Document généré le 8 mai 2024 08:13

Revue des sciences de l'eau
Journal of Water Science

Choix multicritère de procédés d'épuration des eaux usées municipales
Multicriteria choice of municipal wastewater treatment processes

N. Kibi, J. L. Sasseville, J. M. Martel et J. F. Blais

Volume 13, numéro 1, 2000

URI : https://id.erudit.org/iderudit/705378ar
DOI : https://doi.org/10.7202/705378ar

Aller au sommaire du numéro

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)
1718-8598 (numérique)

Découvrir la revue

Citer cet article

Kibi, N., Sasseville, J. L., Martel, J. M. & Blais, J. F. (2000). Choix multicritère de procédés d'épuration des eaux usées municipales. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, *13*(1), 21–38. https://doi.org/10.7202/705378ar

Résumé de l'article

Les stations d'épuration des eaux usées municipales du Québec, comme ailleurs au Canada et aux États Unis, sont en général peu efficaces sur le plan énergétique. Il est donc possible de concevoir des hypothèses de chaînes épuratoires améliorées au plan de leur efficacité énergétique et de leur performance globale en y introduisant, d'une part, diverses MEEE et, d'autre part, certains procédés unitaires améliorant l'épuration. Cependant, le problème de choisir, parmi ces hypothèses de chaînes d'épuration, celle correspondant au procédé le plus adéquat pour prendre en charge une situation donnée, demeure entier. Cet article analyse ce problème de choix pour les stations d'épuration de capacité comprise entre 5,000 m^3/d (≈ 5000 personnes) et 100,000 m^3/d (≈ 100,000 personnes). En faisant l'hypothèse, d'un côté, que l'ajout des mesures d'efficacité énergétique peut améliorer la consommation énergétique d'une chaîne d'épuration, et d'un autre côté, que l'insertion de segments de procédés peut contribuer à améliorer leur performance globale, nous avons élaboré, à partir des stations d'épuration de types Biofiltration, Physico-chimique, Réacteurs Biologiques séquentiels (deux variantes), Boues activées et Étangs aérés, six (6) hypothèses de chaînes épuratoires (chaînes 1 à 6) respectant les exigences opérationnelles et épuratoires et nous les avons comparées entre elles, sur la base d'une analyse multicritère d'aide à la décision, en vue d'en déterminer les plus performantes. Cette analyse multicritère intègre les aspects techniques, énergétiques, économiques, etc. et prend en compte les préférences du(des) décideur(s) dans le processus de choix. Les résultats obtenus montrent que, parmi les six hypothèses de chaînes étudiées, les trois premières positions sont occupées par les chaînes 3, 1 et 4 respectivement. Ce type d'analyse pourrait jouer un rôle complémentaire à une étude technico-économique visant le choix de technologies d'épuration.

Tous droits réservés © Revue des sciences de l'eau, 2000

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter en ligne.

https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/

Cet article est diffusé et préservé par Érudit.

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche.

https://www.erudit.org/fr/

Choix multicritère de procédés d'épuration des eaux usées municipales

Multicriteria choice of municipal wastewater treatment processes

N. KIBI [1 *], J.-L. SASSEVILLE [2], J.-M. MARTEL [3] et J.-F. BLAIS [4]

Reçu le 20 janvier 1997, accepté le 14 mars 1999**

SUMMARY

Quebec municipal wastewater treatment facilities, like those elsewhere in Canada and the United States, generally are low efficiency energy consumers (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI), 1993; OWEN, 1982; ONTARIO-HYDRO, 1993; METCALF and EDDY, INC., 1992; SASSEVILLE *et al.*, 1995). The work of METCALF and EDDY, INC. (1992) and of EPRI (1993) concluded that it would be possible to substantially reduce electricity demand and to improve the utilization of electrical energy in the municipal wastewater treatment processes by introducing Electricity Saving Measures (ESMs) in the processes and their management.

In the province of Quebec, given the potential savings linked to the reduction of electricity consumption in municipal wastewater treatment facilities, and the progressive expansion of the province's wastewater treatment facilities, the adoption of energetically efficient wastewater treatment technologies is particularly timely. SASSEVILLE *et al.* (1995) estimated that it would be possible to save 5 M $ at the present level of wastewater treatment, based on a cost of about 24 M $ for the 400 GWh of electricity annually consumed in the municipal wastewater treatment facilities. This saving would come solely from the implementation of appropriate energy-saving measures.

In hypothesizing on one hand that adding energy-saving measures can improve the energy consumption of a wastewater treatment chain, and on the

1. Chargé de projet à l'Industrielle de l'environnement, INRS-Eau, Université du Québec, 2800, rue Einstein, suite 105, C.P. 7 500, Sainte-Foy, Québec, G1X 4N8, Canada.
2. Professeur titulaire, INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec, Canada.
3. Professeur titulaire, Département Opérations et Systèmes de Décisions, Faculté des sciences de l'administration, Université Laval, Québec, G1K 7P4, Canada.
4. Professeur sous octroi, INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec, Canada.

* Correspondance. E-mail : indusenv@inrs-eau.uquebec.ca

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 15 février 2001.

other hand that the introduction of segments of processes can contribute in improving overall performance, we have elaborated from existing wastewater treatment facilities six hypotheses of liquid treatment chains that respect operational and regulation requirements, on the basis of the experience developed in the operation of municipal wastewater treatment facilities. The six hypothetical treatment chains were elaborated from facilities of the following types : biofiltration (chain 1), physico-chemical (chain 2), sequencing biological (batch) reactors system A (chain 3), sequencing biological (batch) reactors system B (chain 4), activated sludge (chain 5) and aerated lagoons (chain 6). The energy-saving measures utilized in the elaboration of these hypothetical treatment chains were chosen on the basis of a conjunctive analysis (KIBI *et al.*, 1997). However, the problem of choosing among these treatment chains the one corresponding to the most adequate process for a particular situation is still present. The present article analyzes this choice for wastewater treatment facilities of a capacity between 5,000 m^3/d ($\approx$ 5,000 persons) and 100,000 m^3/d ($\approx$100,000 persons).

How then to choose the most efficient of these hypothetical municipal wastewater treatment chains ?

Generally, the choice of the treatment technologies is done on the basis of single-criterion mathematical models: for example, the reduction of construction costs, or of exploitation and maintenance costs (ECKENFELDER, 1982; PINEAU *et al.*, 1985; WANG and WANG, 1979; TYTECA *et al.*, 1977). There are other approaches based on dynamic simulation models or on technological and econometric analyses (HYDRO-QUÉBEC, 1993; MACRAE, 1989; LESSARD, 1989; BROCKTON, 1987; HOLDREN, 1987; FOSBERG and MUKHOPADHYAY, 1981; REID, CROWTHER and PARTNERS, 1978; KLEMETSON and GRENNEY, 1976).

These different approaches are often insufficient to distinguish the real value of the different technological options. Furthermore, they do not take into account many important factors (technological, economic, financial and environmental, ergonomic and socio-political) that affect their implementation and should be considered in identifying an acceptable and viable solution.

The multicriteria approach of decision-making advocated in this article can mitigate this difficulty. It will take into account key factors in the conception and operation of treatment technologies, especially energy and environmental factors, likely to give rise to efficient treatment facilities from both an energy and a treatment point of view. However the analysis of decisional factors to consider in this multicriteria analysis gives rise to a particular problem. They affect the decision that can be appreciated by deterministic relationships, offering a high level of certainty as to its evaluation, while others have a non-deterministic nature (uncertainty and imprecision). Research using the multicriteria analysis approach has been performed in similar situations over the last twenty years, in some cases applied to the environmental and energy sectors (e.g. KEENEY and NAIR, 1977; ROY and VINCKE, 1981; TEGHEM and KUNSCH, 1985; SIMOS, 1990; HANSON, 1991; ROUSSEAU and MARTEL, 1994). Here again, these approaches have limits since the cases were treated either in a situation of certainty or a situation of uncertainty and imprecision. The proposed model deals with the case of certainty and uncertainty at the same time, therefore improving the applicability of the multicriteria approach in the situation under study.

The solution retained consists of applying this type of modelling in order to classify from the best to the worst, the six hypothetical treatment chains. This approach utilizes in the modelling process, fourteen evaluation criteria, various criteria weights, quantitative and qualitative evaluations, as well as the indifference, preference and veto thresholds. The main steps of the model are the construction of evaluated outclass relationships and the exploitation of these outclass relationships. The multicriteria aggregation procedure utilizes an elaborated mathematical model based upon the methods of ELECTRE III

(ROY, 1978) and PROMETHEE II (BRANS *et al.*, 1984), as well as the works of DÉROT *et al.* (1994).

The ranking of these treatment chain hypotheses, elaborated on an empirical level in consultation with the operators and others involved in wastewater treatment and obtained on the basis of this procedure, can discriminate among their overall performance characteristics rather well. It also emphasizes their energy efficiency, since the energy criteria have on average in the analysis a weight that is 28% higher than the other evaluation criteria. The results obtained show that the hypothetical chain 3 is ranked first, chain 1 occupies the second rank, whereas chain 4 is in the third rank. The last three ranks are occupied respectively by chains 6, 5 and 2.

In a decisional and strategic approach, the first three treatment chain hypotheses can be considered overall as being the highest achievers. This result signifies that in the scope of investments related to the expansion of treatment facilities and the construction of facilities with a flow rate contained within the considered range, these three treatment chains (when considering different modification hypotheses), should be preferred over the other chains when the emphasis is on their overall performance including energy efficiency. However, other analyses would be necessary in the case of the construction of a new wastewater treatment facility with a flow rate above the level considered in this study.

Generally, the results of this analysis can assist in discriminating among the behaviors of the technologies considered, and in judging their relative performance in the investments of the construction of new wastewater treatment facilities, in addition to a technico-economic analysis. Overall, the multicriteria model described in this study identified a compromise solution between evaluations of a different and conflicting nature. This result demonstrates that this type of analysis is appropriate for tackling multidimensional problems.

Key-words: *wastewater treatment, multicriteria approach, decision making, electricity savings measures, global performance.*

RÉSUMÉ

Les stations d'épuration des eaux usées municipales du Québec, comme ailleurs au Canada et aux États Unis, sont en général peu efficaces sur le plan énergétique. Il est donc possible de concevoir des hypothèses de chaînes épuratoires améliorées au plan de leur efficacité énergétique et de leur performance globale en y introduisant, d'une part, diverses MEEE et, d'autre part, certains procédés unitaires améliorant l'épuration. Cependant, le problème de choisir, parmi ces hypothèses de chaînes d'épuration, celle correspondant au procédé le plus adéquat pour prendre en charge une situation donnée, demeure entier. Cet article analyse ce problème de choix pour les stations d'épuration de capacité comprise entre 5 000 m^3/d ($\approx$ 5 000 personnes) et 100 000 m^3/d ($\approx$ 100 000 personnes). En faisant l'hypothèse, d'un côté, que l'ajout des mesures d'efficacité énergétique peut améliorer la consommation énergétique d'une chaîne d'épuration, et d'un autre côté, que l'insertion de segments de procédés peut contribuer à améliorer leur performance globale, nous avons élaboré, à partir des stations d'épuration de types biofiltration, physicochimique, réacteurs biologiques séquentiels (deux variantes), boues activées et étangs aérés, six (6) hypothèses de chaînes épuratoires (chaînes 1 à 6) respectant les exigences opérationnelles et épuratoires et nous les avons comparées entre elles, sur la base d'une analyse multicritère d'aide à la décision, en vue d'en déterminer les plus performantes. Cette analyse multicritère intègre les aspects techniques, énergétiques, économiques, etc. et prend en compte les préférences du(des) décideur(s) dans le processus de choix. Les résultats obtenus montrent que, parmi les six hypothèses de chaînes étudiées, les trois premières positions sont occupées par les chaînes 3, 1 et 4 respective-

ment. Ce type d'analyse pourrait jouer un rôle complémentaire à une étude technico-économique visant le choix de technologies d'épuration.

Mots clés : *épuration des eaux usées municipales, modélisation multicritère, aide à la décision, performance globale, mesures d'efficacité énergétique électrique.*

1 - INTRODUCTION

Les stations d'épuration des eaux usées municipales du Québec, comme ailleurs au Canada et aux États-Unis, sont en général peu efficaces au plan énergétique (ANDERSON, 1980 ; ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI), 1993 ; OWEN, 1982 ; ONTARIO-HYDRO, 1993 ; METCALF et EDDY, INC., 1992 ; SASSEVILLE *et al.*, 1995). De plus, dans certains cas, l'efficacité épuratoire peut être améliorée par l'ajout de procédés élémentaires aux chaînes épuratoires en utilisation, dont certains, par surcroît, sont énergivores.

En faisant l'hypothèse, d'un côté, que l'ajout des mesures d'efficacité énergétique peut améliorer la consommation énergétique d'une chaîne d'épuration, et d'un autre côté, que l'insertion de procédés élémentaires peut améliorer, le cas échéant, leur performance globale, il devient possible d'élaborer des hypothèses de chaînes d'épuration plus efficaces au plan énergétique et épuratoire, ceci en se basant sur l'expérience développée sur le terrain dans l'opération des stations d'épuration.

Comment choisir les plus performantes de ces hypothèses de chaînes d'épuration des eaux usées municipales ?

Pour ce faire, nous avons élaboré, à partir des stations d'épuration existantes, six hypothèses différentes de chaînes épuratoires liquides respectant les exigences opérationnelles et réglementaires. Nous les avons ensuite comparées entre elles à l'aide d'une analyse multicritère en vue d'en déterminer les plus performantes. Ce faisant, nous nous sommes limités aux stations d'épuration de capacité comprise entre 5 000 m^3/d ($\approx$ 5 000 personnes) et 100 000 m^3/d ($\approx$ 100 000 personnes).

Les six hypothèses de chaînes de traitement analysées ont été élaborées à partir des stations de types biofiltration (chaîne 1), physico-chimique (chaîne 2), réacteur biologique séquentiel catégorie A (chaîne 3), réacteur biologique séquentiel catégorie B (chaîne 4), boues activées (chaîne 5) et étangs aérés (chaîne 6).

Les mesures d'efficacité énergétique utilisées dans l'élaboration de ces hypothèses ont été choisies sur la base d'une analyse conjonctive (KIBI *et al.*, 1997). De plus, les hypothèses de chaînes d'épuration ont été élaborées de manière conforme aux recommandations des opérateurs municipaux qui, de leurs côtés, sont aux prises avec le problème d'amélioration de la performance de leurs stations et de la réduction des coûts d'opérations. Enfin, il fallait choisir une méthode d'évaluation comparée de ces hypothèses de chaînes d'épuration qui soit capable de discerner la performance de chaque chaîne en regard d'un ensemble de critères établis par les opérateurs municipaux et divers intervenants œuvrant dans le secteur de l'assainissement de l'eau.

L'article présente cette démarche d'analyse en trois sections. La première section expose le problème du choix méthodologique de technologies d'épuration des eaux usées électriquement efficaces et globalement performantes. Le deuxième chapitre décrit comment, par modélisation multicritère, il est possible de classer les diverses hypothèses de chaînes d'épuration selon leur performance globale évaluée sur la base de certains critères de décision. Les résultats de l'analyse et la discussion sont présentés à la troisième section.

2 – PROBLÉMATIQUE DU CHOIX DE CHAÎNES PERFORMANTES AU PLAN ÉNERGÉTIQUE ET ÉPURATOIRE

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. Dans un tel contexte, 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, les économies rendues possibles par la réduction de la consommation d'électricité dans les stations d'épuration des eaux usées et l'expansion progressive et éventuelle 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 millions de dollars sur un coût actuel d'environ 24 millions de dollars pour les 400 GWh d'électricité consommés annuellement dans les stations d'épuration des eaux usées municipales uniquement par l'implantation des mesures efficaces appropriées.

Par ailleurs, plusieurs chaînes de traitement en opération ont une efficacité épuratoire limitée, notamment à cause de l'absence de certains procédés unitaires tels, par exemple, une décantation primaire, un système de désinfection approprié.

Il est donc possible, en se basant sur l'expérience acquise au cours des années d'opération et des déficiences constatées dans l'efficacité épuratoire de certaines chaînes de traitement, de concevoir des hypothèses de chaînes épuratoires améliorées au plan de leur efficacité énergétique et de leur performance globale en y introduisant, d'une part, diverses MEEE et, d'autre part, certains procédés unitaires pouvant compléter le travail d'épuration. Cependant, le problème de choisir, parmi ces hypothèses de chaînes d'épuration, celle correspondant au procédé le plus adéquat pour prendre en charge une situation donnée, demeure entier.

En général, le choix d'un procédé 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 aussi d'autres approches au choix d'un procédé 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 qui s'offrent aux décideurs. En effet, elles ne tiennent pas compte de principaux 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 par rapport auxquels les parties prenantes justifient, transforment et argumentent leurs préférences dans le processus décisionnel (ROY et VINCKE, 1981).

Dans ce type d'analyse, l'approche multicritère permet de tenir compte des principaux facteurs pouvant affecter la conception et l'opération des technologies épuratoires, par exemple, les facteurs énergétiques et environnementaux, débouchant ainsi sur des stations d'épuration efficaces du point de vue énergétique, épuratoire et opérationnel.

Cependant, l'analyse des facteurs qui interviennent dans la décision pose un problème particulier. Certains ont un effet sur la décision qui peut être apprécié par des relations déterministes, offrant ainsi un niveau de certitude élevé quant à son évaluation. D'autres ont un caractère non-déterministe et sont empreints d'incertitude ou d'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 caractéristiques des six hypothèses de chaînes d'épuration des eaux usées municipales. Les stations qui ont servi de base empirique pour élaborer les hypothèses de chaînes d'épuration ont été choisies en fonction du débit hydraulique (compris entre 8 000 m^3/d et 35 000 m^3/d·journalier), de la représentation de la diversité des procédés utilisés et de la volonté des opérateurs de participer à l'analyse.

Tableau 1 Description des hypothèses de chaînes épuratoires comprenant les MEEE et les procédés unitaires choisis.

Table 1 *Description of the hypothetical treatment chains, including the electrical energy efficiency measures (MEEE) and the chosen unit processes.*

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 physicochimique (+ MEEE4 et MEEE5) ⇒ Traitement tertiaire (ozonation)
3	Prétraitement ⇒ Traitement primaire ⇒ Traitement secondaire (Réacteurs biologiques séquentiels avec déphosphatation +MEEE6 +MEEE7 + MEEE8) ⇒ Traitement tertiaire (désinfection aux UV)
4	Prétraitement ⇒ Traitement secondaire (Réacteurs biologiques séquentiels + 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) Biofilter system; (2) Physico-chemical treatment; (3) Sequencing biological (batch) reactors **A**; (4) Sequencing biological (batch) reactors **B**; (5) Activated sludge-extended aeration; (6) Aerated lagoons.

MEEE1 :	Installation des pompes à chaleur pour la récupération calorique au pompage. *Heat recovery using heat pumps.*	MEEE6 :	Installation de diffuseurs à fines bulles. *Installation of fine bubble diffusers.*
MEEE2 :	Installation d'un turbidimètre pour contrôler le lavage des filtres dans les biofiltres. *Installation of turbidity meter to monitor cleaning of biofilters.*	MEEE7 :	Installation d'un système périodique de nettoyage des diffuseurs à fines bulles. *Installations of a periodical cleaning system for the fine bubble diffusers.*
MEEE3 :	Correction de la puissance des pompes en opération. *Operating pumps power correction.*	MEEE8 :	Installation de moniteurs pour le contrôle de l'O.D. dans le système d'aération. *Installation of dissolved oxygen (DO) monitors within aeration system.*
MEEE4 :	Installation des échangeurs de chaleur dans le systèmes de pompage. *Heat interchange used within the pumping system.*	MEEE9 :	Utilisation d'un système d'ajustement automatique de débit d'air. *Use of an air flow automatic adjustment system.*
MEEE5 :	Minimisation du pompage des boues primaires. *Minimization of primary sludge pumping.*	MEEE10 :	Installation de soufflante automatique de type centrifuge. *Use of an automatic centrifugal blowe.*

3 – 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 hypothèses de chaînes d'épuration. Les résultats de cette analyse visent à discriminer le comportement des hypothèses technologiques considérées, et de juger ainsi de leur performance relative en complément à une analyse technico-économique.

3.1 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.

3.1.1 Définition de l'ensemble admissible

L'ensemble admissible est composé de six hypothèses de chaînes d'épuration des eaux usées municipales (*tableau 1*).

On y retrouve aussi quelques procédés unitaires tels la décantation primaire ou encore l'ozonation. 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). Les procédés unitaires intégrés dans certaines chaînes ont été choisis avec le concours des ingénieurs opérant des stations existantes dans la perspective d'une amélioration hypothétique de l'efficacité épuratoire ou opérationnelle.

3.1.2 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*).

3.1.3 Classification des chaînes d'épuration

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

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 2 Les critères de décision utilisés au niveau de l'analyse multicritère.

Table 2 *Decision criteria used 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 moins le montant de la subvention (le cas échéant). Il s'exprime en \$/1 000 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 \$/1 000 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/1 000 m^3 d'eaux épurées. Trois valeurs sont présentées suivant trois pourcentages d'économie d'énergie : 10, 20 et 35 % .
Cr. 4	Consommation énergétique épuratoire (à minimiser)	Quantité d'électricité consommée en fonction de la quantité de DBO5 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 10, 20 et 35 % d'économie d'énergie théorique. Dans l'analyse, on a pris la moyenne de ces trois valeurs.
Cr. 5	Efficacité épuratoire mesurée par rapport à la DBO5 (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 Pt. 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 le pourcentage de réduction d'appel de puissance.
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	Substitutionalité de la chaîne épuratoire (à maximiser)	Facilités à la substitution technologique de la chaîne d'épuration des eaux usées. C'est un critère ordinal.

1. Le coût net 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.

Tableau 2 (suite) Les critères de décision utilisés au niveau de l'analyse multicritère.
Table 2 (suite) *Decision criteria used in the multicriteria analysis.*

Critères	Nature du critère	Caractéristiques du critère
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.

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 :

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

où

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

$$\delta_k(a_i,a_j) = \begin{cases} 1 \text{ si } -q_k \le \Delta_k \\ \dfrac{\Delta_k + p_k}{p_k - q_k} \text{ si } -p_k \le \Delta_k \le -q_k \\ 0 \text{ si } \Delta_k \le -p_k \end{cases}$$

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

p_k et q_k étant respectivement les seuils de préférence et d'indifférence.

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 :

Tableau 3 Tableau multicritère.

Table 3 *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$ 4,8$	6,4 $ 0$ 12,8$	59 $ 0$ 118$	35 $ 0$ 70$	60,5 $ 0$ 121$	55 $ 0$ 111$	0,083 $ 0,083	2 2	10 10	125 125
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	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 : $/1 000 m^3 d'eau traitée (à minimiser) ; Cr. 2 : $/1 000 m^3 d'eau traitée (à minimiser) ; Cr. 3 : kWh/m^3 (à minimiser) ; Cr. 4 : kWh/kg DBO_5 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).

$$D_k(a_i,a_j)=\begin{cases}0 \text{ si} -p_k \le \Delta_k \\ \dfrac{\Delta_k + p_k}{v_k - p_k} \quad \text{si} -v_k \le \Delta_k \le -p_k \\ 1 \text{ si } \Delta_k \le -v_k\end{cases} \tag{2}$$

On prendra $D_k(a_i, a_j)= 0$ pour chaque paire d'actions lorsqu'il s'agit d'un « critère ordinal » et v_k étant le seuil de veto.

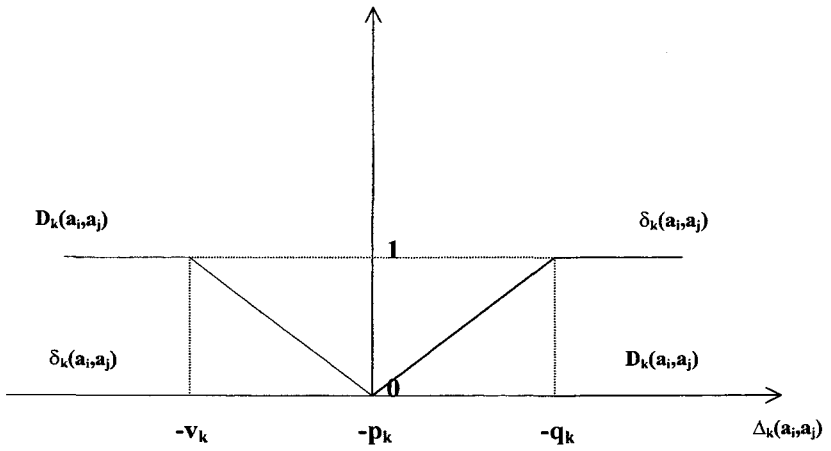

Figure 1 Fonction de préférences des décideurs.
Preference decision function.

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 $\Delta_k(a_i, a) = \Delta_k(a, a_i)$ pour toute $a \in A$, ce qui implique :

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

À partir des indices de concordance et de discordance, on établit des degrés de surclassement entre chaque couple d'actions. Ces degrés de surclassement sont calculés comme suit (voir ROUSSEAU et MARTEL, 1994) :

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

ceci conduisant à prendre en considération la discordance entre les évaluations, quelle que soit sa valeur. Comme dans ELECTRE III, le degré de surclassement est basé sur l'ajustement de l'indice de concordance, en tenant compte de la discordance. MARTEL et ROUSSEAU (1994) ont suggéré dans ce calcul du degré de surclassement, un facteur de correction commun pour l'indice de concordance, lequel pourrait être indépendant du niveau de l'indice de concordance. En d'autres mots, la force d'opposition du critère discordant peut ne pas

être affectée par la force de la concordance. La fonction cubique utilisée dans la formule est justifiée par le fait que la discordance peut varier plus rapidement que dans ELECTRE III, mais d'une manière plus naturelle. De là, la concordance est affectée aussi longtemps qu'il y a discordance sur un critère. L'utilisation de cette fonction est surtout justifiée par la présence de critère plus subjectif comme la contribution au développement durable.

(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 la modélisation sont : les poids de critères, les seuils d'indifférence, les seuils de préférence et 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 décisionnel[2] ;

2. Évaluer les différents critères sur une échelle de valeurs ; il s'agit ici d'attribuer une cote d'importance relative à chaque critère[3].

2. 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).

3. Les différents intervenants, jouant ici le rôle de décideurs, ont attribué une côte 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.

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 (*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.

4 – RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 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. Les performances obtenues par cette chaîne par rapport aux critères « coût net d'implantation » et « coûts d'exploitation » et « de maintenance », par exemple, ainsi que la consommation énergétique hydraulique sont comparables à celles des quatre autres chaînes. En revanche, 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 (MES), sauf pour la chaîne 5 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, de la consommation énergétique épuratoire, du ratio coût/habitant 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. En revanche elle est un peu désavantagée dans l'ensemble à l'égard des critères environnementaux comme l'efficacité épuratoire mesurée par rapport à la DBO_5, aux MES 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 MES et la DBO_5 respectivement. En revanche elle est désavantagée par rapport aux autres chaînes en ce qui concerne le coût net d'investissement et encore plus fortement au point de vue des coûts d'exploitation et de maintenance. En effet, le montant de ce dernier facteur, dans le cas de cette chaîne, est au moins le double des autres chaînes d'épuration.

Tableau 4 Rangement multicritère de différentes hypothèses de chaînes d'épuration.

Table 4 *Multicriteria ranking of the different hypothetical wastewater treatment chains.*

Rangs	Hypothèses de chaînes d'épuration
1	Chaîne 3
2	Chaîne 1
3	Chaîne 4
4	Chaîne 6
5	Chaîne 5
6	Chaîne 2

Pour vérifier comment le classement obtenu peut être affecté par les variables 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 hypothèses de 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 les poids pour l'ensemble des critères. Dans ce cas, le rangement des hypothèses de chaînes est affecté. Dans ce classement, les deux premières positions demeurent inchangées, alors qu'il est plus difficile de discriminer les hypothèses de traitement occupant les quatre dernières positions : en effet, les rangs 3 et 4 sont occupés par les hypothèses 4 et 6 en même temps, alors que les rangs 5 et 6 sont occupés par les chaînes 2 et 6.

4.2 Discussion

Les six hypothèses de chaînes d'épuration analysées ont été élaborées sur la base des 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 m^3/d et 35 000 m^3/d.

Le rangement des hypothèses de chaînes d'épuration élaborées sur cette base empirique, en consultation avec les opérateurs et certains intervenants dans l'assainissement des eaux, 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, dans l'analyse, une pondération de 28 % supérieure aux autres critères d'évaluation.

Les trois premières hypothèses de chaînes d'épuration sont les plus performantes globalement. Cela signifie que pour la construction de stations ayant un débit hydraulique contenu à l'intérieur de la fourchette considérée, ces trois hypothèses de chaînes d'épuration (en considérant l'hypothèse de modifications) pourraient être considérées préférentiellement aux autres lorsqu'il s'agira

de mettre l'accent sur leur performance globale, incluant leur efficacité énergétique.

Cependant, d'autres analyses seront nécessaires 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.

Enfin il faut préciser aussi que les évaluations distributionnelles obtenues suivant les hypothèses posées (cas du coût d'implantation, par exemple), se traiteraient difficilement, avec des relations de préférence ou d'indifférence probabilistes ou encore par la détermination de relations de surclassement probabilistes. Dans ce cas précis, pour ne prendre que celui-là, 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 d'épuration du Québec[4]. 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 obligés d'utiliser des évaluations qualitatives sur plusieurs critères. Les chaînes d'épuration considérées ici étant hypothétique (résultant de l'intégration de MEEE et de quelques procédés unitaires), il est difficile de déterminer avec précision les facilités ergonomiques de la chaîne hypothétique, sans passer par des évaluations techniques et des audits énergétiques au préalable. Dans ce cas, pour faire en sorte que les hypothèses de procédé soient les plus susceptibles de s'appliquer dans la réalité, il est plus raisonnable d'utiliser les données qualitatives à intervalle ou à pas, ces données se traitant mieux dans la méthode d'agrégation préconisée. En plus, la procédure d'agrégation utilise les poids de critères déterminés en dehors des équations. Cette flexibilité est intéressante dans la mesure où elle permet de faire participer les opérateurs et 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 est parfois obligé de démontrer auprès du décideur le bien fondé de sa démarche. Il s'agit d'un aspect empirique important dans l'acceptabilité de la solution proposée.

5 – CONCLUSION

Cet article propose une approche d'aide au choix de technologies efficaces et globalement performantes au plan des préférences des décideurs pour les stations d'épuration hypothétiques de capacité comprise entre 5 000 m^3/d ($\approx$ 5 000 personnes) et 100 000 m^3/d ($\approx$ 100 000 personnes).

L'approche proposée est un rangement multicritère « d'hypothèses » de chaînes d'épuration élaborées à partir de chaînes d'épuration de types biofiltra-

4. La 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.

tion, physico-chimique, réacteurs biologiques séquentiels, boues activées et étangs aérés avec l'aide des opérateurs et de certains intervenants dans l'assainissement des eaux.

Dans le rangement multicritère de ces différentes hypothèses de procédés d'épuration, les trois premières positions sont occupées respectivement par les hypothèses de chaînes 3, 1 et 4. Les autres positions sont occupées par les hypothèses de chaînes 6, 5 et 2. Les trois premières hypothèses de chaînes peuvent être considérées comme préférables aux autres (en tenant compte de modifications), 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 appropriée pour fournir une réponse à la question de la multidimensionnalité du problème de choisir parmi plusieurs variantes de procédé d'épuration.

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., 786 p.

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 methods in multicriteria analysis. In: J.P. Brans (ed), Operational Research 84 North-Holland, Amsterdam, 477-490.

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, 20 p.

ECKENFELDER W., 1982. Gestion des eaux usées urbaines et industrielles. Caractérisation - Techniques d'épuration - Aspects économiques. L. Vandevenne, (trad.) xiv, Tec & Doc Lavoisier, Paris, 503 p.

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 Issus related to Energy supply : the Environment case for increased efficiency of energy uses. *Energy, 12(1),* 975-992.

HYDRO-QUÉBEC, 1993. Programmes d'efficacité énergétique d'Hydro-Québec. Groupe Commercialisation et Affaires, Service de planification commerciale, Montréal, Canada.

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 des électrotechnologies et des MEEE dans le traitement des eaux municipales : une modélisation multicritère. Rapp. scient. présenté à Hydro-Québec, INRS-Eau, 185 p.

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.Vecteur Environnement, *30(5),* 40-48.

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 : Évaluation 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, Canadian Energy Research Institute, Calgary, Alberta.

METCALF et EDDY, INC., 1992. Water and Wastewater industries : characteristics and DSM opportunities. Electric Power Research Institute (EPRI), rapport TR-102015, Polo Alto.

ONTARIO-HYDRO, 1993. Municipal water and wastewater treatment facilities in Ontario. An assessment of electricity Use and the Impact of Environmental Regulations, Toronto, Ontario.

OWEN W.F., 1982. Energy in wasterwater treatment. Toronto: Prentice-Hall.

PINEAU M., CÔTÉ P. et VILLENEUVE J.P., 1985. Estimating of Wasterwater 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, Toronto (Ontario), 70 p.

ROUSSEAU A. et MARTEL J.M., 1994. Environmental Evaluation of an Electric Transmission Line Project. A MCDA Method. Dans Applying Multicriteria Aid for decision to Environmental Management, M. Paruccini (Ed), Kluwer Academic Publishers, 163-186.

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 P.H., 1981. Multicriteria analysis survey and new directions. *Eur. J. Operational Res. 8,* 207-218.

SASSEVILLE J.L., BLAIS J.F., BOURGAULT D., LAREAU J., LEBCIR 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. In: Decision Making with Multiple Objectives, Haimes 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., 22(4),* 23-26.