quant à la complète *comparabilité transitive*, elle porte sur la restriction des possibilités du modélisateur face à un couple d'actions, à la préférence stricte de l'une des actions par rapport à l'autre ou à l'indifférence entre les deux, les deux relations complémentaires (préférence stricte et indifférence) étant obligatoirement transitives.

Dans les organisations humaines, les solutions envisageables pour un problème donné sont souvent caractérisées par la partialité, la complémentarité et rarement par la globalité des mesures possibles.

Sans s'inscrire en faux contre la théorie de l'optimisation, focalisée sur un seul critère de décision, elle a dans certaines conditions des limites qui sont d'ailleurs révélées par de récents développements de la Recherche Opérationnelle, notamment les travaux de Roy (1977). Selon Roy (1977), par exemple, le critère d'optimisation favorise un biais instrumental au niveau de la modélisation. En général, la multiplicité, l'hétérogénéité et l'enchevêtrement des conséquences des actions possibles rend difficile la complète comparabilité transitive sans leur agrégation en une fonction d'évaluation pouvant

simplifier leur comparaison. Selon lui, c'est là, dans la modélisation des conséquences des actions, une véritable procédure de restriction conçue en fonction de la performance des instruments, pouvant entraîner l'abandon de facteurs pourtant déterminants mais difficiles à modéliser compte tenu, sur ce plan, de la médiocrité des instruments. Ainsi, l'objectif poursuivi dans l'approche d'optimisation revient, selon Roy (1977), à privilégier un aspect de la réalité pour le traquer au travers d'une grandeur, d'une fonction, de façon à pouvoir affirmer que tout se passe ou devrait se passer comme si, le système recherchait spontanément un extrême de cette grandeur ou de cette fonction¹⁴. Ceci constitue pour nous une trop grande simplification pouvant avoir de conséquences graves au niveau de la solution proposée.

Pour palier ce genre de difficultés, plusieurs études ont été publiées au cours de deux dernières décennies en vue d'améliorer les diverses méthodes et approches en Recherche opérationnelle (Schärlig, 1985; Leavit, 1975; March, 1978; Roy, 1977; 1985; 1987; 1988). Ces diverses réflexions critiques ont permis de mieux cerner un aspect de la réalité autrefois négligé, à savoir, l'aspect multidimensionnel de plusieurs problèmes qui se posent dans les organisations humaines. Le constat de l'irréductibilité de toute la réalité humaine à des considérations monétaires explique l'avènement de ce nouveau paradigme complémentaire au paradigme monocritère, d'où l'émergence de méthodes multicritères en Recherche Opérationnelle. Dans celles-ci, les actions ou alternatives ne sont plus

¹⁴ Une critique plus détaillée de la théorie de l'optimisation est contenue dans la thèse de doctorat de Azondékon (1991).

évaluées par rapport à un critère (souvent une valeur monétaire) mais à l'aide de plusieurs critères par rapport auxquels le décisionnaire souhaite un optimum (Roy, 1987).

La présente recherche s'inscrit dans ce nouveau courant de réalisme qui a vu le jour au cours des dernières décennies. Elle se fixe comme but d'explorer l'aide multicritère à la décision, en utilisant l'analyse multicritère comme approche de résolution du problème posé.

3.1.2 Modélisation multicritère d'aide à la décision

3.1.2.1 Définition

La modélisation multicritère, connue aussi sous le nom d'approche multicritère d'aide à la décision, fournit à un(des) décideur(s) des outils lui (leur) permettant de progresser dans la résolution d'un problème de décision où plusieurs points de vue, souvent contradictoires, doivent être pris en compte. C'est en fait un ensemble de concepts, d'approches, de modèles et de méthodes en vue d'aider le(s) décideur(s) à décrire, évaluer, trier, ranger, sélectionner et rejeter des objets sur la base d'une évaluation par rapport à plusieurs critères ou attributs (Vincke, 1989). En gros, en modélisation multicritère, on cherche à raisonner les comparaisons entre plusieurs actions (solutions) en se fondant sur l'évaluation de ces actions selon plusieurs critères de décision. Ces critères tiennent compte de plusieurs axes de signification dont on estime qu'ils représentent les différents axes autour desquels toutes les parties prenantes justifient, transforment et argumentent leurs préférences dans le processus décisionnel.

3.1.2.2 Les méthodes multicritères

Les méthodes multicritères d'aide à la décision peuvent être divisées en deux grands groupes. Il s'agit des *méthodes avec attributs/critères multiples* destinées à comparer les actions d'un ensemble d'actions clairement explicitées. Dans ce groupe de méthodes, les spécialistes de l'analyse multicritère incluent : La théorie de l'utilité multiattribut (MAUT); les méthodes de surclassement et les méthodes interactives. La deuxième catégorie est constituée des *méthodes avec objectifs multiples*. Elles sont destinées à déterminer l'ensemble des actions efficaces ou à choisir une action qui est la meilleure dans un ensemble d'actions implicites (généralement infini) défini par des contraintes explicites (Vincke, 1989; Roy et Vincke, 1981; Roy, 1985, 1987; Fishburn, 1977; Keeney et Raiffa, 1976; Scharlig, 85). L'annexe 1 présente une brève description des méthodes multicritères d'aide à la décision.

Compte tenu d'une part, de la problématique de recherche soulevée, du nombre des alternatives (actions) potentielles clairement explicitées, et d'autre part, de la structure des données à traiter, principalement la nature non compensatoire de critères, la présence de performances des actions à l'égard des critères de nature ordinale et cardinale, nous avons porté le choix sur les méthodes avec attributs multiples. Dans ce groupe de méthodes, la modélisation multicritère consiste essentiellement à définir :

- *un ensemble admissible* composé des actions potentielles généralement noté *A* : cet ensemble est constitué des actions ou alternatives possibles à considérer dans le processus de décision¹⁵.
- *une famille (cohérente) de critères ou attributs* noté aussi *A* (pour Attributs) : les critères seront définis en tenant compte des intérêts du (des) décideur(s) et de divers intervenants directement ou indirectement impliqués dans le processus décisionnel. C'est une étape très importante dans ce type de modélisation, puisqu'elle déterminera le succès de l'ensemble du processus¹⁶.
- *appliquer une méthode d'agrégation multicritère* au niveau des performances de chaque action par rapport à chaque critère, de manière

¹⁵ *L'ensemble A peut être défini en extension ou en compréhension; il peut être stable, évolutif, globalisé ou encore fragmenté.*

¹⁶ *Selon Bouyssou (1984), un critère est un outil permettant de comparer des actions selon un certain axe de signification. Plus précisément, un critère est une fonction g allant de l'ensemble d'actions telle que l'on admette fonder de comparer deux actions a et b selon un axe de signification donné en se basant sur les nombres $g(a)$ et $g(b)$; $g(a)$ et $g(b)$ étant respectivement les évaluations des actions a et b suivant le critère g . Construire un critère suppose donc que l'on cerne un axe de signification lié à un point de vue selon lequel on souhaite faire des comparaisons. Pour Bouyssou (1989), déterminer ces axes est un problème important en analyse multicritère et les moyens pour y parvenir s'avèrent de premier ordre. Plusieurs chercheurs [Roy (1985), Keeney et Raiffa (1976) etc.], proposent des techniques pour définir ces axes de signification. Roy (1985), par exemple, préconise de définir les axes de signification à partir d'une analyse de l'ensemble des conséquences des actions en considérant diverses classes de conséquences, cette analyse tenant compte de la « culture » des divers concernés. La construction d'un critère dans une approche multicritère doit toujours nécessiter l'existence d'une exigence d'exhaustivité, de cohésion et de non-redondance.*

à pouvoir comparer localement et ensuite globalement les différentes actions en vue de solutionner le problème.

Dans ce formalisme, la méthode d'agrégation multicritère consiste en une agrégation de l'ensemble des performances des actions, en vue soit de choisir la meilleure action, soit de procéder au rangement des actions de la meilleure à la moins bonne, soit tout simplement de les structurer en vue de faciliter la prise de décision (Roy, 1988).

3.2 Modélisation du cas d'application

Dans l'étude de cas, le problème consiste formellement à modéliser les préférences du(des) décideur(s) à l'intérieur du modèle de type A.F.E. [**Actions, Critères, Évaluations**], tels que :

l'on considère un ensemble admissible :

$$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$$

où a_i , $i = 1, 2, \dots, n$: est une action (ou alternative);

une famille de critères noté :

$$F = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_k\}$$

avec c_j , $j = 1, 2, \dots, k$: correspond à un critère d'évaluation ;

et pour chaque action $a_i \in A$, on associe une évaluation $E_j(a_i)$ indiquant la performance (quantitative ou qualitative) obtenue par l'action a_i à l'égard du critère c_j ;

on a :

$$E = \{ E_j(a_i), i=1,2,\dots,n \text{ et } j=1,2,\dots,k \},$$

où E correspond à l'ensemble des performances de chaque action à l'égard de chaque critère.

Dans le processus de modélisation, dans le cas d'un vrai critère à maximiser, par exemple, l'action « a_i » est au moins aussi bonne que l'action « a_i^* », si et seulement si :

$g_k(a_i) \geq g_k(a_i^*)$; $g_k(a_i)$ et $g_k(a_i^*)$, étant respectivement les performances des actions a_i et a_i^* par rapport au critère k .

C'est à ce niveau qu'interviennent les différentes méthodes d'agrégation multicritères, lesquelles se distinguent surtout au niveau de la modélisation des préférences. L'annexe 2 donne quelques indications au sujet de la modélisation des préférences.

Deux types d'agrégation multicritère ont été utilisées pour solutionner le double problème posé : 1) une analyse conjonctive au niveau du premier volet du problème et 2) une analyse multicritère d'aide à la décision dans le deuxième volet du problème.

3.2.1 Analyse conjonctive

Au niveau de l'analyse conjonctive, appliquée au premier volet du problème, on considère un ensemble potentiel :

$$A = \{ a_1, a_2, a_3, \dots, a_n \}$$

où a_i (avec $i = 1, 2, \dots, n$) est une mesure d'efficacité énergétique électrique (MEEE) appartenant à une chaîne épuratoire (dans une station d'épuration) donnée; on considère également une famille de critères noté :

$$F = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_k\}$$

avec c_j , (avec $j = 1, 2, \dots, k$) correspondant à un critère d'acceptabilité.

Pour chaque action $a_i \in A$, on associe une évaluation $E_j(a_i)$ indiquant le pointage (i.e. la performance) obtenu par l'action a_i à l'égard du critère c_j . On obtient :

$$E = \{E_j(a_i), i = 1, 2, \dots, n \text{ et } j = 1, 2, \dots, k\},$$

où E correspond à l'ensemble des pointages (performances) de chacune des MEEE à l'égard de chaque critère d'acceptabilité.

Selon l'analyse conjonctive, une MEEE $a_i \in A$ sera retenue ($a_i \in A'$) $\Leftrightarrow E_j(a_i) \geq L_j, \forall j, L_j$ étant la condition minimale d'acceptabilité associée au critère j , et A' étant l'ensemble des MEEE pouvant être implantées.

3.2.2 Analyse multicritère d'aide à la décision

Au niveau de l'analyse multicritère appliquée au deuxième volet du problème : on considère un ensemble : $A = \{a_1, \dots, a_i, \dots, a_m\}$;

a_i , étant une chaîne d'épuration des eaux usées modifiée par l'ajout de MEEE.

On considère également une famille (cohérente) des critères notée :

$F' = \{g_1, \dots, g_k, \dots, g_n\}$; avec g_k correspondant au $k^{\text{ième}}$ critère d'évaluation.

Pour chaque action $a_i \in A$, on associe une quantité $g_k(a_i)$ indiquant la performance de l'évaluation (quantitative ou qualitative) de celle-ci par rapport au critère k .

On obtient ainsi une matrice « $E = [g_k(a_i)]$ » contenant les performances de chacune des actions à l'égard de chaque critère. En analyse multicritère, cette matrice est traitée à l'aide d'une méthode d'agrégation multicritère via le processus de modélisation des préférences.

3.2.2.1 Les situations de décision considérées

Trois situations de décision ont été analysées dans le cadre de cette étude de cas :

1. Les critères d'évaluation, ainsi que les performances de chaque action par rapport à chaque critère sont connus avec certitude. Elles sont donc déterministes. Dans ce cas, les variables d'importance (poids de critères, différents seuils) sont déterministes.
2. Les critères ont un caractère aléatoire et les performances de chaque action par rapport à chaque critère sont distributionnelles ou à intervalles. Dans ce cas on suppose que le décideur n'est pas capable d'évaluer avec certitude la performance de différentes actions par rapport aux critères.
3. Les évaluations de performances de chaque action par rapport à chaque

critère sont imprécises. Dans ce cas, certaines évaluations des actions par rapport aux critères ne peuvent pas être déterminées pour diverses raisons : manque d'information ou encore il existe un doute dans les résultats possibles, etc.

Divers travaux théoriques et appliqués portant sur la méthodologie multicritère d'aide à la décision, dont certains s'appliquent à des problèmes environnementaux et énergétiques ont proposé des solutions à ces différentes situations de décision (Zadeh, 1976, 1977; Blin, 1977; Jacquet-Lagrèze, 1977; Goicoechea, 1977; Orlovsky, 1978; Dendrou *et al.*, 1980; Freeling, 1980; Saaty, 1980; Cohon *et al.*, 1980; Teghem et Kunsch, 1985; Martel *et al.* 1986; D'Avignon et Vincke, 1988; Martel et Zaras, 1990; Slyadz et Borissov, 1988; Klir et Folger, 1988; Azondékon, 1991). La majorité des solutions proposées (via les méthodes d'agrégation) sont faites de manière isolée, c'est-à-dire, un traitement de ces situations de décision, cas par cas.

La modélisation de préférences dans le cas de la première situation de décision constitue un cas classique en analyse multicritère d'aide à la décision et a fait l'objet de plusieurs études et propositions de solutions (Vincke, 1989). Plusieurs problèmes dans le secteur de l'environnement et de l'énergie ont été résolus par l'approche du surclassement de synthèse de types PROMETHE, ELECTRE, etc., et par la théorie de l'utilité multiattribut (Briggs *et al.*, 1990; Barda *et al.*, 1990; Simos, 1990; Martel et Kibi, 1993; Cohon *et al.*, 1980; De Neuville et Keeney, 1978; Kibi *et al.*, 1994; Keeney et Nair, 1977; Hanson *et al.*, 1991; Anselin et Arias, 1983).

Briggs *et al.* (1990), par exemple, dans "*Nuclear Waste Management Application of Multicriteria*", ont utilisé la méthode PROMETHEE pour faire le choix de modes de gestion des déchets nucléaires. Dans "*Application of Multiobjective facility location model to power plant siting in a six-state region of U.S.A*" (Cohon *et al.*, 1980), une analyse multiobjectif a été utilisée pour localiser l'emplacement des sites de production d'électricité dans six états des États-Unis. L'application de la méthode PROMETHE dans le cas de l'évaluation technico-économique de différentes chaînes de traitement des eaux usées municipales et domestiques a été réalisée dans une autre étude (Kibi *et al.*, 1994).

Les deux dernières situations de décision font l'objet de plusieurs développements théoriques et appliqués dans la résolution de problèmes de gestion appliqués ou pas dans le secteur de l'environnement et de l'énergie au cours de deux dernières décennies. Les travaux les plus en vue sont ceux de Zadeh (1977); Goicoechea (1977); Blin (1977); Jacquet-Lagrèze (1977); Orlovsky (1978); Dendrou *et al.* (1980); Freeling (1980); Teghem et Kunsch (1985); Martel *et al.* (1986); Slowinski (1986); D'Avignon et Vincke (1988) et Martel et Zaras (1990), Slyadz et Borissov (1988), Klir et Folger (1988), Azondékon (1991), Rousseau et Martel (1994).

Parmi les travaux appliqués dans le secteur de l'environnement et de l'énergie, une modélisation multiobjectif stochastique a été utilisée comme outil d'analyse dans la planification des ressources naturelles (Goicoechea, 1977). Dans Teghem et Kunsch (1985), une modélisation multiobjectif en contexte non déterministe a été utilisée pour la planification des investissements dans le domaine énergétique. Slowinski (1986) avait fait

appel à la modélisation multicritère pour résoudre un problème de planification des systèmes d'approvisionnement en eau et d'épuration des affluents dans le cadre d'un développement urbain.

En ce qui concerne le développement des méthodes d'agrégation multicritère, Jacquet-Lagrèze (1977), par exemple, a résolu la question d'agrégation de l'évaluation de performances distributionnelles en calculant un degré de crédibilité pour chaque paire d'actions (a_i, a_j) , à partir de la construction d'une relation probabiliste de préférence $P_k(a_i, a_j)$ et d'une relation probabiliste d'indifférence $I_k(a_i, a_j)$ sur chaque critère e_k , telles que « $P_k(a_i, a_j) + P_k(a_j, a_i) + I_k(a_i, a_j) = 1$ ». Ces relations permettent d'aboutir au calcul du degré de crédibilité « $d(a_i, a_j) = \sum_k \Pi_k \{ [I_k(a_i, a_j) + \max [P_k(a_i, a_j) - P_k(a_j, a_i), 0] \}$ ». Cette relation est censurée par un seuil $s(\lambda)$. Le terme $\max [P_k(a_i, a_j) - P_k(a_j, a_i), 0]$ exprime le degré de crédibilité en la préférence stricte de a_i à a_j selon l'attribut e_k .

La définition d'un degré de surclassement distributionnel (S_{ij}) de a_j par a_i comme étant la somme des degrés de préférence de a_i par rapport à a_j pour tous les critères a été utilisée par D'Avignon et Vincke (1988). De cette manière :

$$S_{ij} = \sum_{k=1}^m H_{ij}^k$$

où H_{ij}^k représente le degré de préférence de a_i sur a_j avec la particularité que H_{ij}^k est une variable aléatoire, ce qui fait aussi de S_{ij} une variable aléatoire. En utilisant ces degrés de surclassement distributionnels, on peut calculer :

1) la force moyenne S_i d'une action a_i par rapport à toutes les autres actions a_j

$$S_i = \sum_{j \neq i} \sum_{k=1}^m H_{ij}^k / (n-1) = \sum_{k=1}^m \sum_{j \neq i} H_{ij}^k / (n-1) = \sum_{k=1}^m S_i^k$$

où S_i^k représente la force de a_i pour l'attribut e_k ;

2) la faiblesse W_i de l'action a_i par rapport à toutes les autres actions a_j restantes

$$W_i = \sum_{j \neq i} S_{ji} / (n-1) = \sum_{k=1}^m W_i^k$$

où W_i^k représente la faiblesse de a_i pour l'attribut e_k .

Avec les distributions de S_i et W_i , on peut construire la force distributionnelle et la faiblesse distributionnelle susceptible de conduire à un rangement final des actions.

Dendrou *et al.* (1980) considérant que l'on peut associer à chacune des actions des probabilités fixes pour une performance donnée selon chacun des critères, construisent un ordre linéaire partiel en établissant une analogie entre l'étude de la véracité des assertions « a_i au moins aussi bonne que a_j ($a_i S a_j$) » pour tout i, j et la procédure de test d'hypothèse en statistique. Ils associent à chaque paire d'actions (a_i, a_j) la probabilité $P_{ij} = P(a_i S a_j)$ indépendante des autres paires d'actions, mais dépendante de tous les attributs e_k . $\sum P_{ij} \neq 1$ et de ce fait la matrice $P = (P_{ij})$ n'est pas une matrice stochastique. Compte tenu de l'indépendance des critères : $P_{ij} = \sum_k P[a_i S a_j / \text{crit } e_k] \cdot P(\text{crit } e_k)$ et $P(\text{crit } e_k)$ est considérée comme la probabilité que le critère e_k soit décisif dans l'assertion $a_i S a_j$ et représente dans les faits le poids pouvant être assigné subjectivement à chaque critère. Partant des valeurs de $P(\text{crit } e_k)$ a priori, on peut trouver de manière itérative les valeurs a posteriori de $P(\text{crit } e_k)$ sur la base du théorème de Bayes :

$$P[\text{crit } e_k / a_i S a_j] = \frac{P[a_i S a_j / \text{crit } e_k] \cdot P(\text{crit } e_k)}{P_{ij}}$$

La comparaison de chaque action a_i à toutes les autres se mesure par la probabilité conjointe $\Gamma_i = P[a_i S a_1 \cap \dots \cap a_i S a_n]$, qui, compte tenu de l'indépendance entre les

événements (a_i, a_j) donne $\Gamma_i = \prod P_{ij}$ (pour $j \neq i$). Ceci permet de ranger les a_i ($i = 1, \dots, n$) dans un ordre décroissant correspondant aux Γ_i qu'on teste de manière inductive en procédant à la mesure de la validité de chaque hypothèse suivante :

$H_i = a_i \text{ S } a_1 \cap \dots \cap a_i \text{ S } a_n$, à l'aide du niveau de l'entropie inductive suivante :

$$S(H_i) = - \sum_i \Gamma_i \log (\Gamma_i) = \sum_{i, j \neq i} S_{ij}$$

où $S_{ij} = -P_{ij} \log P_{ij}$ est l'entropie inductive de l'hypothèse $H_{ij} = a_i \text{ S } a_j$ sur tous les critères e_k . En vertu de la loi de la décroissance de l'entropie, plus $S(H_i)$ est faible, plus forte est la confiance accordée au rangement Γ_i .

En analyse multicritère, l'imprécision peut aussi être modélisée à l'aide de la théorie des ensembles flous. C'est le cas de la méthode d'agrégation développée par Orlovsky (1978) et améliorée par Azondékon (1991). Dans ce type de modélisation, on définit sur chaque critère e_k , une relation binaire de préférence non stricte floue μ_k telle que : $\mu_k : A \times A \rightarrow [0,1]$ et qui, à toute paire d'actions (a_i, a_j) , on associe un nombre $\mu_k(a_i, a_j)$ interprété comme le degré auquel la préférence de a_i à a_j est établie. Dans la procédure de modélisation des préférences, étant donné $\mu_k(a_i, a_j)$ et $\mu_k(a_j, a_i)$, si l'on suppose que $\mu_k(a_i, a_j) \geq \mu_k(a_j, a_i)$, il est alors possible de construire deux relations floues correspondant à la relation de préférence donnée avec leurs fonctions d'appartenance respectives :

1. une relation d'indifférence floue (RIF) : elle part de la considération que si $\mu_k(a_i, a_j) \geq \mu_k(a_j, a_i)$ pour deux actions quelconques, alors a_i et a_j sont équivalentes (indifférentes) au degré $\mu_k(a_j, a_i)$, ceci permet de

définir la fonction d'appartenance μ_{ek} correspondant à la relation

d'indifférence floue : $\mu_{ek}(a_i, a_j) = \min\{ \mu_k(a_i, a_j), \mu_k(a_j, a_i) \}$

2. une relation de préférence stricte floue (RPSF) : elle part du fait que si $\mu_k(a_i, a_j) \geq \mu_k(a_j, a_i)$ pour deux actions quelconques, alors a_i est préférée strictement à a_j au degré $\mu_k(a_i, a_j) - \mu_k(a_j, a_i)$ ce qui permet aussi de définir sa fonction d'appartenance μ_{sk} telle que : $\mu_{sk}(a_i, a_j) = \mu_k(a_i, a_j) - \mu_k(a_j, a_i)$, si $\mu_k(a_i, a_j) \geq \mu_k(a_j, a_i)$ et 0 autrement.

Dans l'amélioration apportée par Azondékon (1991), l'auteur considère qu'en contexte multicritère, $\mu_{sk}(a_j, a_i)$ décrit, pour a_j fixé, l'ensemble des éléments $a_i \in A$, dominés strictement par a_j . La complémentaire de cet ensemble est l'ensemble $1 - \mu_{sk}(a_j, a_i)$ des éléments non strictement dominés par a_j . Au niveau du processus d'analyse, on détermine par la suite l'ensemble flou des éléments a_i non strictement dominés par aucun élément de A , noté $\mu_{NDk}(a_i)$. Sa fonction d'appartenance est :

$$\mu_{NDk}^{ND}(a_i) = \min_{a_j \in A} [1 - \mu_{sk}^s(a_j, a_i)] = 1 - \max_{a_j \in A} \mu_{sk}^s(a_j, a_i)$$

$\mu_{NDk}(a_i)$ symbolise le caractère non strictement dominé de l'action a_i . On calcule par la suite la « force » de l'action a_i sur les autres actions, exprimée globalement sur l'ensemble des critères, de la manière suivante : $\mu_m(a_i) = \min(\text{sur } k) \prod \mu_{NDk}(a_i)$. D'autre part, en prenant $\mu_{sk}(a_j, a_i)$ et en calculant l'union de tous les ensembles flous des éléments de a_i strictement dominés par a_j pour tous les a_j , on obtient pour cet ensemble flou muni de cette relation, la fonction d'appartenance ci-après :

$$\mu_k^D(a_i) = \max_{a_j \in A} \mu_k^S(a_j, a_i).$$

$\mu_k^D(a_i)$ symbolise le caractère strictement dominé de a_i . On suggère ici de prendre le degré maximal auquel le caractère strictement dominé de l'action a_i est vérifiée sur l'ensemble des critères, compte tenu de l'importance relative Π_k accordée à chacun d'eux à savoir : $\mu^M(a_i) = \min(\text{sur } k) \Pi_k \mu_k^D(a_i)$. $\mu^M(a_i)$ constitue alors la « faiblesse » de l'action a_i sur les autres actions, exprimée globalement sur l'ensemble des critères. À partir de ces forces et de ces faiblesses, on peut obtenir deux rangements des actions de A des meilleures aux pires :

1. le premier rangement se fait par ordre décroissant des forces , à savoir, pour deux actions a_i et a_j de A , si $\mu^m(a_i) > \mu^m(a_j)$ alors a_i est préférée par rapport à a_j ($a_i > a_j$).
2. le deuxième se fait par ordre croissant des faiblesses : pour deux actions a_i et a_j de A , si $\mu^M(a_i) < \mu^M(a_j)$ alors a_i est préférée à a_j ($a_i > a_j$).

Dans les deux rangements obtenus, il y a possibilité d'avoir d'ex-aequo. L'intersection de ces deux rangements donne un rangement final. D'autres détails sur cette procédure d'agrégation sont contenus dans Azondékon (1991).

3.2.2.2 La méthode d'agrégation multicritère utilisée

Contrairement aux méthodes d'agrégation multicritère utilisées dans ces différents travaux, c'est-à-dire, un traitement séparé de situations de décision considérées,

l'originalité de la méthode d'agrégation proposée dans cette thèse réside sur le fait que nous procédons à l'agrégation de différentes performances des actions (chaînes d'épuration améliorées) à l'égard de chaque critère, sur la base d'une seule matrice des performances contenant les trois situations de décision.

Compte tenu de la structure des données contenues dans le tableau multicritère obtenu (voir Kibi *et al.*, 1996), à savoir le caractère non compensatoire des critères, la présence de performances de nature ordinale et cardinale, déterministe, distributionnelle et à intervalle, la méthode d'agrégation multicritère préconisée est basée sur la construction et l'exploitation des relations de surclassement valuées utilisées dans ELECTRE III (Roy, 1978) et PROMETHEE II (Brans *et al.*, 1984) combinés dans une seule procédure (Dérot *et al.*(1994). Ce choix est dicté non seulement à cause de la structure particulière de données du tableau multicritère, mais également en fonction du réalisme de cette procédure d'agrégation multicritère dans l'articulation des préférences des décideurs qui se rapproche jusqu'à un certain point du principe de démocratie ou de consensus de plus en plus recherché pour solutionner de problèmes environnementaux.

En effet, au lieu d'utiliser, soit la modélisation de préférences de Jacquet-Lagèze (1977) sur des relations probabilistes de préférence et des relations probabilistes d'indifférence, soit la notion de degré de surclassement distributionnel de D'Avignon et Vincke (1988), soit le théorème de Bayes dans la construction de relations de surclassement (Dendrou *et al.*,1980), soit la théorie des ensembles flous (Orlovsky,1978 et Azondékon,1991), la procédure d'agrégation préconisée ici est basée sur la détermination d'un indice de

concordance global $C(a_i, a_j)$ et des indices de discordance à partir de seuils de préférence (p), d'indifférence (q) et de veto (v) (Derot *et al.*, 1994).

Les principaux paramètres du modèle sont les suivants :

- m = nombre d'actions ($a_i, i = 1, \dots, m$)
- n = nombre de critères ($g_k, k = 1, \dots, n$)
- M = matrice réelle de cardinalité $m \times n$ contenant les performances des actions par rapport aux critères;
- $Q_{[n]}$ = ensemble des réels de cardinalité n contenant les seuils d'indifférence et $q_k \in Q_{[n]}, k = 1, \dots, n$;
- $P_{[n]}$ = ensemble des réels de cardinalité n contenant les seuils de préférence et $p_k \in P_{[n]}, k = 1, \dots, n$;
- $V_{[n]}$ = ensemble des réels de cardinalité n contenant les seuils de veto et $v_k \in V_{[n]}, k = 1, \dots, n$.
- $W_{[n]}$ = ensemble des réels de cardinalité n contenant les coefficients d'importance relative des critères et $w_k \in W_{[n]}, k = 1, \dots, n$.
- $R_{[n]}$ = ensemble des réels de cardinalité n contenant l'étendue de l'échelle pour chaque critère et $\rho_k \in R_{[n]}, k = 1, \dots, n$;

Les relations suivantes doivent être vérifiées entre les seuils :

$$0 \leq q_k \leq p_k < v_k \leq \rho_k; k = 1, \dots, n, \text{ et les coefficients d'importance relative sont}$$

$$\text{normalisés, à savoir : } \sum_{k=1}^n w_k =$$

Les principales étapes du modèle sont la construction des relations de surclassement valuées et l'exploitation de ces relations de surclassement.

Construction des relations de surclassement valuées

Pour chaque couple d'actions (a_i, a_j), un indice global de concordance est calculé de la manière suivante :

$$c(a_i, a_j) = \sum_{k=1}^n w_k \delta_k(a_i, a_j)$$

où

$$\delta_k(a_i, a_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } -q_k \leq \Delta_k \\ \frac{\Delta_k + p_k}{p_k - q_k} & \text{si } -p_k < \Delta_k < -q_k \\ 0 & \text{si } \Delta_k \leq -p_k \end{cases}$$

et $\Delta_k = g_k(a_i) - g_k(a_j); g_k(a_i) \in M_{[m \times n]}; k = 1, \dots, n; i = 1, \dots, m$

Le $\delta_k(\cdot)$, variant de 0 à 1, mesure en quelque sorte les arguments en faveur de l'affirmation « a_i surclasse a_j ». Dans ce sens, lorsque la performance de a_i sur un critère est égale ou supérieure à a_j , on est alors en présence d'un critère concordant.

Pour tenir compte qu'il existe dans la procédure des critères à maximiser et d'autres à minimiser, deux variables sentinelles temporaires T et T* sont introduites dans les calculs pour effectuer le calcul des Δ_k si $\xi_k = 0$, c'est-à-dire que l'on est en présence d'un critère à minimiser, alors $T = a_j$ et $T^* = a_i$, tandis que si $\xi_k = 1$ (critère à maximiser) alors $T = a_i$ et $T^* = a_j$; ainsi :

$$\Delta_k(a_i, a_j) \equiv \Delta_k = \begin{cases} g_k(T) - g_k(T^*), & \text{si } \xi_k = 1 \\ g_k(T^*) - g_k(T), & \text{si } \xi_k = 0 \end{cases}$$

Pour chaque couple d'actions (a_i, a_j), et au niveau de chaque critère, un indice de disconcordance est calculé de la manière suivante;

$$D_k(a_i, a_j) = \begin{cases} 0 & \text{si } -p_k \leq \Delta_k \\ \frac{\Delta_k + p_k}{v_k - p_k} & \text{si } -v_k < \Delta_k < -p_k \\ 1 & \text{si } \Delta_k < -v_k \end{cases}$$

On prendra $D_k(a_i, a_j) = 0$ pour chaque paire d'actions lorsqu'il s'agit d'un « critère ordinal ».

Dans la modélisation, les évaluations manquantes sont prises dans le sens d'évaluations non pertinentes, ceci affectant ni positivement, ni négativement, une action. Dans ce sens, par exemple, si l'évaluation $g_k(a_i)$ est manquante, alors $\Delta_k(a_i, a) = \Delta_k(a, a_i) = 0$ pour toute $a_i \in A$, ce qui implique :

$$\delta_k(a_i, a) = \delta_k(a, a_i) = 1 \text{ et } D_k(a_i, a) = D_k(a, a_i) = 0$$

À partir de l'indice de concordance et des indices de discordance, on établit des degrés de surclassement $\sigma(a_i, a_j)$ entre chaque couple d'actions. Ces degrés de surclassement sont calculés comme suit (voir Rousseau et Martel, 1994) :

$$\sigma(a_i, a_j) = c(a_i, a_j) \cdot \prod_{k=1}^n [1 - (D_k(a_i, a_j))^3],$$

ceci conduisant à prendre en considération la discordance entre les évaluations, quelque en soit sa valeur.

Exploitation des relations de surclassement

L'exploitation des relations de surclassement consiste à faire la synthèse permettant de prendre une décision sur l'ensemble des évaluations. Pour avoir un classement des actions de la meilleure à la moins bonne, on exploite la notion des flux sortant et entrant de PROMETHEE (Brans *et al.*, 1984) de la manière suivante :

$$\sigma^{(+)}(a_i) = \sum_{a \in A} \sigma(a_i, a) \text{ et } \sigma^{(-)}(a_i) = \sum_{a \in A} \sigma(a, a_i)$$

De cette manière, on obtient un préordre total des actions à partir du bilan de flux comme dans PROMETHEE II : $\sigma(a_i) = \sigma^{+}(a_i) - \sigma^{-}(a_i)$.

Le classement de différentes chaînes épuratoires est réalisé à l'aide de ce modèle mathématique. Pour ce faire, les données sont traitées par un solveur, programmé en C⁺⁺, et utilisant le compilateur Microsoft Visual C⁺⁺ 1.0[®], ainsi que les classes Microsoft Foundation Classes[®] de l'environnement Windows (voir Derot *et al.*, 1994).

Dans le traitement des données, le solveur actionne tous les éléments de la matrice multicritère symbolisés par les paramètres du modèle ($m, n, M, Q_{[n]}, P_{[n]}, V_{[n]}, W_{[n]}$) et exécute les opérations mathématiques suivant l'ordre d'application du modèle multicritère.

Le résultat obtenu est un classement des actions de la meilleure à la moins bonne.

Le chapitre 4 présente les résultats d'application de ces deux types d'analyse dans le cas du problème posé dans la thèse.

CHAPITRE 4

LE CAS D'APPLICATION

4.1 Présentation de l'étude du cas

L'étude du cas concerne l'application de la modélisation multicritère d'aide à la décision à la gestion de l'offre et de la demande des MEEE destinées à l'amélioration de l'efficacité énergétique électrique dans six stations d'épuration du Québec. Les capacités de traitement (débit hydraulique) considérées dans chacune d'elles varient entre 8,000 m³/j et 30,000 m³/j, avec un débit hydraulique moyen de 20,220 m³/j.

Comme défini auparavant, deux volets du problème sont considérés : 1) l'amélioration de la performance énergétique électrique des stations existantes, 2) le choix technologique dans la conception et la construction de nouvelles stations d'épuration efficaces énergétiquement, sur la base des résultats obtenus au niveau des six stations étudiées.

Les données utilisées dans les deux volets du problème proviennent d'une enquête réalisée auprès des stations d'épuration municipales et des usines de traitement d'eau potable du Québec et qui porte sur « *L'élaboration d'un mécanisme d'aide à la décision destiné à la gestion des électrotechnologies et des mesures d'efficacité énergétique électrique dans les systèmes de traitement d'eau potable, d'épuration des eaux usées municipales et dans le traitement des boues* » (Kibi, 1996). La thèse utilise uniquement les données portant sur les mesures d'efficacité énergétique électrique applicables à six stations d'épuration des eaux usées municipales du Québec.

4.2 Méthodologie de l'étude de cas

La méthodologie utilisée pour la récolte des données de l'étude s'inspire des travaux de l'EPRI, de Georgia Technical Research Institute, de Sasseville *et al.* (1994) et de GEST-EAU (1995), ainsi que des travaux sur l'application des méthodes d'aide à la décision dans la résolution de problèmes (Vincke, 1989; Roy, 1987). Elle se divise en six principales étapes : 1) l'élaboration du questionnaire, 2) l'administration de l'enquête, 3) la récolte d'information sur les MEEE et sur les chaînes d'épuration des eaux usées municipales, 4) la réalisation des entrevues, 5) l'organisation d'une table ronde et, 6) le traitement et l'analyse des données.

4.2.1 Première étape : Élaboration du questionnaire

Pour récolter l'information nécessaire à la réalisation de l'étude, un questionnaire destiné aux stations d'épuration des eaux usées a été élaboré en vue de récolter les données utilisables dans le modèle d'aide à la décision. Les questions étaient axées sur le fonctionnement de la station, les différentes technologies et procédés utilisés, les MEEE envisageables, leur faisabilité en termes technique et de financement, l'opération des chaînes d'épuration, l'incidence de la substitution d'une MEEE sur le fonctionnement de la chaîne, la consommation d'électricité, l'efficacité épuratoire, la qualité de l'effluent, les facilités opérationnelles et ergonomiques, etc. Un deuxième questionnaire simplifié, destiné exclusivement aux experts, a été également élaboré au niveau de la récolte de données (voir annexe 3).

4.2.2 Deuxième étape : Administration de l'enquête

Une fois les deux questionnaires élaborés, pour cette étape de l'étude on avait au préalable procédé au choix des technologies et procédés d'épuration des eaux usées municipales en opération au Québec faisant partie de l'enquête. Il s'agissait de déterminer, en collaboration avec Hydro-Québec, le Ministère de l'Environnement et de la Faune, le Ministère des Affaires Municipales, la Société Québécoise d'Assainissement des Eaux (S.Q.A.E), les municipalités; les technologies et les procédés d'épuration à enquêter. Après analyse et investigation, le choix a porté sur les stations de type : Boues activées conventionnelles, Réacteurs Biologiques Séquentiels (RBS), Biofiltration, Étangs aérés et Physico-chimique.

Par la suite, il a fallu déterminer la taille de l'échantillon à considérer pour la réalisation de l'étude. La difficulté et la lourdeur du traitement des données provenant d'un grand nombre des stations de capacité différente utilisant les mêmes technologies d'épuration nous a conduit à retenir un nombre limité de stations, avec une capacité hydraulique se situant dans une fourchette donnée.

Pour réaliser la récolte des données, les deux questionnaires ont été expédiés dans 30 stations d'épuration des eaux usées municipales du Québec et à 18 experts impliqués directement ou indirectement à l'opération et à la gestion des ouvrages d'assainissement des eaux municipales. Les experts oeuvrent aux Ministères : de l'Environnement et de la Faune (MEF), des Affaires Municipales (MAM) et des Ressources naturelles; à la Société Québécoise d'Assainissement des Eaux (S.Q.A.E), à Hydro-Québec, à des firmes de

Génie-Conseil, ainsi qu'aux gestionnaires municipaux. Un contact téléphonique avait précédé chaque envoi postal.

Entre deux et six semaines après l'expédition du questionnaire, une relance a été effectuée dans chacune de ces municipalités dans le but d'activer le dossier et si possible, de prendre un rendez-vous pour une entrevue interactive avec les gestionnaires et ingénieurs municipaux.

4.2.3 Troisième étape : Récolte des données

L'objectif poursuivi par cette étape est de récolter l'information pertinente pouvant servir au modèle d'aide à la décision. Les principaux points considérés sont les suivants:

(a) Détermination de l'ensemble des MEEE potentielles.

L'ensemble des MEEE potentielles à considérer dans chacun des cas provient principalement des travaux de Sasseville *et al.* (1994); de Gest-eau (1995), du Groupe Technika inc. (1994), du Groupe conseil Shooner inc. (1995) et de Burton Environmental Engineering *et al.* (1993). Nous avons également pris en compte les informations originant des municipalités, du Ministère de l'environnement et de la Faune et du Ministère des Ressources Naturelles du Québec. Les MEEE considérées portent sur les principaux procédés utilisés dans les chaînes d'épuration des eaux usées municipales. Il s'agit du pompage des eaux et des boues, du prétraitement, du traitement primaire, du traitement secondaire et du traitement tertiaire.

L'objectif poursuivi à cette étape de l'étude était de dégager, à partir d'un éventail plus

large de MEEE, un nombre approprié de celles-ci par station susceptibles d'y être intégrées dans un avenir assez proche.

(b) Détermination de quelques paramètres d'importance des MEEE et leur caractérisation.

Il s'agissait ici de déterminer les paramètres d'importance comme les coûts d'implantation, le temps de retour sur l'investissement et la vie utile espérée d'une MEEE donnée, l'effet de synergie de la MEEE dans la chaîne d'épuration, etc. Il était aussi question de déterminer l'incidence de différentes MEEE sur l'économie d'énergie au niveau du segment du procédé (équipement électrique), sur la consommation d'électricité et sur l'appel de puissance de la station d'épuration dans son ensemble, sur les paramètres de qualité environnementale, sur les autres intrants (produits chimiques, eau de service, autres sources d'énergie), sur les coûts de la main d'oeuvre, les coûts d'entretien, etc.

(c) Détermination des caractéristiques des chaînes d'épuration des eaux usées.

Il s'agissait ici de caractériser les différentes chaînes d'épuration des eaux usées municipales afin de définir les critères d'évaluation des chaînes modifiées par l'intégration des MEEE. Les caractéristiques (critères) retenues sont les suivantes : le coût d'implantation de différentes chaînes d'épuration améliorées, le coût d'exploitation et de maintenance, l'efficacité d'épuration des eaux, la consommation énergétique hydraulique, la consommation énergétique épuratoire, les facilités opérationnelles et ergonomiques des installations, la substitution par de nouvelles technologies de la chaîne d'épuration, etc.

4.2.4 Quatrième étape : Réalisation des entrevues

Pour compléter la récolte des données, des entrevues ont été réalisées auprès des gestionnaires, des surintendants et des ingénieurs des stations d'épuration des eaux usées municipales retenues pour analyse. Cette démarche servait, soit à approfondir et à préciser certaines réponses obtenues au niveau du questionnaire, soit à passer en revue l'ensemble du questionnaire.

4.2.5 Cinquième partie : Organisation d'une table ronde

Après la structuration et l'analyse préliminaire de données recueillies par les questionnaires et les entrevues, nous avons organisé une table ronde regroupant les représentants d'Hydro-Québec, du Ministère des Affaires Municipales, du Ministère de l'environnement et de la faune du Québec, de quatre bureaux de génie conseil (Gest-eau, Roche Ltée, Genivar et d'Axor Experts-Conseils) et les gestionnaires municipaux. L'objectif poursuivi par cette table ronde était principalement la détermination du nombre exact des critères d'acceptation des MEEE, des critères d'évaluation des chaînes d'épuration pour le traitement final des données, des paramètres d'analyse comme les poids de critères, les seuils de préférence, d'indifférence et de veto. Il était aussi question d'obtenir le point de vue des participants sur certaines évaluations préliminaires des MEEE et des chaînes d'épuration et leur appréciation générale sur l'approche multicritère d'aide à la décision.

4.2.6 Sixième étape : Traitement des données et analyse

Avec l'ensemble des données récoltées dans les stations d'épuration des eaux usées municipales, dans les entrevues et au niveau de la table ronde, cette étape consiste à une

structuration définitive des données et à leur traitement à l'aide du modèle multicritère d'aide à la décision. La structuration des données met sous une forme utilisable par la procédure mathématique toutes les données recueillies. Il s'agit, pour l'analyse conjonctive, du tableau à deux entrées (MEEE et critère d'acceptation) contenant les évaluations de chaque MEEE par rapport aux conditions limites d'acceptabilité et pour l'analyse multicritère, du tableau multicritère contenant les évaluations de chaque chaîne épuratoire améliorée par rapport à chaque critère, le poids de critères, les seuils de préférence, d'indifférence, de veto et le sens de décision de chaque critère. Après cette structuration des données, l'étape subséquente consiste en l'application de la procédure de calcul aux données ainsi structurées. Les résultats obtenus serviront à l'aide à la décision.

La section suivante présente la procédure de traitement des données pour les deux analyses.

4.3 La procédure de traitement des données

Le traitement des données porte sur les deux niveaux d'analyse : (1) l'analyse conjonctive pour le premier niveau du problème et (2) l'analyse multicritère pour le deuxième niveau du problème.

4.3.1 Le traitement des données par l'analyse conjonctive

L'analyse conjonctive a servi à choisir, pour chaque chaîne d'épuration des eaux usées considérée, les MEEE susceptibles d'améliorer le niveau de la consommation d'électricité dans les stations d'épuration considérées. Trois ensembles ont été utilisés : (1) les MEEE applicables dans les chaînes d'épuration des eaux usées municipales (Tableau 3), (2) les

critères d'acceptation (Tableau 4) et, (3) les conditions minimales d'acceptabilité fixées au niveau de chaque critère (Tableau 5).

Le Tableau 3 présente un total des 19 MEEE applicables, donnant lieu à 48 applications¹⁷ possibles de ces MEEE dans les différentes chaînes d'épuration des eaux usées considérées. L'applicabilité de ces MEEE a été établie sur la base d'une évaluation réalisée au cours de l'enquête réalisée auprès des différentes municipalités.

Le Tableau 4 contient quatorze critères d'acceptabilité. Il s'agit de critères techniques, énergétiques, économiques, environnementaux et sociaux. On y présente la nature et les caractéristiques essentielles de chacun d'eux. Ils ont été définis dans le cadre de l'enquête réalisée auprès des municipalités du Québec et au niveau de la table ronde.

¹⁷ Une même MEEE peut être applicable dans plus d'une chaîne d'épuration.

Tableau 3 : Les MEEE applicables dans les chaînes d'épuration des eaux usées municipales

Code	MEEE		Chaînes					
	Nature	Procédé	1	2	3	4	5	6
MEEE1	Installation des pompes à chaleur pour la récupération de la chaleur au niveau du pompage à l'int. de la station	Pompage des eaux	•		•			
MEEE2	Correction de la puissance des pompes en opération	Pompage des eaux		•	•			
MEEE3	Installation des échangeurs de chaleur dans le systèmes de pompage de la station	Pompage des eaux		•				•
MEEE4	Utilisation des bassins d'égalisation des eaux et de stockage des boues pour des opérations réduites des pompes en période de pointe	Système de pompage des eaux usées et des boues				•	•	
MEEE5	Minimisation du pompage des boues primaires	Traitement primaire		•				
MEEE6	Installation de diffuseurs à fines bulles	Traitement secondaire			•	•	•	•
MEEE7	Installation d'un système arrêt-marche dans le système d'aération	Traitement secondaire			•		•	
MEEE8	Optimisation du rapport F/M (kg de DBO ₅ /kg de M.E.S) dans les bassins d'aération	Traitement secondaire			•	•	•	
MEEE9	Installation d'un système périodique de nettoyage des diffuseurs à fines bulles	Trait. secondaire			•		•	•
MEEE10	Installation de moniteurs pour le contrôle de l'O.D. dans le système d'aération	Traitement secondaire			•	•	•	•
MEEE11	Utilisation pour le lavage, d'une soufflante avec un entraînement de moteur à vitesse variable et avec des performances hydrauliques accrues	Traitement secondaire	•					
MEEE12	Maximisation des opérations dans les filtres à vide durant les heures de pointe	Traitement secondaire	•					
MEEE13	Installation d'un turbidimètre pour contrôler le lavage des filtres dans les biofiltres	Traitement secondaire	•					
MEEE14	Utilisation d'un système d'ajustement automatique du débit d'air	Traitement secondaire			•	•	•	•
MEEE15	Installation d'une soufflante de type centrifuge contrôlée par ordinateur	Traitement secondaire			•	•	•	•
MEEE16	Installation de diffuseurs à membranes poreuses dans le bassin d'aération	Traitement secondaire			•	•	•	•
MEEE17	Installation d'un système informatique de suivi combinant le TCO et l'OD	Traitement secondaire			•	•	•	•
MEEE18	Amélioration de l'efficacité des tubes au niveau de la transmission du regroupement dans le système de désinfection U.V.	Désinfection aux U.V.	•		•			
MEEE19	Amélioration de l'efficacité des tubes au niveau de la transmission de la longueur d'ondes U.V.	Désinfection aux U.V.	•		•			

Légende :

Chaîne 1 : Chaîne d'épuration de type Biofiltration

Chaîne 2 : Chaîne d'épuration de type Physico-chimique

Chaîne 3 : Chaîne d'épuration de type Réacteurs Biologiques Séquentiels (RBS) type I

Chaîne 4 : Chaîne d'épuration de type Réacteurs Biologiques Séquentiels (RBS) type II

Chaîne 5 : Chaîne d'épuration de type Boues activées conventionnelles

Chaîne 6 : Chaîne d'épuration de type Étangs aérés facultatifs.

Tableau 4 : Les critères d'acceptabilité utilisés dans l'analyse conjonctive

Critères	Nature des critères	Caractéristiques des critères
1	Coût net de la MEEE	Coût total d'implantation <i>moins</i> la contribution des autres parties prenantes. Il est mesuré en dollar (à minimiser).
2	Vie utile espérée de la MEEE	C'est la durée opérationnelle de la mesure dans la chaîne épuratoire. Il se mesure en année (à maximiser).
3	Période de retour sur l'investissement	Temps de retour sur l'investissement initial en fonction des économies annuelles réalisées (à minimiser). Il se mesure en année.
4	Incidence de la MEEE sur l'économie d'énergie	L'impact de l'implantation sur l'économie d'énergie au niveau du segment du procédé en cause (équipement électrique utilisé) (à maximiser). C'est un critère mesuré sur une échelle ordinale*.
5	Incidence de la MEEE sur l'appel de puissance	L'incidence (positive ou négative) de l'implantation sur la puissance appelée (à maximiser). C'est un critère mesuré sur une échelle ordinale.
6	Incidence de la MEEE sur la qualité de l'effluent	L'impact de l'implantation sur la qualité de l'effluent en termes d'enlèvement de la DBO ₅ , des M.E.S et du Pt (à maximiser). C'est un critère mesuré sur une échelle ordinale.
7	Incidence de la MEEE sur la consommation des produits chimiques.	Effet de l'implantation sur la consommation des produits chimiques (à maximiser). C'est un critère mesuré sur une échelle ordinale.
8	Incidence de la MEEE sur les autres sources d'énergie (gaz, huiles)	Effet de l'implantation sur la consommation des autres sources d'énergie (à maximiser). C'est un critère mesuré sur une échelle ordinale.
9	Incidence de la MEEE sur les eaux de service	L'impact de l'implantation sur la consommation des eaux de service (à maximiser). C'est un critère mesuré sur une échelle ordinale.
10	Disponibilité de la MEEE sur le marché régional ou national.	C'est l'indice de la disponibilité de la mesure sur le marché, de préférence national ou régional. C'est un critère binaire (0, 1).
11	Applicabilité et fiabilité de la MEEE	Applicabilité et fiabilité technique tels « l'implantabilité », la maniabilité, la maintenance et la résistances aux pannes et bris (à maximiser). C'est un critère mesuré sur une échelle ordinale.
12	Effet de synergie de la MEEE sur la chaîne d'épuration des eaux usées.	Effet de l'implantation d'une mesure seule ou en combinaison avec d'autres sur le fonctionnement de la chaîne épuratoire des eaux usées municipales. L'effet pourrait être positif ou négatif (à minimiser). C'est un critère mesuré sur une échelle ordinale.
13	Acceptabilité de la MEEE par les opérateurs.	Changement dans la façon de travailler que pourrait éventuellement occasionné la mise en place de la mesure (à maximiser). C'est un critère mesuré sur une échelle ordinale.
14	Incidence de la MEEE sur le développement durable.	L'incidence de l'implantation de la mesure sur le développement durable (à maximiser). C'est un critère mesuré sur une échelle ordinale.

* Tous les critères ordinaux sont mesurés sur une échelle qualitative allant de 1 à 5 :

Faible (1)	Moyennement faible (2)	Moyen (3)	Moyennement forte (4)	Forte (5)
------------	------------------------	-----------	-----------------------	-----------

Tableau 5 : Les conditions limites d'acceptabilité fixées au niveau de chaque critère.

Critères	Conditions limites (L_j); $j=1,2,\dots,14$		
	Pompage des eaux et/ou des boues : prétraitement (p. tr.) et traitement primaire (tr. Pr.)	Traitement secondaire	Traitement tertiaire
1	Au plus 50 % du coût total d'implantation	Au plus 50 % du coût total d'implantation	Au plus 50 % du coût total d'implantation
2	> 20 ans	10 à 25 ans	5 à 25 ans
3	Jusqu'à 10 ans, si une partie du financement est assurée	• 2 à 4 ans : si le coût est inférieur à 100 000 \$ • 4 à 10 ans : si une partie du financement est assurée. • Plus de 10 ans si la substitution est indispensable au fonctionnement.	• 2 à 4 ans : si le coût est inférieur à 100 000 \$ • 4 à 10 ans : si une partie du financement est assurée. • Plus de 10 ans si la substitution est indispensable au fonctionnement.
4	- Forte pour le pompage - Moy. pour le p. tr. et le tr. pr.	Moyen	Moyennement faible
5	- Forte pour le pompage - Moy pour le p. tr. et le tr. pr.	Moyen	Moyennement faible
6	Nil	Moyennement forte	Moyen
7	- Nil pour le pompage. - Faible le p. tr. et tr. pr	Nil	Nil
8	Nil	Faible	Faible
9	Moyennement forte	Moyen	Nil
10	1	1	1
11	Forte	Forte	Forte
12	Moyen	Moyen	Nil
13	Faible	Faible	Nil
14	Moyen	Moyennement forte	Forte

Le tableau 5 contient les conditions minimales d'acceptabilité. Il s'agit, au niveau de chaque critère considéré, les conditions d'acceptabilité que doivent remplir une MEEE faisant partie de l'ensemble admissible. Une MEEE donnée sera susceptible d'être implantée si, et seulement si, elle remplit la condition minimale au niveau de chaque critère.

Au niveau de l'enquête, toutes les MEEE (Tableau 3) ont donc été évaluées par rapport à chaque critère d'acceptation. Les différents scores obtenus ont été ensuite comparés aux conditions minimales d'acceptabilité fixées à chaque critère (Tableau 4). Les MEEE remplissant toutes les conditions minimales d'acceptabilité sont considérées comme pouvant être implantées dans une chaîne épuratoire donnée. Les résultats obtenus après application de la procédure d'analyse sont présentés au Tableau 6. Les MEEE pouvant être implantées sont les résultats de l'analyse conjonctive.

Tableau 6 : Bilan de MEEE pouvant être implantées

Chaîne d'épuration	MEEE applicables (#)	MEEE pouvant être implantées (#)
1	1,11,12,13,18,19	1,11,19
2	2,3,5	2,3,5
3	1,2,6,7,8,9,10,14 à 19	1,6,7,8,9,10,19
4	4,6,8,10,14,15,16,17	6,10,14
5	4,6,7,8,9,10,14,15,16,17	4,6,8,10,14,15
6	3,6,9,10,14,15,16,17	3,6,10,14,15,16

4.3.2 Le traitement des données par l'analyse multicritère

Dans le but de pouvoir dégager les chaînes d'épuration des eaux usées susceptibles de bien se positionner après intégration des MEEE choisies par l'analyse conjonctive, une analyse multicritère compare entre-elles, en vue d'une classification de la meilleure à la moins bonne, les différentes chaînes épuratoire modifiées et améliorées par l'intégration des MEEE et des autres procédés, le cas échéant.

Les chaînes modifiées et améliorées qui sont au fait des chaînes épuratoires virtuelles (artificielles) se présentent de la manière suivante :

chaîne 1 : **Biofiltration modifiée** (construite à partir de la chaîne d'épuration Biofiltration existante); chaîne 2: **Physico-chimique modifiée** (construite à partir de la chaîne d'épuration Physico-chimique existante); chaîne 3: **Réacteurs Biologiques séquentiels-R.B.S.** (construite à partir de la chaîne d'épuration R.B.S. type I existante); chaîne 4: **Boues activées conventionnelles** (construite à partir de la chaîne d'épuration, R.B.S. type II existante); chaîne 5 : **Boues activées à aération prolongée** (construite à partir de la chaîne d'épuration Boues activées conventionnelles existante) et chaîne 6: **Étangs aérés** (construite à partir de chaîne d'épuration Étangs aérés facultatifs existante).

Le processus d'analyse est réalisé à l'aide de l'ensemble admissible constitué de ces chaînes épuratoires modifiées et améliorées (Tableau 7), de l'ensemble de critères de décision (Tableau 8) et de la procédure d'agrégation multicritère décrite au chapitre 3.

Tableau 7 : Les chaînes épuratoires comprenant les MEEE choisies

Chaînes*	Étapes de traitement
1	Prétraitement (+MEEE1) ⇒ Traitement primaire ⇒ Traitement secondaire (Biofiltration aérobie avec déphosphatation + MEEE2) ⇒ Traitement tertiaire (désinfection aux U.V.)
2	Prétraitement (+MEEE3) ⇒ Traitement physico-chimique (+MEEE4 et MEEE5) ⇒ Traitement tertiaire (ozonation)
3	Prétraitement ⇒ Traitement primaire ⇒ Traitement secondaire (Réacteurs Biologiques Séquentiels avec déphosphatation +MEEE6 +MEEE7 +MEEE8) ⇒ Traitement tertiaire (désinfection aux U.V)
4	Prétraitement ⇒ Traitement secondaire (Réacteurs Biologiques Séquentiels +MEEE6+MEEE8 +MEEE9) ⇒ Traitement tertiaire (ozonation)
5	Prétraitement ⇒ Traitement secondaire (Boues activées conventionnelle, avec déphosphatation + MEEE6 + MEEE8 + MEEE 9 + MEEE10) ⇒ Traitement tertiaire (ozonation)
6	Traitement secondaire (Étangs Aérés avec aér. mécanique et déphosphatation+ MEEE6 + MEEE7)

* (1) Biofiltration; (2) Physico-chimique; (3) Réacteurs Biologiques Séquentiels (R.B.S), (4) Boues activées conventionnelles; (5) Boues activées à aération prolongée; (6) Étangs aérés.

MEEE1 : Installation des pompes à chaleur pour la récupération calorifique au pompage

MEEE2 : Installation d'un turbidimètre pour contrôler le lavage des filtres dans les biofiltres

MEEE3 : Correction de la puissance des pompes en opération

MEEE4 : Installation des échangeurs de chaleur dans le systèmes de pompage

MEEE5 : Minimisation du pompage des boues primaire

MEEE6 : Installation de diffuseurs à fines bulles

MEEE7 : Installation d'un système périodique de nettoyage des diffuseurs à fines bulles

MEEE8 : Installation de moniteurs pour le contrôle de l'O.D. dans le système d'aération

MEEE9 : Utilisation d'un système d'ajustement automatique de débit d'air

MEEE10 : Installation de soufflante automatique de type centrifuge

Tableau 8 : Les critères de décision utilisés au niveau de l'analyse multicritère

Critères	Nature du critère	Caractéristiques du critère
Cr. 1	Coût net ¹⁸ d'implantation des MEEE (à minimiser)	Coût d'acquisition d'équipements & coût d'installation <u>moins</u> le montant de la subvention (le cas échéant). Il s'exprime en \$/1000 m ³ d'eau traitée sur une base annuelle. Trois valeurs sont présentées suivant les trois hypothèses
Cr. 2	Coûts d'exploitation et de maintenance de la chaîne épuratoire (à minimiser)	Coût d'opération modifié (moins le coût d'électricité lié à l'épuration des eaux usées). Il s'exprime en \$/1000 m ³ /année d'eau traitée.
Cr. 3	Consommation énergétique hydraulique (à minimiser)	Quantité d'électricité consommée en fonction de la quantité d'eaux usées traitées, en tenant compte du pourcentage (%) théorique d'économie d'énergie. Il s'exprime en kWh/1000 m ³ d'eaux épurées. Trois valeurs sont présentées suivant trois pourcentages d'économie d'énergie.
Cr. 4	Consommation énergétique épuratoire (à minimiser)	Quantité d'électricité consommée en fonction de la quantité de DBO ₅ enlevée, en tenant compte du % théorique d'économie d'énergie. Il est exprimé en kWh/kg de DBO ₅ enlevés. Trois valeurs sont présentées suivant trois pourcentages d'économie d'énergie théorique.
Cr. 5	Efficacité épuratoire mesurée par rapport à la DBO ₅ (à maximiser)	Pourcentage annuel de la DBO ₅ enlevée dans la chaîne épuratoire.
Cr. 6	Efficacité épuratoire mesurée par rapport aux M.E.S. (maximiser)	Pourcentage annuel des M.E.S. enlevées dans la chaîne épuratoire.
Cr. 7	Efficacité épuratoire en P _t (à maximiser)	Pourcentage annuel du P _t enlevé dans la chaîne épuratoire.
Cr. 8	Facteur de pointe de la puissance appelée (à maximiser)	Facteur de pointe de la puissance appelée liée aux opérations de la chaîne épuratoire à la suite de l'implantation des mesures. Trois valeurs sont présentées suivant trois pourcentages de réduction d'appel de puissance théorique.
Cr. 9	Facilités ergonomiques de la chaîne épuratoire (à maximiser)	Facilités ergonomiques de la chaîne épuratoire du point de vue de la santé et de la sécurité au travail. C'est un critère ordinal*.
Cr. 10	Niveau d'automatisation et opérationnel de la chaîne épuratoire (à maximiser)	Niveau d'automatisation des installations et facilités opérationnelles (maintenance d'équipements, suivi des opérations, accessibilité pour l'entretien, etc.). C'est un critère ordinal.
Cr. 11	Substitutionnalité de la chaîne épuratoire (à maximiser)	Facilités à la substitution technologique de la chaîne d'épuration des eaux usées. C'est un critère ordinal.
Cr. 12	Contribution au développement durable (à maximiser)	Contribution du système d'épuration des eaux usées au développement durable. C'est un critère ordinal.
Cr. 13	Ratio Coût/Habitant (à minimiser)	Montant du coût d'opération supporté par chaque résident. Il s'exprime en \$/habitant de la ville.
Cr. 14	Ratio électricité consommée par le procédé/Consommation électrique totale (à minimiser).	Ratio électricité consommée par le procédé/consommation électrique totale de la station d'épuration des eaux usées.

18. Il tient compte implicitement du temps de retour sur l'investissement et de la politique de financement en considérant les trois hypothèses suivantes : 1) les nouvelles installations sont totalement subventionnées, 2) le temps de retour sur l'investissement est supérieur à 4 ans, alors les installations sont subventionnées à 50 %, 3) le temps de retour sur l'investissement est inférieur à 4 ans et que l'investissement total est inférieur à 100 000 \$, alors les nouvelles installations peuvent totalement être financées par la municipalité. Les installations sont aussi financées à 100 % par la municipalité en cas d'une nécessité de fonctionnement.

Le tableau 7 décrit les différentes étapes de chaque chaînes de traitement améliorées par l'intégration des MEEE. Il s'agit d'une chaîne artificielle issue de la chaîne considérée avant l'intégration des MEEE. Le tableau 8 présente quatorze critères de décision considérés au niveau de l'analyse multicritère. Il présente la nature du critère (technique, économique, environnementale, énergétique et socio-ergonomique), sa caractéristique et le sens de la décision (à maximiser ou à minimiser).

La procédure d'agrégation multicritère décrite au chapitre 3 est réalisé via le tableau multicritère (Tableau 9). Ce tableau contient les six actions (les **six chaînes d'épuration + les MEEE**), les quatorze critères de décision, les différentes performances (cardinales, ordinales, à intervalles et distributionnelles) de chaque chaîne épuratoire par rapport à chaque critère et le sens de chaque critère (i.e. la maximisation ou la minimisation). Les performances manquantes d'une chaîne épuratoire sont considérées comme sans effet sur le processus d'analyse. La deuxième partie du tableau contient le poids des critères dans la décision, les seuils d'indifférence, ainsi que les seuils de préférence et de veto.

Tableau 9 : Tableau multicritère

Critères	Chaîne 1	Chaîne 2	Chaîne 3	Chaîne 4	Chaîne 5	Chaîne 6	Poids de critères	Seuil d'indiff.	Seuil de préfér.	Seuil de veto
Cr.1	2.4\$ 0\$ 4.8\$	6.4\$ 0\$ 12.8\$	59\$ 0\$ 118\$	35\$ 0\$ 70\$	60.5\$ 0\$ 121\$	55\$ 0\$ 111\$	0.083	2	10	125
Cr.2	35.3\$	43.8\$	40.9\$	34.2\$	91.5\$	25.8\$	0.081	5	9	68
Cr.3	64.6 60.8 68.4	29.7 28.1 31.4	69.6 60.9 74	68.3 59.7 72.5	83.7 95.7 101.7	120 107.3 127	0.12	2	10	105
Cr.4	1.35	0.82	0.81	1.1	1.25	1.95	0.13	0.1	0.2	1.3
Cr.5	88%	Nil	87%	79%	94%	82%	0.082	3	6	35
Cr.6	87%	62%	90%	78%	95%	85%	0.081	3	6	35
Cr.7	62%	63%	88%	65%	87%	81%	0.082	2	8	30
Cr.8	1.6 1.5 1.8	1.5 1.4 1.7	1.44 1.15 2.1	1.41 1.13 2.0	1.38 1.1 1.9	1.7 1.1 3.8	0.10	0.1	0.5	3.5
Cr.9	Elevée	Bonne à Elevée	Bonne	Bonne	Bonne	Nil	0.031	Nil	Nil	Nil
Cr.10	Bon à élevé	Bon à élevé	Bon à élevé	Moyen à bon	Bon à élevé	Nil	0.028	Nil	Nil	Nil
Cr.11	Moy. forte à forte	Moy. forte à forte	Moyen à forte	Moyen à moy. forte	Moy. à forte	Moyen à moy. forte	0.027	Nil	Nil	Nil
Cr.12	Moy. forte	Moy. faible	Moy. forte	Moyen	Forte	Moy. forte	0.059	Nil	Nil	Nil
Cr.13	13.6\$/pers.	14.28\$/pers.	28.52\$/pers.	12.47\$/pers.	35.8\$/pers.	8.2\$/pers.	0.025	5	10	30
Cr.14	48%	11%	43%	40%	45%	47%	0.071	3	5	40

Cr.1: \$/1000 m³ d'eau traitée (à minimiser)

Cr.2: \$/1000 m³ d'eau traitée (à minimiser)

Cr.3: kWh/m³ (à minimiser) (les valeurs présentées sont de kWh/1000 m³, suivant 3 pourcentages d'économie d'énergie. Ce % varie de 10% à 35%, suivant le cas.

Cr.4: kWh/kg DBO₅ enlevée (à minimiser)

Cr.5: (%) (à maximiser)

Cr.6: (%) (à maximiser)

Cr.7: (%) (à maximiser.)

Cr.8: Valeur absolue (à maximiser)

Cr.9: En échelle ordinale (à maximiser)

Cr.10: En échelle ordinale (à maximiser)

Cr.11: En échelle ordinale (à maximiser)

Cr.12: En échelle ordinale (à maximiser)

Cr.13: Ratio (à minimiser)

Cr.14: Ratio (à minimiser)

Les résultats obtenus (Tableau 10) est un rangement de chaînes améliorées de la meilleure à la moins bonne.

Tableau 10: Rangement multicritère de différentes chaînes d'épuration

Chaîne	Rangement					
	<i>Rang 1</i>	<i>Rang 2</i>	<i>Rang 3</i>	<i>Rang 4</i>	<i>Rang 5</i>	<i>Rang 6</i>
Chaîne 1		②				
Chaîne 2						⑥
Chaîne 3	①					
Chaîne 4			③			
Chaîne 5					⑤	
Chaîne 6				④		

4.4 Analyse des résultats obtenus pour les deux volets du problème

Dans les deux volets du problème, nous avons utilisé les données provenant de six stations d'épuration des eaux usées municipales du Québec. Pour des fins de comparaison, tant sur le plan de la consommation d'électricité que celui de la performance globale des stations améliorées par les MEEE, les six chaînes d'épuration utilisées traitent un débit hydraulique (capacité de traitement) variant entre 8,000 m³/d et 25,000 m³/d, et emploient les principales technologies d'épuration utilisées dans le cas des eaux usées municipales.

Dans le *premier volet*, le cas de l'amélioration de l'efficacité énergétique des stations existantes, l'analyse conjonctive basée sur quatorze critères d'acceptation et 19 MEEE donnant lieu à 48 applications possibles de ces MEEE dans les six différentes chaînes d'épuration considérées, a permis de choisir les MEEE les plus performantes. Dans cette analyse, les critères d'acceptation considérés tiennent simultanément compte des caractéristiques des MEEE les rendant acceptables tant au producteur d'électricité qu'aux

municipalités susceptibles de les acquérir. Il s'agit des facteurs qui traduisent les obligations concernant les performances techniques et énergétiques, de même que les contraintes économiques, financières, environnementales, ergonomiques et socio-politiques.

Dans l'application du processus d'analyse, nous avons déterminé séparément au niveau de chaque critère retenu, les conditions d'acceptabilité que doivent remplir les MEEE faisant partie de l'ensemble admissible. Une MEEE donnée est considérée comme susceptible d'être implantée dans une chaîne d'épuration donnée si, et seulement si, elle remplit la condition minimale d'acceptabilité fixée à chaque critère.

L'analyse conjonctive a donc permis de choisir un total de 27 MEEE. Leur répartition se présente de la manière suivante : 3 MEEE dans la chaîne d'épuration 1, 3 MEEE dans la chaîne 2, 7 MEEE dans la chaîne 3, 3 MEEE dans la chaîne 4, 6 MEEE dans la chaîne 5, et finalement 6 MEEE dans la chaîne 6.

Ces MEEE sont considérées comme étant performantes et susceptibles d'être utilisées avantageusement pour augmenter l'utilité de l'électricité et diminuer particulièrement la consommation générale et de pointe dans les chaînes d'épuration existantes. Elles possèdent un bon potentiel d'économie d'énergie et le comportement vis-à-vis les autres facteurs décisionnels est aussi appréciable.

Les annexes 5 et 6 présentent deux articles scientifiques qui reprennent en détail l'applicabilité des mesures d'efficacité énergétique dans les stations d'épuration des eaux usées municipales et la procédure d'analyse concernant l'amélioration de l'efficacité

énergétique électrique dans les stations d'épuration des eaux usées municipales existantes. Le premier article intitulé "*Applicabilité des mesures d'efficacité énergétique électrique dans les ouvrages d'épuration des eaux municipales*", établit un ensemble des mesures d'efficacité énergétique électrique technique potentiellement applicables dans les stations d'épuration des eaux usées municipales. Le deuxième article intitulé "*Modélisation multicritère pour l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les stations d'épuration des eaux usées municipales*", présente l'approche utilisée dans le choix des mesures d'efficacité énergétique électrique susceptibles d'être utilisées avantageusement dans les systèmes d'épuration considérées en vue principalement d'y minimiser le niveau de la consommation électrique.

À titre d'information complémentaire, nous présentons également à l'annexe 7 l'essentiel de l'ampleur de la problématique de l'efficacité énergétique dans l'épuration des eaux usées municipales. On y décrit principalement les différentes technologies d'épuration des eaux usées, le niveau de la demande et de la consommation d'électricité dans les stations d'épuration des eaux usées municipales. Un bilan de la consommation électrique des stations d'épuration des eaux usées du Québec est présenté par Blais *et al.* (1995).

Dans le second volet du problème, le cas de l'évaluation de chaînes d'épuration améliorées, les connaissances sur les MEEE pouvant être implantées dans les stations en opération ont été intégrées par simulation qualitative dans les six stations étudiées. Le résultat de l'évaluation de la performance globale de celles-ci, un classement multicritère de ces six stations, de la meilleure à la moins bonne, faciliterait le choix futur de technologies efficaces du point de vue énergétique et épuratoire dans le cadre de l'expansion du parc

québécois des ouvrages d'assainissement des eaux usées municipales. Le modèle multicritère utilisé pour ce faire porte sur quatorze critères de décision de natures différentes et six chaînes d'épuration modifiées et améliorées par l'ajout des MEEE (Kibi *et al.*, 1996).

L'analyse multicritère a permis de ranger de la meilleure à la moins bonne ces chaînes d'épuration modifiées et améliorées. Le rangement multicritère obtenu se présente de la manière suivante : la chaîne 3 se classe au premier rang, la chaîne 1 occupe le deuxième rang et le troisième rang est occupé par la chaîne 4. Les trois derniers rangs sont respectivement occupés par les chaînes 6, 5 et 2.

L'annexe 8 présente l'article scientifique qui reprend la démarche d'analyse multicritère utilisée dans ce cas. L'article intitulé "*Évaluation multicritère de la performance globale de procédés d'épuration des eaux usées améliorées par l'intégration de mesures d'efficacité énergétique*", décrit cette classification multicritère de six différentes chaînes d'épuration en opération au Québec et améliorées par l'intégration de diverses MEEE.

Le chapitre 5 porte sur une discussion générale de l'étude.

CHAPITRE 5

DISCUSSION GÉNÉRALE

Dans cette thèse, nous avons fait l'hypothèse que l'intégration des mesures d'efficacité énergétique électrique (MEEE) dans les stations d'épuration contribuerait, d'une part, à l'augmentation de l'utilité de l'électricité dans ces systèmes, et d'autre part, à la diminution de la consommation électrique générale et particulièrement de la consommation de pointe. En d'autres mots, l'intégration des MEEE appropriées dans les stations d'épuration existantes et dans les nouvelles stations à construire constituerait la base de la rationalisation du niveau de la consommation d'électricité dans les systèmes d'épuration des eaux usées municipales. Ceci faisait partie de deux volets du problème de gestion de la consommation d'électricité dans les stations d'épuration des eaux usées soulevées. Le *premier volet* a porté sur le choix des MEEE appropriées susceptibles d'améliorer l'efficacité énergétique des stations d'épuration existantes. Le second volet était axé sur l'intégration, à l'aide d'une simulation qualitative, des connaissances sur les MEEE dans les stations existantes en vue d'en évaluer la performance globale. Les deux sous-problèmes étaient solutionnés à l'aide d'une modélisation multicritère développée et appliquée aux données provenant de six stations d'épuration des eaux usées du Québec.

Dans le premier volet du problème, une analyse conjonctive a permis de choisir les MEEE les plus appropriées pour améliorer l'efficacité énergétique des stations existantes. Dans le second volet, une analyse multicritère a permis de classer, de la meilleure à la moins bonne, les chaînes d'épuration modifiées et améliorées par l'intégration des MEEE et

d'autres procédés. Les résultats de cette analyse sont utilisables au niveau du choix des technologies efficaces sur le plan énergétique et épuratoire dans le cadre de l'expansion du parc actuel des ouvrages d'assainissement des eaux usées municipales.

La discussion portera dans un premier temps sur le bien fondé de ce choix de l'approche multicritère dans la conception d'une stratégie globale « offre-demande » des MEEE. Ensuite, elle abordera les aspects relatifs à l'application et à l'utilisation des résultats des méthodes d'analyse utilisées. Enfin, elle traitera de l'interprétation des résultats obtenus à l'aide de l'analyse conjonctive et de l'analyse multicritère d'aide à la décision.

5.1 Approche multicritère et conception d'une stratégie globale « offre - demande »

La conception et l'implantation d'un programme d'efficacité énergétique à l'échelle d'un parc entier d'ouvrages d'assainissement des eaux municipales constituent un problème de taille. Elles nécessitent une connaissance approfondie 1) des systèmes d'approvisionnement et d'épuration des eaux usées municipales, ainsi que leur fonctionnement, 2) des contraintes liées à la production et à la distribution d'électricité, 3) des mesures d'efficacité énergétique électrique (MEEE) applicables, 4) des besoins pressentis pour de telles mesures, ainsi que 5) des facteurs contrôlant leur applicabilité technique, économique et socio-ergonomique. Plus particulièrement, dans le cas des stations déjà en place, les municipalités sont incitées à adopter des MEEE qui leur sont proposées, ceci supposant une méthode de résolution du problème permettant le choix de celles-ci qui soit acceptable tant au fournisseur qu'au consommateur d'électricité. Dans le cas de l'expansion du parc des stations d'assainissement, la méthode de résolution doit

discriminer les diverses chaînes d'épuration susceptibles d'être implantées de façon à inciter les offreurs et les demandeurs des MEEE à adopter des procédés efficaces au plan énergétique.

L'approche d'analyse proposée dans cette thèse, une modélisation multicritère, est apparue comme étant la plus appropriée pour résoudre ce problème, notamment en comparaison avec les approches préconisant un seul axe de signification, telles les méthodes unicritères ou encore les méthodes basées sur l'analyse économétrique.

Dans l'utilisation qu'on en a fait dans cette étude, elle permet, d'une part, d'intégrer les conditions de satisfaction de l'offreur et du consommateur, en plus de contraintes de fonctionnement, et d'autre part de discriminer la performance des différentes chaînes d'épuration après implantation des MEEE. De part la nature multidimensionnelle du problème, la prise en compte simultanément dans le processus d'analyse, des facteurs du marché, des facteurs techniques, des aspects économiques et financiers, des facteurs environnementaux et des facteurs humains, permet d'arriver à une solution adéquate et consensuelle, contrairement aux méthodes d'optimisation unicritère.

Comme spécifié dans le chapitre 3 de cette thèse, les méthodes d'optimisation unicritère montrent des limites de discrimination dans les choix possibles à faire. Plusieurs travaux publiés au cours de deux dernières décennies ont permis d'exploiter à bon escient l'aspect multidimensionnel de plusieurs problèmes de gestion, et de mettre en évidence que les considérations décisionnelles ne peuvent être réduites aux seuls paramètres monétarisables ou directement comparables entre eux. D'où le bien fondé des méthodes multicritères

d'aide à la décision. Dans celles-ci, les actions ou alternatives ne sont plus évaluées par rapport à un critère (une valeur monétaire) mais à l'aide de plusieurs critères par rapport auxquels le décisionnaire souhaite un optimum (Roy, 1987).

L'outil d'aide à la décision multicritère, une fois utilisée dans la perspective de la mise en place d'un programme d'efficacité énergétique dans le secteur de l'eau, soulève alors des questions de choix, de comparaison, de création et d'implantation d'un certain nombre d'approches et de stratégies dans la gestion de ce programme; ces interrogations sont susceptibles de déboucher sur des aspects plus profonds ayant trait à la tarification de l'électricité, au contrôle de la pollution de l'eau et au développement durable.

Cette façon de concevoir la méthode d'analyse a permis de considérer et d'intégrer divers facteurs :

- des *facteurs du marché*, comme la répercussion de la mise en place des MEEE sur la consommation des autres intrants (produits chimiques, eau de service, autres sources d'énergie) ;
- des *facteurs freinant* l'adoption ou la substitution d'une technologie énergétique ;
- des *facteurs techniques*, comme l'effet de synergie entre les différents procédés d'une chaîne d'épuration, les facilités opérationnelles, la fiabilité et l'efficacité dans le temps d'une MEEE, dépendamment de l'évolution de l'utilisation d'équipements (modification du profil de charge, du volume d'eau à traiter, etc.), ou l'incidence de la mise en place des MEEE sur la réduction de la demande d'électricité et sur l'appel de puissance ;

- des *facteurs environnementaux* comme les exigences sur les rejets liquides, la gestion des boues (quantité et traitabilité), les facteurs humains comme l'ergonomie, les facteurs socio-politiques tels l'équité entre les différents consommateurs, l'acceptabilité du milieu, etc.

Cette approche a aussi fait ressortir divers *aspects économiques et financiers*, comme l'évaluation des économies tendancielle pour bien distinguer « l'impact net » de « l'impact brut » d'une MEEE, le coût d'immobilisation, les coûts d'exploitation et de maintenance, la période de retour sur l'investissement et la politique de financement de différents programmes d'efficacité énergétique.

Comment a-t-il été possible d'intégrer des considérations aussi diverses dans le cadre d'une stratégie unique ?

Ces différents facteurs et aspects ont permis de définir des critères d'acceptation (au niveau de l'analyse conjonctive) et des critères de décision (au niveau de l'analyse multicritère) qui permettent de choisir des MEEE appropriées. En intégrant dans les stations existantes des MEEE choisies par analyse conjonctive, il est possible de se persuader que les considérations environnementales seront respectées autant que les considérations techniques, économiques, ergonomiques et socio-politiques. Par exemple, le producteur d'électricité vise des MEEE capables de diminuer la consommation de pointe, tandis que les municipalités visent principalement, pour l'implantation d'une MEEE donnée, un temps de retour sur l'investissement qui soit assez court. Ces deux points de vue sont pris simultanément en considération dans la modélisation multicritère utilisée.

5.2 Méthodes d'analyse utilisées

5.2.1 Analyse conjonctive

Peu de travaux scientifiques faisant appel à l'analyse conjonctive utilisée dans la présente étude de cas ont pu être recensés dans la littérature. Néanmoins elle peut être classée dans la catégorie des méthodes multicritères élémentaires comme la moyenne pondérée, la méthode lexicographique (voir Vincke, 1989).

Contrairement à la méthode de la moyenne pondérée ou encore à la méthode lexicographique, l'analyse conjonctive est axée sur les conditions minimales d'acceptabilité imposées à chaque critère d'acceptation, sans pondération des critères. Cet artifice de calcul a permis de simplifier le processus de choix des MEEE en éliminant, à partir d'un éventail plus large des MEEE, celles qui ne remplissaient pas les conditions minimales d'acceptabilité. Son applicabilité se focalise sur la fixation de ces conditions. Dans le cadre de cette étude, les conditions limites d'acceptabilité ont été fixées avec la collaboration d'intervenants impliqués dans la gestion des ouvrages d'assainissement municipaux (gestionnaires, ingénieurs de stations d'épuration, etc.)¹⁹.

L'intérêt pour nous d'utiliser cette méthode réside en sa simplicité d'application, comparativement à une analyse multicritère basée sur une méthode d'agrégation classique compensatoire telle la méthode de l'utilité multiattribut ou encore sur les méthodes sans

¹⁹La détermination des conditions limites d'acceptabilité fixées à chaque critère d'acceptation a fait l'objet de plusieurs investigations avec les gestionnaires et les ingénieurs municipaux. Elles ont été fixées sur la base des connaissances actuelles qu'ils possèdent au niveau du fonctionnement des stations d'épuration.

compensation au niveau de critères, les méthodes de surclassement de synthèse. Dans ces différentes méthodes, il aurait été difficile de comparer entre elles les MEEE applicables à des procédés différents dans une chaîne d'épuration (pré-traitement, traitement primaire, traitement secondaire et traitement de finition), pour arriver à un choix ou un classement des MEEE au niveau d'une chaîne d'épuration donnée. Cela nécessiterait des analyses multicritères pour chacune de ces étapes de traitement, et ensuite, réaliser des analyses de synergie nécessitant plusieurs données et analyses techniques sur l'opération des MEEE.

L'avantage de l'analyse conjonctive dans le cas de cette étude, comparativement à des analyses multicritères et des analyses de synergie indispensables, est sa facilité d'application. Elle procède au choix des MEEE appropriées, à partir d'un éventail plus large, en rejetant tout simplement celles qui ne remplissent pas les conditions limites d'acceptabilité, la décision étant prise de manière individuelle.

5.2.2 Analyse multicritère d'aide à la décision utilisée

Au niveau de l'analyse multicritère d'aide à la décision, nous avons comparé, à partir de quatorze critères de décision, d'abord localement au niveau de chaque critère et ensuite globalement sur l'ensemble de critères, les performances de différentes chaînes d'épuration modifiées et améliorées par l'ajout des MEEE et des autres procédés, le cas échéant, en vue de les classer de la meilleure à la moins bonne sur la base d'une procédure d'agrégation multicritère. Les critères utilisés tiennent compte de divers axes de signification représentant les différents enjeux par rapport auxquels les parties prenantes, principalement l'offreur des MEEE, les consommateurs et les organismes de contrôle justifient, transforment et argumentent leurs préférences dans le processus décisionnel.

L'avantage d'utiliser une méthode multicritère d'aide à la décision pour solutionner ce type de problème, comparativement aux méthodes de minimisation des coûts, porte sur le focus placé, dans la recherche de la solution, à la nature multidimensionnelle du problème de gestion soulevé. Au lieu de simplifier les préférences décisionnelles en un seul axe de signification, on élargit le champ de raisonnement en vue d'arriver à un consensus tenant compte de plusieurs aspects pondérés suivant l'importance relative accordée à chacun d'eux (poids de critères). Ce formalisme d'analyse aboutit à une solution de compromis, obtenue par une démarche impliquant toutes les parties prenantes. Sa particularité, dans la recherche de solution dans un problème impliquant plus d'un intervenant, est de ne pas fournir une solution unique, la meilleure, cachée quelque part que l'on doit découvrir par de sophistifications mathématiques comme c'est le cas en optimisation unicritère, mais plutôt d'apporter une aide au processus décisionnel par la démarche d'analyse suivie : implication de parties prenantes au niveau de la définition de critères et à la détermination de leur poids, prise en compte de leur préférence via les seuils²⁰. En effet, dans la solution

²⁰ *En analyse multicritère, tous facteurs décisionnels ne sont pas considérés sur un même pied d'égalité, c'est la raison d'utilisation du poids de critères, paramètre d'analyse donnant l'importance relative accordée à chaque critère. On tient également compte des seuils d'indifférence, de préférence et de veto. Les seuils d'indifférence donnent le niveau où le décideur est indifférent entre deux performances (évaluations, pour un critère donné) en faisant une comparaison entre deux alternatives. Le seuil de préférence donne le niveau auquel la préférence pour une alternative donnée (en comparaison avec une autre) devient stricte. Le seuil de veto donne le niveau où, une fois atteint, l'alternative (toujours en comparaison avec une autre) ne peut plus être mieux jugée que l'autre, peu importe les évaluations réalisées au niveau des autres critères. C'est donc un niveau de discrimination important dans le processus de modélisation.*

proposée, un rangement des chaînes épuratoires améliorées de la meilleure à la moins bonne, l'on ait en présence de plus d'une solution. La solution définitive, la plus satisfaisante, sera trouvée par le(s) décideur(s) suivant le contexte et peut être la conjoncture.

Quant à la méthode d'agrégation multicritère proposée, elle est basée essentiellement sur l'utilisation des seuils de préférence, d'indifférence et de veto. Son application est consistante à la nature de certaines données contenues dans le tableau multicritère (données à distribution triangulaire, données qualitatives à intervalle) (voir Kibi *et al.*, 1997b). Dans le cas de l'évaluation du coût d'implantation des MEEE dans les chaînes d'épuration, par exemple, nous étions obligés, suivant les résultats de la table ronde, de considérer trois hypothèses de coûts²¹. Les évaluations distributionnelles obtenues suivant les trois hypothèses posées, se traiteraient difficilement, avec des relations de préférence ou d'indifférence probabilistes ou encore par la détermination de relations de surclassement probabilistes (cas de l'utilisation du théorème de Bayes). Dans ces deux cas, les probabilités de réalisation des événements sont difficiles à déterminer compte tenu des informations disponibles sur l'installation et le fonctionnement des MEEE dans les stations

²¹ On tient compte implicitement du temps de retour sur l'investissement et de la politique de financement en considérant les trois hypothèses suivantes : 1) les nouvelles installations sont totalement subventionnées, 2) le temps de retour sur l'investissement est supérieur à 4 ans et les installations sont subventionnées à 50 %, 3) le temps de retour sur l'investissement est inférieur à 4 ans et l'investissement total est inférieur à 100 000 \$, dans ce cas les nouvelles installations peuvent totalement être financées par la municipalité. Il faut noter que les installations sont aussi financées à 100 % par la municipalité dans le cas d'une nécessité de fonctionnement.

d'épuration du Québec²². La notion de seuils, exploitée dans la détermination de l'indice de concordance global et des indices de discordance, semble être plus facile d'application et à faire accepter aux décideurs dans ce cas précis. Dans le processus d'analyse, nous étions également obligés d'utiliser des évaluations qualitatives sur plusieurs critères (facilités ergonomiques, niveau d'automatisation de la chaîne d'épuration, développement durable, etc.). Les chaînes d'épuration améliorées étant ici analysées dans un sens virtuel (on a simulé l'implantation des MEEE), il est difficile de déterminer avec précision les facilités ergonomiques de la nouvelle chaîne d'épuration (ancienne chaîne d'épuration + les MEEE), sans passer par des évaluations techniques et des audits énergétiques au préalable. Dans ce cas, pour éviter de s'éloigner de la réalité, il est plus raisonnable d'utiliser les données qualitatives à intervalle ou à pas. Ces données se traitent aussi bien dans la méthode d'agrégation multicritère préconisée.

Enfin, la procédure d'agrégation utilise les poids de critères déterminé en dehors des équations, contrairement à la méthode d'agrégation de Dendrou *et al.* (1980), où ils sont déterminés de manière implicite. Cette flexibilité est intéressante dans la mesure où elle permet de faire participer les décideurs à la détermination de ces poids. C'est une implication directe dans le processus de modélisation. Cette considération est très importante en analyse multicritère d'aide à la décision, où l'analyste « le scientifique » est

²²La détermination de probabilités de réalisation des événements nécessitent l'utilisation de plusieurs données (historiques à l'occurrence). Or dans le cadre du programme d'efficacité énergétique, les données sur l'installation et le fonctionnement de plusieurs MEEE sont rares.

parfois obligé de démontrer auprès du décideur le bien fondé de la démarche. C'est un aspect non négligeable dans l'acceptabilité de la solution proposée.

5.3 Interprétation des résultats obtenus

Les résultats obtenus dans l'analyse du premier volet du problème montrent que les MEEE choisies possèdent particulièrement un bon potentiel d'économie d'énergie tout en satisfaisant les autres caractéristiques des MEEE basées sur les coûts, l'efficacité épuratoire, la contribution au développement durable, etc. Dans le cas, par exemple, de la quatrième chaîne d'épuration (une *Boue activée*) traitant un débit hydraulique de 19,700 m³/d, l'amélioration de la consommation énergétique hydraulique et de la consommation énergétique épuratoire se réalisent à l'aide des MEEE touchant directement le fonctionnement des procédés. En effet, au niveau du traitement secondaire, c'est principalement le débit d'air ou d'oxygène et les caractéristiques du système d'alimentation, notamment la vitesse d'alimentation en air, qui déterminent la quantité d'énergie électrique consommée. Ainsi, l'implantation : 1) *de diffuseurs à fines bulles*, 2) *de moniteurs pour le contrôle de l'oxygène dissous dans le système d'aération* et 3) *d'un système d'ajustement automatique du débit d'air* au niveau du bassin d'aération, permettra de contrôler 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. Dans ce cas, l'optimisation du système d'aération se fera généralement sans compromettre pour autant le rendement épuratoire de la station d'épuration, en maintenant l'oxygène dissous aux environs de 2 mg/L partout dans le bassin d'aération.

Quant à l'application de ces résultats à l'ensemble du parc des ouvrages municipaux actuel, l'implantation de ces trois mêmes MEEE dans une autre chaîne d'épuration de type boues activées traitant un débit hydraulique contenu dans la fourchette considérée et fonctionnant dans les conditions similaires de celles de la quatrième chaîne étudiée, réduirait également la consommation d'électricité.

Cette interprétation montre que les résultats obtenus (implantation des MEEE appropriées) sont directement corrélés au fonctionnement de la chaîne d'épuration améliorée virtuellement. On note qu'il y a modification du niveau de la consommation dans l'ancien système d'épuration, à la suite de l'implantation des MEEE. Ceci a un effet sur la gestion de l'électricité. Au niveau de la station d'épuration, la diminution de la consommation se traduirait par des économies monétaires et au niveau du producteur, il y aurait modification du système de production via la nouvelle structure de la demande d'électricité destinée au parc des ouvrages d'assainissement des eaux usées municipales.

Pour ce qui est de la construction de nouvelles stations d'épuration efficaces du point de vue énergétique, on doit prendre en considération non seulement les critères habituels comme l'efficacité du traitement, le coût d'opération, le coût d'investissement, mais également l'efficacité énergétique épuratoire et hydraulique, ainsi que certains paramètres moins facilement quantifiables qui se sont avérés importants dans la décision d'implanter les MEEE, comme la contribution au développement durable ou encore les facilités ergonomiques de la chaîne d'épuration. L'utilisation des données sur les MEEE pouvant être implantées dans les chaînes d'épuration fournit alors l'information nécessaire à la mise en place des chaînes de traitement efficaces sur le plan énergétique.

La solution retenue ici est de classer, de la meilleure à la moins bonne, les six chaînes d'épuration étudiées après y avoir simulée l'implantation de MEEE choisies par l'analyse conjonctive. Dans l'ensemble, les six chaînes d'épuration sont considérées comme représentatives de leur classe de capacité hydraulique de traitement. Elles représentent de plus un sous-ensemble important du parc actuel de stations d'épuration des eaux usées municipales. Les résultats de cette *modélisation* devraient permettre de discriminer le comportement des technologies d'épuration après l'ajout des MEEE, et de juger ainsi de leur performance relative dans les investissements pour la construction de nouvelles stations d'épuration.

L'effet combiné des critères énergétiques, constituant un indicateur du niveau de consommation électrique atteignable dans les systèmes épuratoires, et d'autres critères décisionnels, comme le coût net d'implantation, le coût d'opération, les critères de qualité, permet le rangement de différentes chaînes d'épuration améliorées. Le classement obtenu reflète l'effet des objectifs visés, soit : la rationalisation de la consommation d'électricité et l'efficacité globale de la chaîne épuratoire.

La *chaîne 3* arrive au *premier rang*. De manière générale, cette chaîne a de bonnes performances en regard de l'ensemble des critères. Le coût net d'implantation, les coûts d'exploitation et de maintenance, par exemple, ainsi que la consommation énergétique hydraulique sont comparables à quatre autres chaînes d'épuration. Par contre elle a des performances supérieures aux autres chaînes sur les plans de la consommation énergétique épuratoire et de l'efficacité épuratoire mesurée par rapport aux M.E.S et au Pt. La *chaîne 1* occupe le *deuxième rang* puisqu'en général, l'ensemble de ces performances sont

comparables à celles de la chaîne 3, à l'exception des coûts d'exploitation et de maintenance et de l'efficacité épuratoire mesurée par rapport au Pt. Le *troisième rang* est occupé par la *chaîne 4*. Cette chaîne possède de bonnes performances à l'égard de quelques critères comparativement aux deux premières chaînes. Par contre elle est un peu désavantagée par rapport à deux d'entre-elles, à l'égard des critères environnementaux comme l'efficacité épuratoire mesurée par rapport à la DBO₅, aux M.E.S. et au Pt. Les *trois derniers rangs* sont occupés respectivement par les chaînes 6, 5 et 2. La chaîne 6 possède deux performances manquantes. La chaîne 5 présente de très bonnes performances sur les critères environnementaux avec des rendements épuratoire de 95% et 94% pour les M.E.S. et la DBO₅ respectivement. Par contre elle est désavantagée par rapport aux autres chaînes surtout en ce qui a trait au coût net d'investissement et très fortement désavantagée du point de vue des coûts d'exploitation et de maintenance. Ce dernier facteur, dans le cas de cette chaîne, est au moins le double des autres chaînes d'épuration.

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que les trois premières chaînes d'épuration améliorées sont les plus performantes sur la base de critères d'analyse considérés. Cela signifie que pour l'expansion du parc, ces trois chaînes seront préférées aux autres chaînes lorsqu'il s'agit de construire une nouvelle station d'épuration efficace sur le plan de la consommation électrique et qui traiterait un débit hydraulique contenu à l'intérieur de la fourchette considérée. Cette fourchette de débit hydraulique est significative puisque 30.3 % du débit (représentant 33.7 % de la population du Québec) est traité par les stations de capacité comprise entre 5,000 et 100,000 m³/d, alors que les trois grandes stations

(Communauté Urbaine de Montréal, Communauté Urbaine de Québec et Communauté Urbaine de l'Outaouais) traitent plus de 63.1 % du débit (représentant 56.5 % de la population du Québec).

Les résultats de ce deuxième volet du problème reflètent mieux le bien fondé de proposer au(x) décideur(s) une solution de compromis et non une solution unique, la meilleure comme dans le cas des approches d'optimisation unicritères. Dans l'opération des stations d'épuration, les trois chaînes d'épuration améliorées du classement multicritère, présentent de ressemblables remarquables du point de vue rendement épuratoire, constituant l'objectif ultime d'une station d'épuration des eaux usées municipales. Dans le cadre de l'expansion du parc des ouvrages d'assainissement des eaux usées du Québec, la construction de nouvelles stations d'épuration possédant un bon rendement épuratoire, un niveau de consommation électrique acceptable, un coût d'opération moyen et qui sont faciles à opérer, constitue un bon compromis pour le producteur d'électricité et les municipalités qui sont en charges des stations d'épuration des eaux usées du Québec.

CONCLUSION

Le principal objectif poursuivi par cette thèse est d'élaborer un mécanisme d'aide à la décision facilitant la gestion de l'offre et de la demande des mesures d'efficacité énergétique électrique susceptibles d'être intégrées dans les chaînes d'épuration des eaux usées municipales. Cette intégration vise à augmenter l'utilité de l'électricité dans les opérations d'épuration et à diminuer les niveaux de la demande et de la consommation qui en résultent.

Le mécanisme d'aide à la décision élaboré dans cette thèse intègre la logique décisionnelle du producteur d'électricité et celle du consommateur des MEEE, les municipalités. Il a été possible de tenir compte que, par exemple, le producteur préférera une MEEE capable de diminuer la consommation de pointe, alors que les municipalités préféreront une MEEE avec un temps de retour sur l'investissement assez court. L'intégration de ces deux logiques dans le choix des MEEE, ceci dans un cadre qui les astreint à atteindre des performances environnementales, a permis de tenir compte de la multidimensionalité du problème de choix.

Les aspects déterminants dans les choix sont les immobilisations, les coûts d'exploitation et de maintenance, la politique de financement, l'effet de l'intégration des MEEE sur la consommation d'électricité, sur l'appel de puissance et sur l'efficacité globale des systèmes d'épuration, l'évaluation des économies tendancielle pour bien distinguer « l'impact net » de « l'impact brut » d'une mesure d'efficacité énergétique, etc.

Dans l'ensemble, l'analyse conjonctive a permis d'identifier une solution de compromis entre les évaluations de nature différente et conflictuelle. Cette analyse permet de choisir des MEEE concrètement utilisables dans les stations en opération actuellement. Ces MEEE sont considérées comme performantes et susceptibles d'être utilisées avantageusement pour augmenter l'utilité de l'électricité et diminuer particulièrement la consommation de pointe dans les chaînes d'épuration des eaux usées existantes. Elles possèdent naturellement un bon potentiel d'économie d'énergie et le comportement vis-à-vis les autres facteurs décisionnels est aussi appréciable.

Les résultats montrent que parmi les six chaînes d'épuration analysées, les trois premières positions sont occupées par les chaînes de types Réacteurs Biologiques Séquentiels, Biofiltration et Boues activées respectivement. Ces données peuvent être utiles pour aider au choix des meilleures technologies efficaces sur le plan électrique dans le cadre de l'expansion du parc d'ouvrages d'épuration des eaux usées municipales actuel.

La contribution la plus significative de cette thèse est le fait de proposer une solution à un problème complexe, pratique et réel nécessitant des connaissances sur les technologies d'épuration des eaux usées, la gestion de l'électricité (production et consommation) et sur les méthodes de gestion des systèmes, en l'occurrence les outils d'aide à la décision.

La démarche suivie dans la réalisation de l'étude et la solution proposée démontre jusqu'à quel point la simplification de la réalité humaine en un seul axe de signification, ne représente plus l'hégémonie de la rationalité cartésienne prônée autrefois. Au cours de l'enquête et de la table ronde, par exemple, nul n'était près à prendre pour compte que le

problème du choix des mesures d'efficacité énergétique ne dépendait que des coûts, il faudrait considérer d'autres facteurs pour arriver à une solution adéquate et acceptable. C'est là l'importance de développer des outils d'analyse qui soient plus près des utilisateurs. Selon Bouyssou (1984: dans Azondékon, 1991), la façon la plus indiquée pour valider un outil d'aide à la décision est sa capacité de convaincre leurs utilisateurs directs, les décideurs, ainsi que les concepteurs, les conseillers ou les académiciens. La conviction des utilisateurs directs (décideurs) exige la transparence de l'outil d'analyse développé, ainsi que sa simplicité relative et son accessibilité.

Enfin, nous n'avons pas la prétention d'avoir développée la meilleure « l'unique » démarche analytique et stratégique pour solutionner la problématique de l'efficacité énergétique dans le secteur de l'eau, puisque la démarche utilisée a des limites.

La première limite porte sur le processus d'analyse utilisée. Deux considérations sont à signaler à ce niveau. L'utilisation de l'analyse conjonctive pour solutionner le premier volet du problème et la technique d'intégration (la simulation) des MEEE dans les stations existantes. Nous l'avons souligné dans le texte, l'analyse conjonctive est une simplification d'un problème complexe qui nécessiterait plus d'investigations pour être solutionné. La première simplification importante porte sur les critères, que nous avons considéré, d'égale importance. La deuxième simplification concerne la procédure de choix de MEEE. Il s'agit de la détermination des conditions limites d'acceptabilité. Les MEEE choisies doivent être considérées seulement à l'intérieur de cette limite. Les études subséquentes pourraient éventuellement améliorer cette procédure d'analyse.

À propos de la simulation de l'intégration des MEEE dans les stations d'épuration existantes donnant lieu à des stations améliorées, les études subséquentes pourraient préconiser une technique de simulation basée sur des considérations mathématiques.

La deuxième limite touche les décideurs et leurs acolytes (les participants à l'étude). La question à se poser est celle de savoir jusqu'à quel point les opinions des personnes impliquées dans l'analyse sont définitives et non évolutives (nous pensons particulièrement ici à la détermination du poids de critères, de différents seuils, sur laquelle repose la méthode d'agrégation utilisée)? Nous savons que le monde évolue et avec lui les opinions de personnes, les humeurs, etc. Est-ce que les résultats obtenus seraient différents avec un autre groupe de décideurs ? Nous voulons simplement souligner que la démarche d'analyse est contextuelle. Les recherches subséquentes devraient donc se pencher sur ce point essentiel, le choix des décideurs, sur qui repose « la qualité du produit fini ».

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anderson L.G. (1980). *Energy savings at wastewater treatment plants*. Commission of European Communities-Energy, rapport EUR 6680 EN.
- Anonyme (1976). *Technology Assessment for New Water Development Projects*. Office of Water Research and Technology, Washington, 3 volumes.
- Anselin L. et E.G. Arias (1983). A Multi-criteria framework as a decision support system for urban growth management applications: central city redevelopment. *Eur. J. Operat. Res.*, **13**: 300-309.
- Baker B.D. et E. Battle (1992). *Demand-Side Management for electricity : Pushing Back Barriers*. Calgary: Canadian Energy Research Institute.
- Barbet P. (1983). *La théorie des prix de l'énergie dans la pensée économique: une recension*. Economies et Sociétés, « Les prix de l'énergie », Cahiers de l'I.S.M.E.A., Série EN no.1, Décembre, p.1809-1834.
- Barda O.H., J. Dupuis et P. Lencioni (1990). Multicriteria location of thermal power plants. *Eur. J. Operational Res.*, **45**: 332-346.
- Bardera A. J. et V-D. McConnel (1990). The impact of Environmental Regulations on Industry Productivity: Direct and Indirect Effects. *J. Environ. Econ. Manag.*, **18**: 50-65.

- Batchelor A., A. Bacarro et P. Pybus (1991). Low-Cost and Low-Energy Wastewater Treatment: A South African Perspective. *Water Sci. Technol.*, **24(5)**: 241-246.
- Bernard J.T. (1980). *La vérité des prix : tarification au coût marginal ou tarification à l'équilibre budgétaire*. R.C.B., no.43.
- Bernard J.T. (1992). Compétition électricité/gaz au Québec. *Energy Studies Review*, **4(2)**:117-127.
- Bernard J.T. (1994). L'efficacité énergétique chez Hydro-Québec. *Canadian Public Policy*, **XX(1)**: 26-32.
- Berthomieu C. (1968). *La gestion des entreprises nationalisées*. P.U.F., Paris.
- Bishop, R. C., A.T. Heberlein et M. J. Kealy (1983). Contingent valuation of Environmental Asseds: comparaisons with a simulated market. *Natural Resource J.*, **23(3)**: 619-633.
- Blais J.F., J.L. Sasseville, K. Mamouny, N. Kibi et H. Hamelin (1995). Consommation énergétique des stations québécoises d'épuration des eaux usées municipales. *Vecteur Environnement*, **28(2)**: 25-39.
- Blais J.F., K. Mamouny, N. Kibi, J.L. Sasseville et M. Létourneau (1994). *Les mesures d'efficacité énergétique électrique dans le secteur de l'eau*. Volume 3. *Les mesures d'efficacité énergétique pour l'épuration des eaux usées municipales*. Projet mandaté par Hydro-Québec, rapport scientifique No. 405-3, INRS-Eau, Université du Québec.

- Blais J.F., R.D. Tyagi et J.C. Auclair (1992). Comparison of acid and microbial leaching for metal removal from municipal sludge. *Wat. Sci. Technol.*, **26**(1/2): 197-206.
- Blevins R. et B. Miller (1991). *Survey of Industrial-Sector Demand-Side Management Programs*. EPRI CU-7089; Project 2884-1.
- Blin J.-M. (1977). Fuzzy sets in multiple criteria decision-making. *TIMS Studies in Management Sciences*, 6.
- Bohm P. (1971). An approach to the problem of estimating demand for public goods. *Sweden J. Economics*, **4**(5): 55-66.
- Boiteux M. (1956). *Sur la gestion des monopoles publics astreints à l'équilibre budgétaire*. *Econometrica*, Janvier. Dans Percebois, J. (1989).
- Bourbonnais J. (1992). Industries, Environnement et électricité-Horizon 2006. *Marché industriel Journal*.
- Bouyssou D. (1984). *Approches descriptives et constructives d'aide à la décision: fondements et comparaisons*. Thèse de 3^e Cycle, Université Paris-Dauphine.
- Brans J.P.(1982). *L'ingénierie de la décision: l'élaboration d'instruments d'aide à la décision*. Colloque, Faculté des Sc. de l'administration, Université Laval, 22 p.
- Brans J.P., B. Mareschal et Ph. Vincke (1984). PROMETHEE : A new family of outranking multiple criteria. *Cahier du LAMSADE*, no. 88, Université de Paris Dauphine, Paris, France.

Briggs Th., P.L. Kunsch et B. Mareschal (1990). Nuclear Waste management : Application of Multicriteria PROMETHEE Methods. *Eur. J. Operat. Res.* **44**: 1-10.

Brockton C.N. (1987). Energy Management considerations and their application. *J. Inst. Water Environment Manag.*, **1(1)**: 111-116.

Brooks H. (1988). *The Government of Science*. The M.I.T. Press.

Burton Environmental Engineering RCG/Hagler, Bailly Inc. et Metcalf & Eddy Inc. (1993). *Water and Wastewater Industries: Characteristics and DSM Opportunities*. Electric Power Research Institute, rapport EPRI TR-102015, Projects 2662-10, 3046-03, Paolo Alto.

Charles River Associates (1977). *Subsidies, capital formation and technological change: Municipal wastewater treatment facilities*. Vol.1, Rapport no.302-03, Cambrigde, Mass. 140 pages.

Cliff R.C. et J.F. Andrews (1981). Aeration control for reducing energy consumption in small activated sludge plants. *Water Sci. Technol.*, **13(7)**: 371-379.

Cohon J.L., C. Revelle, J. Current (1980). Application of Multiobjective facility location model to power plant siting in a six-state region of U.S.A.. *Computers Operations Res.*, **7(3)**: 107-123.

Coomber N.H. et A.K. Biswos (1972). *Evaluation of environmental intangibles*. Bronxville, N.Y: Geneva Press.

- Côté P.L. (1981). *Le rôle des modèles mathématiques dans la conception d'une station d'épuration*. Assises Annuelles de l'AQTE 1981, Montréal, 25 au 28 février 1981, Association québécoise des techniques de l'eau.
- Couillard D. (1989). Elimination des boues résiduelles urbaines par la fertilisation sylvicole. *Can J. Civ Eng.*, **16**: 650-661.
- Couillard D. et G. Mercier (1991). Procédé de solubilisation biologique des métaux dans les boues anaérobies d'épuration: filtrabilité, neutralisation et teneurs en N et P des boues traitées. *Can J. Chem., Eng.* **69**: 779-778.
- Couillard D. et G. Mercier (1993). Removal of metals and fate of N and P in the bacterial leaching of aerobically digested sewage sludge. *Wat. Res.*, **27**: 1227-1236.
- Couillard D. et S. Zhu (1992). Bacterial leaching of heavy metals from sewage sludge for agricultural application. *Wat Air Soil Pollut.*, **63**: 76-81.
- Couillard D. (1994). Environmental factors affecting sustainable uses of sawage as agricultural fertilizer. *J. Environ. Syst.* **22**: 83-96.
- Crandall R.W. (1983). *Pollution Controls and Productivity Growth in Basic Industries*. Dans: T.G. Cowing et R.E. Stevenson (éds), *Productivity Measurement in Regulated Industry*. New York : Academic Press.
- Crowley M., J.L. Sasseville et D. Couillard (1986). L'importance accordée à l'évaluation technologique dans l'assainissement des eaux usées municipales au Québec. *Rev. Int. Sci. Eau*, **2(2)**: 49-57.

- Crowley M. (1991). *Le marché politique comme mécanisme de réduction de l'incertitude dans le contrôle de la pollution : le cas de l'assainissement des eaux usées municipales au Québec de 1978 à 1987*. Thèse de doctorat, INRS-Eau, Université du Québec, 299 p.
- D'Avignon G. et Ph. Vincke (1988). An outranking method under uncertainty. *Eur. J. Operat. Res.* 36.
- Dantzig G. (1966). *Applications et prolongements de la programmation linéaire*. Dunod, Paris.
- Dasgupta A.K. et D.W. Pearce (1972). *Cost-benefit Analysis : Theory and Practice*. London, Macmillan.
- De Neuville R. et R.L. Keeney (1972). Systems evaluation through decision analysis: Mexico City airport. *J. Systems Eng.*, 3(1).
- Degrémont et Lyonnaise des Eaux (1989). *Mémento technique de l'eau*. 2 tomes. Paris: Degrémont.
- Dendrou B.A., S.A. Dendrou et E.N. Houstis (1980). Multiobjective decision analysis for engineering systems. *Compt. operat. Res.*, 7: 118-125.
- Derot B., J. Gareau, L.N Kiss et J.M. Martel (1994). Le solveur du tableau multicritère VOLVOX. *Document de travail 94-11, Centre de Recherche sur l'Aide à l'évaluation et à la décision dans les organisations*, Faculté des Sciences de l'Administration, Université Laval.

- Dorfman R. et N.S. Dorfman (1972). *Economics of Environment. Selected Reading*. New York: W.W. Norton and Company inc. pp. XIIIV à XL.
- Eckenfelder W. (1982). *Gestion des eaux usées urbaines et industrielles. Caractérisation - Techniques d'épuration - Aspects économiques*. L. Vandevenne, (trad.) XIV, 503 p., Paris : Lavoisier.
- Electric Power Research Institute (1984). *Demand-Side Management*. Volume 1: Overview of key Issues, EA-EM 3597.
- Electric Power Research Institute (1992). *Survey of Utility demand-side management programs*. EPRI, vol. 1 et 2.
- Electric Power Research Institute (1993). *Energy efficiency in wastewater treatment. TechCommentary, 1(2): 1-6*.
- Fishburn P.C. (1977). *A survey of multiattribute/multicriteria evaluation theories*. Dans Multicriteria problem solving, Zionts S. (ed.) Springer Verlag.
- Fisher A.-C., J.V. Krutilla et C. J. Cicchetti (1972). The economics of environmental preservation : A theoretical and empirical analysis. *Am. Economic Rev.*, **62(2)**: 605-619.
- Foell W.K. (1979). *Management of Energy/Environment Systems : Methods and Case studies*. International Institute for Applied Systems Analysis. J. Wiley & Sons.

- Fosberg T.M. et J. Mukhopadhyay (1981). Selecting Energy-Efficient Wastewater Treatment systems. *CEP*.
- Freeling A.N.S. (1980). Fuzzy sets and decision analysis. *IEEE Transactions on systems Man. Cybernetics*, 10 (7).
- Gammill L.M. (1993). Proactive Approach to Pollution Prevention. *Pollut. Eng.*, 34.
- Gasso S., J.M. Baldasano et C. Celades (1989). *Application du systeme CAD/CAE SIMTAR à la conception des usines de traitement des eaux usées*. Symposium International sur le traitement des eaux usées, 20-21 novembre 1989, Montréal, Québec.
- Gest-eau (1995). *Audit énergétique de l'usine d'épuration de l'Île Perrot*. Les Consultants GEST-EAU Inc., Dossier 41-032, Montréal.
- Goicoechea A., D.R. Hansen et L. Dukstein (1982). *Multiobjective decision analysis with engineering and business applications*. John Wiley and Sons.
- Goicoechea A. (1977). *A multiobjective stochastic programming model in watershed management*. Thèse de doctorat, University of Arizona, Tucson.
- Gouja M. (1993). Les limites de la tarification marginaliste comme instrument de gestion de la demande d'électricité. *Revue de l'énergie*, 449(1): 365-376.
- Groupe Environnement Shooner Inc. (1994). *Identification des mesures d'efficacité énergétique électrique dans le secteur de l'épuration des eaux usées municipales*.

- Groupe Tecknika Inc. (1994). *Inventaire des installations d'aération des stations d'épuration du Québec et estimation de la consommation énergétique annuelle.*
- Hanson M.. (1991). Electric Utility Least-cost Planning Within a Multiattribute Decision-making Framework. *J. Am. Planning Assoc.*, 4(3): 12-17.
- Harris W.R., M.J. Cullinane (1982). *Process Design and Cost Estimating Algorithms for the Computer Assisted Procedure for the Design and Evaluation of Wastewater Treatment Systems (CAPDET)*. Final Report. Préparé pour U.S. Environment Protection Agency, 729 p.
- Harris B.S. (1984). Contingent Valuation of Water Pollution Control. *J. Environ. Manag.*, 19(6): 199-208.
- Hohmeyer O (1988). *Social costs of energy consumption*. Berlin Spring Verlag.
- Holdren J.-P. (1987). Global Environmental Issues related to Energy supply : the Environment case for increased efficiency of energy uses. *Energy*, 12(1): 975-992.
- Hwang C. et A. Masud (1980). Mathematical programming with multiple objective. *Comp. Operat. Res.*, 7: 5-31.
- Hydro-Québec (1985). *Les électrotechnologies et l'industrie*. Montréal.
- Hydro-Québec (1992). *Potentiel technico-économique d'amélioration de l'efficacité économique au Québec*. Groupe Commercialisation et Affaires internationales, Service de planification commerciale, Montréal, Québec.

- Hydro-Québec (1993a). *Programmes d'efficacité énergétique d'Hydro-Québec*.
- Hydro-Québec (1993b). *L'efficacité énergétique: de multiples façons d'améliorer votre compétitivité*. Montréal.
- Jacobs Engineering Group R. Rice et M. Browning (1994). Ozone Treatment of industrial Wastewater. *Pollut. Techn. Rev.*
- Jacquet-Lagrez E. (1977). *Modeling preferences amongs distributions using fuzzy relations*. Dans Jungermann H. et G. Zeeuw (éds), *Decision making and change in human affairs*, Reidel D. Publishing Company.
- Keeney R.L. et K. Nair (1977). *Selecting nuclear power plant sites in the Pacific Northwest using decision analysis in : conflicting objectives in decisions*. Bell, Keeney et Raiffa (éds.), New York.
- Keeney R.L. et H. Raiffa (1976). *Decisions with multiple objectives preferences and value of trade-offs*. John Wiley and Sons.
- Kibi N. (1996). *Élaboration d'un mécanisme d'aide à la décision pour la gestion de l'implantation des électrotechnologies et des mesures d'efficacité énergétique électrique dans les systèmes de traitement d'eau potable, d'épuration des eaux usées municipales et dans le traitement des boues: une modélisation multicritère*. Projet mandaté par Hydro-Québec, INRS-Eau, Université du Québec, Sainte-Foy, Québec.

- Kibi N., J.L. Sasseville, J.F. Blais, J.M. Martel et D. Couillard (1997a). Modélisation multicritère pour l'amélioration de l'efficacité énergétique électrique dans les stations d'épuration des eaux usées municipales. (Soumis à la revue *Vecteur Environnement*).
- Kibi N., J.L. Sasseville, J.M. Martel, D. Couillard et J.F. Blais (1997b). Évaluation multicritère de la performance globale de procédés d'épuration des eaux usées améliorés par l'intégration des mesures d'efficacité énergétique. (Soumis à la revue *des Sciences de l'eau*).
- Kibi N., J.L. Sasseville, D. Couillard et J.F. Blais (1994). Évaluation technico-économique de différentes chaînes de traitement des eaux usées municipales et domestiques réalisée dans une perspective de choix. *Compte rendu du 17^e Symposium International sur le traitement des eaux usées*, Hôtel Le Méridien, Montréal (Québec).
- Kibi N., J.L. Sasseville, J.F. Blais, D. Couillard (1996). Applicabilité des mesures d'efficacité énergétique électrique dans les ouvrages d'épuration des eaux municipales. *Vecteur Environnement*, 29(4): 33-46.
- Kirkpatrick P. J. (1991). *Applied Mathematical for Wasterwater Plant Operators*. Math. for Water and Wasterwater Treat. Plant Operators Series.

- Klemetson S.L. et W.V. Grenney (1976). Physical and Economic parameters for Planning Regional Wastewater Treatment systems. *J. Water Pollut. Control Fed.*, **48(12)**: 2690-2699.
- Klir G.J. et T.A. Folger (1988). *Fuzzy sets, uncertainty , and information*. Prentice-Hall, Englewood, New Jersey.
- Leavit H.-J. (1975). *Beyond the analytical manager*. Spring, XVIII: 3.
- Legay J.M. (1973). La méthode des modèles, état actuel de la méthode expérimentale. *Informatique et Biosphère*.
- Lemelin A. (1984). Les économies d'énergie et l'efficacité économique. *Document de travail 84-02 du GREEN*, Université Laval, Québec.
- Lessard M.P. (1989). Simulation dynamique d'une usine de traitement des eaux usées: Evaluation d'un modèle. *Symposium International sur le traitement des eaux usées*, Montréal, Québec.
- Létourneau M. et K. Pouliot (1995). Profil de l'ozonation en purification de l'eau potable au Québec et identification des MEEE applicables, Rapport final présenté au laboratoire des technologies électrochimiques et des électrotechnologies d'Hydro-Québec, SOLIVAR, Groupe-Conseil, Québec.
- MacRae K.M. (1989). *Critical Issues in Electric Power Planning in the 1990s*. Canadian Energy Research Institute, Calgary, Alberta.

- Marceau, R. (1992). L'assainissement des eaux du Québec: Planification et marché. *Sci. et Techniques Eau*, 3(2): 55-59.
- March J.G. (1978). Rationalité limitée, ambiguïté et mécanique du choix. *Bell J. Economics*, 9(2).
- Martel J.-M. et K. Zaras (1990). Dominance stochastique en analyse multicritère face au risque. *Cahiers du LAMSADE*, Université de Paris Dauphine, Paris.
- Martel J.-M., G.R. D'Avignon et J. Couillard (1986). A Fuzzy outranking relation in multicriteria decision-making. *Eur. J. Operat. Res.*, 25.
- Martel J.-M. et N. Kibi (1993). Choix multicritère du couple Site/Technologie pour l'installation d'une station de traitement et d'élimination des boues de fosses septiques. *Compte-rendu de la 15^e Conférence Canadienne sur la gestion de déchets*. St-John, Nouveau-Brunswick.
- Metcalf & Eddy Inc. (1993a). *Opportunities for energy conservation and demand-side management in pumping and aeration systems*. Electric Power Research Institute, Rapport TR-101599, Palo Alto.
- Metcalf & Eddy Inc. (1993b). *Water and Wastewater industries : characteristics and DSM opportunities*. Electric Power Research Institute (EPRI), rapport TR-102015, Palo Alto.
- Middlebrooks E.J., C.H. Middlebrooks et S.C. Reed (1981). Energy requirement for small wastewater treatment systems. *J. Water Pollut. Control Fed*, 47(3): 626-629.

- Monnier L. (1983). La tarification de l'électricité: nouveau débat. *Économie et Société*, vol. 17, Série En (1), décembre 1983.
- Mouloud N. (1980). *Les modèles*. Encyclopedie Universel, éd., Paris, France.
- Ontario Hydro (1993). *Municipal water and wastewater treatment facilities in Ontario*.
An assessment of electricity Use and the Impact of Environmental Regulations.
- Orlovsky S.A. (1978). Decision-making with a fuzzy preference relation. *Fuzzy sets and systems*, 1(1).
- Ouellette R.P., J.A King (1990). Electrotechnology vol.1: Wastewater Treatment and Separation Methods, 609p. Arbor Science Publishers.
- Owen W.F. (1982). *Energy in Wasterwater Treatment*. Prentice-Hall, Toronto, Ontario.
- Azondékon H. S. (1991). *Construction de relations de préférence floues dans le contexte non déterministe avec information incomplète*. Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec.
- Pearce D. W. (1971). *Cost benefit Analysis*. London, Macmillan.
- Percebois J. (1989). *Économie de l'énergie*. Économica, Paris, France.
- Pineau M. (1985). *Modèle mathématique pour optimiser la construction d'un réseau d'usines d'épuration à l'échelle du bassin versant-développement et applications*.
Thèse de doctorat, INRS-Eau, Sainte-Foy.

- Pineau M., P. Côté et J.P. Villeneuve (1985). Estimating of Wasterwater Treatment costs: Evaluation of the CAPDET Model for Canadian Conditions. *Can. J. Civ. Eng.*, **12**: 483-493.
- Plan Vert du Canada, l'état de l'environnement (1991).*
- Ton-That Q-A. et M.A. Desjardins (1995). Mesures d'économie d'énergie électrique applicables aux systèmes d'aération pour le traitement des effluents municipaux. *Vecteur Environnement*, **28(5)**: 33-43.
- Reid Crowther & Partners, Ltd (1978). *Conservation Measures in Waste Water Treatment Plants : A Feasibility Study*. Ontario Ministry of Energy, Ontario Ministry of the Environment, Toronto, 70 pages
- Reid M. et J. Culshaw (1984). Energy conservation considerations for Calgary's Bonnybrook Sewage Plant. *J. Water Pollution Control*, **122(1)**: 22-24, 36-38.
- Robert J.-M, S. Bellefleur, G. Pinault (1995). Programme cadre en efficacité énergétique-Volet municipal, Gest-eau inc., dossier 41-029-6.
- Rousseau A. et J.M. Martel (1994). Environmental Evaluation of an Electric Transmission Line Project. A MCDA Method. *Work Applying Multicriteria Decision Aid for Environmental Management*, M. Paruccini (éds), Kluwer Academic Publishers.
- Roy B. (1985). *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*. Economica, Paris, France.

- Roy B. (1987). Des critères multiples en recherche opérationnelle: pourquoi?". *Cahier de Lamsade*, 80.
- Roy B. (1988). La Recherche opérationnelle depuis 25 ans. *AFCET/INTERFACES*, 66.
- Roy B. et D. Bouyssou (1987). *Aide à la décision*. Encyclopédie des sciences de gestion, Vuibert.
- Roy B. et Ph. Vincke (1981). Multicriteria analysis survey and new directions. *Eur. J. Operat. Res.*, 8: 207-218.
- Roy B. (1978). ELECTRE III : un algorithme de classements fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples. *Cahier du CERO*, 1: 3-24.
- Roy B. (1977). Mathématique et décision en sciences de management. *Sciences et Techniques*, 44.
- Roy K.A. (1990). Innovative Technology Finds a New Ally. The National Environmental Technology Corp. *Hazmat World*, pp. 35-38.
- Saaty T.L.(1990). How to make a decision: the Analytic Hierarchy Process. *Eur. J. Operat. Res.*, 48: 9-26.
- Sasseville J.L., J.F. Blais, J.D. Bourgault, J. Lareau, R. Lebcir, K. Mamouny, N. Kibi, W. Sochanski, J. Desrosiers, D. Couillard et J.P. Villeneuve (1994). *Les mesures d'efficacité énergétique électrique dans l'industrie de l'eau*. Projet mandaté par

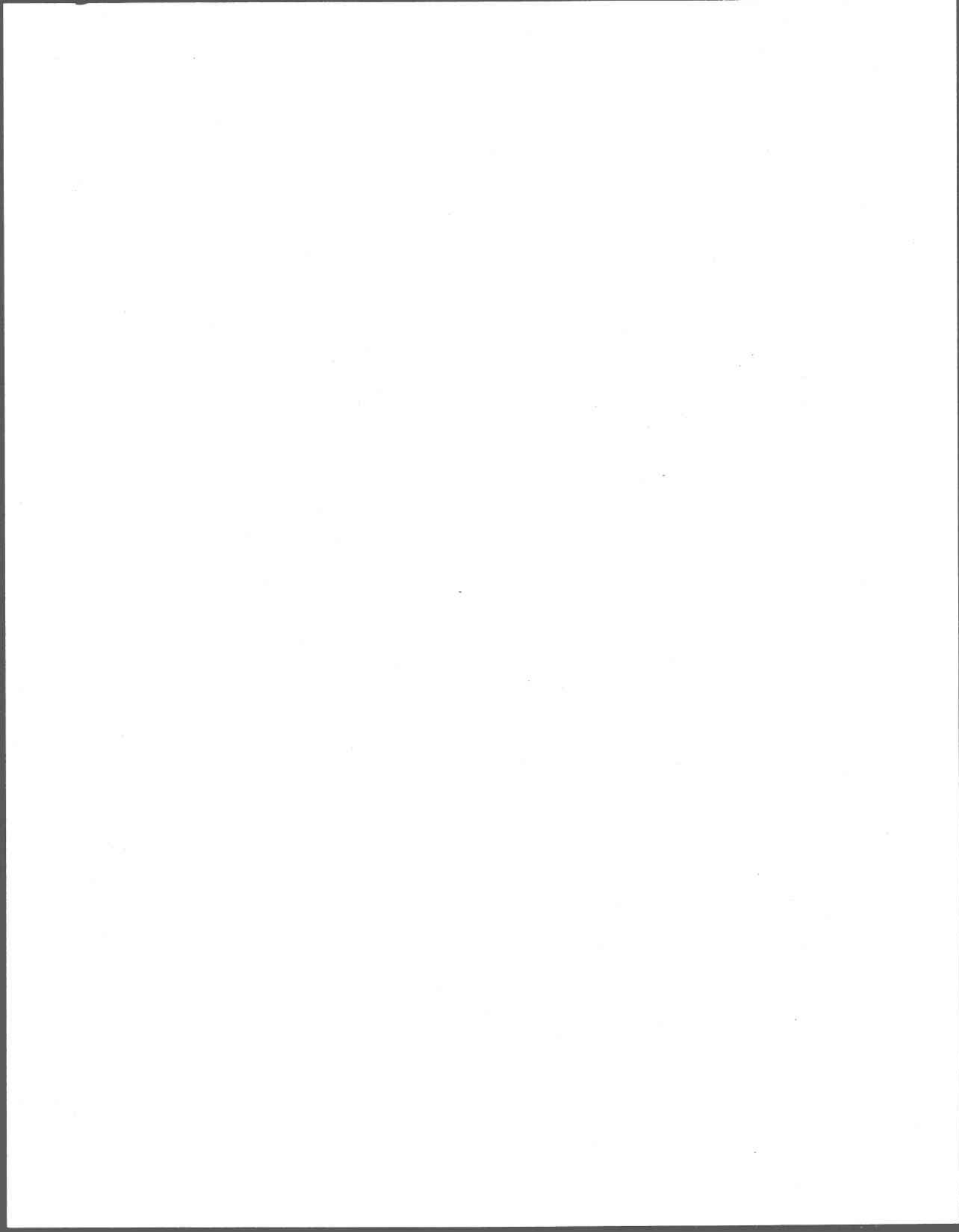
- Hydro-Québec, avril, rapport scientifique No. 405, INRS-Eau, Université du Québec, Sainte-Foy, Québec.
- Sasseville J.L. (1986). *Le contrôle institutionnel de la pollution et la maîtrise des systèmes de production des polluants: l'intérêt et la plausibilité d'une intervention sur le processus d'interaction homme-machines et sur les facteurs affectant la production des polluants*. Rapport scientifique no.213, INRS-EAU, 45p.
- Schärlig A. (1985). *Décider sur plusieurs critères*. Collection diriger l'Entreprise, Presses Polytechniques Romandes.
- Simos J. (1990). *Évaluer l'impact sur l'environnement*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Bienne, 261 pages.
- Slowinski R.-A. (1986). Multicriteria fuzzy linear programming method for water Supply System Development Planning. *Fuzzy Sets and Systems*.
- Slyadz N.N. et A.N. Borissov (1988). Decision-making based on fuzzy stochastic and statistical dominance. *Combining fuzzy imprecision with probabilistic uncertainty in decision making*, Kacprzyk J. et M. Dedrizzi (éds.) Springer-Verlag, Berlin.
- Teghem J. et P. Kunsch (1985). Multiobjective decision making under uncertainty : an example for power systems. Dans *Decision making with multiple objective*, Haimes et Chankong (éds.), Springer-Verlag, Berlin.
- Turvey R. (1966). *La vente au coût marginal: une solution de moindre mal*. Colloque de Biarritz.

- Turvey R. et D. Anderson (1977). *L'Économie de l'électricité: essais et études de cas*.
Publié pour la Banque Mondiale par les Éditions Economica, Paris
- Tyagi R.D., J.F. Blais, N. Meunier et D. Kluepfel (1993). Biolixiviation des métaux lourds
et stabilisation des boues d'épuration. Essai en bioréacteur opéré en mode cuvée.
Can. J. Civ. Eng., **20(1)**: 57-64.
- Tyteca D., Y. Sweers et E.J. Nyns (1977). Mathematical Modeling and Economic
Optimization of Wastewater Treatment Plants. *CRC Crit. Rev. Environ. Control*,
8(1): 89-108.
- U.S. Environmental Protection Agency (1980). *Innovative and Alternative Technology
Assessment Manual*.
- 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.
- Vanderpooten D. (1989). The interactive approach in MCDA: a technical framework and
some conceptions. *Math. and Comp. Modeling*, vol. 3.
- Vincke Ph. (1989). *L'aide Multicritère à la Décision*. Editions de l'Université de Bruxelles.
- Vismara R. (1985). A model for autothermic aerobic digestion. Effects of scale depending
on aeration efficiency and sludge concentration. *Water Res.*, **19(4)**: 441-447.

- Wang, M.H. et K. L. Wang (1979). Mathematical Modeling of Electrical Energy consumption and heating requirements by Municipal Wastewater Treatment Plants. *J. Environ. Sci.*, **12(3)**: 123-132.
- 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. *J. Environ. Eng. - ASCE*, **117(3)**: 300-307.
- Zadeh L.A. (1976). *The linguistic approach and its application to decision analysis*. Dans : *Directions in large Scale Systems*.. Ho Y.C et S. Miller (éds.), Plenum.
- Zadeh L.A. (1977). *A theory of fuzzy sets*. Elect. Res. Lab. University of California, Berkeley, Memo UCB/ERL/M77-1.

Zionts S. (1983). Multicriteria mathematic programming, an overview and several approaches. *Dans Multiple Criteria Decision Methods and applications*, Fandal et Spronk (éds), Springer Verlag.

ANNEXES



ANNEXE 1

Typologie des méthodes multicritères d'aide à la décision

TYPOLOGIE DES MÉTHODES MULTICRITÈRES D'AIDE À LA DÉCISION

Les méthodes multicritères d'aide à la décision peuvent être divisées en deux grands groupes. Il s'agit des méthodes avec attributs/critères multiples et les méthodes avec objectifs multiples.

(1) Les méthodes de décision avec attributs (critères) multiples (M.A.D.M.) sont destinées à comparer les actions d'un ensemble d'actions clairement explicitées. Dans ce groupe de méthodes, les spécialistes de l'analyse multicritère incluent:

- **La théorie de l'utilité multiattribut (MAUT)** : pour Vincke (1989), cette théorie repose sur l'axiome fondamental suivant : un décideur essaye inconsciemment (ou implicitement) de maximiser une fonction d'utilité U qui agrège tous les points de vue à prendre en compte. Autrement dit, si l'on interroge le décideur sur ses préférences, ses réponses seront en accord avec une certaine fonction U que l'on ne connaît pas. Le rôle de l'analyste ou du « scientifique » est d'essayer d'estimer cette fonction en posant des questions judicieuses au décideur. Les travaux de (Fishburn, 1964; 1977) et de Keeney et Raïffa (1976) donnent plus de détails sur l'opérationnalisation de cette approche.

La procédure générale consiste à représenter les préférences du décideur aux yeux de chaque attribut j par une fonction d'utilité U_j telle que l'action a est préférée à l'action b pour le critère j si et seulement si $U_j(a) > U_j(b)$. Ces fonctions U_j sont ensuite agrégées en une fonction unique U de telle sorte que le problème multicritère initial est ramené à un problème unicritère.

La fonction d'utilité peut être additive, multiplicative ou autre. Par exemple, elle est additive si elle peut se décomposer sous forme de

$$U = k_1u_1 + k_2u_2 + \dots + k_mu_m$$

où: u_j ($j=1, \dots, m$) représentent les utilités partielles définies sur chacun des m attributs; k_j les facteurs de pondération de chacun des m critères, avec, $\sum k_j = 1$.

- **Les méthodes de surclassement** : pour Vincke (1989), une relation de surclassement est définie comme étant une relation binaire S définie dans l'ensemble des actions telle qu'en prenant deux actions a et b , $a S b$ (a surclasse b) si, étant donné ce que l'on sait des préférences du décideur et étant donné la qualité des évaluations des actions et de la nature du problème, il y a suffisamment d'arguments pour admettre que l'action a est au moins aussi bonne que l'action b , sans qu'il y ait de raison importante de refuser cette affirmation. Ainsi, une relation de surclassement n'a aucune raison d'être complète ni transitive. Roy (1985) donne plus de détails sur les fondements théoriques de ces méthodes. Les méthodes ELECTRE, PROMETHEE, QUALIFLEX, ORESTE, MELCHIOR, etc. entrent dans ce paradigme.

• **Les méthodes interactives:** pour Vincke (1989) ces méthodes consistent tout simplement en une alternance d'étapes de calculs et d'étapes de dialogue avec le décideur. La première étape de calculs fournit une première solution. Celle-ci est présentée au décideur qui réagit en apportant des informations supplémentaires sur ses préférences locales (étape de dialogue). Cette information est injectée dans le modèle utilisé et permet de construire une nouvelle solution. Les travaux de Vanderpooten (1989) donnent plus de détails sur les méthodes interactives.

(2) **Les méthodes de décision à objectifs multiples (M.O.D.M.)** sont destinées à déterminer l'ensemble des actions efficaces ou à choisir une action qui est la meilleure dans un ensemble d'actions implicites (généralement infini) défini par des contraintes explicites. Vincke (1989) et Zionts (1983) les définissent comme étant des méthodes de programmation mathématique à objectifs multiples. Plusieurs de ces méthodes, notamment parmi celles destinées à choisir la meilleure action, sont de type interactif.

La formulation générale d'un problème de M.O.D.M. se présente comme ci-dessous:

$$\text{Max } [g_1(X), \dots, g_p(X)]$$

sujet à

$$h_i(X) \geq 0 \quad (i=1, \dots, n).$$

avec en plus des contraintes additionnelles (contraintes d'intégrité), où les $g_p(X)$ sont appelées fonctions objectifs et sont des fonctions à valeurs réelles;

- les $h_i(X)$ ($i=1, \dots, n$) sont des fonctions-contraintes;
- X est le vecteur des variables de décision;
- le terme « Max » indique que l'on est à la recherche du meilleur compromis pour un décideur, suivant sa structure de préférence en prenant en compte chacun des p objectifs.

Zionts (1983) suggère une typologie des méthodes multicritères de décision dans laquelle il fait intervenir la nature déterministe ou stochastique des résultats. Si les résultats sont déterministes, on parle de programme mathématique déterministe à objectifs multiples. On retrouve alors toutes les méthodes incluses dans la typologie de Hwang *et al.* (1980), une classification qui est faite en fonction:

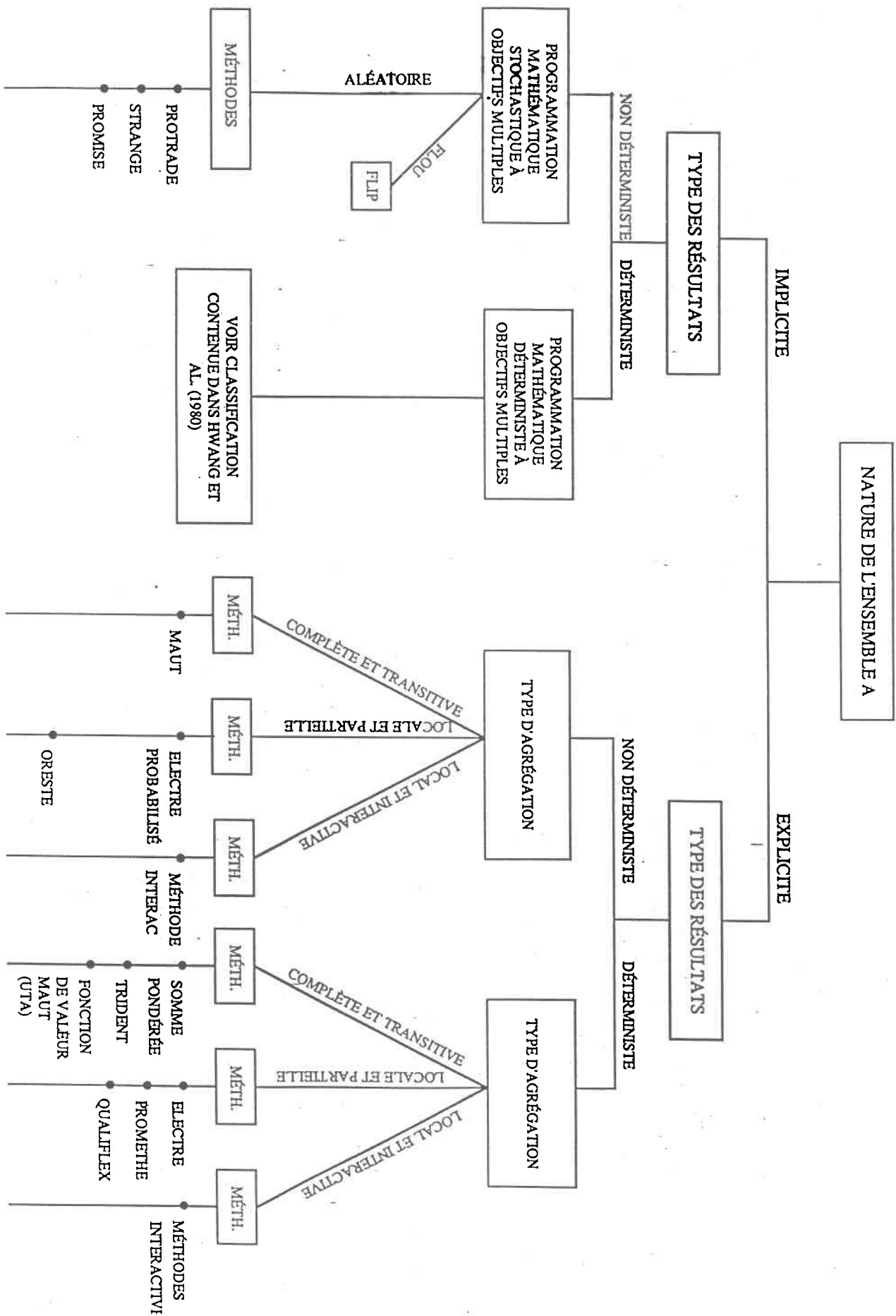
(a) du moment où les préférences du décideur sont prises en compte. Ainsi, il peut s'agir de méthodes avec : *aucune articulation des préférences*; *articulation à priori des préférences*; *articulation progressive des préférences*; et *articulation à posteriori des préférences*;

(b) du type d'information nécessaire: *ordinaire* ou *cardinale*, taux de substitution implicite ou explicite.

Si les résultats sont stochastiques (non-détermistes), on parle de la programmation mathématique stochastique à objectifs multiples. Relativement peu de travaux ont été réalisés à ce sujet. Néanmoins il y a les travaux de Goicoechea *et al.* (1982), ainsi que quelques méthodes avec articulation interactive des préférences. Les méthodes PROTADE et STRANGE (dans Teghem *et al.*, 1986) présentent une bonne base théorique de chacune de ces deux méthodes.

La figure 1 (de Martel et Kibi, 1993) présente une classification des méthodes multicritères de décision. Elle est basée sur la nature de l'ensemble admissible **A** (implicite ou explicite), les types de résultats (*déterministe* ou *non déterministe*) et sur les types d'agrégation.

Figure 1 : Typologie des méthodes multicritères d'aide à la décision.



ANNEXE 2

Modélisation des préférences

MODÉLISATION DES PRÉFÉRENCES

Selon Vincke (1989), les préférences sont essentielles dans la vie des individus aussi bien que des collectivités. Leur modélisation constitue une étape indispensable en aide à la décision, mais aussi en économie, en actuariat, en sociologie, en psychologie, en recherche opérationnelle, en actuariat,....

Dans la modélisation des préférences, on suppose dans un premier temps, qu'en voulant comparer deux actions a et b de A , le décideur aura l'une des trois réactions suivantes :

1. *Préférence pour l'une des deux actions* : $a P b$ si a est préférée à b ($b P a$ si c'est l'inverse).

2. *Indifférence entre les deux actions* : $a I b$ s'il y a indifférence entre a et b ,

3. *Refus ou impossibilité de comparer*: $a R b$ s'il y a incomparabilité.

Il est généralement reconnu que les trois relations: P (préférence), I (indifférence) et R (incomparabilité) remplissent les propriétés suivantes :

$\forall a \text{ et } b \in A :$

- $a P b \Rightarrow b P a$: P est asymétrique,
- $a I a \Rightarrow$: I est réflexive,
- $a I b \Rightarrow b I a$: I est symétrique,
- $a R a \Rightarrow$: R est irréflexive,
- $a R b \Rightarrow b R a$: R est symétrique.

Pour modéliser les préférences par rapport au critère, on donne les précisions ci-dessous sur les concepts de préordre complet, de quasi-ordre et de pseudo-ordre.

Ordre complet

Soit $g(.)$ une fonction critère. Cette fonction induit sur l'ensemble des actions de A un système relationnel (I, P) de préférence qui est un préordre complet tel que:

$$a P b \text{ si } g(a) > g(b)$$

$$a I b \text{ si } g(a) = g(b).$$

Le problème de ce type de modélisation est de faire apparaître une différence entre de petits et de grands écarts entre $g(a)$ et $g(b)$. De plus la relation d'indifférence doit être transitive. Dans la pratique de telles implications ne sont toujours pas réalisables.

Quasi-ordre

Pour cette modélisation, on introduit un seuil d'indifférence q tel que

$$a P b \text{ si } g(a) > g(b) + q$$

$$a I b \text{ si } g(a) \in [g(b) - q, g(b) + q].$$

Dans ce cas précis, il faut observer un écart suffisant entre $g(a)$ et $g(b)$ pour conclure à une préférence stricte et l'indifférence n'est pas nécessairement transitive. Le système (I,P) de préférence qui résulte de cette représentation est appelé quasi-ordre.

Pseudo-ordre

Les deux modèles précédents excluent toute situation de préférence autre que I et P. Or dans certains cas, le décideur, ayant à comparer deux actions a et b , peut avoir de multiples raisons de ne pas pouvoir trancher entre l'indifférence et la préférence stricte. L'information nécessaire à cette comparaison peut ne pas être disponible, elle peut être incomplète, subjective, contradictoire. Le pseudo-ordre est donc une situation d'hésitation entre l'indifférence et la préférence stricte. On la note pas Q et est appelée préférence faible. Il résulte des systèmes relationnels de préférence de type (I, P, Q) qui donnent lieu à une structure appelée pseudo-ordre caractérisée par les relations suivantes :

$$a P b \text{ si } g(a) > g(b) + q + p$$

$$a Q b \text{ si } g(a) + q + p \geq g(a) > g(b) + q$$

$$a I b \text{ si } g(b) + q \geq g(a) \geq g(b) - q.$$

où les seuils de préférence et d'indifférence peuvent être variables ou constants. Plus de détails sur le modélisation des préférences sont contenus dans Roy(1985), Vincke (1989) et Vanderpooten (1989).

ANNEXE 3

Questionnaires utilisés lors de l'enquête

**ENQUÊTE SUR LES MESURES D'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ÉLECTRIQUE
DANS
LES STATIONS D'ÉPURATION DES EAUX USÉES MUNICIPALES
DU QUÉBEC**

**RÉALISÉE PAR Nlombi Kibi, Étudiant du doctorat en Sciences de l'eau
L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (INRS-Eau)**

EN COLLABORATION

AVEC

HYDRO-QUÉBEC.

JUIN 1995

PRÉAMBULE

Au Québec, l'implantation en grand nombre de stations d'épuration des eaux usées municipales et des usines de traitement de l'eau potable a provoqué une augmentation rapide de la consommation d'énergie électrique dans ce secteur. Depuis les dernières années, on assiste également à une prolifération de procédés énergivores tels que la nitrification/dénitrification au niveau du traitement secondaire, la désinfection par ultraviolet ou par ozonation, la déshydratation des boues sur filtre ou centrifugeuse, etc.

Plusieurs travaux de recherche et développement menés aux États-Unis, au Canada et en Europe (Burton Environmental Engineering, RCG/Hagler, Bailly, Inc., Metcalf & Eddy Inc, 1993; Anderson, 1980; EPRI, 1992; 1993; Middlebrooks *et al.*, 1981; Owen, 1982; WPCF, 1988; in Sasseville *et al.*, 1994¹) soutiennent en effet que, dans les systèmes d'approvisionnement, de traitement, de distribution et d'épuration des eaux municipales, la consommation d'électricité est peu rationalisée. Ainsi, dans le but d'établir la solution actuelle de référence et d'apprécier le potentiel d'efficacité énergétique, Hydro-Québec a réalisé quelques études sur le programme d'efficacité énergétique applicable aux industries de l'eau au Québec (Sasseville *et al.*, 1994; Blais *et al.*, 1994; Programme Cadre en efficacité énergétique-Volet municipal- secteur de traitement de l'eau, Gest-eau, janvier 1995, etc.).

Ces différents travaux ont mis en lumière plusieurs mesures d'efficacité énergétique électrique susceptibles d'être implantées dans les systèmes d'épuration des eaux usées municipales et de traitement d'eau potable. Le problème qui se pose à Hydro-Québec, aux municipalités et aux différentes régies est celui du choix des MEEE à mettre en place, à partir d'un éventail assez large et très variée.

Le défi consiste alors pour la société d'État, les municipalités et les régies à dégager un ensemble des MEEE et une stratégie d'implantation pouvant permettre de respecter leur rationalité, tout en tenant compte des contraintes imposées par les différentes législations contrôlées par la Société Québécoise d'Assainissement de l'Eau (SQAE), le Ministère de l'Environnement et de la Faune (MEF) et le Ministère des Affaires Municipales.

La résolution de ce problème devra tenir compte simultanément de plusieurs caractéristiques significatives des MEEE qui les rendent acceptables à l'offreur et à l'utilisateur. Il s'agit des **aspects techniques**, comme l'effet de synergie entre les procédés d'une chaîne de traitement, les facilités opérationnelles, la fiabilité et l'efficacité dans le temps d'une MEEE, dépendamment de l'évolution de l'utilisation des équipements (modification des profils de charge, des volumes à traiter, etc.), l'incidence de la mise en place des MEEE sur la réduction de la demande d'électricité et sur la demande de puissance; **les aspects économiques et financiers**, comme l'évaluation des économies tendancielle pour bien distinguer « l'impact net » de « l'impact brut » d'une MEEE, le coût d'implantation, les coûts d'exploitation et de maintenance, la période de recouvrement du capital et la politique de financement (Hydro-Québec versus municipalités); **les aspects environnementaux** comme les exigences sur les rejets liquides et solides, la gestion des boues (quantité et traitabilité), **les aspects humains** comme la santé et sécurité au travail, **les aspects socio-politiques** tels l'équité entre les différentes municipalités faisant partie du parc, l'acceptabilité du milieu, etc., ce à quoi s'intéresse la présente étude.

¹Sasseville *et al.* (1994). "Efficacité énergétique dans le secteur de l'eau - Volume 1-5", *Rapport scientifique no.405*, Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-Eau, Université du Québec, Dainte-Foy, Québec.

L'objectif poursuivi par cette étude est d'élaborer un outil d'aide à la décision destiné à l'évaluation et au choix des MEEE susceptibles d'être implantées dans quelques ouvrages d'épuration des eaux usées municipales, ainsi que dans quelques ouvrages de traitement de l'eau potable. L'outil préconisé est basé sur l'approche multicritère d'aide à la décision. Cette approche permettra d'évaluer les différentes MEEE, sur la base de plusieurs aspects ou critères ci-haut mentionnés.

L'outil d'aide à la décision qui sera mis en place pourrait entre autre permettre de simuler plusieurs hypothèses de gestion de la consommation d'électricité touchant l'efficacité énergétique hydraulique, l'efficacité énergétique épuratoire, le facteur de puissance, en fonction, par exemple, de la substitution électro-technologique, tout en mesurant l'effet de ce changement sur l'efficacité épuratoire des systèmes d'épuration des eaux usées municipales ou encore sur la qualité de l'eau potable. Cette considération importante du projet de recherche répondra directement aux besoins du programme d'efficacité énergétique dans l'industrie municipale de l'eau. Pour rendre opérationnel l'outil d'aide à la décision préconisé, nous jugeons opportun de le valider par certaines données réelles provenant des ouvrages d'épuration des eaux usées municipales et de traitement de l'eau potable.

Le but de ce questionnaire est tout justement de récolter les informations pertinentes auprès de quelques municipalités du Québec.

Les recherches et consultations préliminaires effectuées auprès du Ministère de l'Environnement et de la Faune, du Ministère des Affaires Municipales et d'Hydro-Québec, ont permis de choisir votre municipalité comme candidate potentielle.

Les résultats de cette analyse appliquées aux données en provenance de votre municipalité seront susceptibles d'être utilisées dans le cadre du programme d'efficacité énergétique d'Hydro-Québec, dans le cas du consentement de toutes les parties prenantes.

Le questionnaire est simple et surtout présenté de manière à ce que les réponses soient utiles et pertinentes au besoin du programme d'efficacité énergétique d'Hydro-Québec et de votre municipalité ou régie dans le but de proposer de solutions d'amélioration du fonctionnement de votre station. Les bonnes réponses permettront naturellement d'arriver à des solutions plus intéressantes pour toutes les parties prenantes.

Nous vous prions de ne répondre qu'à des questions qui ne concernent que votre station et au mieux de votre connaissance. Une ou plusieurs personnes sont susceptibles de répondre à ce questionnaire qui nécessitera à certains égards la participation de plusieurs intervenants au niveau de la station.

Nous serons de passage en personne dans votre municipalité pour passer à travers le questionnaire surtout surtout en ce qui concerne les points nécessitant plus d'investigations ou d'éclaircissement.

Dans l'espoir de compter sur votre entière collaboration dans la réussite de cette étude, nous vous prions d'accepter, monsieur (madame), l'expression de nos sentiments distingués.

Nlombi Kibi
Étudiant au doctorat en Sciences de
l'eau (INRS-Eau),
2700, rue Einstein, C.P. 7500
Sainte-Foy (Québec),
G1V 4C7

Dr. Jean-Louis Sasseville,
Professeur titulaire à l'INRS-
Eau (Directeur de Recherche)

Dr. Denis Couillard,
professeur titulaire à l'INRE-
Eau (Co-directeur de
recherche)

QUESTIONNAIRE

1. DESCRIPTION DE LA STATION D'ÉPURATION

- Nom de la municipalité ou de la Régie: _____
- Indiquer l'adresse de la station d'épuration:
Numéro civile: _____ Rue: _____
Ville: _____ Code postal: _____
- Type de la station d'épuration:
 1. Physico-chimique ☐
 2. Étangs aérés ☐
 3. Boues activées ☐
 4. Biofiltration ☐
- Année du début des opérations: _____
- Population desservie par la station: _____

2. INFORMATIONS SUR LES OPÉRATIONS

Débit journalier:

Unité: m³/j ☐

Gl/j ☐

GUS/j ☐

été : _____
Automne: _____

Hiver: _____
Printemps: _____

Puissance totale installée:

Veuillez indiquer la puissance totale installée de tous les équipements électriques pour les procédés: _____ kW

Veuillez indiquer la puissance souscrire de l'emplacement: _____ kW

Groupes électrogènes:

Nombre de groupes électrogènes: _____
(génératrices)

Puissance par groupe électrogènes (kW):
1. _____ kW 3. _____ kW
2. _____ kW 4. _____ kW

Nombre d'heures d'utilisation annuelle des groupes électrogènes: _____ heures/an.

3. Selon vous, lesquelles des mesures d'efficacité énergétique électrique (MEEE) suivantes sont susceptibles d'être implantées (applicables dans le cadre du programme d'efficacité énergétique) dans votre station².

A. Au niveau du pompage des eaux usées et/ou des boues

MEEE	Technologie/Procédé	Cocher si applicable	Econ. Pot ³ . (%)
1. Utilisation des bassins d'égalisation des eaux et de stockage des boues pour une opération accrue des pompes en période de pointe	Système de pompage des eaux usées et des boues d'épuration	☐	_____
2. Correction de la puissance des pompes en opération	Système de pompage	☐	_____
3. Installation de moteurs à haut rendement énergétique au niveau du pompage des boues primaires	Pompage des boues	☐	_____
4. Installation de moteurs à haut rendement énergétique au niveau du pompage des boues secondaires	Pompage des boues	☐	_____
5. Installation de moteurs à haut rendement énergétique pour le pompage des écumes	Système de pompage	☐	_____
6. Installation de moteurs à haut rendement énergétique pour le pompage des eaux de lavage	Système de pompage	☐	_____
7. Installation des pompes à chaleur pour la récupération de la chaleur au niveau du pompage des eaux	Système de pompage	☐	_____
8. Installation des échangeurs de chaleur dans le système de pompage	Système de pompage	☐	_____

²Ces MEEE proviennent des différents travaux et études réalisées pour le compte d'Hydro-Québec dans le cadre du programme d'efficacité énergétique appliqué dans le secteur de l'eau potable et des eaux usées. Il s'agit de travaux suivants:

(1). Sasseville et al. (1994). "Les mesures d'efficacité énergétique électrique dans le secteur de l'eau": vol. I à Vol. 5, INRS-Eau, Rapport scientifique no.405.

(2). GEST-EAU. Programme cadre en efficacité énergétique- volet municipal, Enquête générale et spécifique auprès des municipalités: Rapport synthèse, Tomes I, II et III.

³Econ. Pot.: ce paramètre signifie, économie d'énergie potentielle liée à l'implantation de la MEEE. La réponse sera surtout effective dans le cas où cette dernière est déjà implantée ou en expérimentation dans la station ou encore au meilleur de votre expérience et de votre expérience. Elle peut être donnée en %. Dans tous les cas, veuillez indiquer la provenance de l'information fournie. Elle pourrait être, soit mesurée à la station, provenant de la littérature ou des expériences réalisées ailleurs ou encore de votre propre expérience (connaissance).

B. Au niveau du pré-traitement et du traitement primaire

MEEE	Technologie/Procédé	Cocher si applicable	Econ. Pot (%)
1. Utilisation de moteurs à haut rendement énergétique au niveau de dessableurs	Prétraitement	☐	_____
2. Utilisation de moteurs à haut rendement énergétique au niveau de dégrilleurs	Prétraitement	☐	_____
3. Utilisation de moteurs à haut rendement énergétique au niveau de convoyeurs automatiques et de racleurs.	Prétraitement	☐	_____
4. Minimisation du lavage des dessableurs et des dégrilleurs	Prétraitement	☐	_____
5. Installation d'un moteur à haut rendement énergétique pour l'entraînement du décanteur	Décantation primaire	☐	_____
6. Installation d'un moteur à haut rendement énergétique au niveau de la coagulation	Coagulation électro-efficace	☐	_____
7. Installation d'un moteur à haut rendement énergétique au niveau de la floculation	Floculation électro-efficace	☐	_____
Autres.....			

C. Au niveau du traitement secondaire

MEEE	Technologie/Procédé	Cocher si applicable	Econ. Pot.
1. Installation de diffuseurs à fines bulles combiné au contrôle de l'oxygène dissout (O.D.) dans le bassin d'aération	Boues activées, Étangs aérés	☐	—
2. Installation de diffuseurs à membranes poreuses dans le bassin d'aération	Boues activées, Étangs aérés	☐	—
3. Installation d'une soufflante de type centrifuge contrôlée par ordinateur	Boues activées, Étangs aérés	☐	—
4. Installation d'un système d'aération à oxygène pur	Boues activées, Étangs aérés	☐	—
5. Installation d'un système arrêt-marche (on-off) dans le système d'aération	Boues activées	☐	—
6. Installation des moteurs à vitesse ajustable (ASD) sur les soufflantes d'air	Boues activées; Étangs aérés;	☐	—
7. Installation des moteurs à fréquence variable (VFD) sur des surfaces d'aérateur dans chaque bassin d'aération de deuxième stage	Boues activées	☐	—
8. Installation d'un système informatique de suivi combinant le TCO et l'OD	Boues activées; Étangs aérés;	☐	—
9. Optimisation du rapport F/M (kg de DBO5/kg de MES) dans les bassins d'aération	Boues activées	☐	—
10. Utilisation d'un système d'aération avec nitrification-dénitrification	Boues activées	☐	—
11. Installation d'un système de contrôle automatique de la vitesse de rotation du support de biomasse	Biodisques	☐	—
12. Installation de moniteurs pour le contrôle de l'O.D. dans le système d'aération	Boues activées; Étangs aérés;	☐	—
13. Installation d'un système de contrôle de la nitrification par ordinateur dans les soufflantes	Boues activées	☐	—
14. Augmentation de fréquences de soufflage dans le filtre de nettoyage	Boues activées	☐	—
15. Installation d'un système périodique de nettoyage des diffuseurs à fines bulles	Boues activées, Étangs aérés	☐	—
16. Utilisation d'un système d'ajustement automatique du débit d'air	Boues activées; Étangs aérés;	☐	—
17. Utilisation de moteurs à haut rendement énergétique pour le moteur d'entraînement du biofiltre.	Biofiltration aérobie	☐	—
18. Utilisation pour le lavage, d'une soufflante avec un entraînement de moteur à vitesse variable et avec des performances hydrauliques accrues	Biofiltration	☐	—

19. Maximisation des opérations dans les filtres à vide durant les heures de pointe	Biofiltration	☐	_____
20. Installation d'un turbidimètre pour contrôler le lavage des filtres dans les biofiltres	Biofiltration	☐	_____
21. Utilisation d'un moteur à haut rendement énergétique pour le moteur d'entraînement du bac de mélange des produits chimiques	Physico-chimique	☐	_____
22. Utilisation d'un moteur à haut rendement énergétique pour la pompe doseuse de produits chimiques	Physico-chimique	☐	_____
Autres.....			

D. Au niveau du traitement tertiaire

MEEE	Technologie/Procédé	Cocher si applicable	Econ. Pot.
1. Utilisation des moteurs et pompes plus performantes	Déphosphatation; filtration tertiaire	☐	_____
2. Amélioration de l'efficacité des tubes au niveau de la transmission du regroupement dans le système de désinfection U.V.	Désinfection aux U.V.	☐	_____
3. Amélioration de l'efficacité des tubes au niveau de la transmission de la longueur d'ondes du rayonnement U.V.	Désinfection aux U.V.	☐	_____
Autres.....			

E. Au niveau du traitement et élimination des boues

MEEE	Technologie/Procédé	Cocher si applicable	Econ. Pot.
1. Remplacement des systèmes de digestion aérobie par les systèmes anaérobie utilisant un digesteur optimisé de type « Egg-Shaped »	Stabilisation des boues	☐	_____
2. Installation d'un système de digestion aérobie-anoxie	Stabilisation des boues	☐	_____
3. Installation d'un digesteur aérobie à oxygène pur.	Stabilisation des boues	☐	_____
4. Installation d'une digestion aérobie thermophile suivie d'une étape de digestion anaérobie mésophile	Stabilisation des boues	☐	_____
5. Stérilisation de boues par pasteurisation	Stabilisation des boues	☐	_____
6. Stérilisation des boues par radiation ionisante	Désinfection des boues	☐	_____
7. Biolixiviation avec soufre	Décontamination des boues	☐	_____

8. Biolixiviation avec sulfate ferreux	Décontamination des boues	☐	_____
9. Lixiviation chimique	Décontamination des boues	☐	_____
10. Utilisation d'un moteur à haut rendement énergétique pour la pompe doseuse de produits chimiques pour le conditionnement	Conditionnement des boues	☐	_____
11. Utilisation de conditionnement des boues par gel-dégel	Conditionnement des boues	☐	_____
12. Utilisation des moteurs à haut rendement énergétique pour différents filtres (à vacuum, à bandes presseuses, à plateaux)	Déshydratation des boues	☐	_____
13. Installation des centrifugeuses à teneurs élevées en solides avec un moteur à haut rendement énergétique	Déshydratation des boues	☐	_____
14. Installation des presses électroacoustiques	Déshydratation des boues	☐	_____
15. Installation des presseoirs verticaux à auge	Déshydratation des boues	☐	_____
16. Installation des filtres-presses rotatifs à vis	Déshydratation des boues	☐	_____
17. Installation des filtres-presses tubulaires	Déshydratation des boues	☐	_____
18. Installation des membranes filtrantes à courant longitudinal	Déshydratation des boues	☐	_____
19. Installation des déshydratateurs à micro-ondes	Déshydratation des boues	☐	_____
20. Installation d'un système de déshydratation des boues par presseoir rotatif	Déshydratation des boues	☐	_____
21. Utilisation d'un système de déshydratation des boues par filtration sur bande presseuse combiné à une étape de séchage par radiation infra-rouge	Déshydratation des boues	☐	_____
22. Installation des systèmes de séchage des boues à la vapeur ou par infra-rouge	Séchage des boues	☐	_____
23. Installation des lits de séchage sous vide	Séchage des boues	☐	_____
24. Utilisation d'un système de vis chauffante d'induction magnétique par séchage	Séchage des boues	☐	_____
25. Utilisation d'un procédé électro-efficace de séchage thermique et incinération des boues	Séchage des boues	☐	_____
26. Utilisation d'échangeurs de chaleur dans le traitement de boues	Déshydratation ou séchage de boues	☐	_____
27. Utilisation des filtres à membrane	Déshydratation des boues	☐	_____

Autres.....

4. Dans les conditions actuelles d'opérations de votre station, à combien estimeriez-vous le coût d'implantation approximatif et la vie utile espérée des MEEE suivantes (prière de ne considérer que les MEEE s'appliquant dans le cas de votre station).

A. Au niveau du pompage des eaux usées et des boues

MEEE	Coût d'implantation appr.	Vie utile
Installation des bassins d'égalisation des eaux et de stockage des boues pour une opération accrue des pompes en période de pointe.		
Correction de la puissance des pompes en opération		
Installation de moteurs à haut rendement énergétique au niveau du pompage des boues primaires		
Installation de moteurs à haut rendement énergétique au niveau du pompage des boues secondaires		
Installation de moteurs à haut rendement énergétique pour le pompage des écumes		
Installation de moteurs à haut rendement énergétique pour le pompage des eaux de lavage		
Installation des pompes à chaleur dans la récupération de la chaleur au niveau du pompage des eaux		
Installation des échangeurs de chaleur dans le système de pompage		

B. Au niveau du pré-traitement et du traitement primaire

MEEE	Coût d'implantation appr.	Vie utile
Installation de moteurs à haut rendement énergétique au niveau de dessableurs		
Installation de moteurs à haut rendement énergétique au niveau de dégrilleurs		
Installation de moteurs à haut rendement énergétique au niveau de convoyeurs automatiques et de racleurs		
Minimisation du lavage des dessableurs		
Installation d'un moteur à haut rendement énergétique pour l'entraînement du décanteur		
Installation d'un moteur à haut rendement énergétique au niveau de la coagulation		
Installation d'un moteur à haut rendement énergétique au niveau de la floculation		

C. Au niveau du traitement secondaire

MEEE	Coût d'implantation appr.	Vie utile
Installation de diffuseurs à fines bulles combiné au contrôle de l'OD dans le bassin d'aération		
Installation d'un système périodique de nettoyage des		

diffuseurs à fines bulles		
Installation de diffuseurs à membranes poreuses dans le bassin d'aération		
Installation de soufflante de type centrifuge contrôlée par ordinateur		
Installation d'un système d'aération à oxygène pur		
Installation d'un système arrêt-marche (on-off) dans le système d'aération		
Installation des moteurs à vitesse ajustable (ASD) sur les soufflantes d'air		
Installation des moteurs à fréquence variable (VFD) sur des surfaces d'aérateur dans chaque bassin d'aération de deuxième stage		
Installation d'un système informatique de suivi combinant le TCO et l'OD		
Optimisation du rapport F/M (kg de DBO5/kg de MES) dans les bassins d'aération		
Utilisation d'un système avec nitrification-dénitrification		
Installation de pompes plus performantes pour la recirculation des boues		
Installation d'un système de contrôle automatique de la vitesse de rotation du support de biomasse		
Installation de moniteurs pour le contrôle de l'O.D. 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		
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		
Utilisation de moteurs à haut rendement énergétique pour le moteur d'entraînement du biofiltre.		
Utilisation pour le lavage, une soufflante avec un entraînement de moteur à vitesse variable et avec des performances hydrauliques accrues		
Maximiser l'opération dans les filtres à vide durant les heures de pointe		
Installation d'un turbidimètre pour contrôler le lavage des filtres dans les biofiltres		
Utilisation d'un moteur à haut rendement énergétique pour le moteur d'entraînement du bac de mélange des produits chimiques		
Utilisation d'un moteur à haut rendement énergétique pour la pompe doseuse de produits chimiques		

D. Au niveau du traitement tertiaire

MEEE	Coût d'implantation appr.	Vie utile
Utilisation des moteurs et pompes plus performantes		
Amélioration de l'efficacité des tubes au niveau de la transmission du regroupement dans la désinfection		
Amélioration de l'efficacité des tubes au niveau de la transmission de la longueur d'ondes du rayonnement U.V.		

E. Au niveau du traitement et élimination des boues

MEEE	Coût d'implantation appr.	Vie utile
Remplacement des systèmes de digestion aérobie par les systèmes anaérobie utilisant un digesteur optimisé de type « Egg-Shaped »		
Installation d'un système de digestion aérobie-anoxie		
Installation d'un digesteur aérobie à oxygène pur		
Installation d'une digestion aérobie thermophile suivie d'une étape de digestion anaérobie mésophile		
Stérilisation de boues par pasteurisation		
Stérilisation des boues par radiation ionisante		
Utilisation d'un moteur à haut rendement énergétique pour la pompe doseuse de produits chimiques pour le conditionnement		
Utilisation de conditionnement des boues par gel-dégel		
Biolixiviation avec soufre		
Biolixiviation avec sulfate ferreux		
Lixiviation chimique		
Utilisation des moteurs à haut rendement énergétique pour différents filtres (à vacuum, à bandes presseuses, à plat)		
Installation des centrifugeuses à teneurs élevées en solides avec un moteur à haut rendement énergétique		
Installation des presses électroacoustiques		
Installation des presseurs verticaux à auge		
Installation des filtres-presses rotatifs à vis		
Installation des filtres-presses tubulaires		
Installation des membranes filtrantes à courant longitudinal		
Installation des déshydratateurs à micro-ondes		
Installation d'un système de déshydratation des boues par presseur rotatif		
Utilisation des filtres à membrane		
Utilisation d'un système de déshydratation des boues par filtration sur bande presseuse combiné à une étape de séchage par radiation infra-rouge		
Installation des systèmes de séchage des boues à la vapeur ou par infra-rouge		
Installation des lits de séchage sous vide		
Utilisation d'un système de vis chauffante par induction magnétique par séchage		
Utilisation d'un procédé électro-efficace de séchage thermique et incinération des boues		
Utilisation d'échangeurs de chaleur dans le traitement de boues		
Utilisation d'un système de séchage thermique granulaire		

5. Selon votre expérience au niveau de la station, quelle incidence peut avoir les MEEE ci-dessous sur (A) l'économie d'énergie au niveau du segment du procédé en cause (équipement électrique utilisé); (B) la consommation d'électricité de la station; (C) l'appel de puissance; en utilisant l'échelle d'évaluation ci-dessous. Répondre par (X) dans le cas d'une non application.

Faible (1)	Moyennement faible (2)	Moyen (3)	Moyennement forte (4)	Forte (5)
---------------	---------------------------	--------------	--------------------------	--------------

A. Au niveau du pompage des eaux usées et/ou des boues

MEEE	(A)	(B)	(C)
1. Utilisation des bassins d'égalisation des eaux et de stockage des boues pour une opération accrue des pompes en période de pointe.	☐	☐	☐
2. Corriger la puissance des pompes en opération	☐	☐	☐
3. Installation de moteurs à haut rendement énergétique pour le pompage des boues primaires	☐	☐	☐
4. Installation de moteurs à haut rendement énergétique pour le pompage des boues secondaires	☐	☐	☐
5. Installation de moteurs à haut rendement énergétique pour le pompage des écumes	☐	☐	☐
6. Installation de moteurs à haut rendement énergétique pour le pompage des eaux de lavage	☐	☐	☐
7. Installation des pompes à chaleur dans la récupération de la chaleur au niveau dans le pompage des eaux	☐	☐	☐
8. Installation des échangeurs de chaleur	☐	☐	☐

B. Au niveau du pré-traitement et du traitement primaire

MEEE	(A)	(B)	(C)
1. Installation de moteurs à haut rendement énergétique au niveau de dessableurs	☐	☐	☐
2. Installation de moteurs à haut rendement énergétique au niveau de dégrilleurs	☐	☐	☐
3. Installation de moteurs à haut rendement énergétique au niveau de convoyeurs automatiques et de racleurs	☐	☐	☐
4. Optimisation du pompage de la mousse, des écumes et des boues primaires	☐	☐	☐
5. Minimiser le lavage des dessableurs	☐	☐	☐

- | | | | |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 6. Installation d'un moteur à haut rendement énergétique pour l'entraînement du décanteur | ☐ | ☐ | ☐ |
| 7. Installation d'un moteur à haut rendement énergétique au niveau de la coagulation | ☐ | ☐ | ☐ |
| 8. Installation d'un moteur à haut rendement énergétique au niveau de la floculation | ☐ | ☐ | ☐ |
-

C. Au niveau du traitement secondaire

MEEE	(A)	(B)	(C)
1. Installation de diffuseurs à fines bulles combiné au contrôle de l'OD dans le bassin d'aération	☐	☐	☐
2. Installation d'un système périodique de nettoyage des diffuseurs à fines bulles	☐	☐	☐
3. Installation de diffuseurs à membranes poreuses dans le bassin d'aération	☐	☐	☐
4. Installation de soufflante de type centrifuge contrôlée par ordinateur	☐	☐	☐
5. Installation d'un système d'aération à oxygène pur	☐	☐	☐
6. Installation d'un système arrêt-marche (on-off) dans le système d'aération	☐	☐	☐
7. Installation des moteurs à vitesse ajustable (ASD) sur les soufflantes d'air	☐	☐	☐
8. Installation des moteurs à fréquence variable (VFD) sur des surfaces d'aérateur dans chaque bassin d'aération de deuxième stage	☐	☐	☐
9. Installation d'un système informatique de suivi combinant le TCO et l'OD	☐	☐	☐
10. Optimisation du rapport F/M (kg de DBO5/kg de MES) dans les bassins d'aération	☐	☐	☐
11. Utilisation d'un système avec nitrification-dénitrification	☐	☐	☐
12. Installation de pompes plus performantes pour la recirculation des boues	☐	☐	☐
13. Installation d'un système de contrôle automatique de la vitesse de rotation du support de biomasse	☐	☐	☐
14. Installation de moniteurs pour le contrôle de l'O.D. dans le système d'aération	☐	☐	☐
15. Installation d'un système de contrôle de la nitrification par ordinateur dans les soufflantes	☐	☐	☐
16. Augmentation de fréquences de soufflage dans le filtre de nettoyage	☐	☐	☐
17. Équilibrage de la distribution d'air au niveau des bassins d'aération	☐	☐	☐
18. Utilisation d'un système d'ajustement automatique du débit d'air	☐	☐	☐
19. Utilisation de moteurs à haut rendement énergétique dans le moteur d'entraînement du biofiltre.	☐	☐	☐
20. Utilisation pour le lavage, une soufflante avec un entraînement de moteur à vitesse variable et avec des performances hydrauliques accrues	☐	☐	☐

21. Maximisation des opérations dans les filtres à vide durant les heures de pointe	☐	☐	☐
22. Installation d'un turbidimètre pour contrôler le lavage des filtres dans les biofiltres	☐	☐	☐
23. Utilisation d'un moteur à haut rendement énergétique pour le moteur d'entraînement du bac de mélange des produits chimiques	☐	☐	☐
24. Utilisation d'un moteur à haut rendement énergétique pour la pompe doseuse de produits chimiques	☐	☐	☐

D. Au niveau du traitement tertiaire

MEEE	(A)	(B)	(C)
1. Utilisation des moteurs et pompes plus performantes	☐	☐	☐
2. Amélioration de l'efficacité des tubes au niveau de la transmission du regroupement dans la désinfection	☐	☐	☐
3. Amélioration de l'efficacité des tubes au niveau de la transmission de la longueur d'ondes du rayonnement U.V.	☐	☐	☐

E. Au niveau du traitement et élimination des boues

MEEE	(A)	(B)	(C)
1. Remplacement des systèmes de digestion aérobie par les systèmes anaérobie utilisant un digesteur optimisé de type « Egg-Shaped »	☐	☐	☐
2. Installation d'un système de digestion aérobie-anoxie	☐	☐	☐
3. Installation d'un digesteur aérobie à oxygène pur.	☐	☐	☐
4. Installation d'une digestion aérobie thermophile suivie d'une étape de digestion anaérobie mésophile	☐	☐	☐
5. Stérilisation de boues par pasteurisation	☐	☐	☐
6. Stérilisation des boues par radiation ionisante	☐	☐	☐
7. Utilisation d'un moteur à haut rendement énergétique pour la pompe doseuse de produits chimiques pour le conditionnement	☐	☐	☐
8. Utilisation de conditionnement des boues par gel-dégel	☐	☐	☐
9. Biolixiviation avec soufre	☐	☐	☐

10. Biolixiviation avec sulfate ferreux	☐	☐	☐
11. Lixiviation chimique	☐	☐	☐
12. Utilisation des moteurs à haut rendement énergétique pour différents filtres (à vacuum, à bandes presseuses, à plat)	☐	☐	☐
13. Installation des centrifugeuses à teneurs élevées en solides avec un moteur à haut rendement énergétique	☐	☐	☐
14. Installation des presses électroacoustiques	☐	☐	☐
15. Installation des presseoirs verticaux à auge	☐	☐	☐
16. Installation des filtres-presses rotatifs à vis	☐	☐	☐
17. Installation des filtres-presses tubulaires	☐	☐	☐
18. Installation des membranes filtrantes à courant longitudinal	☐	☐	☐
19. Installation des déshydratateurs à micro-ondes	☐	☐	☐
20. Installation d'un système de déshydratation des boues par presseoir rotatif	☐	☐	☐
21. Utilisation des filtres à membrane	☐	☐	☐
22. Utilisation d'un système de déshydratation des boues par filtration sur bande presseuse combiné à une étape de séchage par radiation infra-rouge	☐	☐	☐
23. Installation des systèmes de séchage des boues à la vapeur ou par infra-rouge	☐	☐	☐
24. Installation des lits de séchage sous vide	☐	☐	☐
25. Utilisation d'un système de vis chauffante par induction magnétique par séchage	☐	☐	☐
26. Utilisation d'un procédé électro-efficace de séchage thermique et incinération des boues	☐	☐	☐
27. Utilisation d'échangeurs de chaleur dans le traitement de boues	☐	☐	☐
28. Utilisation d'un système de séchage thermique granulaire	☐	☐	☐

6. Quelle incidence peut avoir les MEEE suivantes sur l'efficacité épuratoire, mesurée par rapport à la DBO₅, aux M.E.S et au Pt, en utilisant l'échelle d'évaluation ci-dessous. Répondre par (X) dans le cas d'une non application.

Faible (1)	Moyennement faible (2)	Moyen (3)	Moyennement forte (4)	Forte (5)
---------------	---------------------------	--------------	--------------------------	--------------

MEEE	DBO ₅	M.E.S	Pt
1. Installation de diffuseurs à fines bulles combiné au contrôle de l'OD dans le bassin d'aération	☐	☐	☐
2. Installation d'un système périodique de nettoyage des diffuseurs à fines bulles	☐	☐	☐
3. Installation de diffuseurs à membranes poreuses dans le bassin d'aération	☐	☐	☐
4. Installation de soufflante de type centrifuge contrôlée par ordinateur	☐	☐	☐
5. Installation d'un système d'aération à oxygène pur	☐	☐	☐
6. Installation d'un système arrêt-marche (on-off) dans le système d'aération	☐	☐	☐
7. Installation des moteurs à vitesse ajustable (ASD) sur les soufflantes d'air	☐	☐	☐
8. Installation des moteurs à fréquence variable (VFD) sur des surfaces d'aérateur dans chaque bassin d'aération de deuxième stage	☐	☐	☐
9. Installation d'un système informatique de suivi combinant le TCO et l'OD	☐	☐	☐
10. Optimisation du rapport F/M (kg de DBO ₅ /kg de MES) dans les bassins d'aération	☐	☐	☐
11. Utilisation d'un système avec nitrification-dénitrification	☐	☐	☐
12. Installation de pompes plus performantes pour la recirculation des boues	☐	☐	☐
13. Installation d'un système de contrôle automatique de la vitesse de rotation du support de biomasse	☐	☐	☐
14. Installation de moniteurs pour le contrôle de l'O.D. dans le système d'aération	☐	☐	☐
15. Installation d'un système de contrôle de la nitrification par ordinateur dans les soufflantes	☐	☐	☐
16. Augmentation de fréquences de soufflage dans le filtre de nettoyage	☐	☐	☐
17. Installer des chronomètres sur le pompage des boues primaires	☐	☐	☐

18. Équilibrer la distribution d'air au niveau des bassins d'aération	☐	☐	☐
19. Installer un système d'ajustement automatique du débit d'air	☐	☐	☐
20. Utilisation de moteurs à haut rendement énergétique pour le moteur d'entraînement du biofiltre.	☐	☐	☐
21. Utilisation pour le lavage, une soufflante avec un entraînement de moteur à vitesse variable et avec des performances hydrauliques accrues	☐	☐	☐
22. Maximiser l'opération dans les filtres à vide durant les heures de pointe	☐	☐	☐
23. Installation d'un turbidimètre pour contrôler le lavage des filtres dans les biofiltres	☐	☐	☐
24. Utilisation d'un moteur à haut rendement énergétique pour le moteur d'entraînement du bac de mélange des produits chimiques	☐	☐	☐
25. Utilisation d'un moteur à haut rendement énergétique pour la pompe doseuse de produits chimiques	☐	☐	☐

7. Quelle incidence peut avoir les MEEE suivantes sur (A) la réduction de la quantité des produits chimiques utilisés; (B) la réduction des eaux de service; (C) les opérations en amont; (D) les opérations en aval; (E) la réduction d'autres sources d'énergie, en utilisant l'échelle d'évaluation ci-dessous. Répondre par (X) dans le cas d'une non application.

Faible (1)	Moyennement faible (2)	Moyen (3)	Moyennement forte (4)	Forte (5)
---------------	---------------------------	--------------	--------------------------	--------------

A. Au niveau du pompage des eaux usées et/ des boues.

MEEE	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
Installation et optimisation des bassins d'égalisation des eaux et de stockage des boues pour une opération accrue des pompes en période de pointe.	☐	☐	☐	☐	☐
Corriger la puissance des pompes en place	☐	☐	☐	☐	☐
Installation de moteurs à haut rendement énergétique pour le pompage des boues primaires	☐	☐	☐	☐	☐
Installation de moteurs à haut rendement énergétique pour le pompage des boues secondaires	☐	☐	☐	☐	☐

Installation de moteurs à haut rendement énergétique pour le pompage des écumes	☐	☐	☐	☐	☐
Installation de moteurs à haut rendement énergétique pour le pompage des eaux de lavage	☐	☐	☐	☐	☐
Installation des pompes à chaleur dans la récupération de la chaleur au niveau dans le pompage des eaux	☐	☐	☐	☐	☐
Installation des échangeurs de chaleur	☐	☐	☐	☐	☐

B. Au niveau du pré-traitement et du traitement primaire

MEEE	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
Installation de moteurs à haut rendement énergétique au niveau de dessableurs aérés, de dégrilleurs et de convoyeurs automatiques, etc.	☐	☐	☐	☐	☐
Optimisation du pompage de la mousse, des écumes et des boues primaires	☐	☐	☐	☐	☐
Minimiser le lavage des dessableurs	☐	☐	☐	☐	☐
Installation d'un racleur avec un moteur à haut rendement énergétique	☐	☐	☐	☐	☐
Installation d'un moteur à haut rendement énergétique pour l'entraînement du décanteur	☐	☐	☐	☐	☐
Installation d'un moteur à haut rendement énergétique au niveau de la coagulation	☐	☐	☐	☐	☐
Installation d'un moteur à haut rendement énergétique au niveau de la floculation	☐	☐	☐	☐	☐

C. Au niveau du traitement secondaire

MEEE	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
Installation de diffuseurs à fines bulles combiné au contrôle de l'OD dans le bassin d'aération	☐	☐	☐	☐	☐
Installation d'un système périodique de nettoyage des diffuseurs à fines bulles	☐	☐	☐	☐	☐

Installation de diffuseurs à membranes poreuses dans le bassin d'aération	☐	☐	☐	☐	☐
Installation de soufflante de type centrifuge contrôlée par ordinateur	☐	☐	☐	☐	☐
Installation d'un système d'aération à oxygène pur	☐	☐	☐	☐	☐
Installation d'un système arrêt-marche (on-off) dans le système d'aération	☐	☐	☐	☐	☐
	☐	☐	☐	☐	☐
Installation des moteurs à vitesse ajustable (ASD) sur les soufflantes d'air	☐	☐	☐	☐	☐
Installation des moteurs à fréquence variable (VFD) sur des surfaces d'aérateur dans chaque bassin d'aération de deuxième stage	☐	☐	☐	☐	☐
Installation d'un système informatique de suivi combinant le TCO et l'OD	☐	☐	☐	☐	☐
Optimisation du rapport F/M (kg de DBO5/kg de MES) dans les bassins d'aération	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation d'un système avec nitrification-dénitrification	☐	☐	☐	☐	☐
Installation de pompes plus performantes pour la recirculation des boues	☐	☐	☐	☐	☐
Installation d'un système de contrôle automatique de la vitesse de rotation du support de biomasse	☐	☐	☐	☐	☐
Installation de moniteurs pour le contrôle de l'O.D. 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	☐	☐	☐	☐	☐
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	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation de moteurs à haut rendement énergétique pour le moteur d'entraînement du biofiltre.	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation pour le lavage, une soufflante avec un entraînement de moteur à vitesse variable et avec des performances hydrauliques accrues	☐	☐	☐	☐	☐
Maximiser l'opération dans les filtres à vide durant les heures de pointe	☐	☐	☐	☐	☐

Installation d'un turbidimètre pour contrôler le lavage des filtres dans les biofiltres	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation d'un moteur à haut rendement énergétique pour le moteur d'entraînement du bac de mélange des produits chimiques	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation d'un moteur à haut rendement énergétique pour la pompe doseuse de produits chimiques	☐	☐	☐	☐	☐

D. Au niveau du traitement tertiaire

MEEE	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
Utilisation des moteurs et pompes plus performantes	☐	☐	☐	☐	☐
Amélioration de l'efficacité des tubes au niveau de la transmission du regroupement dans la désinfection	☐	☐	☐	☐	☐
Amélioration de l'efficacité des tubes au niveau de la transmission de la longueur d'ondes du rayonnement U.V.	☐	☐	☐	☐	☐

E. Au niveau du traitement et élimination des boues

MEEE	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
Remplacement des systèmes de digestion aérobie par les systèmes anaérobie utilisant un digesteur optimisé de type « Egg-Shaped »	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation d'un système de digestion aérobie-anoxie	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation d'un digesteur aérobie à oxygène pur.	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation de la digestion aérobie thermophile suivie d'une étape de digestion anaérobie mésophile	☐	☐	☐	☐	☐
Stérilisation de boues par pasteurisation	☐	☐	☐	☐	☐
Stérilisation des boues par radiation ionisante	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation d'un moteur à haut rendement pour la pompe doseuse de produits chimiques pour le conditionnement	☐	☐	☐	☐	☐

Utilisation de conditionnement des boues par gel-dégel	☐	☐	☐	☐	☐
Biolixiviation avec soufre	☐	☐	☐	☐	☐
Biolixiviation avec sulfate ferreux	☐	☐	☐	☐	☐
Lixiviation chimique	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation des moteurs à haut rendement énergétique pour différents filtres (à vacuum, à bandes presseuses, à plat)	☐	☐	☐	☐	☐
Installation des centrifugeuses à teneurs élevées en solides avec un moteur à haut rendement énergétique	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation des presses électroacoustiques	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation des presseurs verticaux à auge	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation des filtres-presses rotatifs à vis	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation des filtres-presses tubulaires	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation des membranes filtrantes à courant longitudinal	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation des déshydratateurs à micro-ondes	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation d'un système de déshydratation des boues par presseur rotatif	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation des filtres à membrane	☐	☐	☐	☐	☐
Déshydratation des boues par filtration sur bande presseuse combiné à une étape de séchage par radiation I.R.	☐	☐	☐	☐	☐
Installation des systèmes de séchage des boues à la vapeur ou par infra-rouge	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation des lits de séchage sous vide	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation d'un système de vis chauffante par induction magnétique par séchage	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation d'un procédé électro-efficace de séchage thermique et incinération des boues	☐	☐	☐	☐	☐
Utilisation d'échangeurs de chaleur dans le traitement de boues	☐	☐	☐	☐	☐

8. Selon votre expérience au niveau de la station, quelle incidence peuvent avoir les MEEE suivantes sur (A) les facilités à opérer la MEEE; (B) la fiabilité de la MEEE; (C) l'ergonomie (dans le sens de la sécurité); (D) l'acceptabilité par les opérateurs, en utilisant l'échelle d'évaluation ci-dessous. Répondre par (X) dans le cas d'une non application.

Faible (1)	Moyennement faible (2)	Moyen (3)	Moyennement forte (4)	Fort (5)
---------------	---------------------------	--------------	--------------------------	-------------

A. Au niveau du pompage des eaux usées

MEEE	Facilités op. (A)	Fiabilité (B)	Ergonomie (C)	Acceptabilité (D)
Installation et optimisation des bassins d'égalisation des eaux et de stockage des boues pour une opération accrue des pompes en période de pointe.	☐	☐	☐	☐
Corriger la puissance des pompes en place	☐	☐	☐	☐
Installation de moteurs à haut rendement énergétique pour le pompage des boues primaires	☐	☐	☐	☐
Installation de moteurs à haut rendement énergétique pour le pompage des boues secondaires	☐	☐	☐	☐
Installation de moteurs à haut rendement énergétique pour le pompage des écumes	☐	☐	☐	☐
Installation de moteurs à haut rendement énergétique pour le pompage des eaux de lavage	☐	☐	☐	☐
Installation des pompes à chaleur dans la récupération de la chaleur au niveau dans le pompage des eaux	☐	☐	☐	☐
Installation des échangeurs de chaleur	☐	☐	☐	☐

B. Au niveau du pré-traitement et du traitement primaire

MEEE	Facilités op. (A)	Fiabilité (B)	Ergonomie (C)	Acceptabilité (D)
Installation de moteurs à haut rendement énergétique au niveau de dessableurs aérés, de dégrilleurs et de convoyeurs automatiques, de racleurs.	☐	☐	☐	☐
Optimisation du pompage de la mousse, des écumes et des boues primaires	☐	☐	☐	☐
Minimiser le lavage des dessableurs	☐	☐	☐	☐

Installation d'un moteur à haut rendement énergétique pour l'entraînement du décanteur	☐	☐	☐	☐
Installation d'un moteur à haut rendement énergétique au niveau de la coagulation	☐	☐	☐	☐
Installation d'un moteur à haut rendement énergétique au niveau de la floculation	☐	☐	☐	☐

C. Au niveau du traitement secondaire

MEEE	Facilités op. (A)	Fiabilité (B)	Ergonomie (C)	Acceptabilité (D)
Installation de diffuseurs à fines bulles combiné au contrôle de l'OD dans le bassin d'aération	☐	☐	☐	☐
Installation d'un système périodique de nettoyage des diffuseurs à fines bulles	☐	☐	☐	☐
Installation de diffuseurs à membranes poreuses dans le bassin d'aération	☐	☐	☐	☐
Installation de soufflante de type centrifuge contrôlée par ordinateur	☐	☐	☐	☐
Installation d'un système d'aération à oxygène pur	☐	☐	☐	☐
Installation d'un système arrêt-marche (on-off) dans le système d'aération	☐	☐	☐	☐
Installation des moteurs à vitesse ajustable (ASD) sur les soufflantes d'air	☐	☐	☐	☐
Installation des moteurs à fréquence variable (VFD) sur des surfaces d'aérateur dans chaque bassin d'aération de deuxième stage	☐	☐	☐	☐
Installation d'un système informatique de suivi combinant le TCO et l'OD	☐	☐	☐	☐
Optimisation du rapport F/M (kg de DBO5/kg de MES) dans les bassins d'aération	☐	☐	☐	☐
Utilisation d'un système avec nitrification-dénitrification	☐	☐	☐	☐
Installation de pompes plus performantes pour la recirculation des boues	☐	☐	☐	☐
Installation d'un système de contrôle automatique de la vitesse de rotation du support de biomasse	☐	☐	☐	☐
Installation de moniteurs pour le contrôle de l'O.D. 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	☐	☐	☐	☐
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	☐	☐	☐	☐
Utilisation de moteurs à haut rendement énergétique pour le moteur d'entraînement du biofiltre.	☐	☐	☐	☐
Utilisation pour le lavage, une soufflante avec un entraînement de moteur à vitesse variable et avec des performances hydrauliques accrues	☐	☐	☐	☐
Maximisation des opérations dans les filtres à vide durant les heures de pointe	☐	☐	☐	☐
Installation d'un turbidimètre pour contrôler le lavage des filtres dans les biofiltres	☐	☐	☐	☐
Utilisation d'un moteur à haut rendement énergétique pour le moteur d'entraînement du bac de mélange des produits chimiques	☐	☐	☐	☐
Utilisation d'un moteur à haut rendement énergétique pour la pompe doseuse de produits chimiques	☐	☐	☐	☐

D. Au niveau du traitement tertiaire

MEEE	Facilités op. (A)	Fiabilité (B)	Ergonomie (C)	Acceptabilité (D)
Utilisation des moteurs et pompes plus performantes	☐	☐	☐	☐
Amélioration de l'efficacité des tubes au niveau de la transmission du regroupement dans la désinfection	☐	☐	☐	☐
Amélioration de l'efficacité des tubes au niveau de la transmission de la longueur d'ondes du rayonnement U.V.	☐	☐	☐	☐

E. Au niveau du traitement et élimination des boues

MEEE	Facilités op. (A)	Fiabilité (B)	Ergonomie (C)	Acceptabilité (D)
Remplacement des systèmes de digestion aérobie par les systèmes anaérobie utilisant un digesteur optimisé de type « Egg-Shaped »	☐	☐	☐	☐
Installation d'un système de digestion aérobie-anoxie	☐	☐	☐	☐
Installation d'un digesteur aérobie à oxygène pur.	☐	☐	☐	☐
Utilisation de la digestion aérobie thermophile suivie d'une étape de digestion anaérobie mésophile	☐	☐	☐	☐
Stérilisation de boues par pasteurisation	☐	☐	☐	☐
Stérilisation des boues par radiation ionisante	☐	☐	☐	☐
Utilisation d'un moteur à haut rendement énergétique pour la pompe doseuse de produits chimiques pour le conditionnement	☐	☐	☐	☐
Utilisation de conditionnement des boues par gel-dégel	☐	☐	☐	☐
Biolixiviation avec soufre	☐	☐	☐	☐
Biolixiviation avec sulfate ferreux	☐	☐	☐	☐
Lixiviation chimique	☐	☐	☐	☐
Utilisation des moteurs à haut rendement énergétique pour différents filtres (à vacuum, à bandes presseuses, à plat)	☐	☐	☐	☐
Installation des centrifugeuses à teneurs élevées en solides avec un moteur à haut rendement énergétique	☐	☐	☐	☐
Installation des presses électroacoustiques	☐	☐	☐	☐
Installation des presseurs verticaux à auge	☐	☐	☐	☐
Installation des filtres-presses rotatifs à vis	☐	☐	☐	☐
Installation des filtres-presses tubulaires	☐	☐	☐	☐
Installation des membranes filtrantes à courant longitudinal	☐	☐	☐	☐

Installation des déshydratateurs à micro-ondes	☐	☐	☐	☐
Installation d'un système de déshydratation des boues par presseur rotatif	☐	☐	☐	☐
Utilisation des filtres à membrane	☐	☐	☐	☐
Utilisation d'un système de déshydratation des boues par filtration sur bande presseuse combiné à une étape de séchage par radiation infra-rouge	☐	☐	☐	☐
Installation des systèmes de séchage des boues à la vapeur ou par infra-rouge	☐	☐	☐	☐
Installation des lits de séchage sous vide	☐	☐	☐	☐
Utilisation d'un système de vis chauffante par induction magnétique par séchage	☐	☐	☐	☐
Utilisation d'un procédé électro-efficace de séchage thermique et incinération des boues	☐	☐	☐	☐
Utilisation d'échangeurs de chaleur dans le traitement de boues	☐	☐	☐	☐
Utilisation d'un système de séchage thermique granulaire	☐	☐	☐	☐

9. Dans le but de pouvoir comparer les différentes MEEE, veuillez évaluer la valeur approximative des caractéristiques des MEEE suivantes (*N.B: Prière de répondre au meilleur de vos connaissances*)

Caractéristiques des MEEE	Valeur
1. Coût d'implantation de la MEEE	
2. Vie utile de la MEEE	
3. Temps de retour sur l'investissement	

10. Dans le but de pouvoir comparer les différentes MEEE, veuillez qualifier les caractéristiques des MEEE suivantes en utilisant l'échelle ci-après. Répondre par (X) dans le cas d'une non application.

Faible (1)	Moyennement faible (2)	Moyen (3)	Moyennement forte (4)	Forte (5)
---------------	---------------------------	--------------	--------------------------	--------------

(N.B: Prière de répondre au meilleur de vos connaissances)

Caractéristiques des MEEE	Qualification
1. Effet de synergie de la MEEE sur la chaîne d'épuration	
2. Incidence de la MEEE sur la consommation d'électricité	
3. Incidence de la MEEE sur l'appel de puissance	
4. Incidence de la MEEE sur la DBO ₅	
5. Incidence de la MEEE sur les M.E.S.	
6. Incidence de la MEEE sur le Phosphore total (Pt)	
7. Acceptabilité de la MEEE par les opérateurs	
8. Substitutionnalité et fiabilité de la MEEE	
9. Incidence de la MEEE sur les produits chimiques et autres sources d'énergie	
10. Incidence de la MEEE sur le développement durable	

11. Pour les caractéristiques des MEEE ci-dessous, veuillez:

- les classer par ordre d'importance décroissante en fonction de votre sensibilité dans le choix des MEEE à implanter dans votre station dans le cadre du programme d'efficacité énergétique (classement: colonne 1);
- pour ce classement, en utilisant une échelle de 0 à 10, veuillez attribuer une valeur à chacune de ces caractéristiques. Une valeur près de 10 indique que la caractéristique est très très importante selon vous, alors qu'une valeur près de 0 signifie que la caractéristique est très peu importante. (valeur: colonne 2)

Caractéristiques des MEEE	Class.	Valeur
1. Coût d'implantation de la MEEE		
2. Politique de financement (Hydro-Québec versus Municipalité)		
3. Vie utile de la MEEE		
4. Temps de retour sur l'investissement		
5. Effet de synergie de la MEEE sur la chaîne de traitement		
6. Incidence de la MEEE sur la consommation d'électricité		
7. Incidence de la MEEE sur l'appel de puissance		
8. Effet de la MEEE sur la DBO ₅		
9. Effet de la MEEE sur les M.E.S.		
10. Effet de la MEEE sur le Phosphore total (Pt)		

11. Acceptabilité de la MEEE par les opérateurs		
12. Substitutionnalité et fiabilité de la MEEE		
13. Incidence de la MEEE sur les produits chimiques et autres sources d'énergie		
14. Incidence de la MEEE sur le développement durable		

12. Les procédés de traitement ci-dessous constituant généralement les étapes d'une chaîne de traitement des eaux usées municipales et domestiques, veuillez pointer ceux qui s'appliquent dans le cas de votre station:

Procédé	Cocher
1. Dégrillage	
2. Tamisage	
3. Déchiquetage/broyage ou dilacération	
4. Dessablage/dégraissage	
5. Coagulation-Floculation	
6. Décantation	
7. Aération	
8. Filtration sur sable ou sur gravier	
9. Filtration biologique	
10. Désinfection (UV)	
11. Déphosphatation	
12. Chaulage	
13. Digestion des boues	
14. Épaississement des boues	
15. Déshydratation des boues (filtres)	
16. Incinération	
17. Enfouissement	

13. Pour la chaîne épuratoire ainsi identifiée, répondre aux questions suivantes:

13.1 Pour la chaîne d'épuration des eaux (Pré-traitement→ Trait. Tertiaire), veuillez évaluer la valeur des caractéristiques des MEEE suivantes (*N.B: Prière de répondre au meilleur de vos connaissances*)

	Caractéristiques des chaînes de traitement	Valeur
1.	Coût d'implantation de la chaîne épuratoire (\$)	
2.	Coût d'exploitation de la chaîne épuratoire (\$)	
3.	Efficacité énergétique hydraulique (kWh/m ³ d'eaux traitées)	
4.	Efficacité énergétique épuratoire (kWh/Kg de DBO ₅ enlevé)	
5.	Efficacité épuratoire ⁴ mesurée par rapport à la DBO ₅	
6.	Efficacité épuratoire mesurée par rapport aux M.E.S	
7.	Efficacité épuratoire mesurée par rapport au Pt	

13.2 Dans le but de pouvoir comparer les différentes chaînes épuratoires, veuillez qualifier les caractéristiques des chaînes épuratoires suivantes en utilisant l'échelle ci-après. Répondre par (X) dans le cas d'une non application.

Faible (1)	Moyennement faible (2)	Moyen (3)	Moyennement forte (4)	Forte (5)
---------------	---------------------------	--------------	--------------------------	--------------

(*N.B: Prière de répondre au meilleur de vos connaissances*)

	Caractéristiques des chaînes de traitement	Valeur
1.	Facilités opératoires et ergonomiques de la chaîne épuratoire	
2.	Acceptabilité du type de traitement par la population	
3.	Contribution du traitement au développement durable	
4.	Substitutionnalité de nouvelles technologies de la chaîne épuratoire	

⁴L'efficacité épuratoire mesurée par rapport à la DBO₅, aux M.E.S. et au Pt peut être estimée en %, sur une base annuelle.

13.3 Pour les caractéristiques des chaînes épuratoires ci-dessous, veuillez:

- les classer par ordre d'importance décroissante en fonction de votre sensibilité dans le choix des chaînes épuratoires à privilégier dans votre municipalité ou régie dans le cadre du programme d'efficacité énergétique (classement: Colonne 1);
- pour ce classement, en utilisant une échelle de 0 à 10, veuillez attribuer une valeur à chacune de ces caractéristiques. Une valeur près de 10 indique que la caractéristique est très très importante selon vous, alors qu'une valeur près de 0 signifie que la caractéristique est très peu importante. (valeur: colonne 2)

Caractéristiques des chaînes épuratoires	Classement	valeur
1. Coût d'implantation de la chaîne épuratoire		
2. Coût d'exploitation et de maintenance de la chaîne épuratoire		
3. Facilités opératoires et ergonomiques de la chaîne épuratoire		
4. Efficacité énergétique hydraulique		
5. Efficacité énergétique épuratoire		
6. Efficacité épuratoire mesurée par rapport à la DBO ₅		
7. Efficacité épuratoire mesurée par rapport aux M.E.S		
8. Efficacité épuratoire mesurée par rapport au Pt		
9. Acceptabilité du type de traitement par la population		
10. Contribution du traitement au développement durable		
11. Substitutionnalité à la nouvelle technologie de la chaîne épuratoire		

14. Pour la partie portant sur le traitement et élimination des boues d'épuration, veuillez évaluer la valeur des caractéristiques des chaînes de traitement des boues suivantes *(N.B: Prière de répondre au meilleur de vos connaissances)*

	Caractéristiques des chaînes de traitement des boues	Valeur
1.	Coût d'implantation de la chaîne de traitement des boues (\$)	
2.	Coûts d'exploitation et de maintenance de la chaîne (\$)	
3.	Efficacité énergétique de traitement (kWh/kg de boues traitées)	

15. Dans le but de pouvoir comparer les différentes chaînes de traitement des boues, veuillez qualifier les caractéristiques suivantes en utilisant l'échelle ci-après. Répondre par (X) dans le cas d'une non application.

Faible (1)	Moyennement faible (2)	Moyen (3)	Moyennement forte (4)	Forte (5)
---------------	---------------------------	--------------	--------------------------	--------------

(N.B: Prière de répondre au meilleur de vos connaissances)

	Paramètres	Qualification
1.	Facilités opératoires et ergonomiques de la chaîne de traitement	
2.	Efficacité de réduction des pathogènes	
3.	Pouvoir de putréfaction de la chaîne de traitement	
4.	Efficacité du contrôle des odeurs	
5.	Capacité d'éliminer les métaux lourds	
6.	Capacité d'éliminer les composés volatils et semi-volatils	
7.	Capacité d'éliminer les pesticides et les PCB	
8.	Capacité d'éliminer les polluants toxiques inorganiques	
9.	Capacités d'éliminer les polluants toxiques organiques	
10.	Acceptabilité du type de traitement par la population	
11.	Contribution du traitement au développement durable	
12.	Substitutionnalité de nouvelles technologies de la chaîne	

16. Pour les caractéristiques des chaînes de traitement des boues ci-dessous, veuillez:

- les classer par ordre d'importance décroissante en fonction de votre sensibilité dans le choix des MEEE à implanter dans votre station dans le cadre du programme d'efficacité énergétique (classement: Colonne 1);
- pour ce classement, en utilisant une échelle de 0 à 10, veuillez attribuer une valeur à chacune de ces caractéristiques. Une valeur près de 10 indique que la caractéristique est très très importante selon vous, alors qu'une valeur près de 0 signifie que la caractéristique est très peu importante. (valeur: colonne 2)

Caractéristiques des chaînes de traitement des boues	Classement	Valeur
1. Coût d'implantation de la chaîne de traitement des boues		
2. Coût d'exploitation et de maintenance de la ch. de tr. des boues		
3. Facilités opératoires et ergonomiques de la ch.de trait. des boues		
4. Efficacité énergétique de traitement		
5. Efficacité de réduction des pathogènes		
6. Pouvoir de putréfaction de la chaîne de traitement		
7. Efficacité du contrôle des odeurs		
8. Capacité d'éliminer les métaux lourds		
9. Capacité d'éliminer les composés volatils et semi-volatils		
10.Capacité d'éliminer les pesticides et les PCB		
11.Capacité d'éliminer les polluants toxiques inorganiques		
12.Capacités d'éliminer les polluants toxiques organiques		
13.Acceptabilité du type de traitement par la population		
14. Contribution du traitement au développement durable		
15. Substitutionnalité à la nouvelle technologie de la chaîne		

**ENQUÊTE SUR LES MESURES D'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ÉLECTRIQUE
DANS
LES STATIONS D'ÉPURATION DES EAUX USÉES MUNICIPALES
DU QUÉBEC**

QUESTIONNAIRE DESTINÉ AUX EXPERTS

**RÉALISÉE PAR Nlombi Kibi, Étudiant du doctorat en Sciences de l'eau
L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (INRS-Eau)**

EN COLLABORATION

AVEC

HYDRO-QUÉBEC.

SEPTEMBRE 1995

A. STATIONS D'ÉPURATION DES EAUX USÉES MUNICIPALES

1. Dans le but de pouvoir comparer les différentes mesures (MEEE) entre-elles, veuillez qualifier selon vous, l'importance que prennent dans la comparaison, les caractéristiques des MEEE suivantes en utilisant l'échelle ci-après. Répondre par (X) dans le cas d'une non application.

Faible (1)	Moyennement faible (2)	Moyen (3)	Moyennement forte (4)	Forte (5)
---------------	---------------------------	--------------	--------------------------	--------------

(N.B: Prière de répondre au meilleur de vos connaissances)

Caractéristiques des MEEE	Qualification
1. Coût d'implantation de la MEEE	
2. Politique de financement (Hydro-Québec versus Municipalité)	
3. Vie utile de la MEEE	
4. Temps de retour sur l'investissement	
5. Effet de synergie de la MEEE sur la chaîne d'épuration	
6. Incidence de la MEEE sur la consommation d'électricité	
7. Incidence de la MEEE sur l'appel de puissance	
8. Incidence de la MEEE sur la DBO ₅	
9. Incidence de la MEEE sur les M.E.S.	
10. Incidence de la MEEE sur le Phosphore total (Pt)	
11. Acceptabilité de la MEEE par les opérateurs	
12. Substitutionnalité et fiabilité de la MEEE	
13. Incidence de la MEEE sur les produits chimiques et autres sources d'énergie	
14. Incidence de la MEEE sur le développement durable	

2. Pour les caractéristiques des mesures ci-dessous, veuillez:

- les classer par ordre d'importance décroissante en fonction de votre sensibilité à les considérer dans le choix des mesures à implanter dans une station donnée dans le cadre du programme d'efficacité énergétique (**classement**: colonne 1);
- pour ce classement, en utilisant une échelle de 0 à 10, veuillez attribuer une valeur à chacune de ces caractéristiques. Une valeur près de 10 indique que la caractéristique est très très importante à considérer dans le choix selon vous, alors qu'une valeur près de 0 signifie que la caractéristique est très peu importante (**valeur**: colonne 2)

Caractéristiques des MEEE	Class.	Valeur
1. Coût d'implantation de la MEEE		
2. Politique de financement (Hydro-Québec versus Municipalité)		
3. Vie utile de la MEEE		
4. Temps de retour sur l'investissement		
5. Effet de synergie de la MEEE sur la chaîne de traitement		
6. Incidence de la MEEE sur la consommation d'électricité		
7. Incidence de la MEEE sur l'appel de puissance		
8. Effet de la MEEE sur la DBO ₅		
9. Effet de la MEEE sur les M.E.S.		
10. Effet de la MEEE sur le Phosphore total (Pt)		
11. Acceptabilité de la MEEE par les opérateurs		
12. Substitutionnalité et fiabilité de la MEEE		
13. Incidence de la MEEE sur les produits chimiques et autres sources d'énergie		
14. Incidence de la MEEE sur le développement durable		

3. Dans le but de pouvoir comparer différentes chaînes épuratoires, veuillez qualifier les caractéristiques des chaînes épuratoires suivantes en utilisant l'échelle ci-après. Répondre par (X) dans le cas d'une non application.

Faible (1)	Moyennement faible (2)	Moyen (3)	Moyennement forte (4)	Forte (5)
---------------	---------------------------	--------------	--------------------------	--------------

(N.B: Prière de répondre au meilleur de vos connaissances)

	Caractéristiques des chaînes de traitement	Qualification
1.	Coût d'implantation de la chaîne épuratoire	
2.	Coût d'exploitation de la chaîne épuratoire	
3.	Efficacité énergétique hydraulique (kWh/m ³ d'eaux traitées)	
4.	Efficacité énergétique épuratoire (kWh/Kg de DBO ₅ enlevé)	
5.	Efficacité épuratoire ¹ mesurée par rapport à la DBO ₅	
6.	Efficacité épuratoire mesurée par rapport aux M.E.S	
7.	Efficacité épuratoire mesurée par rapport au Pt	
8.	Facilités opératoires et ergonomiques de la chaîne épuratoire	
9.	Acceptabilité du type de traitement par la population	
10.	Contribution du traitement au développement durable	
11.	Substitutionnalité de nouvelles technologies de la chaîne épuratoire	

¹ L'efficacité épuratoire mesurée par rapport à la DBO₅, aux M.E.S. et au Pt peut être estimée en %, sur une base annuelle.

4. Pour les caractéristiques des chaînes épuratoires ci-dessous, veuillez:

- les classer par ordre d'importance décroissante en fonction de votre sensibilité à les considérer dans le choix des chaînes épuratoires à privilégier dans votre municipalité ou régie dans le cadre du programme d'efficacité énergétique (classement: Colonne 1);
- pour ce classement, en utilisant une échelle de 0 à 10, veuillez attribuer une valeur à chacune de ces caractéristiques. Une valeur près de 10 indique que la caractéristique est très très importante à considérer dans le choix selon vous, alors qu'une valeur près de 0 signifie que la caractéristique est très peu importante. (valeur: colonne 2)

Caractéristiques des chaînes épuratoires	Classement	valeur
1. Coût d'implantation de la chaîne épuratoire		
2. Coût d'exploitation et de maintenance de la chaîne épuratoire		
3. Facilités opératoires et ergonomiques de la chaîne épuratoire		
4. Efficacité énergétique hydraulique		
5. Efficacité énergétique épuratoire		
6. Efficacité épuratoire mesurée par rapport à la DBO ₅		
7. Efficacité épuratoire mesurée par rapport aux M.E.S		
8. Efficacité épuratoire mesurée par rapport au Pt		
9. Acceptabilité du type de traitement par la population		
10. Contribution du traitement au développement durable		
11. Substitutionnalité à la nouvelle technologie de la chaîne épuratoire		

5. Dans le but de pouvoir comparer les **différentes chaînes de traitement des boues**, veuillez qualifier l'importance que prennent des caractéristiques suivantes dans la comparaison en utilisant l'échelle ci-après. Répondre par (X) dans le cas d'une non application.

Faible (1)	Moyennement faible (2)	Moyen (3)	Moyennement forte (4)	Forte (5)
---------------	---------------------------	--------------	--------------------------	--------------

(N.B: Prière de répondre au meilleur de vos connaissances)

	Paramètres	Qualification
1.	Coût d'implantation de la chaîne de traitement des boues (\$)	
2.	Coûts d'exploitation et de maintenance de la chaîne (\$)	
3.	Efficacité énergétique de traitement (kWh/kg de boues traitées)	
4.	Facilités opératoires et ergonomiques de la chaîne de traitement	

5.	Efficacité de réduction des pathogènes	
6.	Pouvoir de putréfaction de la chaîne de traitement	
7.	Efficacité du contrôle des odeurs	
8.	Capacité d'éliminer les métaux lourds	
9.	Capacité d'éliminer les composés volatils et semi-volatils	
10.	Capacité d'éliminer les pesticides et les PCB	
11.	Capacité d'éliminer les polluants toxiques inorganiques	
12.	Capacités d'éliminer les polluants toxiques organiques	
13.	Acceptabilité du type de traitement par la population	
14.	Contribution du traitement au développement durable	
15.	Substitutionnalité de nouvelles technologies de la chaîne	

6. Pour les caractéristiques des chaînes de traitement des boues ci-dessous, veuillez:

- les classer par ordre d'importance décroissante en fonction de votre sensibilité à les considérer dans le choix des MEEE à implanter dans votre station dans le cadre du programme d'efficacité énergétique (classement: Colonne 1);
- pour ce classement, en utilisant une échelle de 0 à 10, veuillez attribuer une valeur à chacune de ces caractéristiques. Une valeur près de 10 indique que la caractéristique est très très importante à considérer dans le choix selon vous, alors qu'une valeur près de 0 signifie que la caractéristique est très peu importante. (valeur: colonne 2)

Caractéristiques des chaînes de traitement des boues	Classement	Valeur
1. Coût d'implantation de la chaîne de traitement des boues		
2. Coût d'exploitation et de maintenance de la ch. de tr. des boues		
3. Facilités opératoires et ergonomiques de la ch. de trait. des boues		
4. Efficacité énergétique de traitement		
5. Efficacité de réduction des pathogènes		
6. Pouvoir de putréfaction de la chaîne de traitement		
7. Efficacité du contrôle des odeurs		
8. Capacité d'éliminer les métaux lourds		
9. Capacité d'éliminer les composés volatils et semi-volatils		
10. Capacité d'éliminer les pesticides et les PCB		
11. Capacité d'éliminer les polluants toxiques inorganiques		
12. Capacités d'éliminer les polluants toxiques organiques		
13. Acceptabilité du type de traitement par la population		
14. Contribution du traitement au développement durable		
15. Substitutionnalité à la nouvelle technologie de la chaîne		

ANNEXE 4

« Applicabilité des mesures d'efficacité énergétique électrique dans les ouvrages d'épuration des eaux usées municipales »

Article publié dans la Revue Vecteur Environnement, vol. 29(4) : 33-46, Montréal (Québec).

**APPLICABILITÉ DES MESURES D'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE
ÉLECTRIQUE DANS LES OUVRAGES D'ÉPURATION
DES EAUX USÉES MUNICIPALES**

**Nlombi Kibi^{1†}, Jean-Louis Sasseville², Jean-François Blais³
et Denis Couillard⁴**

INRS-Eau, Université du Québec, 2800 rue Einstein, suite 105,
C.P. 7500, Sainte-Foy, Québec, G1X 4N8.

1. Doctorant en sciences de l'eau
2. Professeur titulaire, INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec
3. Associé de recherche, INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec
4. Professeur titulaire, INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec

[†] *Auteur correspondant*

RÉSUMÉ

On reconnaît en général que l'utilisation de l'énergie électrique dans les stations d'épuration des eaux usées est peu rationalisée et qu'il est possible de réduire les coûts de consommation de plus de vingt pour cent par l'application de mesures d'efficacité énergétique. Face à cette situation peu avantageuse à long terme pour le fournisseur et le consommateur d'électricité, divers programmes d'incitations à l'adoption de telles mesures sont en élaboration en Amérique du nord. Le Québec n'échappe pas à cet effort de rationalisation et on y prépare depuis 1994 des programmes d'incitations aux économies d'énergie pour les stations d'épuration des eaux municipales. Le choix des mesures le plus performantes nécessite au préalable que l'on circoncrive et évalue l'ensemble des moyens techniques potentiellement applicables. À partir de différents travaux et études sur l'efficacité énergétique électrique dans le secteur de l'eau, cette recherche établit un ensemble des mesures d'efficacité énergétique électrique technique (MEEET) potentiellement applicables dans les stations d'épuration des eaux usées municipales. Elles touchent principalement le pompage des eaux et des boues, les systèmes d'aération au niveau du traitement secondaire et diverses électrotechnologies au niveau du traitement et élimination des boues. Les stations de type boues activées et de type étangs aérés représentent un potentiel d'efficacité énergétique plus important en ce qui a trait au nombre des MEEET potentiellement implantables.

MOTS CLÉS

Épuration des eaux usées, boues d'épuration, efficacité énergétique, mesures d'efficacité énergétique électrique.

ANNEXE 5

« Modélisation multicritère pour l'amélioration de l'efficacité énergétique électrique dans les stations d'épuration des eaux usées municipales »

Article soumis pour publication à la Revue Vecteur Environnement, Montréal (Québec)

**MODÉLISATION MULTICRITÈRE POUR L'AMÉLIORATION DE
L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ÉLECTRIQUE DANS LES STATIONS
D'ÉPURATION DES EAUX USÉES MUNICIPALES**

**Nlombi Kibi¹⁺, Jean-Louis Sasseville²⁺, Jean-François Blais³,
Jean-Marc Martel⁴ et Denis Couillard⁵**

- 1 Doctorant, INRS-Eau, Université du Québec, 2800, rue Einstein, suite 105,
C.P. 7 500, Sainte-Foy, Québec, G1X 4N8.
- 2 Professeur Titulaire, INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec.
- 3 Professeur Titulaire, Département O.S.D., Fac. Sc. De l'Administration,
Université Laval, Sainte-Foy (Québec), G1K 7P4.
- 4 Associé de recherche, INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec.
- 5 Professeur Titulaire, INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec.

⁺ Auteurs correspondants

** Article soumis pour publication à la Revue Vecteur Environnement, Montréal (Québec).*

L'INRS ne détient pas les droits pour diffuser cet article. Vous pouvez le consulter dans la version papier de cette thèse :

Kibi, N., Sasseville, J.L., Couillard, D. et Blais, J.F. (1998). Modélisation multicritère pour l'amélioration de l'efficacité énergétique électrique dans les stations d'épuration des eaux usées municipales. *Vecteur Environ.* 30(5): 40-48.

ANNEXE 6

« Évaluation multicritère de la performance globale de procédés d'épuration des eaux usées améliorés par l'intégration de mesures d'efficacité énergétique »

Article soumis pour publication à la Revue des sciences de l'eau, Québec-France

**ÉVALUATION MULTICRITÈRE DE LA PERFORMANCE GLOBALE
DE PROCÉDÉS D'ÉPURATION DES EAUX USÉES AMÉLIORÉS PAR
L'INTÉGRATION DE MESURES D'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE**

Nlombi Kibi¹, Jean-Louis Sasseville^{2*}, Jean-Marc Martel³,
Denis Couillard⁴ et Jean-François Blais⁵

¹ Doctorant, INRS-Eau, Université du Québec, 2800, rue Einstein, suite 105,
C.P. 7 500, Sainte-Foy, Québec, G1X 4N8.

² Professeur Titulaire, INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec.

³ Professeur Titulaire, Département Opérations et Systèmes de Décisions,
Faculté des Sciences de l'Administration, Université Laval, Québec, Canada,
G1K 7P4.

⁴ Professeur Titulaire, INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec.

⁵ Associé de recherche, INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec.

** Auteur correspondant*

Résumé

La mise en vigueur de nouvelles politiques et de législations de contrôle de la pollution de l'eau amorcée durant la dernière décennie a entraîné à l'implantation d'un grand nombre de stations d'épuration des eaux usées municipales, y occasionnant une augmentation rapide de la consommation d'électricité. D'où la nécessité de la mise en oeuvre de divers programmes d'efficacité énergétique dans ce secteur. Les travaux en la matière révèlent que des économies d'énergie allant jusqu'à 30 % sont réalisables par l'implantation de mesures d'efficacité énergétique électrique (MEEE). Celles-ci sont susceptibles de réduire la consommation moyenne et la consommation de pointe. Cet article propose une classification multicritère intégrant les aspects techniques, énergétiques, économiques, etc. de six chaînes d'épuration des eaux municipales, améliorées par l'intégration de diverses MEEE. Le but poursuivi est d'aider au choix de technologies d'épuration efficaces du point de vue énergétique et épuratoire. L'analyse est réalisée sur la base des données provenant de stations d'épuration des eaux usées municipales du Québec. Les résultats obtenus montrent que, parmi les six chaînes étudiées, les trois premières positions sont occupées par les chaînes de types Réacteurs Biologiques Séquentiels, Biofiltration et Boues activées avec déphosphatation respectivement. Dans le cadre de l'expansion du parc québécois des ouvrages d'assainissement, lorsqu'il s'agit de choisir des technologies efficaces sur le plan électrique et épuratoire, ces trois premières stations seront considérées comme les meilleures dans la fourchette de débits situés entre 8,000 m³/d et 30,000 m³/d.

Mots-clés : *Épuration des eaux usées municipales, modélisation multicritère, aide à la décision, performance globale, Mesures d'Efficacité Énergétique Électrique.*

MULTICRITERIA DECISION-MAKING OF THE GLOBAL PERFORMANCE OF WASTEWATER TREATMENT PROCESSES ENHANCED BY THE INTEGRATION OF ELECTRICITY SAVINGS MEASURES.

SUMMARY

Since the mid-1980s new policies and legislations in water pollution control have resulted, among others, in the implementation of many municipal wastewater treatment plants, resulting in a rapid increase in electricity consumption. In fact, not only the number of wastewater plants is increasing, but there is also a proliferation of energy consuming processes. Any intervention toward reducing electricity consumption and demand in wastewater systems is necessary. This explains the interest in the setting-up of various energy saving programs in the wastewater sector. In fact, the rationalization of electricity consumption in municipal wastewater treatment is becoming a new management problem to which are faced both the producer and the consumer of this energy resource. In the province of Quebec, savings made possible by reducing electricity consumption in wastewater plants and the progressive expansion of the actual park of wastewater treatment facilities are hardly calling for the adoption of efficient technologies in term of energy and treatment. Research works in energy efficiency have showed that up to 30 % of energy savings are possible with the implementation of appropriate Electricity Savings Measures (ESMs) in operating wastewater plants. It is assumed that these will reduce average consumption and peak consumption in these stations. This paper suggests a multicriteria ranking of six different treatment chains operating in Quebec, improved by the integration of various ESMs able to reduce electricity consumption. The stations types are : (1) Biofiltration system, (2) Physico-chemical system, (3) Sequencing biological (batch) reactors system, (4) Activated sludge system, (5) Activated sludge with extended aeration system, (6) Aerated Lagoons system. The objective is to assist in choosing of efficient technologies on the basis of energy and treatment, while globally being the most performant. The multicriteria ranking is based on the assessment of global performance. This assessment integrates technical, energetic, economic, environmental, social and ergonomic aspects. This shows the multidimensional nature of this problem, often approached, may be for simplification reasons, by unicriteria optimization or economic methods. These methods often seek to establish a unique criteria taking into account all the aspects of the problem. The multicriteria modeling suggested in this paper is based on ELECTRE III (Roy, 1978) and PROMETHEE II (Brans *et al.*, 1984) methods, and work by Derot *et al.* (1994). It enables to aggregate six municipal wastewater treatment chains with fourteen decision criteria, in order to rank them from best to worst. Results obtained show that between the six treatment chains studied, the first three ranks are occupied by the following types : Sequencing biological (batch) reactors, Biofiltration system and Activated sludge with

extended aeration system respectively. With regards to the expansion of the province of Quebec's park of municipal wastewater treatment facilities, these first three technologies will be considered as the best electrical and treatment efficient technologies. The analysis was undertaken on the basis of data obtained from six wastewater treatment plants operating in Quebec. The six treatment chains were mainly chosen because of their daily hydraulic discharge and their treatment technology. Treatment capacities considered in each of these stations vary between 8,000 m³/d and 30,000 m³/d with a mean hydraulic discharge of 20,220 m³/d.

KEY-WORDS : *Wastewater treatment, Multicriteria approach, Decision Making, electricity savings measures, Global performance.*

INTRODUCTION

D'importants travaux d'analyse et d'évaluation ont été réalisés au cours des dix dernières années sur la consommation d'électricité dans le secteur de l'eau (ANDERSON, 1980; ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI), 1993; OWEN, 1982; ONTARIO-HYDRO, 1993; METCALF et EDDY, INC., 1992). Ces travaux montrent qu'en général, l'utilisation de l'électricité est peu rationalisée dans les systèmes de traitement et d'épuration des eaux municipales.

Les travaux de METCALF et EDDY, INC. (1992) et d'EPRI (1993) concluent qu'il est possible de réduire substantiellement la demande d'électricité ainsi que d'améliorer l'utilisation de l'énergie électrique dans les procédés d'épuration des eaux usées municipales, notamment en introduisant dans les procédés et leur gestion, des mesures d'efficacité énergétique électrique (MEEE).

Au Québec, l'expansion du parc actuel des ouvrages d'assainissement des eaux usées municipales et les économies d'énergie envisageables incitent fortement à améliorer les chaînes d'épuration en y intégrant des MEEE appropriées. Cette rationalisation du niveau de la consommation d'électricité devrait se traduire en pratique par une augmentation de l'utilisation de l'énergie électrique et d'une diminution de la consommation moyenne et de la consommation de pointe. Elle doit cependant aboutir au choix de chaînes d'épuration qui conservent un haut niveau de performance globale tout en satisfaisant diverses contraintes environnementales, techniques, économiques et ergonomiques.

Comment choisir les chaînes d'épuration les plus énergétiquement efficaces tout en étant globalement plus performantes ?

Cet article propose une solution à cette question en procédant à une évaluation de la performance globale de chaînes d'épuration des eaux usées municipales auxquelles on a, par simulation qualitative, intégrées des mesures d'efficacité énergétique électrique.

L'article se divise en trois sections. La première section présente le problème du choix de technologies d'épuration des eaux usées électriquement efficaces tel qu'il se pose actuellement au Québec. La deuxième expose comment, par modélisation multicritère, il est possible de classer, selon leur performance globale, divers procédés d'épuration rendus énergétiquement efficaces par l'intégration des MEEE. Les résultats et une discussion les concernant sont présentés à la troisième section. Enfin l'article conclut sur les possibilités d'améliorer sensiblement l'efficacité énergétique du parc des ouvrages d'assainissement des eaux usées en développement au Québec.

1. PROBLÉMATIQUE DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ÉLECTRIQUE DANS L'EXPANSION DU PARC DES OUVRAGES D'ASSAINISSEMENT DES EAUX USÉES MUNICIPALES

Au Québec, les économies rendues possibles par la réduction de la consommation d'électricité dans les stations d'épuration des eaux usées et l'expansion progressive du parc actuel des ouvrages d'assainissement des eaux usées incitent fortement à l'adoption des technologies d'épuration efficaces au plan énergétique. SASSEVILLE *et al.* (1995) estiment en effet qu'il est possible d'économiser, au niveau du parc actuel, 5 M \$ sur un coût actuel d'environ 24 M \$ pour les 400 GWh d'électricité consommés annuellement dans les stations d'épuration des eaux usées municipales uniquement par l'implantation de mesures d'efficaces appropriées.

Il est en effet possible d'améliorer l'efficacité énergétique des chaînes d'épuration actuelles en y introduisant diverses MEEE. Cependant, le problème de choisir parmi ces chaînes d'épuration améliorées la technologie la plus adéquate pour prendre en charge une situation donnée demeure entier.

En général, le choix des technologies d'épuration est réalisé sur la base de modèles mathématiques unicritères, par exemple, la minimisation du coût de construction ou des coûts d'exploitation et de maintenance (ECKENFELDER, 1982; PINEAU *et al.*, 1985; WANG ET WANG, 1979; TYTECA *et al.*, 1977). Il existe d'autres approches basées sur des modèles de simulation dynamique ou encore sur des analyses technologiques et économétriques (HYDRO-QUÉBEC, 1993; MACRAE (1989); LESSARD, 1989; BROCKTON, 1987; HOLDREN, 1987; FOSBERG ET MUKHOPADHYAY, 1981; REID, CROWTHER et PARTNERS, 1978; KLEMETSON et GRENNEY, 1976).

Ces différentes approches sont souvent insuffisantes pour discriminer la valeur réelle des diverses options technologiques. En effet, elles ne tiennent pas compte de tous les facteurs (techniques, économiques, financiers et environnementaux, ergonomiques et socio-politiques) qui interviennent dans leur mise en place, ces facteurs étant pourtant indispensables pour arriver à une solution acceptable et viable.

L'approche multicritère d'aide à la décision peut pallier cette difficulté. Par définition, l'approche multicritère est basée sur un ensemble de concepts, de voies, de modèles et de méthodes en vue d'aider les décideurs à décrire, évaluer, trier, ranger, sélectionner et rejeter des objets sur la base d'une évaluation par rapport à plusieurs critères. Ces critères, souvent contradictoires, tiennent compte de plusieurs axes de signification correspondant aux différents axes autour desquels les parties prenantes justifient, transforment et argumentent leurs préférences dans le processus décisionnel (ROY et VINCKE, 1981).

Dans cette analyse, l'approche multicritère d'aide à la décision permet de tenir compte de principaux facteurs dans la conception et l'opération des technologies épuratoires, principalement des facteurs énergétiques et environnementaux, débouchant ainsi sur des stations d'épuration efficaces du point de vue énergétique et épuratoire.

Cependant, l'analyse des facteurs décisionnels à considérer, pose un problème particulier. Certains ont un effet sur la décision qui peut être apprécié par des relations déterministes, offrant un niveau de certitude élevé quant à son évaluation, alors que d'autres ont un caractère non-déterministe (incertitude et imprécision). Plusieurs travaux de recherche portant sur l'analyse multicritère dans de telles situations, dont quelques uns s'appliquant aux secteurs de l'environnement et de l'énergie, ont été réalisés au cours des vingt dernières années. Il s'agit notamment des travaux de KEENEY et NAIR (1977); ROY et VINCKE (1981); TEGHEM et KUNSCH (1985); SIMOS (1990); HANSON (1991); ROUSSEAU et MARTEL (1994). Là encore, ces approches ont des limites, les cas étant traités, soit en situation de certitude, soit en situation d'incertitude ou d'imprécision. La modélisation, proposée dans cet article, traite le cas de certitude et d'incertitude en même temps, améliorant ainsi l'intérêt de l'approche multicritère dans la situation de décision étudiée.

L'analyse est réalisée sur la base des données provenant de six chaînes d'épuration des eaux usées en opération dans des stations du Québec. Elles ont été choisies en fonction du débit hydraulique journalier et de la technologie de traitement. Pour des fins de comparaison, les débits hydrauliques considérés dans chacune des stations varient entre 8,000 m³/d et 30,000 m³/d, avec une moyenne de 20,220 m³/d.

2. L'APPLICATION DE L'APPROCHE MULTICRITÈRE AU CHOIX DE PROCÉDÉS D'ÉPURATION GLOBALEMENT EFFICACES

La solution retenue ici consiste à appliquer l'approche multicritère d'aide à la décision en vue de classer, de la meilleure à la moins bonne, les six chaînes d'épuration améliorées par l'intégration des MEEE adéquates. Les résultats de cette analyse permettraient de discriminer le comportement des technologies considérées, et de juger ainsi de leur performance relative dans les investissements pour la construction de nouvelles stations d'épuration.

2.1 La modélisation multicritère

La modélisation multicritère se réalise en trois étapes : 1) la définition de l'ensemble admissible des chaînes d'épuration améliorées, 2) la définition de l'ensemble de critères d'évaluation de celles-ci et 3) l'agrégation des performances de chaque chaîne en regard de chaque critère et leur classification en regard de leur performance globale.

2.1.1 Définition de l'ensemble admissible

L'ensemble admissible est composé de six chaînes d'épuration des eaux usées municipales auxquelles sont intégrées diverses MEEE (voir tableau 1). Les MEEE considérées ont été choisies à l'aide d'une analyse conjonctive réalisée sur les mêmes six stations d'épuration des eaux usées sur la base de critères d'acceptabilité et de conditions limites d'acceptabilité (KIBI *et al.*, 1997).

Tableau 1 : Description des chaînes épuratoires comprenant les MEEE choisies

Chaînes *	Étapes de traitement
1	Prétraitement (+MEEE1) ⇒ Traitement primaire ⇒ Traitement secondaire (Biofiltration aérobie avec déphosphatation + MEEE2) ⇒ Traitement tertiaire (désinfection aux U.V.)
2	Prétraitement (+MEEE3) ⇒ Traitement physico-chimique (+MEEE4 et MEEE5) ⇒ Traitement tertiaire (ozonation)
3	Prétraitement ⇒ Traitement primaire ⇒ Traitement secondaire (Réacteurs Biologiques Séquentiels avec déphosphatation +MEEE6 +MEEE7 +MEEE8) ⇒ Traitement tertiaire (désinfection aux U.V)
4	Prétraitement ⇒ Traitement secondaire (Boues activées conventionnelles +MEEE6+MEEE8 +MEEE9) ⇒ Traitement tertiaire (ozonation)
5	Prétraitement ⇒ Traitement secondaire (Boues activées à aération prolongée, avec déphosphatation + MEEE6 + MEEE8 + MEEE 9 + MEEE10) ⇒ Traitement tertiaire (ozonation)
6	Traitement secondaire (Étangs Aérés avec-aér. mécanique et déphosphatation+ MEEE6 + MEEE7)

* (1) Biofiltration; (2) Physico-chimique; (3) Réacteurs Biologiques Séquentiels (R.B.S), (4) Boues activées conventionnelles; (5) Boues activées à aération prolongée; (6) Étangs aérés.

* (1) Biofiltering system; (2) Physico-chemical; (3) Sequencing biological (batch) reactors; (4) Activated sludge system; (5) Activated sludge-extended aeration; (6) Aerated Lagoons.

MEEE1 : Installation des pompes à chaleur pour la récupération calorifique au pompage

Heat recovery using heat pumps

MEEE2 : Installation d'un turbidimètre pour contrôler le lavage des filtres dans les biofiltres

MEEE3 : Correction de la puissance des pompes en opération
Operating pumps power correction

MEEE4 : Installation des échangeurs de chaleur dans le systèmes de pompage
Heat interchange using within the pumping system

MEEE5 : Minimisation du pompage des boues primaires
Primary sludge pumping minimization

MEEE6 : Installation de diffuseurs à fines bulles
Fine bubbles diffusers installation

MEEE7 : Installation d'un système périodique de nettoyage des diffuseurs à fines bulles

Fine bubbles diffusers periodical cleaning system using

MEEE8 : Installation de moniteurs pour le contrôle de l'O.D. dans le système d'aération

Dissolved Oxygen (D.O) Monitors control within aeration system

MEEE9 : Utilisation d'un système d'ajustement automatique de débit d'air
Air flow automatic ajustement system using

MEEE10 : Installation de soufflante automatique de type centrifuge
Automatic centrifugal blower using

2.1.2 Définition de critères de décision

Quatorze critères de décision (*les critères de performance*) sont retenus au niveau de cette analyse multicritère. Ils sont divisés en cinq catégories : les critères 1) techniques, 2) énergétiques, 3) économiques, 4) environnementaux et 5) ceux ayant trait aux ressources humaines (Tableau 2).

2.1.3 Classification des chaînes d'épuration

La classification des chaînes d'épuration, de la meilleure à la moins bonne, comporte deux étapes principales : 1) l'agrégation des performances et 2) et le classement des chaînes d'épuration en regard des préférences multicritères.

1. *L'agrégation des performances*

L'agrégation des performances est réalisée sur la base d'une procédure d'agrégation multicritère basée sur la construction des relations de surclassement valuées et sur l'exploitation de celles-ci. Les calculs se font à l'aide de la matrice multicritère présentée au Tableau 3. La première partie de ce tableau contient les six actions (**les six chaînes d'épuration + les MEEE**), les quatorze critères de décision, les différentes performances (cardinales, ordinales, à intervalles et distributionnelles) de chaque chaîne épuratoire par rapport à chaque critère et le sens de chaque critère (i.e. la maximisation ou la minimisation). Les performances manquantes d'une chaîne épuratoire sont considérées comme sans effet sur le processus d'analyse. La deuxième partie contient le poids des critères dans la décision, les seuils d'indifférence, ainsi que les seuils de préférence et de veto.

Tableau II : Les critères de décision utilisés au niveau de l'analyse multicritère

Table II : Decision criteria using in the multicriteria analysis.

Critères	Nature du critère	Caractéristiques du critère
Cr. 1	Coût net ¹ d'implantation des MEEE (à minimiser)	Coût d'acquisition d'équipements & coût d'installation <u>moins</u> le montant de la subvention (le cas échéant). Il s'exprime en \$/1000 m ³ d'eau traitée sur une base annuelle. Trois valeurs sont présentées suivant les trois hypothèses
Cr. 2	Coûts d'exploitation et de maintenance de la chaîne épuratoire (à minimiser)	Coût d'opération modifié (moins le coût d'électricité lié à l'épuration des eaux usées). Il s'exprime en \$/1000 m ³ /année d'eau traitée.
Cr. 3	Consommation énergétique hydraulique (à minimiser)	Quantité d'électricité consommée en fonction de la quantité d'eaux usées traitées, en tenant compte du pourcentage (%) théorique d'économie d'énergie. Il s'exprime en kWh/1000 m ³ d'eaux épurées. Trois valeurs sont présentées suivant trois pourcentages d'économie d'énergie variant de 10 à 35% suivant le cas.
Cr. 4	Consommation énergétique épuratoire (à minimiser)	Quantité d'électricité consommée en fonction de la quantité de DBO ₅ enlevée, en tenant compte du % théorique d'économie d'énergie. Il est exprimé en kWh/kg de DBO ₅ enlevés. Trois valeurs sont présentées suivant trois pourcentages d'économie d'énergie théorique.
Cr. 5	Efficacité épuratoire mesurée par rapport à la DBO ₅ (à maximiser)	Pourcentage annuel de la DBO ₅ enlevée dans la chaîne épuratoire.
Cr. 6	Efficacité épuratoire mesurée par rapport aux M.E.S. (maximiser)	Pourcentage annuel des M.E.S. enlevées dans la chaîne épuratoire.
Cr. 7	Efficacité épuratoire en P _t (à maximiser)	Pourcentage annuel du P _t enlevé dans la chaîne épuratoire.
Cr. 8	Facteur de pointe de la puissance appelée (à maximiser)	Facteur de pointe de la puissance appelée liée aux opérations de la chaîne épuratoire à la suite de l'implantation des mesures. Trois valeurs sont présentées suivant trois pourcentages de réduction d'appel de puissance théorique.
Cr. 9	Facilités ergonomiques de la chaîne épuratoire (à maximiser)	Facilités ergonomiques de la chaîne épuratoire du point de vue de la santé et de la sécurité au travail. C'est un critère ordinal.
Cr. 10	Niveau d'automatisation et opérationnel de la chaîne épuratoire (à maximiser)	Niveau d'automatisation des installations et facilités opérationnelles (maintenance d'équipements, suivi des opérations, accessibilité pour l'entretien, etc.). C'est un critère ordinal.
Cr. 11	Substitutionnalité de la chaîne épuratoire (à maximiser)	Facilités à la substitution technologique de la chaîne d'épuration des eaux usées. C'est un critère ordinal.
Cr. 12	Contribution au développement durable (à maximiser)	Contribution du système d'épuration des eaux usées au développement durable. C'est un critère ordinal.
Cr. 13	Ratio Coût/Habitant (à minimiser)	Montant du coût d'opération supporté par chaque résident. Il s'exprime en \$/habitant de la ville.
Cr. 14	Ratio électricité consommée par le procédé/Consommation électrique totale (à minimiser).	Ratio électricité consommée par le procédé/consommation électrique totale de la station d'épuration des eaux usées.

1. Il tient compte implicitement du temps de retour sur l'investissement et de la politique de financement en considérant les trois hypothèses suivantes : 1) les nouvelles installations sont totalement subventionnées, 2) le temps de retour sur l'investissement est supérieur à 4 ans, alors les installations sont subventionnées à 50 %, 3) le temps de retour sur l'investissement est inférieur à 4 ans et que l'investissement total est inférieur à 100 000 \$, alors les nouvelles installations peuvent totalement être financées par la municipalité. Les installations sont aussi financées à 100 % par la municipalité en cas d'une nécessité de fonctionnement.

Ce tableau montre d'une part, l'hétérogénéité des échelles de mesure associées aux critères² et, d'autre part, le caractère conflictuel des critères, rendant ainsi difficile le choix d'une solution. Par exemple, pour le premier critère, le coût net d'implantation des MEEE, s'exprime en \$/1000 m³ d'eau traitée, alors que le troisième critère mesure la consommation énergétique hydraulique exprimée en kWh/m³ d'eau traitée et que le huitième critère est en valeur absolue. En ce qui concerne le caractère conflictuel, la chaîne 1, par exemple, est meilleure que la chaîne 2 suivant le critère 1, ainsi, même en investissant moins d'argent dans l'implantation des MEEE, la chaîne 1 a toutefois une consommation énergétique hydraulique meilleure que la chaîne 2. Par contre la chaîne 2 est meilleure que la chaîne 1 en tenant compte du critère 4, soit la consommation énergétique épuratoire. On se retrouve aussi avec des critères donnant lieu à des évaluations cardinales et ordinales, à des évaluations avec intervalle (critères 10 et 11) et d'autres (critères 1 et 3) à évaluation distributionnelle donnant lieu à trois évaluations suivant les trois hypothèses considérées. Une procédure d'agrégation multicritère a été spécialement conçue pour résoudre ce type de problème.

Formellement, le problème consiste à modéliser les préférences du (des) décideur(s) à l'intérieur du modèle de type A.F.E. [Actions, Attributs (critères), Évaluations], tel que :

$$A = \{a_1, \dots, a_i, \dots, a_m\}$$

a_i , étant une chaîne d'épuration des eaux usées modifiée par l'ajout des MEEE;

$F = \{g_1, \dots, g_k, \dots, g_n\}$; avec g_k correspondant au $j^{\text{ème}}$ critère d'évaluation, une famille (cohérente) des critères.

Pour chaque action $a_i \in A$, on associe une quantité $g_k(a_i)$ indiquant la performance de l'évaluation (quantitative ou qualitative) de celle-ci par rapport au critère k . On obtient ainsi une matrice « $E = [g_k(a_i)]$ » contenant les performances de chacune des actions à l'égard de chaque critère.

² Tous les critères ordinaux sont mesurés sur une échelle ordinale allant de 1 à 7 :

Médiocre (1)	Faible (2)	Passable (3)	Moyen (4)	Bon (5)	Très bon (6)	Excellent (7)
--------------	------------	--------------	-----------	---------	--------------	---------------

Dans le processus de modélisation, dans le cas d'un vrai critère, par exemple, l'action « a_i » est au moins aussi bonne que l'action « a_j » $\Leftrightarrow g_k(a_i) \geq g_k(a_j)$; $g_k(a_i)$ et $g_k(a_j)$, étant respectivement les performances des actions a_i et a_j par rapport au critère k .

Tableau III : Tableau multicritère
Table III : Multicriteria table.

Critères	Chaîne 1	Chaîne 2	Chaîne 3	Chaîne 4	Chaîne 5	Chaîne 6	Poids de critères	Seuil d'indiff.	Seuil de préfér.	Seuil de veto
Cr.1	2.4\$ 0\$	6.4\$ 0\$ 12.8\$	59\$ 0\$ 118\$	35\$ 0\$ 70\$	60.5\$ 0\$ 121\$	55\$ 0\$ 111\$	0.083	2	10	125
Cr.2	35.3\$	43.8\$	40.9\$	34.2\$	91.5\$	25.8\$	0.081	5	9	68
Cr.3	64.6 60.8 68.4	29.7 28.1 31.4	69.6 60.9 74	68.3 59.7 72.5	83.7 95.7 101.7	120 107.3 127	0.12	2	10	105
Cr.4	1.35	0.82	0.81	1.1	1.25	1.95	0.13	0.1	0.2	1.3
Cr.5	88%	Nil	87%	79%	94%	82%	0.082	3	6	35
Cr.6	87%	62%	90%	78%	95%	85%	0.081	3	6	35
Cr.7	62%	63%	88%	65%	87%	81%	0.082	2	8	30
Cr.8	1.5 1.6 1.8 1.4 1.5	1.7	1.44 1.15 2.1	1.41 1.13 2.0	1.38 1.1 1.9	1.7 1.1 3.8	0.10	0.1	0.5	3.5
Cr.9	Élevée	Bonne à Élevée	Bonne	Bonne	Bonne	Nil	0.031	Nil	Nil	Nil
Cr.10	Bon à élevé	Bon à élevé	Bon à élevé	Moyen à bon	Bon à élevé	Nil	0.028	Nil	Nil	Nil
Cr.11	Moy. forte à forte	Moy. forte à forte	Moyen à forte	Moyen à moy. forte	Moy. à forte	Moyen à moy. forte	0.027	Nil	Nil	Nil
Cr.12	Moy. forte	Moy. faible	Moy. forte	Moyen	Forte	Moy. forte	0.059	Nil	Nil	Nil
Cr.13	13.6\$/pers.	14.28\$/pers.	28.52\$/pers.	12.47\$/pers.	35.8\$/pers.	8.2\$/pers.	0.025	5	10	30
Cr.14	48%	11%	43%	40%	45%	47%	0.071	3	5	40

Cr.1: \$/1000 m³ d'eau traitée (à minimiser)
 Cr.2: \$/1000 m³ d'eau traitée (à minimiser)
 Cr.3: kWh/m³ (à minimiser)
 Cr.4: kWh/kg DBO₅ enlevée (à minimiser)
 Cr.5: (%) (à maximiser)
 Cr.6: (%) (à maximiser)
 Cr.7: (%) (à maximiser.)

Cr.8: Valeur absolue (à maximiser)
 Cr.9: En échelle ordinale (à maximiser)
 Cr.10: En échelle ordinale (à maximiser)
 Cr.11: En échelle ordinale (à maximiser)
 Cr.12: En échelle ordinale (à maximiser)
 Cr.13: Ratio (à minimiser)
 Cr.14: Ratio (à minimiser)

Il s'agit alors de modéliser les préférences du décideur, afin de pouvoir prendre une décision entre les actions « a_i » et « a_j », d'abord localement (au niveau de chaque critère), et ensuite globalement (pour l'ensemble des critères) à l'aide d'une méthode d'agrégation multicritère. La procédure d'agrégation multicritère est réalisée à l'aide d'un modèle mathématique. Les étapes de ce modèle sont élaborées sur la base des méthodes ELECTRE III (Roy, 1978) et PROMETHEE II (Brans *et al.*, 1984), ainsi que des travaux de Dérot *et al.* (1994).

Les principales étapes du modèle sont la construction des relations de surclassement valuées et l'exploitation de ces relations de surclassement.

(a) Construction des relations de surclassement valuées

Pour chaque couple d'actions (a_i, a_j), un indice global de concordance est calculé de la manière suivante :

$$C(a_i, a_j) = \sum_{k=1}^n w_k \delta_k(a_i, a_j) \quad (1)$$

où

w_k est le poids associé au critère k et $\sum_k w_k = 1$

$$\delta_k(a_i, b_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } -q_k \leq \Delta_k \\ \frac{\Delta_k + p_k}{p_k - q_k} & \text{si } -p_k < \Delta_k < -q_k \\ 0 & \text{si } \Delta_k \leq -p_k \end{cases}$$

et $\Delta_k = g_k(a_i) - g_k(a_j); g_k(a_i) \in M_{[m \times n]}; k = 1, \dots, n; i = 1, \dots, m$

Pour chaque couple d'actions (a_i, a_j), et au niveau de chaque critère, un indice de discordance est calculé de la manière suivante;

$$D_k(a_i, b_j) = \begin{cases} 0 & \text{si } -p_k \leq \Delta_k \\ \frac{\Delta_k + p_k}{v_k - p_k} & \text{si } -v_k < \Delta_k < -p_k \\ 1 & \text{si } \Delta_k < -v_k \end{cases} \quad (2)$$

On prendra $D_k(a_i, a_j) = 0$ pour chaque paire d'actions lorsqu'il s'agit d'un « critère ordinal ».

Dans la modélisation, les évaluations manquantes sont prises dans le sens d'évaluations non pertinentes, ceci affectant ni positivement, ni négativement, une

action. Dans ce sens, par exemple, si l'évaluation $g_k(a_i)$ est manquante, alors $\Delta_k(a_i, a) = \Delta_k(a, a_i) = 0$ pour toute $a \in A$, ce qui implique :

$$\delta_k(a_i, a) = \delta_k(a, a_i) = 1 \text{ et } D_k(a_i, a) = D_k(a, a_i) = 0 \quad (3)$$

À partir de l'indice de concordance et des indices de discordance, on établit des degrés de surclassement $\sigma(a_i, a_j)$ entre chaque couple d'actions. Ces degrés de surclassement sont calculés comme suit (voir Rousseau et Martel, 1994) :

$$\sigma(a_i, a_j) = c(a_i, a_j) \cdot \prod_{k=1}^n [1 - (D_k(a_i, a_j))^3], \quad (4)$$

ceci conduisant à prendre en considération la discordance entre les évaluations, quelqu'en soit sa valeur.

(b) Exploitation des relations de surclassement

L'exploitation des relations de surclassement consiste à faire la synthèse permettant de prendre une décision sur l'ensemble des évaluations. Pour avoir un classement des actions de la meilleure à la moins bonne, on exploite la notion des flux sortant et entrant de PROMETHEE (Brans *et al.*, 1984) de la manière suivante :

$$\sigma^{(+)}(a_i) = \sum_{a \in A} \sigma(a_i, a) \text{ et } \sigma^{(-)}(a_i) = \sum_{a \in A} \sigma(a, a_i) \quad (5)$$

De cette manière, on obtient un préordre total des actions à partir du bilan de flux comme dans PROMETHEE II :

$$\sigma(a_i) = \sigma^{+}(a_i) - \sigma^{-}(a_i) \quad (6)$$

(c) Les étapes d'application de la procédure

Les principaux paramètres du modèle utilisés dans le processus de modélisation sont : (1) les poids de critères, (2) les seuils d'indifférence, (3) les seuils de préférence et (4) les seuils de veto. Les poids des critères donnent l'importance relative accordée à chaque critère; le seuil d'indifférence donne le niveau où le décideur est indifférent entre les performances (pour un critère donné) de deux actions qu'il compare. Le seuil de préférence donne le niveau auquel la préférence pour une action donnée, en comparaison avec une autre, devient stricte. Le seuil de veto donne le niveau qui, une fois atteint, fait en sorte qu'une action (toujours en comparaison avec une autre) ne peut être jugée meilleure qu'une autre, peu importe ses performances au niveau des autres critères. C'est donc un niveau de discrimination important dans le processus de modélisation.

Les poids des critères ont été déterminés à l'aide de la méthode de *Ranking*, suivie de la méthode *Rating*. Plus spécifiquement, la procédure utilisée est la suivante :

1. ranger les différents critères par ordre d'importance : cette étape vise à donner une allure générale du classement de critères selon les intervenants dans le processus décisionnel³;
2. Évaluer les différents critères sur une échelle de valeurs; il s'agit ici d'attribuer une cote d'importance relative à chaque critère⁴.

Les seuils d'indifférence, de préférence et de veto ont été déterminés en collaboration avec les 11 intervenants. Les poids de critères, les seuils d'indifférence, de préférence et de veto déterminés dans le cadre de cette étude sont contenus dans la partie de droite du tableau multicritère (voir tableau 3).

2. Le classement de différentes chaînes d'épuration

Le classement de différentes chaînes épuratoires est réalisé à l'aide de ce modèle mathématique. Pour ce faire, les données sont traitées par un solveur, programmé en C++, et utilisant le compilateur Microsoft Visual C++ 1.0®, ainsi que les classes Microsoft Foundation Classes® de l'environnement Windows.

Dans le traitement des données, le solveur actionne tous les éléments de la matrice multicritère et exécute les opérations mathématiques suivant l'ordre d'application du modèle multicritère. Le résultat obtenu est un classement des six chaînes d'épuration considérées de la meilleure à la moins bonne.

3. Dans le cadre de cette étude, onze intervenants avaient participé à l'élaboration de ces critères. Il s'agit de représentants de 6 municipalités, d'Hydro-Québec, du Ministère des Affaires Municipales, du Ministère de l'Environnement et de la Faune, des firmes de Génie-conseil, GEST-EAU, GENIVAR et ROCHE (voir KIBI, 1996).

4. Les différents intervenants, jouant ici le rôle de décideurs, ont attribué une cote allant de 1 à 10 à chacun des critères, 10 indique que le critère est très important et 1 indique que le critère est très peu important selon leur perception. Le poids de différents critères sont obtenus en faisant une moyenne normalisée de l'ensemble des données obtenues.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Les résultats obtenus

Le tableau 4 présente le rangement multicritère obtenu. La chaîne 3 se classe au premier rang. De manière générale, cette chaîne a de bonnes performances en regard de l'ensemble des critères. Le coût net d'implantation, les coûts d'exploitation et de maintenance, par exemple, ainsi que la consommation énergétique hydraulique sont comparables à quatre des autres chaînes d'épuration. Par contre elle a des performances supérieures aux autres chaînes sur les plans de la consommation énergétique épuratoire et de l'efficacité épuratoire mesurée par rapport aux matières en suspension (M.E.S.) et au phosphore total (Pt). La chaîne 1 occupe le deuxième rang. L'ensemble de ses performances sont comparables à celles de la chaîne 3, à l'exception des coûts d'exploitation et de maintenance et de l'efficacité épuratoire mesurée par rapport au Pt. Le troisième rang est occupé par la chaîne 4. Cette dernière montre de bonnes performances à l'égard de quelques critères, s'approchant ainsi de celles des deux premières chaînes. Par contre elle est un peu désavantagée dans l'ensemble à l'égard des critères environnementaux comme l'efficacité épuratoire mesurée par rapport à la DBO₅, aux M.E.S et au Pt.

Les trois derniers rangs sont occupés respectivement par les chaînes 6, 5 et 2. Pour la chaîne 6, on observe deux performances manquantes résultant d'un manque d'information sur deux critères. La chaîne 5 présente de très bonnes performances sur les critères environnementaux avec comme rendement épuratoire 95 % et 94 % pour les M.E.S et la DBO₅ respectivement. Par contre elle est désavantagée par rapport aux autres chaînes en ce qui a trait au coût net d'investissement alors qu'elle est fortement désavantagée du point de vue des coûts d'exploitation et de maintenance. Ce dernier facteur, dans le cas de cette chaîne, est au moins le double des coûts d'exploitation et de maintenance des autres chaînes d'épuration.

Tableau IV: Rangement multicritère de différentes chaînes d'épuration
Table IV : Multicriteria ranking of wastewater treatment chains.

Chaîne	Rangement					
	Rang 1	Rang 2	Rang 3	Rang 4	Rang 5	Rang 6
Chaîne 1		②				
Chaîne 2						⑥
Chaîne 3	①					
Chaîne 4			③			
Chaîne 5					⑤	
Chaîne 6				④		

Pour vérifier comment le classement obtenu peut être affecté par les variable de performance, une analyse de sensibilité est réalisée en majorant toutes les données de 5 %, ceci sans changer le poids de critères. L'analyse montre que les performances des chaînes d'épuration par rapport aux critères 5, 8 et 12 sont sensibles à cette modification, même si le classement des chaînes demeure inchangé.

La deuxième analyse de sensibilité a porté sur la majoration de 10 % des données du tableau multicritère, en conservant le même poids pour l'ensemble des critères. Dans ce cas, le rangement des chaînes est affecté par cette modification. Dans ce classement, les deux premières positions demeurent inchangées, alors qu'il est plus difficile de discriminer les chaînes occupant les quatre dernières positions : en effet, les rangs 3 et 4 sont occupés par les chaînes 4 et 6 en même temps, alors que les rangs 5 et 6 sont occupés par les chaînes 2 et 6.

3.2 Discussion

Les six chaînes d'épuration analysées ici utilisent les principales technologies d'assainissement en opération au Québec. Leurs caractéristiques sont considérées comme représentatives de leur classe de capacité hydraulique de traitement qui varie entre 8,000 m³/d et 30,000 m³/d. Les caractéristiques de ces chaînes d'épuration sont représentatives d'un sous-ensemble important du parc québécois des ouvrages d'assainissement des eaux usées municipales. En effet, considérant que, pour l'ensemble de ce parc, 30.3 % du débit (33.7 % de la population) est traité par les chaînes d'épuration de capacité comprise entre 5,000 et 100,000 m³/d, la fourchette de débits hydrauliques choisie fait partie de cette catégorie représentative des stations du Québec. Cet ensemble exclut les trois grandes stations (Communauté Urbaine de Montréal, Communauté Urbaine de Québec et Communauté Urbaine de l'Outaouais), qui traitent, à elles seules, plus de 63.1 % du débit (56.5 % de la population).

Le rangement des chaînes d'épuration améliorées obtenu à l'aide de l'analyse multicritère permet de discriminer assez bien leur performance globale, tout en mettant en évidence le poids de leur efficacité énergétique, puisque les critères énergétiques ont en moyenne une pondération 28 % supérieure aux autres critères d'évaluation.

Les trois premières chaînes d'épuration améliorées sont les plus performantes globalement. Cela signifie que, dans le cadre des investissements conduisant à l'expansion du parc, et pour la construction de stations ayant un débit hydraulique contenu à l'intérieur de la fourchette considérée, ces trois chaînes d'épuration devraient être considérées préférentiellement aux autres chaînes lorsqu'il s'agira de mettre l'accent sur leur efficacité énergétique.

D'autres analyses seront nécessaires cependant, dans le cas de la construction d'une nouvelle station d'épuration traitant un débit hydraulique dépassant le niveau considéré dans le cadre de cette étude.

CONCLUSION

Cet article propose une solution au problème du choix de technologies efficaces sur le plan énergétique et globalement performantes au plan des préférences des gestionnaires, problème qui se pose dans le cadre de l'expansion du parc des ouvrages d'assainissement des eaux usées municipales du Québec. La solution proposée est un rangement multicritère de chaînes d'épuration utilisées présentement au Québec, mais améliorées par l'intégration de mesures d'efficacité énergétique électrique considérées sur la base de la performance globale, en mettant un accent particulier sur le niveau de la demande et de la consommation d'électricité.

Dans le rangement multicritère de différentes chaînes épuratoires améliorées par l'intégration des MEEE, les trois premières positions sont occupées respectivement par les chaînes de types : 1) réacteurs biologiques séquentiels (R.B.S.), 2) biofiltration et 3) boues activées avec déphosphatation. Les autres positions sont occupées par les traitements de types : 4) Étangs aérés, 5) Boues Activées avec aération prolongée et 6) la chaîne épuratoire de type Physico-chimique.

Dans le choix des chaînes d'épuration devant s'intégrer aux nouvelles stations à construire, les trois premières technologies peuvent être considérées comme préférables aux autres, notamment lorsque l'on vise à augmenter l'utilité de l'électricité dans les systèmes d'épuration des eaux usées municipales.

Dans l'ensemble, le modèle multicritère d'aide à la décision a permis d'identifier une solution de compromis entre les évaluations de nature différente et conflictuelle. Ceci montre bien que ce type d'analyse est approprié pour solutionner la question de la multidimensionalité du problème.

Le fait d'avoir impliqué, dans la présente analyse multicritère, les divers intervenants dans la gestion des stations municipales, confère aux résultats obtenus un bon niveau de crédibilité et d'applicabilité.

REMERCIEMENTS

Les auteurs adressent leurs remerciements au Service de programmes - Marché industriel d'Hydro-Québec pour leur participation financière, et aux municipalités de Châteauguay, de Laval, de Thetford Mines, de Saint Georges, de Victoriaville et de Varennes, faisant partie du parc actuel des ouvrages d'assainissement des eaux usées du Québec pour leur participation à la réalisation de l'étude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDERSON, L.G.(1980). *Energy savings at wastewater treatment plants. Commission of European Communities-Energy, rapport EUR 6680 EN.*
- BROCKTON, C.N.(1987). *Energy Management considerations and their application. The J. Inst. of Water and Environ. Manag., 1(1) : 111-116.*
- BRANS, J.P., MARESCHAL, B. et VINCKE, PH. (1984). PROMETHEE : *A new family of outranking multiple criteria. Cahier du LAMSADE, no. 88, Université de Paris Dauphine, Paris, France.*
- DEROT B., GAREAU J., KISS, L.N et MARTEL, J.M. (1994). Le solveur du tableau multicritère VOLVOX. Document de travail 94-11, Direction de la recherche, Faculté des Sciences de l'administration, Université Laval, Québec, Canada.
- ECKENFELDER, W. (1982). *Gestion des eaux usées urbaines et industrielles. Caractérisation - Techniques d'épuration - Aspects économiques. L. Vandevenne, (trad.) xiv, 503 p., Paris : Lavoisier.*
- ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (1993). *Energy efficiency in wastewater treatment. TechCommentary, 1(2) : 1-6.*
- FOSBERG, T.M. et MUKHOPADHYAY, J. (1981). *Selecting Energy-Efficient Wastewater Treatment systems, C.E.P.*
- HANSON, M. (1991). *Electric Utility Least-cost Planning Within a Multiattribute Decision-making Framework. J. of the Amer. Planning Association, 4(3) : 12-17.*
- HOLDREN, J.-P. (1987). *Global Environmental Issues related to Energy supply : the Environment case for increased efficiency of energy uses. Energy, 12(10111), 975-992.*
- HYDRO-QUÉBEC (1993). *Programmes d'efficacité énergétique d'Hydro-Québec.*

- KEENEY, R.L. et NAIR, K.(1977). Selecting nuclear power plant sites in the Pacific Northwest using decision analysis. Dans *Conflicting objectives in decisions*, Bell, Keeney and Raiffa (eds.), New York.
- KIBI, N. (1996). Élaboration d'un mécanisme d'aide à la décision destiné à la gestion de des électrotechnologies et des MEEE dans le traitement des eaux municipales : une modélisation multicritère. Rapp. scient. présenté à Hydro-Québec, INRS-Eau.
- KIBI, N., SASSEVILLE, J.L., BLAIS, J.F., MARTEL, J.M. et COUILLARD, D. (1997). Modélisation multicritère pour l'amélioration de l'efficacité énergétique électrique dans les stations d'épuration des eaux usées municipales. Document de travail, 97- Direction de la recherche, Faculté des Sciences de l'Administration, Université Laval, Québec, Canada.
- KLEMETSON, S.L. et GRENNEY, W.V. (1976). Physical and Economic parameters for Planning Regional Wastewater Treatment systems, *J. Water Pollut. Control Fed.*, 48(12) : 2690-2699.
- LESSARD, M.P. (1989). Simulation dynamique d'une usine de traitement des eaux usées : Evaluation d'un modèle. Symposium International sur le traitement des eaux usées, 20-21 novembre 1989, Montréal, Québec.
- MACRAE, K.M. (1989). Critical Issues in Electric Power Planning in the 1990s, Calgary. Canadian Energy Research Institute.
- METCALF et EDDY, INC. (1992). Water and Wastewater industries : characteristics and DSM opportunities. Electric Power Research Institute, rapport TR-102015.
- ONTARIO - HYDRO (1993). 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.
- PINEAU, M., CÔTÉ, P. et VILLENEUVE, J.P. (1985). Estimating of Wastewater Treatment costs : Evaluation of the CAPDET Model for Canadian Conditions. *Can. J. Civ. Eng.* 12 : 483-493.
- REID, CROWTHER et PARTNERS, LTD (1978). Conservation Measures in Waste Water Treatment Plants : A Feasibility Study. Ministry of Energy : Ontario Ministry of the Environment, 70 pages, Toronto (Ontario).

- ROUSSEAU, A. et MARTEL, J.M. (1994). Environmental Evaluation of an Electric Transmission Line Project. A MCDA Method. Dans *Work Applying Multicriteria Decision Aid for Environmental Management*, M. Paruccini (Ed), Kluwer Academic Publishers.
- ROY, B. (1978). ELECTRE III : un algorithme de classements fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples. *Cahier du CERO*, 1 : 3-24.
- ROY, B. et VINCKE, PH. (1981). Multicriteria analysis survey and new directions. *Eur. J. Operational Res.* 8 : 207-218.
- SASSEVILLE, J.L., BLAIS, J.F., BOURGAULT, D., LAREAU J., LEBECIR, R., MAMOUNY, K., KIBI, N. SOCHANSKI, W., DESROSIERS J., COUILLARD, D. et VILLENEUVE, J.P. (1994). Les mesures d'efficacité énergétique électrique dans l'industrie de l'eau. Projet mandaté par Hydro-Québec, J.L. Sasseville et J.F. Blais (éditeurs), avril, rapport scientifique No. 405, INRS-Eau, Un. du Québec.
- SIMOS, J. (1990). Évaluer l'impact sur l'environnement, une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation. Presses polytechniques romandes, Lausanne, 261 p.
- TEGHEM, J. et KUNSCH, P.(1985). Multiobjective decision making under uncertainty : an example for power systems. Dans *Decision making with multiple objective*, Haines and Chankong (Eds.), Springer-Verlag, Berlin.
- TYTECA, D., SWEERS, Y. et NYNS, E.J. (1977). Mathematical Modeling and Economic Optimization of Wastewater Treatment Plants. *CRC Crit. Rev. Environ. Control.*, 8(1) : 89-108.
- WANG, M.H. et WANG, K. L. (1979). Mathematical Modeling of Electrical Energy consumption and heating requirements by Municipal Wastewater Treatment Plants. *J. environ. sc.*