

Titre: Approche multicritère en évaluation des réseaux de transport
Title:

Auteur: Pierre Fournier
Author:

Date: 1989

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Fournier, P. (1989). Approche multicritère en évaluation des réseaux de transport [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/58227/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/58227/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:**
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITE DE MONTREAL

APPROCHE MULTICRITERE EN EVALUATION
DE RESEAUX DE TRANSPORT

par

Pierre FOURNIER

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

ECOLE POLYTECHNIQUE

MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION
DU GRADE DE MAITRE ES SCIENCES APPLIQUEES (M.Sc.A)

avril 1989

UNIVERSITE DE MONTREAL

ECOLE POLYTECHNIQUE

Ce mémoire intitulé :

"APPROCHE MULTICRITERE EN EVALUATION
DE RESEAUX DE TRANSPORT"

présenté par: Pierre FOURNIER

en vue de l'obtention du grade de: MAITRE ES SCIENCES APPLIQUEES
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. Karsten Baass, Ph. D., Président

M. Robert Chapleau, Ph. D., Directeur de recherche

M. Pierre Trottier, M. Sc. A., S.T.C.U.M.

SOMMAIRE

Un réseau "exemplaire", à partir duquel plusieurs scénarios sont générés à l'aide du progiciel MADITUC⁽¹⁾, permet de cerner la complexité du "design" de réseaux et d'identifier certaines caractéristiques relatives à l'évaluation de ces derniers. Le "design" de réseaux de transport urbain collectif a pour composantes la génération et l'évaluation de réseaux. Mais comment générer des réseaux "satisfaisants" à la fois pour l'exploitant et pour les usagers lorsque, pour un niveau de ressources consommées donné, il existe d'une part plusieurs niveaux de qualité de service aux usagers, et d'autre part plusieurs ensembles "géométrie-niveau de service" ? Face à ce contexte où les réseaux générés ne peuvent répondre parfaitement à 2 objectifs divergents, à savoir maximiser les bénéfices aux usagers et minimiser les coûts d'opération pour l'exploitant, comment identifier le meilleur réseau à partir d'un ensemble de réseaux à compromis ? De plus les indicateurs de performance (ou critères) utilisés pour l'évaluation sont exprimés dans des unités de mesure différentes. L'évaluation nécessite donc une approche adaptée.

(1) MADITUC : Modèle d'Analyse Désagrégée des Itinéraires
en Transport Urbain Collectif

L'analyse multicritère est retenue comme étant une approche potentielle pour l'évaluation de réseaux selon les exigences présentées ci-dessus. Une revue de la littérature sur ce sujet a permis d'identifier plusieurs approches analytiques et de retenir la méthode PROMETHEE⁽²⁾. Le présent ouvrage présente une procédure systématique permettant: de fixer les paramètres nécessaires à PROMETHEE, de modéliser les préférences des décideurs, et finalement d'évaluer les réseaux.

L'application de la méthode PROMETHEE a permis de classer 15 réseaux selon l'ordre suivant: 1-l'ensemble des réseaux à meilleur compromis; 2-les réseaux extrêmes (à coûts minimums pour l'exploitant et à bénéfices maximums pour les usagers); 3-les réseaux non-surclassés sur l'ensemble des critères par les réseaux à meilleur compromis; 4-les réseaux à éliminer sans ambiguïté, c'est-à-dire ceux surclassés sur l'ensemble des critères. Ce résultat vérifié graphiquement est obtenu lorsque des poids égaux sont associés aux objectifs et aux critères. Cependant, lorsque des poids variés sont utilisés pour les critères, le résultat obtenu et sa justification ne

(2) PROMETHEE : méthode de classement par l'organisation des préférences en vue d'un enrichissement de l'évaluation

permettent pas de conclure à l'efficacité de l'utilisation d'une pondération à "poids variés" dans un contexte où celle-ci ne répond pas à des besoins spécifiques.

ABSTRACT

In the wake of the present urban transport financing crisis, every decision concerning the choice of a transport network is important because of many implied consequences. This study presents a multicriteria analysis which will permit better evaluation of public network.

Generated from the MADITUC⁽¹⁾ model the different transport alternatives undergo an initial evaluation to identify the networks where a choice of compromises is given. These networks are then evaluated with the multicriteria analysis which identifies the best ones with respects to two objectives: the minimization of operation costs and the maximization of users' benefits.

The multicriteria method used is effective in classifying the networks in order from the best to the worst compromise, based on equal weight sets. But the complexity caused by using several weight vectors makes the justification of the obtained results difficult.

(1) Model for the Disaggregate Analysis of Itineraries on a Transit Network

REMERCIEMENTS

Cet ouvrage a nécessité des rapports importants avec des personnes qui en ont facilité l'accomplissement. Aussi je tiens particulièrement à remercier le docteur Robert Chapleau pour ses conseils judicieux qui sauront me guider la vie durant.

Je remercie également les étudiants de la section Génie des Transports pour leurs encouragements et leurs conseils utiles.

Enfin, je désire remercier ma conjointe, Chantal Sibille, pour la motivation qu'elle m'a apportée tout au long de ce mémoire.

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE.....	iv
ABSTRACT.....	vii
TABLE DES MATIERES.....	ix
LISTE DES FIGURES.....	xiii
LISTE DES TABLEAUX.....	xiv
LISTE DES GRAPHIQUES.....	xv
LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS.....	xvi
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTERATURE ET PROBLEMATIQUE.....	3
1.1 La nature multidimensionnelle des problèmes de transport.....	3
1.2 L'application de l'analyse multicritère au domaine des transports.....	8
1.3 La problématique méthodologique de l'analyse multicritère.....	13
1.3.1 Le choix des critères d'évaluation.....	15
1.3.2 La détermination de l'importance relative des critères.....	18
1.3.3 L'analyse de sensibilité des résultats.....	25

1.3.4	L'incommensurabilité de la valeur des critères.....	26
1.4	L'application de l'approche multiobjectif au domaine des transports.....	28
1.5	Commentaires.....	31
CHAPITRE 2 METHODOLOGIE.....		35
2.1	La production des données.....	37
2.1.1	La génération des scénarios de réseau.....	37
2.1.2	La description des données.....	43
2.2	Le choix des objectifs et des critères d'évaluation.....	49
2.3	La pondération des objectifs.....	58
2.4	La pondération des critères d'évaluation.....	59
2.4.1	La pondération du critère relatif à l'exploitant.....	60
2.4.2	La pondération des critères relatifs aux usagers.....	60
2.5	La modélisation des préférences.....	67
2.5.1	La modélisation des préférences de l'exploitant.....	68
2.5.1.1	La détermination du seuil d'indifférence..	69
2.5.1.2	La détermination du seuil de préférence...	71

2.5.2	La modélisation des préférences des usagers.....	73
2.5.3	La détermination des fonctions de préférence.....	73
2.5.4	L'approche globale de modélisation des préférences.....	75
2.6	L'analyse multicritère.....	76
2.6.1	Les généralités.....	76
2.6.2	La méthode d'analyse multicritère PROMETHEE.....	78
2.7	L'analyse de sensibilité des résultats.....	87
2.7.1	La perturbation des poids des critères.....	88
2.7.2	La perturbation des poids des objectifs.....	90
2.7.3	La perturbation des seuils de préférence et d'indifférence.....	93
2.7.4	Les intervalles de stabilité.....	93
2.8	Les résultats possibles.....	96
 CHAPITRE 3 RESULTATS DE L'APPLICATION DE LA METHODE PROMETHEE.....		
3.1	L'évaluation de réseaux de transport avec poids égaux.....	99
3.1.1	L'évaluation avec poids égaux pour fin de filtrage.....	99
3.1.2	L'évaluation des 7 réseaux retenus.....	104

3.2	L'évaluation de réseaux de transport avec poids variés.....	110
3.2.1	L'évaluation avec poids variés pour fin de filtrage.....	110
3.2.2	L'évaluation des 8 réseaux retenus.....	115
3.2.3	L'analyse de sensibilité des résultats.....	117
3.3	Les résultats obtenus.....	120
3.3.1	L'analyse de la méthode utilisée.....	120
3.3.2	L'interprétation des résultats.....	121
CHAPITRE 4 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....		125
BIBLIOGRAPHIE.....		127
ANNEXE.....		137

LISTE DES FIGURES

1.1	Importance relative des critères d'évaluation.....	20
1.2	Applications de la programmation multiobjectif en transport.....	29
1.3	Approches multiobjectif en conception de réseau....	30
2.1	Géométrie du réseau routier.....	39
2.2	Flux de surclassement selon PROMETHEE.....	86
3.1	Filtrage de 15 réseaux avec poids des critères égaux.....	101
3.2	Evaluation de 7 réseaux avec poids des critères égaux.....	106
3.3	Filtrage de 15 réseaux avec poids des critères variés.....	111
3.4	Evaluation de 8 réseaux avec poids des critères variés.....	116

LISTE DES TABLEAUX

1.1 Analyse multicritère et programmation multiobjectif.....	7
2.1 Synthèse des résultats sur les réseaux générés.....	46
2.2 Coûts relatifs au nombre de véhicules requis.....	54
2.3 Coûts relatifs au nombre de véhicules-heures.....	55
2.4 Coûts relatifs au nombre de véhicules-kilomètres.....	56
2.5 Vecteurs de poids par groupe d'hypothèses.....	66
2.6 Ensembles de paramètres souples et sévères.....	76
2.7 Types de critères généralisés.....	81
3.1 Vérification des résultats.....	107
3.2 Indices de stabilité des résultats.....	118
3.3 Résultats globaux.....	121

LISTE DES GRAPHIQUES

2.1 Nature compromissaire des scénarios de réseau.....	48
2.2 Fonction de l'intensité de préférence.....	75
2.3 Fonction générale de préférence.....	79
3.1 Coûts d'opération Vs indice du niveau de service (poids égaux).....	102
3.2 Coûts d'opération Vs indice du niveau de service (poids variés).....	114

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

c_i	critère d'évaluation "i"
ELECTRE	ELimination Et Choix Traduisant la REalité
GHx	Groupe d'Hypothèses numéro x
H0	Hypothèse de l'égalité des poids d'évaluation
H _y	Hypothèse "y"
MADITUC	Modèle d'Analyse Désagrégée des Itinéraires de Transport Urbain Collectif
n	l'indice "n" est à la fois le nombre de critères d'évaluation, le nombre de poids et le nombre de seuils puisque pour chacun des critères est associé un seuil et un poids
NS	Nombre moyen de Sections utilisées
PROMETHEE	Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations (méthode de classement par l'organisation des préférences en vue d'un enrichissement de l'évaluation)
p_i	seuil de préférence "i" (unité selon le critère)
$P_i(a, b)$	intensité de préférence entre les réseaux "a" et "b" concernant le critère "i"
q_i	seuil d'indifférence "i" (unité selon le critère)
RATP	Régie Autonome des Transports Parisien
STEM	STEp Method, méthode par incrément
TA	Temps moyen d'Attente (minute)

TES	Temps moyen d'Entrée-Sortie sur le réseau (minute)
TOPSIS	the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, technique de classement des préférences selon la similarité à une solution idéale.
TV	Temps moyen en Véhicule (minute)
VE	Valeur Entière non-arrondie
w_i	poids du critère "i"
W	vecteur de poids
\$	coûts d'opération associés à l'exploitant
$\pi(a, b)$	indice multicritère entre les réseaux "a" et "b"
$\bar{x}^+(a)$	flux sortant associé au réseau "a"
$\bar{x}^-(a)$	flux entrant associé au réseau "a"
$\bar{x}(a)$	flux net associé au réseau "a"

INTRODUCTION

La décision de modifier ou de remplacer un réseau de transport collectif urbain pour répondre à de nouveaux besoins peut être lourde de conséquences pour plusieurs des intervenants concernés, à savoir principalement les usagers et l'exploitant. Celle-ci est d'autant plus importante en période de crise du financement des transports publics. Dans ce contexte, l'évaluation de réseaux devient un instrument d'aide à la décision. Cependant cette évaluation doit se faire en considérant un nombre sans cesse croissant de dimensions liées à la satisfaction de la clientèle, à la gestion, à l'exploitation, au financement d'un réseau, pour n'en nommer que quelques-unes. Aussi, certaines méthodes qui répondent à cette exigence sont utilisées depuis nombre d'années, mais de façon limitée dans le domaine spécifique de l'évaluation de réseaux de transport collectif urbain.

L'évaluation de réseaux de transport doit donc considérer la nature multidimensionnelle du transport et ainsi prendre en compte simultanément un grand nombre d'objectifs "divergents" ou du moins "partiellement contradictoires". Cependant, selon cette exigence, l'atteinte d'une valeur optimale pour certains objectifs entraîne pour les autres des valeurs non-optimales. On n'évalue donc plus de manière à permettre l'identification

d'une solution optimale unique, mais plutôt de façon à distinguer un ensemble de solutions à meilleur compromis. Il faut par conséquent identifier ces solutions à compromis, et départager parmi l'ensemble lesquelles représentent les meilleures. C'est cette dernière opération qui s'avère être difficile à exécuter. Dans cet esprit l'analyse multicritère est proposée comme instrument pour faciliter le choix de réseaux à meilleur compromis.

Il s'agit ainsi de vérifier le potentiel d'application de l'analyse multicritère en évaluation de réseaux de transport collectif urbain. Les réseaux fictifs soumis à l'évaluation ont été préalablement créés à l'aide d'un modèle. Ceux-ci font l'objet d'une procédure de filtrage afin d'identifier les réseaux à compromis qui sont performants, c'est-à-dire ceux qui offrent un niveau de service élevé sans entraîner une augmentation trop importante des coûts d'opération pour l'exploitant. Les réseaux identifiés comme tels sont ensuite soumis à une méthode d'analyse multicritère. Cette dernière classe les réseaux à évaluer par ordre décroissant, à savoir du meilleur au pire des compromis.

CHAPITRE I

REVUE DE LA LITTÉRATURE ET PROBLÉMATIQUE

Les agglomérations et leurs citoyens sont en constante mutation. Qu'il s'agisse de la dérive des citadins vers la banlieue, du vieillissement de la population ou de l'éclatement de la cellule familiale, les services offerts à la population doivent s'adapter à la présente réalité et être élaborés de manière à répondre avec souplesse aux besoins futurs. Le transport collectif est l'un des services qui commande une symbiose avec l'environnement "politico-socio-économico-évolutif" de la ville. L'adaptation d'un service de transport en commun à de nouveaux besoins peut s'effectuer entre autres par la modification du réseau existant ou par son remplacement. Ce chapitre présente d'une part la problématique liée à l'évaluation de réseaux de transport, et d'autre part les problèmes associés à l'application des méthodes d'évaluation existantes.

1.1 La nature multidimensionnelle des problèmes de transport

De par sa nature, le transport est un domaine multidimensionnel. Manheim (1966, p.7) exprime ainsi la

spécificité de la planification des transports :

«La production d'un service de transport n'est pas une fin intrinsèque (en général), mais un instrument: l'objet du transport est d'aider à atteindre les autres buts de la société ... Par conséquent, les infrastructures de transport doivent être évaluées, ultimement, en fonction de l'importance des objectifs globaux à atteindre pour la société» (texte traduit de l'anglais).

Multidimensionnalité en nature signifie également multiobjectif en évaluation, aussi la compréhension des problèmes de transport se traduit-elle souvent par la prise en compte de plusieurs dimensions non considérées auparavant, ou considérées, mais non introduites dans les méthodologies d'analyse et/ou d'évaluation en usage. L'intégration de ces dimensions, qui sont le reflet des nouvelles préoccupations du milieu de la planification, nécessite des approches méthodologiques adaptées. Des approches qui prennent en considération simultanément toutes les dimensions pertinentes à une évaluation ou une analyse de transport.

Plusieurs changements ont précisé la reconnaissance de la nature multidimensionnelle de la planification des transports et ont contribué au développement de méthodes qui sont adaptées à cette réalité. Du point de vue méthodologique, selon Giuliano (1985), ces changements dans l'évolution du processus de planification des transports

ont contribué à l'utilisation d'approches multidimensionnelles, les plus importants sont:

- l'augmentation de la complexité dans le processus de planification des transports;
- la conciliation d'objectifs multiples et conflictuels, soit économiques, sociaux, énergétiques, environnementaux et autres;
- un élargissement notable du nombre de solutions possibles aux problèmes posés;
- un nombre croissant d'intervenants dans le processus de planification.

Cependant la complexité et la compréhension que l'on a des problèmes actuels de planification demandent selon Giuliano (1985) que les approches analytiques présentent certaines caractéristiques, à savoir:

- être applicable à une grande variété de problèmes;
- permettre la gestion d'une vaste quantité de données;
- permettre une identification claire des compromis entre les objectifs conflictuels;
- permettre une comparaison systématique de tous les scénarios, de manière à ce que les décideurs puissent prendre leurs décisions sur des informations utiles et compréhensibles.

Hormis ces exigences, il existe principalement deux catégories de méthodes d'évaluation de nature multidimensionnelle utilisées pour résoudre les problèmes de transport.

Les méthodes d'analyse multicritère permettent l'étude d'un problème de décision pour lequel plusieurs points de vue sont pris en considération simultanément. A l'aide de cette méthode, l'évaluation permet, à partir d'un ensemble donné de possibilités, de choisir, à la lumière de plusieurs critères et de priorités conflictuelles, un sous-ensemble de possibilités. Cette approche est utilisée depuis peu en évaluation de réseau de transport urbain collectif (Janarthanan et Schneider, 1987).

Les méthodes de programmation multiobjectif rendent possible l'identification d'une solution optimale. Elles permettent également, d'une part de générer des réseaux de transport qui satisfont les objectifs et les contraintes posés, et d'autre part d'identifier parmi les choix possibles, la solution optimale.

Afin de cerner les différences et les caractéristiques de chacune de ces approches, le tableau 1.1 résume les principaux éléments à retenir, alors que les deux sections

TABEAU 1.1 ANALYSE MULTICRITERE ET PROGRAMMATION MULTIOBJECTIF

caractéristiques	approche multiojectif	approche multicritère
- intervenants	- fixent les objectifs et les poids; - n'interviennent pas dans le processus;	- fixent les critères et les poids; - peuvent intervenir dans le processus;
- objectifs	- évaluation et génération de scénarios;	- évaluation de scénarios;
- base théorique	- théorie de l'optimisation;	- théorie de la décision;
- éléments traités	- quantifiable seulement;	- quantifiable et non quantifiable;
- méthodes	- programmation mathématique simple; - programmation multilinéaire multiobjectifs; - "goal programming";	- de classement, comparative, statistique; - fonction d'utilité; - méthode de surclassement; - méthode de hiérarchisation;
- solution	- exacte et souvent unique;	- un sous-ensemble des scénarios de départ;
- atteinte de la solution	- progressive, par itération;	- direct;
- application en transport	- très diversifiée;	- embryonnaire;
- application à l'élaboration et à l'évaluation de réseau	- faible;	- très faible (1987);

qui suivent présentent des applications de ces approches au domaine spécifique du transport.

1.2 L'application de l'analyse multicritère au domaine des transports

Le rôle de l'analyse multicritère est le même que celui de toute étude d'évaluation de projet. Ce rôle selon Godard (1981) est d'aider à la prise de décision en identifiant comment des ressources rares peuvent être utilisées au mieux pour satisfaire les besoins d'une population donnée. Cette approche d'aide à la prise de décision se fait en dégagant les conséquences du choix du projet considéré, et cela pour chacun des principaux intervenants concernés. Il est donc important que la méthode d'évaluation utilisée identifie et présente les principaux éléments nécessaires pour faciliter le choix d'un projet. Plus précisément, voyons dans quelle mesure ce rôle est assumé par l'analyse multicritère appliquée au domaine des transports.

L'émergence des méthodes d'analyse multicritère se situe aux environs des années 60. En particulier les travaux de Hill (1967), Schimpeler et Grecco (1968), Schlager (1968), Boyce et al. (1970), Barbier (1971) et Simpson (1976), qui sont principalement des applications en

évaluation de projets d'investissement en infrastructure de transport. Les méthodes utilisées permettent de classer par ordre prioritaire les projets d'investissement, soit du meilleur au pire, à l'aide de variables quantitatives et qualitatives. L'approche utilisée a également permis de prendre en compte dans une même évaluation des considérations sociales, économiques et autres. Ainsi certains auteurs ont évalué sous plusieurs dimensions des politiques de transport, particulièrement Ball (1977), d'autres se sont intéressés à l'évaluation de différents modes de transport, en particulier Grabe (1978). Les méthodes qui caractérisent ces évaluations sont essentiellement des sommes pondérées qui tendent à réduire le problème multidimensionnel à un problème unidimensionnel. Cette pratique est simplificatrice puisqu'elle crée des effets de substitution entre différents objectifs (voir 1.3.2). On ne tente plus d'évaluer selon plusieurs critères, mais plutôt à partir d'un unique critère agrégé, qui représente une somme pondérée.

Afin de pallier à cette lacune, l'école française propose une nouvelle méthode d'analyse multicritère appelée ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité) qui est en développement depuis le milieu des années 70. Pour mieux connaître en quoi consistent les méthodes

d'évaluation multicritère, une revue de la littérature est présentée en annexe.

L'utilisation de la méthode ELECTRE dans le domaine des transports se limite principalement aux applications suivantes. D'abord Roy et Hugonnard (1982) utilisent la méthode ELECTRE pour classer par ordre d'importance décroissante des projets de prolongement de lignes de métro. Chacun des intervenants concernés choisit un et un seul critère pour faire valoir son point de vue, concernant cette application. Les acteurs suivants ont participé:

INTERVENANTS	CRITERES CHOISIS
-les habitants;	-population + emplois desservis par kilomètre de ligne;
-l'exploitant;	-volume prévisible d'entrants aux nouvelles stations par kilomètre de ligne;
-l'état français;	-coût par kilomètre de ligne;
-le gouvernement régional (Ile de France)	-taux de rentabilité interne;

(un sixième critère a été ajouté afin de faire intervenir la contrainte "respect du schéma d'aménagement")

A l'aide des 6 critères et de paramètres relevant d'une

appréciation subjective, l'application de la méthode ELECTRE IV a permis un classement des projets de prolongement cohérents avec l'évolution du processus de décision. Les principales difficultés rencontrées concernent l'appréciation des marges d'erreurs ainsi que la fixation des différents seuils (paramètres) nécessaires à la modélisation des préférences.

La deuxième application de l'analyse multicritère est faite par Roy, Présent et Silhol (1986) en vue d'élaborer les programmes de rénovation des stations de métro parisien. Cette application de la méthode ELECTRE pour la RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens) permet de classer annuellement l'ensemble des stations nécessitant une rénovation sur la base de 7 critères qualitatifs ou quantitatifs :

- le nombre d'usagers par quai;
- le nombre de passagers en transit à la station;
- la coordination du travail;
- l'aspect visuel de la station;
- le niveau d'inconfort;
- l'environnement.

La troisième application de l'analyse multicritère est faite par Janarthanan et Schneider (1987), elle concerne

spécifiquement l'évaluation de scénarios de réseau de transport. La méthode utilisée est une comparaison par paire de la valeur normalisée des critères. A l'aide des écarts de valeur entre 2 scénarios pour chacun des critères, une analyse de concordance et de discordance est appliquée pour mettre en ordre les différents réseaux du meilleur au pire des compromis. Ce classement est établi à partir d'objectifs relatifs aux usagers, à la communauté, ainsi qu'à l'opérateur du réseau. L'atteinte de chacun des objectifs est mesurée à l'aide des critères suivants :

INTERVENANTS	OBJECTIFS	CRITERES
-usager	-efficacité du service	-temps moyen en véhicule; -temps moyen de voyage; -nombre de transferts; -nombre de passagers servis;
-communauté	-accessibilité	-% de voyages assignés; -nombre de places-kilomètres offert; -longueur totale du réseau; -nombre de lignes;
-opérateur	-coûts -utilisation	-coûts d'opération de l'heure; -coûts en capital; -% des lignes sous-utilisées

- ou sur-utilisées;
- passagers-kilomètres/places-kilomètres;
- nombre de passagers-kilomètres;
- passagers servis/passagers-kilomètres;
- utilisation moyenne.

Chacun des intervenants pondère l'ensemble des critères en proposant 2 jeux de poids. Le classement final, obtenu à l'aide de l'analyse de concordance et de discordance, est ensuite établi comme étant le rang moyen ressortant de l'application de la méthode pour chacun des vecteurs de poids.

L'utilisation de l'approche multicritère au domaine spécifique de l'évaluation de réseaux de transport urbain collectif est donc embryonnaire. La problématique que l'on associe à l'utilisation de cette approche est l'une des raisons qui peuvent expliquer ce fait.

1.3 La problématique méthodologique de l'analyse multicritère

Les méthodes d'analyse multicritère souffrent de plusieurs

points faibles. La critique de Godard (1981) le confirme par la phrase suivante :

«Cependant il faut reconnaître que les méthodes d'analyse multicritère, malgré leur intérêt évident, peuvent souffrir des mêmes critiques (que les méthodes bénéfices/coûts) quant à l'arbitraire possible des conclusions : on peut justifier, sans doute plus facilement par une analyse multicritère, une conclusion définie à l'avance ...».

En effet, une multitude de décisions sont prises avant ou pendant l'analyse multicritère, celles-ci ont un effet inévitable sur les résultats finaux ou leur interprétation, mentionnons :

- 1-selon Brans et Vincke (1982) le choix de la quantité de critères à utiliser est un élément important, plus on considère de critères, plus les relations qui permettent de classer les scénarios risquent de s'appauvrir;
- 2-le choix des critères ou des indicateurs de performance;
- 3-le choix de l'importance relative à associer à chacun des critères ou indices de performance;
- 4-le choix des valeurs à affecter aux paramètres

nécessaires à la différenciation des éléments devant être évalués (voir annexe);

5-le choix d'utiliser des critères qui s'expriment selon une même unité de mesure;

6-le choix d'effectuer une analyse systématique de la sensibilité des résultats.

La littérature couvre principalement la problématique associée aux points 2, 3 et 6.

1.3.1 Le choix des critères d'évaluation

En ce qui concerne le choix des critères ou des indicateurs de performance, Talley (1986) présente deux méthodologies utilisées par des organismes de transport pour choisir des indicateurs en vue d'évaluer les performances d'un réseau. Ces indicateurs sont divisés selon deux concepts, l'"efficiency" (efficience) et l'"effectiveness" (efficacité). L'"efficiency" permet d'identifier avec quel rendement un organisme de transport utilise ses ressources disponibles en capital et en main-d'oeuvre; tandis que l'"effectiveness" mesure le degré avec lequel le service de transport rencontre les objectifs

fixés (U.S. Department of Transportation, 1978). Fielding et al. (1977) donnent cependant la définition suivante au concept d' "effectiveness": une mesure du degré auquel le service de transport répond aux besoins des usagers et de la communauté. Deux méthodologies permettant le choix d'indicateurs de performance relativement à ces concepts sont identifiées dans la revue de la littérature.

La première méthode, la plus utilisée, spécifie les critères que les indicateurs doivent satisfaire (Fielding et Glauthier, 1976). Cette méthode utilise principalement le critère de "methodological correctness" (rectitude méthodologique). Ce critère est créé pour éviter qu'un indicateur soit à la fois une mesure d'efficacité et d'efficience. D'autres critères sont ensuite apparus, dont voici les principaux :

- la pertinence avec les objectifs visés;
- la concision, qui se réfère au choix des critères qui minimisent la redondance et l' "overlap" (chevauchement) parmi les indicateurs;
- la disponibilité des données;
- le temps et les dépenses nécessaires à l'obtention des données;
- la facilité de mesurer la valeur des indicateurs de performance;

-et en dernier lieu, le critère "minimisation des facteurs incontrôlables", qui fait référence aux indicateurs qui peuvent être utilisés pour évaluer une variété de scénarios de transport;

(Fielding et al.(1977), Heaton (1980) et Tyson (1977).

Selon l'approche méthodologique proposée, les indicateurs qui satisfont ces critères sont utilisés afin d'évaluer les performances d'un réseau de transport.

La deuxième méthodologie de sélection d'indicateurs est celle de Talley (1986). Elle consiste essentiellement à préciser les objectifs d'opération de l'organisme de transport, et à partir de ceux-ci, à identifier les indicateurs pertinents. La seule contrainte qui influence la sélection est que les variables qui apparaissent comme étant des objectifs d'opération doivent être sous le contrôle de l'organisme de transport. Talley (1986) conclut que la deuxième méthodologie est plus claire et que rien n'empêche que les indicateurs choisis par cette dernière méthode ne soient soumis aux critères de sélection de la première méthode.

Bien que les deux méthodologies présentées n'apportent que des éléments de réponse au problème délicat du choix des indicateurs de performance, ou critère d'évaluation,

celles-ci peuvent être considérées concernant les choix à effectuer.

1.3.2 La détermination de l'importance relative des critères

Le problème de la détermination de l'importance relative des valeurs sur lesquelles portent les décisions, soit les critères concernant l'analyse multicritère, ainsi que les objectifs concernant la programmation multiobjectif, est l'un des plus délicats problèmes en ce qui concerne les approches multidimensionnelles. Différentes méthodes ont été proposées pour déterminer des valeurs adéquates aux poids relatifs à chacun des critères ou objectifs (David 1963, Eckenrode 1965, Thurstone 1967 et Solymosi et Dombi 1986). Les questions importantes que soulève la détermination de l'importance relative des critères d'évaluation, ou des objectifs, sont les suivantes:

-Quelle importance relative doit-on affecter à chacun des critères ou des objectifs?

-Comment peut-on justifier le choix effectué concernant la valeur du poids affectée à chacun des critères ou

objectifs?

-Quelle influence ces choix ont-ils sur les résultats finaux de l'évaluation? L'influence identifiée est-elle celle qui est désirée?

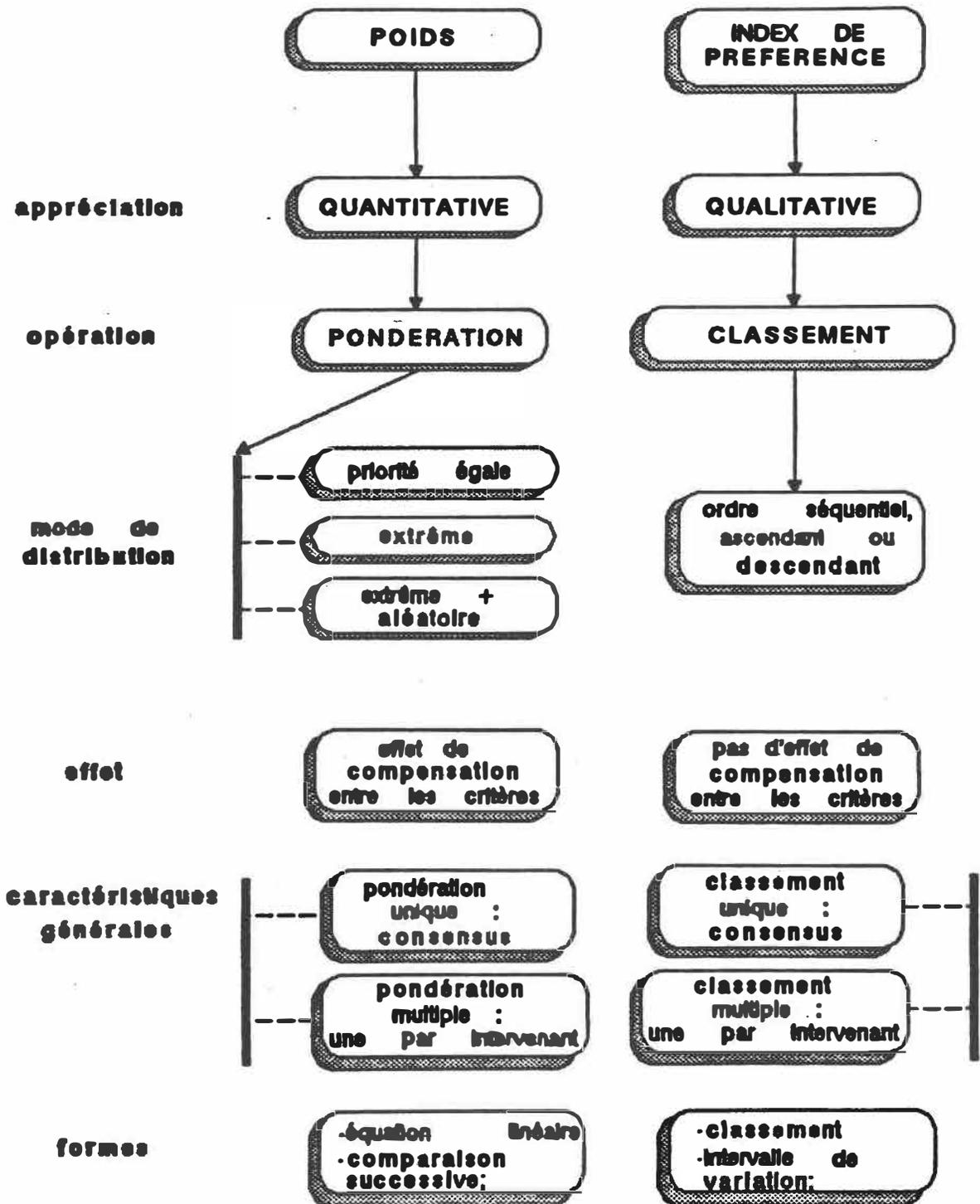
L'établissement de l'importance relative des critères ou objectifs est abordé ici de manière globale, mais les usages faits dans le domaine des transports font l'objet d'une attention spéciale. Principalement deux méthodologies sont utilisées pour modéliser l'importance relative des critères, la pondération et la détermination d'indices d'importance. La figure 1.1 présente les principales caractéristiques des deux approches.

L'émergence du concept d'importance relative des critères coïncide avec celle des méthodes d'analyse multicritère, soit dans les années 60. Afin de mieux connaître les procédures de pondération, une revue de la littérature sur le sujet est présentée en annexe.

Dans le domaine spécifique des transports, les méthodes de détermination des poids ou indices d'importance sont celles de Zeleny (1976), Giuliano (1985) et Roy et al. (1986). La méthode de Zeleny est utilisée pour pondérer des critères servant à évaluer des scénarios concernant un

FIGURE 1.1

IMPORTANCE RELATIVE DES CRITERES D' EVALUATION



service de navette (Theodoric, 1985). Cette méthode, appelée aussi méthode d'entropie, est basée sur l'hypothèse qu'un critère est moins important si, pour tous les scénarios évalués, les valeurs de cet attribut sont dans un même ordre de grandeur. Ainsi un critère ayant des écarts importants de valeurs entre les scénarios aura un poids proportionnel à ce même écart. La faiblesse de cette approche est que, relativement à certains critères, même un faible écart peut être très significatif. Est-ce qu'un écart de 5 minutes en temps passé en véhicule est réellement plus important en terme de poids, qu'un écart de 2 minutes en temps d'attente? Indépendamment des écarts, le temps d'attente est, de façon générale, pondéré (consciemment ou non) par les usagers à une valeur plus grande que la valeur associée à un temps passé en véhicule. L'usage de cette méthode est donc limité, dans le contexte bien précis de l'évaluation de réseaux de transport.

Giuliano (1985) n'utilise pas de méthode pour déterminer les poids, mais plutôt une procédure pour les appliquer. En évaluant des scénarios à l'aide de "n" critères, Giuliano propose que chacun des intervenants crée un ou plusieurs vecteurs de poids "W", où $W = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$. Chaque vecteur représente un point de vue, les scénarios qui ne sont pas dominés (voir annexe pour la définition de dominé) pour l'ensemble des vecteurs poids

représentent ceux qui offrent le meilleur compromis. Janarthanan et Schneider (1987) utilisent cette méthode pour évaluer des scénarios de réseau de transport. Concernant ce dernier ouvrage, 8 vecteurs de poids, représentant le système de valeur et la perception des usagers, de l'opérateur, de la communauté et du gouvernement, ont permis de classer 5 scénarios à l'aide de 14 critères d'évaluation. Cette méthode permet de faire intervenir le point de vue de chacun des intervenants dans le processus de décision, mais aussi d'analyser entre autre l'influence de différentes perceptions de l'utilisateur sur le classement final des scénarios évalués. L'approche proposée est donc à retenir pour fin d'expérimentation.

La dernière approche de détermination de la valeur relative des critères est celle de Roy et al. (1986). Celle-ci fait appel au concept d'indice d'importance plutôt qu'à celui de poids. Le poids est habituellement associé au concept d'effet de substitution. Selon ce concept, le rapport de deux poids, w_1/w_2 , est directement proportionnel au nombre d'unités dont le critère c_1 doit être augmenté pour compenser exactement une diminution du critère c_2 d'une unité (Roy et al., 1986). Le rapport est donc indépendant des valeurs de référence c_1 et c_2 . Cependant l'indice d'importance n'est pas une composante d'un système de compensation. Son but est toujours de représenter

l'importance relative que le décideur désire accorder aux différents critères. Cet indice d'importance est établi uniquement sur la base d'un jugement qualitatif des préférences. Ce jugement est obtenu suite aux réponses données par les décideurs à deux types de questions :

-Est-ce que le critère c_n est de plus grande importance, de moindre importance, ou de même importance comparé au critère c_1 ?

-Est-ce que le groupe de critères c_7 et c_8 est de plus grande importance, de moindre importance, ou de même importance comparé au critère c_1 ?

Les réponses à une série de questions présentées dans un certains ordre (boîtes chinoises) permettent d'exprimer celles-ci en plusieurs relations d'inégalité. La résolution de ce système d'inégalité fournit un intervalle réduit de variation des indices d'importance. A leur tour les intervalles de variation permettent de générer un ensemble de vecteurs d'indice pouvant représenter différentes perceptions extrêmes ou intermédiaires. La complexité et le nombre de questions posées viennent toutefois limiter l'application de cette méthode.

Cette dernière approche constitue une réorientation par

rapport à l'application faite par Roy et Hugonnard (1982) pour la R.A.T.P. :

«Il est bien clair enfin qu'aucun raisonnement scientifique n'est de nature à asseoir une pondération des critères car celle-ci est en fait d'ordre politique.»

De façon à éviter la pondération, la R.A.T.P. et ses partenaires ont défini que seul 2 hypothèses d'ordre qualitative peuvent être considérées dans une évaluation multicritère :

-aucun des critères considérés ne doit jouer un rôle prépondérant, soit un unique critère par intervenant;

-chacun des critères est susceptible de modifier l'ordre de priorité qui, sans lui, découlerait des "n-1" autres.

Il s'agit donc d'une approche sans pondération. Toutefois, malgré les défauts inhérents à la pondération, celle-ci demeure une opération essentielle pour exprimer que certains critères ou objectifs ont une incidence plus grande relativement au choix final. Cette étape peut néanmoins être vérifiée par une analyse de sensibilité des résultats face à une perturbation de chacun des poids.

1.3.3 L'analyse de sensibilité des résultats

C'est principalement la pondération qui fait l'objet d'une attention spéciale concernant l'analyse de sensibilité des résultats. En effet les poids ou indices d'importance ont généralement une grande influence sur les résultats fournis par les méthodes d'analyses multicritères. Dans cette optique des méthodes comme Melchior (Leclercq, 1984) et Oreste (Roubens, 1982) font une analyse de sensibilité des résultats en se contentant de donner une relation de préférence binaire entre les éléments évalués (comparaison critère à critère). Bien que ce type d'information soit facile à obtenir de la part du décideur, il ne permet pas de moduler de manière très fine les écarts entre les différents critères.

Cependant la méthode d'analyse de sensibilité de Mareschal (1988) permet d'évaluer l'influence des poids sur les résultats finaux à l'aide d'intervalles de stabilité partielle et/ou totale. Il y a stabilité totale lorsqu'il y a absence de toutes modifications de la "relation de préférence" (annexe) après modification des poids. Par ailleurs, une fois que le classement est effectué, si le décideur analyse la stabilité des 5 premiers éléments d'une liste par rapport aux autres ou des 5 entre eux, il s'agit

alors d'une analyse de stabilité partielle. Ainsi tant que le poids d'un critère est maintenu dans son intervalle de stabilité, la méthode multicritère fournit un résultat inchangé par rapport aux poids initiaux. Somme toute, l'analyse de la sensibilité des résultats à l'aide des intervalles de stabilité est une étape de l'évaluation qui est simple mais qui peut devenir longue si l'on considère plusieurs combinaisons possibles de vecteurs de poids. L'information que l'on retire de l'analyse de sensibilité reste donc limitée par le choix de ces jeux de poids, et surtout par le temps que l'on accepte de consacrer à cet exercice.

1.3.4 L'incommensurabilité de la valeur des critères

Les différentes dimensions d'un problème s'expriment rarement à l'aide d'un système unique de référence, c'est-à-dire en utilisant une même unité de mesure. Quelles méthodes d'analyse permettent de comparer des coûts (valeur économique des ressources nécessaires à la réalisation d'un projet) et les effets à attendre de ce projet (bénéfices aux usagers et aux non-usagers du projet)?

Une approche connue consiste à ramener chacune des

dimensions dans une unité commune, à savoir une mesure monétaire, pensons à la méthode des prix de référence (Godard, 1981). Le problème est alors de mesurer l'incertitude liée à la fixation de la valeur associée à un critère ou à un objectif. Quelle est la valeur exacte du temps d'attente pour une classe socio-économique précise d'usagers du transport? La réponse n'est pas évidente.

Une deuxième approche face au traitement de valeurs exprimées dans différentes unités de mesure consiste à créer une échelle de comparabilité des mesures par une normalisation des valeurs (Giuliano 1985, Janarthanan et Schneider 1987). La procédure de normalisation transforme chaque mesure de manière à ce que chacune des valeurs des critères ou des objectifs se situe entre 0 et 1. Selon cette méthode une valeur élevée est toujours meilleure, qu'elle soit à minimiser ou à maximiser.

Cette deuxième approche est utilisée dans la majorité des méthodes d'analyse multicritère, bien que la formulation relative à la procédure de normalisation diffère.

1.4 L'application de l'approche multiobjectif au domaine des transports

Comparativement à l'analyse multicritère, l'approche multiobjectif est utilisée dans plusieurs champs du domaine des transports, la figure 1.2 en témoigne. Cependant l'utilisation au champ spécifique de l'évaluation d'un réseau est limitée. Si l'application des méthodes multicritère en transport se fait relativement à l'évaluation de projet, celle de l'approche multiobjectif est essentiellement utilisée à la génération de réseaux. Bien que l'intérêt ici soit l'étape de l'évaluation, l'étape précédente qui est la génération ne peut être mise de côté; en fait les deux peuvent être intégrées. L'intérêt premier concernant l'approche multiobjectif est d'identifier quels objectifs ont été utilisés dans la génération de réseaux. Cette information peut servir d'entrant à l'évaluation, plus spécifiquement à la détermination des critères. La figure 1.3 rend compte des approches multiobjectif utilisées spécifiquement en conception de réseau, ainsi que des objectifs fixés.

FIGURE 1.2 APPLICATIONS DE LA PROGRAMMATION MULTIOBJECTIF EN TRANSPORT

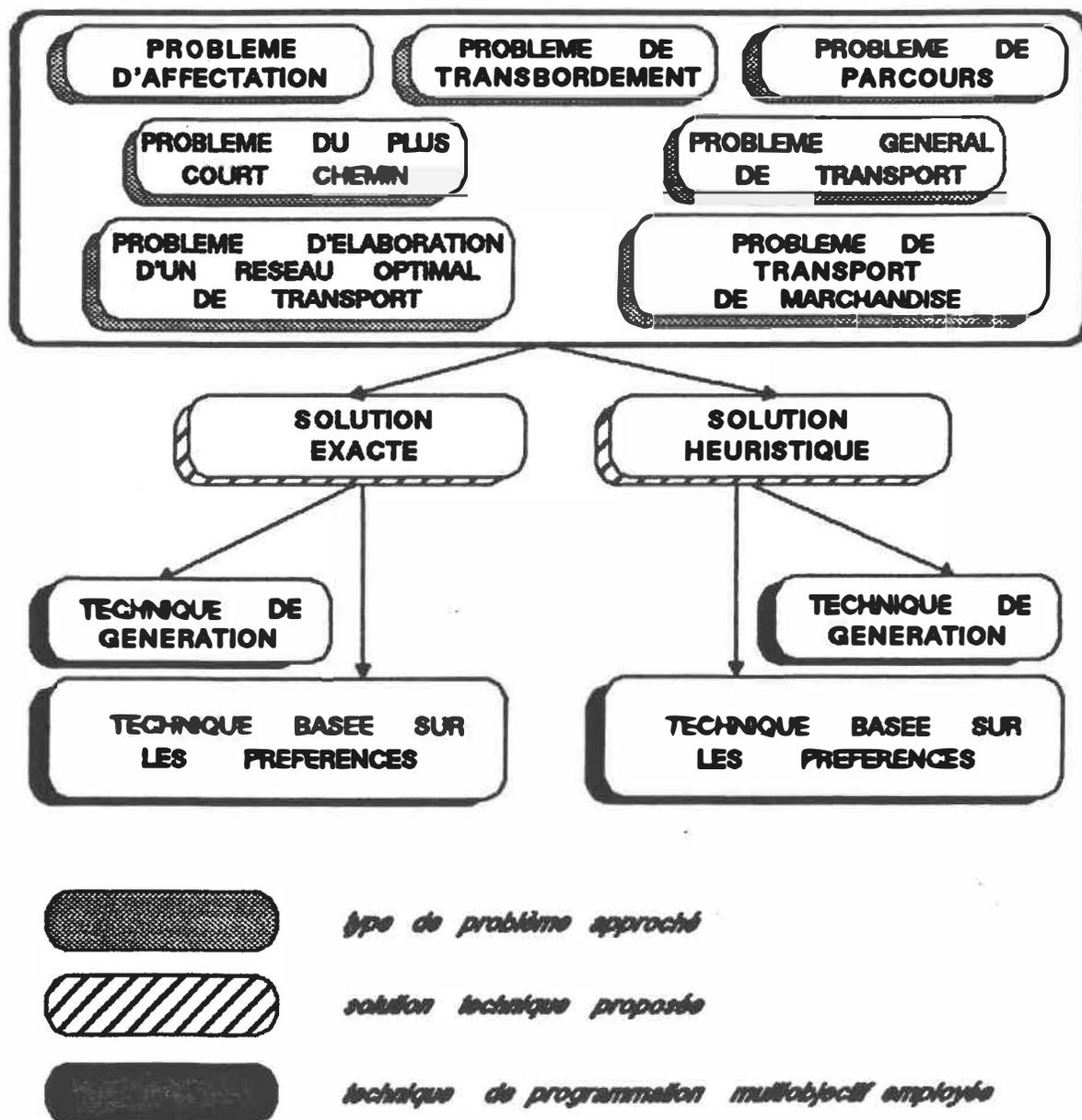
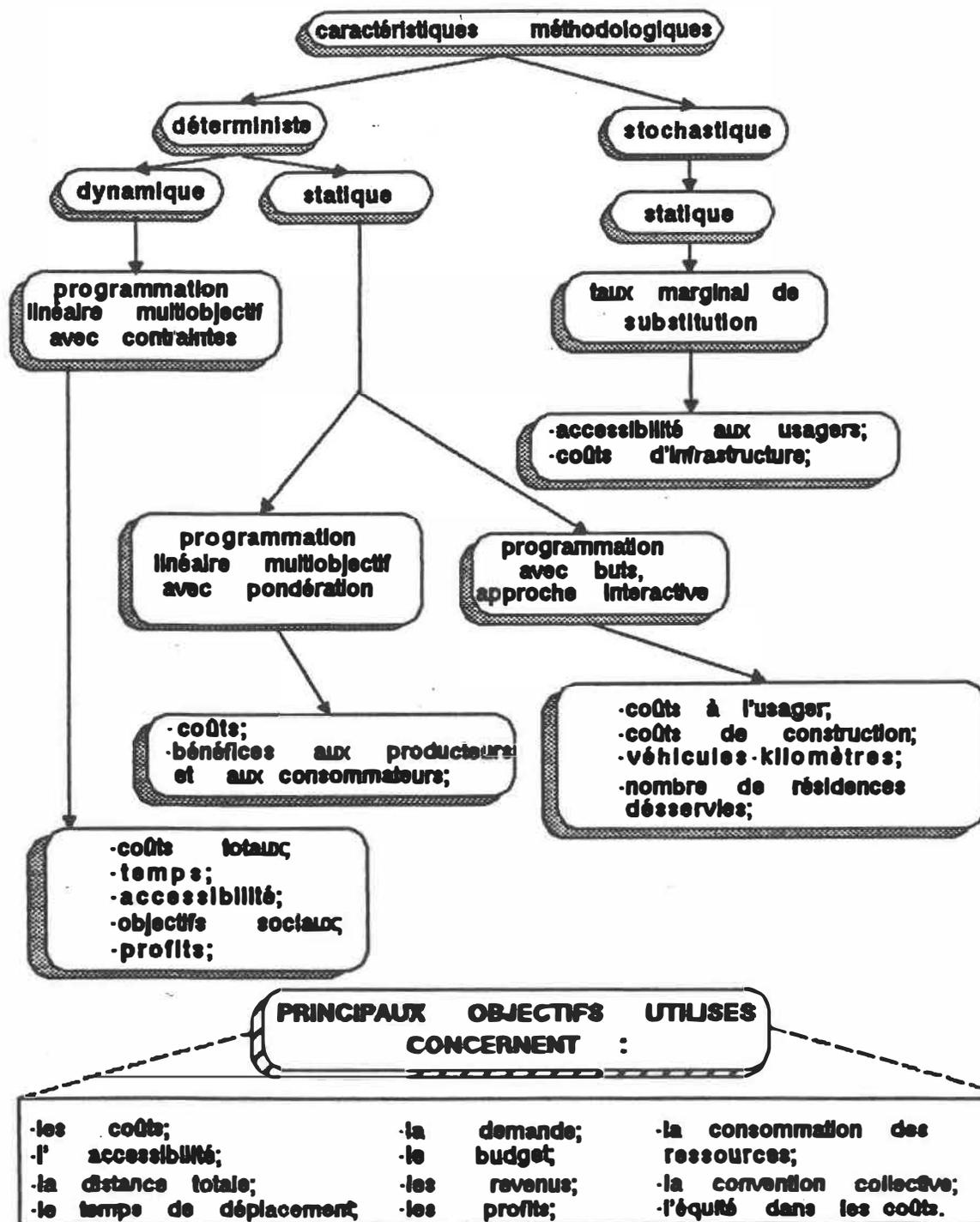


FIGURE 1.3

APPROCHES MULTIOBJECTIF EN CONCEPTION DE RESEAU



1.5-Commentaires

La revue de la littérature a permis de constater que les méthodes de programmation multiobjectif sont plutôt utilisées à la génération de scénarios de réseau, tandis que peu de méthodes d'analyse multicritère sont utilisées à l'évaluation des réseaux. De manière générale, les principales méthodes sont :

-ELECTRE (I à IV);

-PROMETHEE : Preference Ranking Organization METHOD for Enrichment Evaluations, pour méthode de classement par l'organisation des préférences en vue d'un enrichissement de l'évaluation;

-STEM : STEP Method, méthode par incrément;

-TOPSIS : the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, technique de classement des préférences selon la similarité à une solution idéale.

L'unique méthode utilisée en évaluation de réseau de transport est l'analyse de concordance et de discordance. Cette analyse constitue la base sur laquelle repose la

série de méthodes ELECTRE. Cependant, parmi l'ensemble des méthodes présentées, une seule attire l'attention pour de multiples raisons, il s'agit de la méthode PROMETHEE, présentée en détail au prochain chapitre. En fait cette méthode:

- ne nécessite pas la détermination d'une importante quantité de paramètres comparativement aux autres méthodes;
- utilise des paramètres nécessaires à la modélisation des préférences qui ont une signification économique bien précise;
- intègre une procédure d'analyse de sensibilité des résultats pour un ou plusieurs critères;
- permet l'utilisation de la méthode GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Aid, pour une représentation géométrique du problème multicritère de décision, voir annexe).

La méthode PROMETHEE est proposée pour expérimenter l'application de l'analyse multicritère au domaine spécifique de l'évaluation de réseaux de transport.

Une des phases délicates de l'application de toute approche multidimensionnelle est la détermination de l'importance relative des critères. Dans certains cas précis, une pondération adéquate des critères peut être faite lorsque ceux-ci sont exprimés dans une unité commune, à savoir une unité monétaire pour exprimer les coûts. Cependant dans d'autres cas, un vecteur de poids ne peut être représentatif d'une diversité de perceptions face à la valeur d'un ou de plusieurs critères. Ainsi le vecteur de poids relatif aux critères : temps d'accès, d'attente, en véhicule et de transfert, n'aura certainement pas la même valeur selon :

- la classe socio-économique de l'utilisateur ;
- l'heure du déplacement ;
- que le déplacement est effectué un jour de semaine ou un jour de fin de semaine, etc.

Devant cette diversité et face à la complexité associée à la détermination de poids précis, l'approche proposée consiste à estimer plusieurs vecteurs de poids qui soient les plus représentatifs possibles de différentes perceptions des usagers face à la qualité d'un service de transport. Le décideur se voit donc présenter différents classements de réseaux, répondant à de multiples hypothèses quant à la perception des usagers, ou relativement à

certaines classes spécifiques d'usagers. La même approche peut être utilisée concernant différentes hypothèses relatives aux poids associés aux coûts.

L'utilisation de plusieurs vecteurs de poids vient toutefois complexifier une étape importante et déjà délicate concernant l'interprétation des résultats, à savoir l'analyse de sensibilité du classement des réseaux. Relativement à ce sujet, la littérature est discrète. Seule la notion d'intervalle de stabilité des poids associée à un ou plusieurs critère(s) est avancée pour répondre à la problématique de l'analyse de sensibilité. L'utilisation de cette procédure est envisagée dans le cadre de l'expérimentation de la méthode FROMETHEE pour l'ensemble des paramètres utilisés.

Les différents concepts méthodologiques brièvement présentés dans ce chapitre constituent la base méthodologique sur laquelle se fonde l'expérimentation de l'analyse multicritère au domaine de l'évaluation de réseaux de transport. La méthodologie utilisée est le sujet du prochain chapitre.

CHAPITRE II

METHODOLOGIE

L'analyse multicritère est proposée pour évaluer un ensemble de réseaux de transport afin d'identifier parmi eux ceux qui présentent un meilleur compromis face à des objectifs divergents. A cette fin la méthode PROMETHEE a été choisie sur la base de ses caractéristiques inhérentes (section 1.5). Celle-ci est présentée en détail dans ce chapitre avec l'approche utilisée pour déterminer les différents paramètres nécessaires à son application. L'utilisation de la méthode PROMETHEE vise 2 objectifs :

- identifier à partir de l'évaluation d'un ensemble de réseaux de transport ceux qui sont les plus performants, c'est-à-dire ceux qui offrent un bon rapport gains/pertes (bénéfices des usagers/coûts d'opération de l'exploitant) en comparaison à un ou à plusieurs réseaux de référence;

- selon les résultats de la précédente utilisation de la méthode, classer les réseaux retenus selon l'ordre suivant: en allant du meilleur au pire des compromis.

Mais d'abord il faut générer les éléments à évaluer. La conception d'un réseau de transport collectif urbain

comporte plusieurs étapes, parmi celles-ci mentionnons principalement la génération et l'évaluation de scénarios. Bien que l'évaluation de scénarios soit ici le point d'intérêt, l'étape de la génération des scénarios est brièvement présentée pour préciser la provenance des données utilisées. La méthodologie est composée essentiellement des étapes suivantes :

- la production des données;
- le choix des objectifs et des critères d'évaluation;
- la pondération des objectifs;
- la pondération des critères d'évaluation;
- la modélisation des préférences;
- l'analyse multicritère à l'aide de la méthode PROMETHEE;
- l'analyse de sensibilité des résultats.

L'exécution de l'analyse multicritère et de l'analyse de sensibilité des résultats sera facilitée par l'usage du chiffrier électronique LOTUS. Les résultats attendus après l'exécution de ces étapes sont le sujet de la dernière section du chapitre.

2.1 La production des données

Les données sont produites par l'entremise d'une procédure mathématique de modélisation. Cette procédure influence l'interprétation que l'on peut faire des résultats obtenus. Ainsi, de manière à comprendre la provenance et la signification de ces données, les deux prochaines sous-sections présentent respectivement ces sujets.

2.1.1 La génération des scénarios de réseau

La multidimensionnalité liée à la génération d'un réseau de transport collectif ne fait pas de doute. Cependant est-il possible de prendre en considération simultanément les principales dimensions de l'opération d'un réseau, à savoir:

- les besoins de déplacements de la population, spécialement ceux des usagers;
- certaines contraintes quant:
 - aux coûts d'opération;
 - à l'utilisation des infrastructures de transport

existantes (ligne de métro, réseau de rues et/ou de routes, etc.)

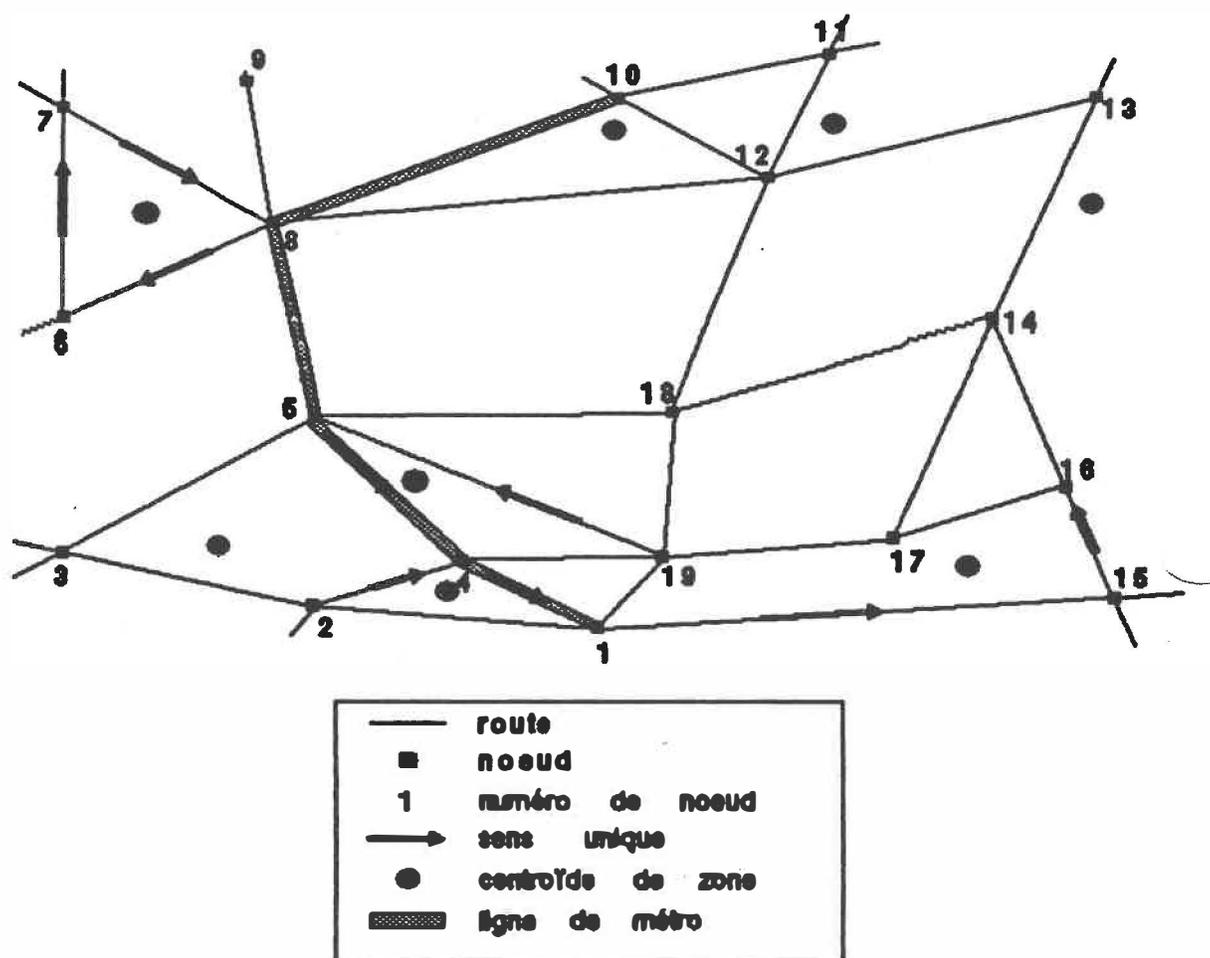
-au niveau du service à offrir;

-au financement de l'exploitation;

La simulation à l'aide du modèles MADITUC (Chapleau et al., 1982) facilite l'intégration de ces composantes et l'analyse de leurs interactions. Deux de ces composantes font l'objet de simulations, d'une part le niveau de service offert par l'exploitant (ou la qualité de service du point de vue des usagers), et d'autre part les coûts d'opération associés à l'exploitation du service. Cependant le traitement considérable de données associé à la modélisation d'un réseau de grandeur "réaliste" ne justifie pas ici la génération de tels réseaux. Ainsi un réseau imaginaire et une communauté fictive sont utilisés pour modéliser une offre de service, une demande de transport, et l'interaction entre ces deux composantes du système. Le territoire est divisé en 8 zones reliées entre elles par un système routier de 31 liens décrit à l'aide de 19 noeuds. Chaque zone est représentée sur le territoire par un centroïde, c'est-à-dire une coordonnée territoriale d'où virtuellement tous les usagers du transport quittent la zone, et/ou, tous ceux qui proviennent des autres zones arrivent. La figure 2.1 présente la position relative de ces centroïdes de zones, la géométrie du réseau de rues,

ant.

FIGURE 2.1 GEOMETRIE DU RESEAU ROUTIER



ainsi que la localisation d'une ligne de métro.

Sur la base de ces informations, des scénarios de réseau sont générés en considérant les contraintes suivantes :

- la géométrie du réseau routier;
- l'emplacement de la ligne de métro;
- la production d'un niveau de service minimal aux usagers, à savoir:
 - un intervalle maximal de 15 minutes;
 - une capacité nominale des autobus de 50 passagers;
 - une vitesse moyenne du métro de 50 Km/h;
 - une vitesse moyenne des véhicules sur le réseau routier de 30 Km/h;
- l'obligation de desservir tous les noeuds du réseau;
- la considération d'une certaine demande de transport, inélastique à court terme tant au niveau du nombre d'usagers qu'au niveau de l'origine et de la destination des déplacements effectués.

Cette demande de transport est exprimée par le nombre d'usagers qui se déplacent pendant la période de pointe du matin, soit entre 7 et 9 heures inclusivement. En considérant ces différentes contraintes, plusieurs

scénarios de réseau sont créés. Ces scénarios doivent offrir la meilleure qualité de service possible aux usagers à un coût moindre pour l'exploitant.

60
+
md

Dans ce contexte, le planificateur prend essentiellement trois décisions pour concevoir un réseau: à savoir, la technologie à utiliser (autobus et métro ici), la géométrie à donner au réseau (où doivent passer les lignes ?), ainsi que le niveau de service à offrir.

L'utilisation du modèle MADITUC permet d'identifier les conséquences de ces décisions à la fois pour l'exploitant et pour les usagers. Construit en plusieurs modules spécialisés, deux modules sont utilisés pour faciliter la génération de plusieurs scénarios. Le module "réseau" du modèle MADITUC permet la codification du réseau de transport à partir des coordonnées (x, y) des noeuds. Cette codification est utilisée pour définir la géométrie du réseau en décrivant chacune des lignes de transport par une suite de noeuds. Le noeud désigne une extrémité de ligne, un point d'embarquement ou de débarquement des usagers, une intersection ou toutes autres références territoriales. A la description géométrique de chacune des lignes s'ajoute un ensemble de variables qui décrivent le niveau de service qui caractérise la ligne, à savoir, pour chaque identificateur (# et nom de ligne):

- la distance à l'aller; -la distance au retour;
- la vitesse à l'aller; -la vitesse au retour;
- l'intervalle de service; -l'heure de début et de fin
- le type de ligne (capacité); du service;
- le numéro de la division (le réseau est divisé en plusieurs parties, selon la localisation des hangars d'autobus).

L'exécution du module "réseau" permet de créer une série de fichiers de "sortie" (au choix) fournissant une multitude d'indicateurs de performance et de statistiques sur le service offert. Le module "réseau" produit également le fichier XRES qui devient l'entrant au module "chargement". Ce module "chargement", après lecture des fichiers XRES et de la table d'accès, affecte la demande de transport sur le réseau codifié. Les résultats obtenus par l'exécution du module chargement serviront à l'évaluation des scénarios de réseau. Ces indicateurs de performance sont explicités à la sous-section suivante.

2.1.2 La description des données

L'affectation d'une demande de transport sur un réseau à l'aide de certains modules du modèle MADITUC permet de générer un ensemble d'indicateurs de performance utile pour l'évaluation de réseaux. Voici une liste partielle des indicateurs de performance fournie par le module "chargement" du modèle MADITUC à partir de laquelle les critères d'évaluation seront choisis. Tous sont établis pour une période de pointe du matin d'une durée de deux heures :

- le nombre de lignes: le nombre total de lignes de transport formant le réseau (métro compris);

- le nombre de véhicules requis: le nombre maximum de véhicules nécessaires pour offrir le service pendant la période concernée;

- la distance réelle: la somme des longueurs de chacune des lignes de transport (aller-retour);

- le nombre de véhicules-kilomètres: la distance totale parcourue par l'ensemble des véhicules pendant la période concernée;

- le nombre de véhicules-heures: le nombre total d'heures de service effectuées à l'aide de l'ensemble des véhicules pendant la période concernée;
- le nombre de véhicules-heures productifs/effectifs: le nombre total d'heures de service effectuées à l'aide de l'ensemble des véhicules/le nombre total d'heures de service incluant les délais pour l'ensemble des véhicules;
- le temps moyen en véhicule; la somme des durées de déplacement en véhicule de chacun des usagers/le nombre total d'usagers;
- le temps moyen d'attente: la somme des durées entre l'arrivée au point d'entrée sur le réseau (arrêt) et l'arrivée du véhicule, de chacun des usagers + la somme des durées d'attente pour chacun des usagers qui transfert à une autre ligne/le nombre total d'usagers;
- le temps moyen d'entrée-sortie: la somme suivante pour chacun des usagers divisée par le nombre total d'usagers: le temps de marche entre le point de départ du déplacement et le point d'entrée sur le réseau (arrêt) + le temps de marche entre l'arrêt final (la sortie du véhicule) et la destination;

- le temps moyen d'un voyage: la somme des trois temps précédents;
- la distance moyenne en véhicule: la distance totale parcourue en véhicule par chacun des usagers/le nombre total d'usagers;
- le nombre moyen de sections utilisées: la somme du nombre total de lignes utilisées par chacun des usagers/le nombre total d'usagers;
- le facteur d'utilisation temps: la somme du temps d'occupation des sièges/la somme du temps total de disponibilité des sièges offerts.

Chacun de ces indicateurs de performance peut être utilisé pour évaluer des réseaux.

Le modèle MADITUC a été utilisé pour générer plusieurs scénarios de réseau à partir des informations de la sous-section précédente. Le tableau 2.1 en contient quelques-uns, classés selon le nombre de véhicules requis. Il s'agit d'un échantillon de l'ensemble des réseaux qui peuvent être conçus à l'aide du modèle. En effet

tableau 2.1 synthèse des résultats sur les réseaux générés

INDICATEURS DE PERFORMANCE RELATIFS A L'EXPLOITANT															
# de scé.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
nb.lignes	10	10	9	10	10	8	11	10	11	9	10	9	7	9	7
nb. bus	49	56	58	58	59	59	60	61	61	64	64	75	79	79	98
distance réelle	202.2	196.2	192.2	208.4	190	188	187.0	200.8	217.4	213.1	225.7	241.7	---	217.8	219.0
véh-km (régime transitoire)	2886	3234	3442	3344	3194	5294	3239	3500	3673	3614	3842	4450	4372	4748	5550
véh-hres (régime transitoire)	105.5	119.2	122.5	123.7	122.0	188.0	127.1	129.4	129.4	135.7	135.7	158.3	156.0	165.9	203.9
véh-hres productifs/effectifs	0.85	0.85	0.89	0.85	0.89	0.95	0.81	0.85	0.90	---	0.90	0.90	0.94	0.86	0.88
INDICATEURS DE PERFORMANCE RELATIFS AUX USAGERS															
temps moyen d'un voyage	59.16	59.85	60.92	59.70	57.00	55.11	59.22	59.60	54.46	58.15	54.09	53.05	60.47	52.90	60.35
temps moyen en véhicule	18.49	20.22	18.93	20.10	17.08	15.56	18.46	20.82	18.17	17.97	18.23	18.32	21.33	18.58	21.40
temps moyen d'attente	10.90	12.23	11.96	12.01	12.23	11.29	14.43	12.39	10.29	13.35	9.72	8.54	12.53	7.84	12.06
temps moyen d'entrée-sortie sur le réseau	29.76	27.40	30.03	27.59	27.69	26.26	26.32	26.38	26.01	26.83	26.14	26.18	26.60	26.49	26.89
distance moyenne en véhicule	12.55	13.41	12.23	13.35	10.62	10.92	11.68	13.72	10.90	11.07	10.79	10.86	13.04	11.19	13.06
nombre moyen de sections utilisées	1.27	1.44	1.24	1.43	1.28	1.33	1.53	1.49	1.24	1.37	1.18	1.03	1.49	1.13	1.43
nombre d'usagers du métro	9100	9100	6587	9100	6197	5371	7358	9100	5089	6206	4373	4473	6520	5224	6507
facteur d'utilisation (temps)	0.51	0.52	0.49	0.51	0.47	0.33	0.53	0.51	0.45	0.47	0.44	0.40	0.48	0.25	0.41

Handwritten notes and calculations:

- 122.6
- 6736
- 71414
- 70366
- 7731

Handwritten numbers at the bottom right:

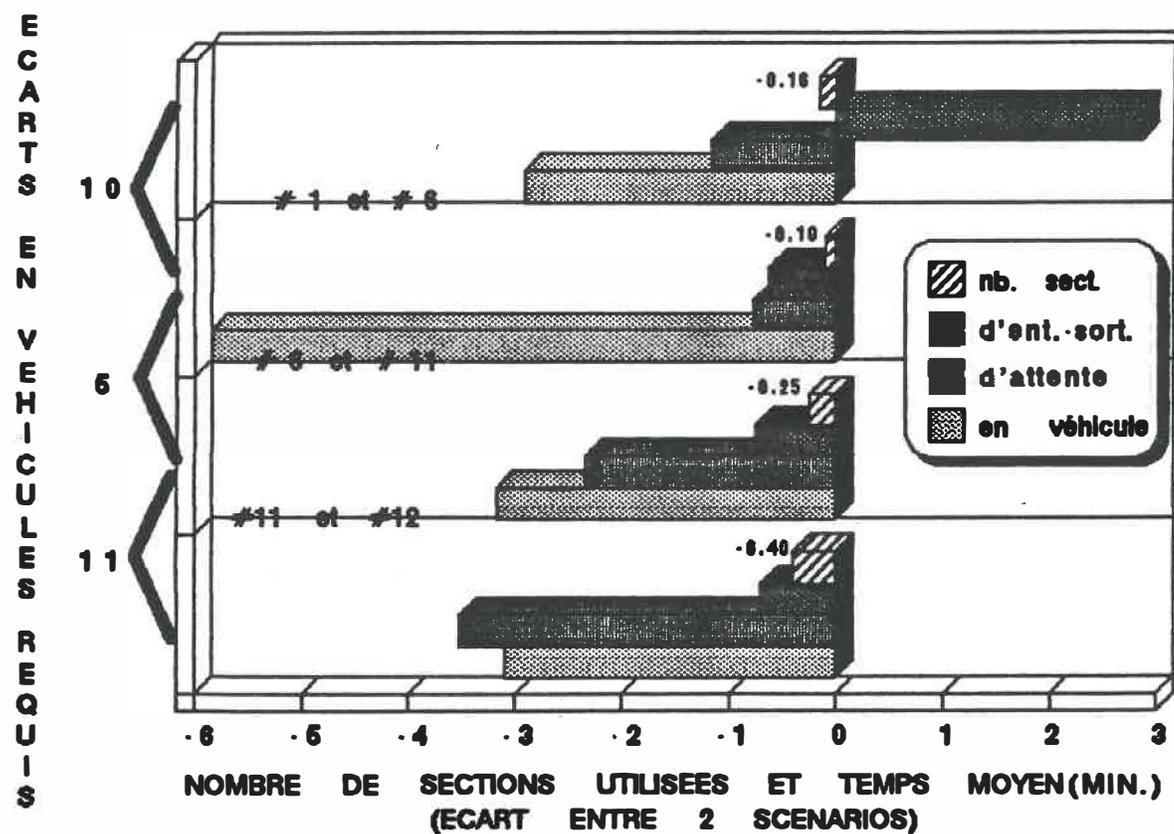
- 75822
- 75307

l'identification de l'ensemble des combinaisons possibles de géométrie de réseau et de niveau de service pourrait être faite à l'aide du modèle MADITUC mais la consommation de ressources nécessaires ne serait pas forcément justifiée.

Concernant spécifiquement les données, chacun des réseaux générés à l'aide de MADITUC est caractérisé par un vecteur ligne (ou colonne) composé d'indicateurs de performance. Un numéro identificateur est associé à chacun de ces vecteurs pour bien différencier les réseaux. Ces numéros d'identification ainsi que les valeurs contenues dans les vecteurs constituent les données de base nécessaires à l'application de la méthode multicritère.

L'examen des vecteurs d'indicateurs de performance permet d'identifier deux de leurs caractéristiques; d'une part leur nature discrète, et d'autre part leur nature compromise. Par exemple, en considérant plusieurs vecteurs donnés, la comparaison du nombre de véhicules requis aux différents temps moyen caractérisant la qualité du service fait ressortir cette nature compromise des vecteurs d'indicateurs, donc des réseaux mêmes. Ainsi selon le graphique 2.1 aucun des scénarios présentés n'en surclasse un autre de façon systématique en considérant les indicateurs choisis.

graphique 2.1 NATURE COMPROMISSOIRE DES SCENARIOS DE RESEAU



C'est sur la base de l'ensemble des indicateurs de performance présentés sur le tableau 2.1 que s'effectue le choix des critères d'évaluation nécessaires à la méthode d'analyse multicritère, cette sélection est faite à la section suivante, avec la sélection des objectifs.

2.2 Le choix des objectifs et des critères d'évaluation

Parmi l'ensemble d'indicateurs de performance fourni par les résultats de l'exécution du module "chargement", deux classes se distinguent: d'abord les indicateurs relatifs aux ressources consommées pour l'opération d'un réseau, ensuite les indicateurs qui expriment la qualité du service offert aux usagers, ou du point de vue de l'exploitant, le niveau de service.

A chacune de ces classes d'indicateurs de performance est associée un objectif d'évaluation des scénarios de réseau, à savoir :

- MINIMISER LES COUTS D'OPERATION POUR L'EXPLOITANT
- MAXIMISER LES BENEFICES AUX USAGERS

Ces deux objectifs sont divergents ou du moins partiellement contradictoires puisqu'ils s'établissent sur

un arrangement d'indicateurs de performance dans lequel se font des concessions mutuelles. Ainsi selon cette organisation "objectifs-indicateurs", il n'existe donc pas de solution quant à l'identification d'un réseau optimale, mais plutôt un ensemble de solutions de compromis qui est intermédiaire à deux solutions extrêmes, chacune correspondant respectivement à l'un des objectifs choisis.

Les objectifs sont évalués à l'aide de certains indicateurs de performance fournis par le module "chargement" du modèle MADITUC. Ces indicateurs sont aussi appelés "critères d'évaluation" selon le jargon associé aux méthodes d'analyse multicritère. Ils sont choisis sur la base de leur disponibilité et de leur pertinence à répondre aux objectifs fixés, ce sont :

pour l'exploitant

- le nombre de véhicules requis;
- le nombre de véhicules-heures;
- le nombre de véhicules-kilomètres;

pour les usagers:

- le temps moyen en véhicule;
- le temps moyen d'attente;

- le temps moyen d'entrée-sortie sur le réseau;
- le nombre moyen de sections utilisées.

Les critères d'évaluation relatifs à la qualité de service sont utilisés sous leur forme la plus simple, c'est-à-dire que chacun représente une composante de l'élément à évaluer. Cependant les 3 autres critères d'évaluation sont utilisés à la formation d'un unique critère agrégé.

Associée chacun à un coût unitaire, la valeur de ces 3 critères d'évaluation permet de calculer un indicateur de performance représentant la majorité des coûts variables d'opération d'un réseau. Cette opération d'unification amène une base de comparaison plus claire concernant la différenciation des réseaux. Nous verrons que selon la méthode PROMETHEE (section 2.6.2) ce nouveau critère d'évaluation, ou indicateur de performance, est établi à partir de l'écart que prend la valeur de chacun des critères d'évaluation. Cet écart, pour un critère à la fois, représente la variation de la valeur de ce même critère entre les deux scénarios comparés. Lorsque la différence est en faveur du scénario "a", la valeur de la variation est affectée à ce scénario et un écart de "0" est attribué au réseau "b", et vice-versa. Ainsi pour comparer les scénarios 2 à 2, un écart est déterminé pour chacun des

critères d'évaluation. Il importe cependant de déterminer avec précision la valeur de chacun des coûts unitaires nécessaire au calcul du "coûts d'opération" d'un réseau.

La détermination des coûts unitaires est grandement influencée par l'approche de Stopher et al. (1987) concernant les modèles d'allocation des coûts. Ces auteurs déterminent des coûts unitaires à partir de trois types de dépenses segmentées : les dépenses de type fixe, direct ou par "quantité déterminée" (quantum). Ainsi concernant le critère "nombre de véhicules requis en période de pointe", les dépenses associées à ce critère comportent des coûts "directs" (équipement d'entretien, radio, etc), des coûts "fixes" (administration) ainsi que des coûts dits "par quantités déterminées" (par exemple un pointeur par 31.5 véhicules, des dépenses d'entretien électrique par 47 véhicules, etc). Pour calculer les coûts d'opération nécessaires à l'évaluation des réseaux il est donc possible de déterminer une équation qui permet d'identifier les coûts relatifs à un écart donné. Les étapes suivantes permettent de déterminer cette équation pour chacun des critères concernés afin de générer le nouveau critère "coûts d'opération":

-à partir du tableau 2.1, la détermination du plus grand écart pour chacun des critères nécessaires;

- selon cet écart, l'identification des coûts selon l'ouvrage de Stopher et al.(1987) permettant de différencier 2 scénarios;
- pour chacun des écarts, la détermination des coûts engendrés, soit la composition de l'équation cherchée.

La considération des coûts unitaires présentés par Stopher et al. (1987) permet de différencier les scénarios 2 à 2. Ainsi selon le tableau 2.1 nous avons pour deux scénarios donnés un écart maximum de 49 véhicules requis pour opérer en période de pointe, dans ce cas précis les coûts présentés sur le tableau 2.2 s'appliquent:

Toujours selon le tableau 2.2, un écart entre deux scénarios de 5 véhicules signifie pour l'un d'eux une diminution de coût d'environ 377\$ (5 unités * 75.50\$), alors qu'un écart de 6 (5.8) véhicules entraîne une diminution de coût de 32398\$, soit 31945\$ (coût quantum) + 453\$ (coût direct, 6 unités * 75.4907\$). Donc à partir des informations du tableau 2.2, l'équation suivante est établie :

Nombre entier nb véh

$$VE(x/5.8)*31945\$ + VE(x/31.5)*42645\$ + VE(x/33)*71950\$\$$$

$$+ VE(x/47)*39927\$ + 43716\$ * x$$

nb véh

où VE signifie "valeur entière" (non-arrondie) et "x" est l'écart mesuré pour le critère concerné.

tableau 2.2 Coûts relatifs au nombre de véhicules requis

type de coût	le pas	unité par pas(coût)	niveau	source
direct	1.0	75.5	sys.*	équipement d'entretien
fixe	1.0	43640.7	sys.	administration
quantum	5.8	31945.0	div.*	division d'entretien
quantum	31.5	42645.0	sys.	pointeurs
quantum	33.0	31771.0	div.	entretien - nettoyage
quantum	33.1	40179.0	div.	service - fauteuil roulant
quantum	47.0	39927.0	sys.	entretien - électricité

* sys. : coûts au niveau du système;

* div. : coûts au niveau de la division.

SOURCE : Stophier et al. (1987), TRR 1108, page 35

L'approche est quelque peu différente concernant les 2 autres critères d'évaluation puisque les coûts unitaires qui leur correspondent sont calculés pour une période d'un an. Par conséquent la valeur des écarts identifiée par paire de scénarios est ajustée temporellement. Cet ajustement se fonde sur les deux hypothèses suivantes:

-1^{re}-hypothèse : une journée contient deux périodes de pointe par jour, de longueur égale;

-2^{ème}-hypothèse : une année contient 250 jours avec des

périodes de pointe.

Sur la base de ces hypothèses les écarts des critères "nombre de véhicules-heures" et "nombre de véhicules-kilomètres" sont ajustés à l'aide du facteur multiplicateur 500 (2 périodes * 250 jours). Si l'on considère le critère "nombre de véhicules-heures", les coûts unitaires présentés sur le tableau 2.3 permettent de composer la seconde équation. Relativement à un écart maximum de 49 véhicules-heures identifié à l'aide du tableau 2.1, l'équation suivante est déduite:

$$VE(x/853) * 21064\$ + 0.5101\$ * x$$

Veh.

tableau 2.3 Coûts relatifs au nombre de véhicules-heures

type de coût	le pas	unité par pas (coût)	niveau	source
fixe	1.0	0.1696	sys.*	service général
fixe	1.0	0.3326	sys.	service transport-salaire
fixe	1.0	0.0079	sys.	autres dépenses
quantum	853.0	19383.0	div.*	dépenses d'opération
quantum	853.0	1681.0	div.	bénéfices sociaux

* sys. : coûts au niveau du système;

* div. : coûts au niveau de la division.

SOURCE : Stopher et al. (1987), TRR 1108, page 35

La dernière équation à composer et qui est nécessaire pour le calcul des coûts d'opération concerne le critère "nombre de véhicules-kilomètres". A la manière du critère précédent, le nombre de véhicules-kilomètres est ajusté temporellement de façon à devenir compatible avec les coûts fournis par Stopher et al. (1987). Le plus important écart concernant ce critère est de 2664 véhicules-kilomètres selon le tableau 2.1, avant l'ajustement temporel. Selon ce maximum, le tableau 2.4 présente les coûts relatifs au nombre de véhicules-kilomètres et nous permet de déduire l'équation suivante:

$$VE(x/69332) * 3710\$ + \overset{\text{veh.km}}{VE(x/107465)} * 3055\$ + \\ VE(x/178810) * 40186\$ + 0.5069\$ * x$$

tableau 2.4 Coûts relatifs au nombre de véhicules-kilomètres

type de coût	le pas	unité par pas(coût)	niveau	source
direct	1.0	0.2366	sys.*	dépenses d'entretien
direct	1.0	0.2703	sys.	essences et taxes
quantum	107465	524	sys.	dommages à la propriété
quantum	107465	2531	sys.	dommages à la propriété
quantum	69332	3710	div.*	bénéfices sociaux
quantum	178810	40186	sys.	réparations courantes

* sys. : coûts au niveau du système;

* div. : coûts au niveau de la division.

SOURCE : Stopher et al. (1987), TRR 1108, page 35

En résumé, lors de la comparaison de 2 scénarios, un écart est calculé à partir de la valeur de chacun des critères d'évaluation. Les écarts calculés sont ensuite appliqués à leurs équations respectives pour permettre de déduire les coûts. La somme de ces coûts détermine la valeur des coûts d'opération à assumer en plus ou en moins selon le réseau choisi parmi les deux évalués. Cette somme représente l'unique critère d'évaluation utilisé pour vérifier dans quelle mesure l'objectif de l'exploitant est atteint.

Cependant face à l'utilisation de ces critères d'évaluation on doit faire 2 remarques, d'abord l'incommensurabilité entre les indicateurs des classes (par objectif) entre elles et entre certains indicateurs de chacune des classes entre eux, ensuite l'impossibilité de dissocier les deux composantes du critère "temps moyen d'attente".

L'incommensurabilité des indicateurs est évidente entre les classes "ressources consommées" et "qualité de service". Cependant, à l'intérieur de la classe qualité de service, elle existe entre le critère "temps moyen de voyage", ou entre les variables de temps que celui-ci intègre, et le critère "nombre moyen de sections utilisées".

Ainsi, relativement à l'indicateur "temps moyen d'attente", celui-ci intègre à la fois le temps moyen d'attente lorsque les usagers effectuent une ou plusieurs correspondance(s) et le temps moyen d'attente lorsque les usagers n'effectuent aucun transfert. Or, concernant la pondération des critères d'évaluation, il n'est pas évident que ces deux composantes aient le même niveau d'importance aux yeux des usagers. Cependant, à défaut de pouvoir différencier la valeur des 2 temps d'attente, ceux-ci seront considérés comme étant de niveau d'importance égal. La détermination de l'importance relative (poids) de chacun des objectifs et de chacun des critères fait l'objet de la prochaine section.

2.3 La pondération des objectifs

En transport collectif urbain les exigences des usagers ne sont certes pas toujours compatibles avec les contraintes financières que connaissent les exploitants. Par conséquent affecter un poids à chacun des objectifs d'évaluation est une tâche délicate, spécialement lorsque celle-ci implique que les intérêts des intervenants sont pratiquement inconciliables si l'on désire une solution optimale pour chacun d'eux. Face à ceci la pondération ne

doit pas devenir un instrument pour imposer un système de valeur, aussi l'approche proposée concernant les objectifs est d'assumer qu'aucun de ceux-ci ne joue un rôle prédominant dans l'évaluation. C'est-à-dire que chacun des objectifs peut modifier le classement des réseaux dans le processus d'évaluation. Cette pondération est établie en affectant un poids de 0.5 à chacun des 2 objectifs, de façon à obtenir une somme totale des poids qui soit égale à 1.0 (par convention). Cependant la réalisation de la pondération des objectifs s'opère par l'entremise de celle des critères. La section suivante couvre ce sujet.

2.4 La pondération des critères d'évaluation

La pondération des critères d'évaluation est une étape déterminante de l'analyse multicritère, aussi une seule faiblesse introduit une composante subjective dans ce processus, à savoir une faible compréhension de la perception de la qualité du service par la clientèle du transport urbain collectif. Une modélisation de cette perception serait utile pour l'affectation des poids aux critères associés à la qualité de service.

La sous-section suivante aborde la pondération des critères relatifs à l'évaluation de l'objectif de

l'exploitant tandis que la partie qui suit présente une approche de modélisation de la perception d'une clientèle à l'égard de la qualité d'un service de transport urbain collectif.

2.4.1 La pondération du critère relatif à l'exploitant

Tel que mentionné à la section 2.3 ci-haut, un poids de 0.5 est attribué à chacun des objectifs. Mais un seul critère est représentatif de l'objectif relatif à l'exploitant, par conséquent le poids de ce critère est équivalent à celui de l'objectif.

2.4.2 La pondération des critères relatifs aux usagers

Quatre critères ont été choisis pour évaluer l'objectif "maximiser les bénéfices aux usagers", à savoir, le temps moyen d'entrée-sortie sur le réseau (TES), le temps moyen d'attente (TA), le temps moyen en véhicule (TV), ainsi que le nombre moyen de sections utilisées (NS). Quelle importance relative les usagers accordent-ils à chacun de ces critères? Si réponse il y a, elle est sûrement très diversifiée puisque plusieurs caractéristiques associées aux déplacements peuvent influencer les choix effectués, à

savoir que le déplacement est fait:

- pendant un jour de semaine ou en fin de semaine;
- en période de pointe ou en période hors-pointe;
- pour le motif travail ou pour un autre motif;
- fait pendant l'hiver plutôt que pendant l'été, etc.

A la limite chaque usager peut avoir sa propre conception de l'importance relative des différentes composantes d'un déplacement. Mais il n'est pas évident que les usagers puissent exprimer leurs intérêts sur la base de valeurs moyennes qui sont caractéristiques à un réseau complet. Il incombe donc au planificateur de modéliser la perception des usagers au niveau du choix d'une ligne et de transposer celle-ci au niveau d'un réseau entier. Par conséquent l'hypothèse est faite que la pondération des critères associés aux usagers peut être transposée sans ajustement.

Devant le peu d'information permettant de pondérer de façon précise les critères, une approche "exploratoire" consiste à soumettre le processus d'évaluation des scénarios à plusieurs vecteurs de poids. Ainsi, à partir d'hypothèses quant à l'importance relative que les usagers sont sujets d'accorder aux différentes composantes d'un déplacement, il est possible de générer plusieurs vecteurs

de poids. Les résultats obtenus respectivement à partir de ces vecteurs sont ensuite présentés aux décideurs. Les hypothèses retenues considèrent les principaux critères d'évaluation associés à la perception que les usagers ont de la qualité d'un service de transport, à savoir :

- le nombre moyen de sections utilisées sur le réseau;
- le temps moyen d'entrée-sortie sur le réseau;
- le temps moyen d'attente;
- le temps moyen en véhicule.

Cependant très peu d'hypothèses permettent d'établir une relation entre les critères ou d'identifier un vecteur de poids complet. En fait la seule hypothèse retenue est celle que le nombre de transferts représente la composante principale d'un déplacement à laquelle l'utilisateur est le plus sensible (Horowitz et al., 1981).

La procédure de création des vecteurs de poids se résume aux étapes suivantes :

- le choix d'une variable de référence (arbitraire);
- la description des hypothèses de pondération;
- à partir de la variable de référence, l'établissement d'une relation entre les critères;
- le calcul du poids de chacun des critères et la

normalisation de leur somme à 0.5.

Ainsi en choisissant la variable de référence comme étant le temps moyen en véhicule et les hypothèses suivantes pour former un premier vecteur de poids, nous avons :

1^{er} vecteur de poids :

h_1 : le temps moyen d'attente est 2 fois plus important pour l'utilisateur que le temps moyen en véhicule;

h_2 : le nombre moyen de sections utilisées est le critère d'évaluation le plus important pour l'utilisateur, celui-ci est 2 fois plus important que le temps moyen d'attente;

h_3 : le temps moyen en véhicule et le temps moyen d'entrée-sortie sont d'importance égale pour l'utilisateur.

En considérant ces hypothèses et en posant "x" comme étant le poids associé au temps moyen en véhicule, nous avons alors la relation suivante :

$$\begin{array}{ccccccc} \text{TV} & & \text{TES} & & \text{TA} & & \text{NS} \\ x & + & x & + & 2x & + & 4x & = & 0.5 \end{array}$$

à partir de laquelle on calcule $x = 0.062500$ ainsi que

les poids:

-TV et TES : 0.0625

-TA : $2 * 0.0625 = 0.125000$

-NS : $4 * 0.0625 = 0.250000$

2^{ème} vecteur de poids

h_1 et h_2

h_4 : le nombre moyen de sections utilisées et le temps moyen d'attente sont d'un niveau d'importance égal selon les usagers;

A partir de la relation créée les poids sont alors :

-TV et TES : 0.083333;

-TA et NS : 0.166666.

3^{ème} vecteur de poids

h_1 et h_2 ;

h_3 : les usagers accordent 3 fois plus d'importance au nombre moyen de sections utilisées qu'au temps moyen en véhicule.

Les poids obtenus sont :

-TV et TES : 0.071429;
 -TA : 0.142857;
 -NS : 0.214286.

4^{ème} vecteur de poids

h_1 et h_2 ;

h_6 : le temps moyen d'entrée-sortie est perçu par les usagers comme étant 2 fois plus important que le temps moyen en véhicule.

Les poids obtenus sont les suivants :

-TV : 0.066666 -TA : 0.133333;
 -TES : 0.033333 -NS : 0.266666.

5^{ème} vecteur de poids

h_1 et h_2 ;

h_7 : le temps moyen d'entrée-sortie est perçu par les usagers comme étant d'importance égale au temps

moyen d'attente.

Les poids obtenus sont les suivants :

-TV : 0.055555 -TA : 0.111111;
 -TES : 0.111111 -NS : 0.222222.

tableau 2.5 Vecteurs de poids par groupe d'hypothèses

(GH_i = Groupe d'Hypothèses "i")

	GH1	GH2	GH3	GH4	GH5
TV	0.062500	0.083333	0.071429	0.066666	0.055555
TES	0.062500	0.083333	0.071429	0.033333	0.111111
TA	0.125000	0.166666	0.142857	0.133333	0.111111
NS	0.250000	0.166666	0.214286	0.266666	0.222222

N'oublions pas que l'hypothèse "H0" peut être considérée. Celle-ci consiste à accorder un poids égal à chacun des critères d'évaluation. Par conséquent le poids de l'objectif correspondant à ces critères est subdivisé en parties égales selon la quantité de critères. Le but de ce mode de pondération est de ne pas avantager un critère plutôt qu'un autre.

Chacun de ces vecteurs de poids est ensuite soumis au processus d'évaluation pour établir différents classements des scénarios. Les solutions proposées se basent ainsi sur

une ou plusieurs hypothèses quant à la perception que les usagers ont de la qualité d'un service de transport.

La pondération des critères représente l'une des composantes de la modélisation des préférences des usagers. Cette composante influence le choix à effectuer alors que la deuxième composante représente directement un choix au niveau de la valeur des critères d'évaluation. La section suivante présente cette deuxième composante de la modélisation des préférences.

2.5 La modélisation des préférences

La modélisation des préférences consiste à déterminer, pour chacun des critères d'évaluation, la valeur de 2 écarts qui permettent de faciliter la différenciation de deux scénarios, à savoir le seuil de préférence et le seuil d'indifférence. Concernant la comparaison de 2 scénarios ("a" et "b") et l'écart calculé pour un critère donné, le seuil d'indifférence représente le plus grand écart en dessous duquel le décideur considère que le scénario "a" et le scénario "b" sont indifférents. Tandis que le seuil de préférence est la plus petite valeur de cet écart au-dessus de laquelle le décideur éprouve une préférence stricte en faveur d'un des scénarios. Ces seuils sont établis pour

chaque critère associé à chacun des objectifs. La section 2.5.1 traite de la détermination de ces seuils concernant les critères rattachés aux coûts d'opération, tandis que la section 2.5.2 présente les seuils associés aux critères d'évaluation de l'objectif "maximiser les bénéfices aux usagers".

2.5.1 La modélisation des préférences de l'exploitant

Elle est facilitée par la création d'un unique critère sur lequel le décideur s'appuie pour différencier un ou plusieurs scénarios de réseaux. Ce critère est "coûts d'opération" dont le mode de calcul est présenté à la section 2.2. La modélisation des préférences s'effectue en définissant trois éléments :

- un seuil de préférence;
- un seuil d'indifférence;
- une fonction qui détermine le niveau de l'intensité de préférence pour une valeur comprise entre les deux seuils.

2.5.1.1 La détermination du seuil d'indifférence

Le seuil d'indifférence représente la plus grande valeur de l'écart des "coûts d'opération" calculée lors d'une comparaison au-dessous de laquelle le décideur considère que les deux scénarios comparés sont indifférents. Ce seuil pourrait être équivalent au coût de transformation ou de remplacement d'un réseau donné. En effet on peut considérer que, connaissant le coût de transformation d'un réseau existant en un deuxième réseau, si en choisissant le deuxième réseau :

- la diminution des coûts d'opération est supérieure au coût de transformation, alors le choix est facilité, on préfère le réseau substitut;
- la diminution des coûts d'opération est inférieure au coût de transformation, alors le réseau existant est conservé et le choix de transformer ce dernier nous est indifférent.

Mais la valeur du coût de transformation est fonction de plusieurs paramètres (grandeur du réseau, nombre de tronçons à modifier, etc) et suppose un seuil d'indifférence adapté à chaque contexte, donc à chaque paire de scénarios comparés. La difficulté est alors de

déterminer avec précision la valeur du coût de transformation d'un réseau donné en un deuxième de façon à fixer cette valeur du seuil d'indifférence.

L'approche proposée est extrême quant à la différenciation de 2 scénarios. Elle consiste d'une part à fixer le seuil à une valeur qui indique un maximum de sévérité, et d'autre part à fixer le seuil à une valeur qui donne un maximum de souplesse.

Un seuil d'une valeur nulle indique un maximum de sévérité. En effet selon cette valeur le décideur n'est jamais indifférent puisqu'il fonde sa décision quant à la comparaison de 2 scénarios uniquement sur la valeur du seuil de préférence. Ainsi, lors de la comparaison de 2 scénarios ("a" et "b"), le scénario "a" est préféré de façon stricte au deuxième, ou l'inverse. Donc aucune autre possibilité intermédiaire n'intervient.

Cependant un seuil d'indifférence fixé à la valeur du plus petit écart de coûts d'opération entre 2 scénarios permet plus de souplesse quant à la différenciation de ces 2 derniers. En effet, selon cette valeur affectée au seuil, le décideur est indifférent au choix d'un scénario plutôt qu'un autre dans un seul cas. Il s'agit du cas où l'écart calculé est égal à la valeur du seuil

d'indifférence. Dans tous les autres cas le niveau d'indifférence du décideur prend une valeur comprise entre celle du seuil d'indifférence et celle du seuil de préférence. Le niveau d'indifférence est alors appelé "intensité de préférence". La section 2.6.2. présente avec plus de détails le calcul et la signification de la valeur de l'intensité de préférence. Mais voyons maintenant comment est déterminé le seuil de préférence du critère "coûts d'opération" pour l'objectif de l'exploitant.

2.5.1.2 La détermination du seuil de préférence

Le seuil de préférence est la plus petite valeur de l'écart des coûts d'opération au-dessus de laquelle la préférence d'un scénario par rapport à un autre est stricte. Si le seuil d'indifférence peut être considéré comme étant un montant minimum pour couvrir les coûts relatifs à la transformation d'un réseau ou à son remplacement, le seuil de préférence peut être assimilé à un niveau de rentabilité donné de l'investissement effectué. Cependant, de la même manière que la fixation d'un coût de transformation ou de remplacement d'un réseau, la difficulté est alors de déterminer une valeur précise concernant ce niveau de rentabilité.

L'approche proposée est la même que celle associée à la fixation du seuil d'indifférence. Par conséquent elle consiste à fixer alternativement les 2 seuils extrêmes de préférence. C'est-à-dire celui qui permet une interprétation souple de l'intensité de préférence et celui qui permet une interprétation sévère.

Le seuil de préférence sévère est déterminé en identifiant l'écart minimum des coûts d'opération entre 2 scénarios. Selon la valeur de cet écart tous les scénarios en surclassent au moins un autre, sauf un, celui que la comparaison par paire désavantage avec l'écart minimum.

Le seuil de préférence souple est déterminé en identifiant l'écart maximum des coûts d'opération entre 2 scénarios. Selon la valeur de cet écart un seul scénario en surclasse strictement un deuxième, celui que la comparaison par paire avantage avec l'écart maximum. Parmi les autres, aucun n'est préféré mais chacun est caractérisé par un niveau d'intensité de préférence.

Le calcul de l'intensité de préférence concernant les critères associés aux usagers nécessite également la détermination de seuils, c'est le sujet de la sous-section qui suit.

2.5.2 La modélisation des préférences des usagers

La modélisation des préférences des usagers s'effectue de la même manière que celle de l'exploitant, seuls les seuils diffèrent. Aussi les seuils sont-ils établis selon 2 approches, l'une sévère, l'autre souple. Il faut mentionner que l'approche sévère semble désignée pour l'ensemble des critères concernés. En effet, chacun exprime une valeur moyenne qui est représentative pour l'ensemble d'un réseau. Ainsi un écart du nombre moyen de sections utilisées de 0.01 ou de 0.01 minute de temps moyen d'attente (ou d'un autre temps) peut représenter une amélioration importante de la qualité de service au niveau d'un réseau. L'utilisation des seuils sévères devrait donc être faite en priorité.

2.5.3 La détermination des fonctions de préférence

La fonction de préférence détermine le niveau de l'intensité de préférence pour un écart compris entre le seuil d'indifférence et le seuil de préférence. Par conséquent elle s'applique uniquement lorsque le seuil de préférence sévère est utilisé puisque selon le cas contraire l'intensité de préférence prend obligatoirement la valeur 0 ou 1 (section 2.6.2).

La fonction peut prendre plusieurs formes mais elle est supposée linéaire. C'est-à-dire que l'intensité de préférence croît proportionnellement selon que la valeur de l'écart se rapproche de celle du seuil de préférence. Ainsi si "x" représente la valeur d'un écart comprise entre celles des 2 seuils, alors la valeur du niveau de l'intensité de préférence se calcule comme suit :

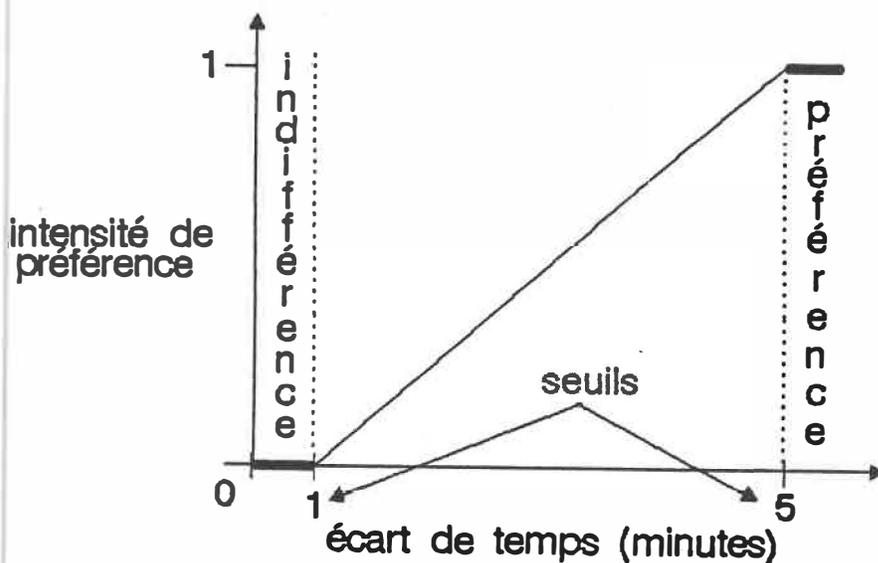
$$\text{niveau de préférence} = (x - \text{seuil d'indifférence})$$

$$\frac{\text{-----}}{(\text{seuil de préférence} - \text{seuil d'indifférence})}$$

Selon cette équation l'intensité de préférence est nulle lorsque la valeur de l'écart égale celle du seuil d'indifférence, et maximum lorsque la valeur de l'écart est égale à celle du seuil de préférence. La forme de la fonction est présentée sur le graphique 2.2.

Bien qu'elle varie légèrement selon la valeur des seuils choisis, la fonction de préférence est utilisée pour identifier l'intensité de préférence concernant le point de vue de l'exploitant aussi bien que celui des usagers.

GRAPHIQUE 2.2 FONCTION DE L'INTENSITE DE PREFERENCE



2.5.4 L'approche globale de modélisation des préférences

La fixation des seuils d'indifférence et de préférence a été faite séparément dans les sous-sections précédentes. Cependant leur utilisation se fait de façon conjointe (section 2.6.2). Ces seuils sont groupés pour former 2 ensembles de paramètres, l'un qualifié de "souple" et le deuxième qualifié de "sévère". Ainsi, en considérant les seuils déterminés précédemment et les écarts minimums et maximums calculés à partir du tableau 2.1, nous avons les 2 ensembles de paramètres du tableau 2.6.

tableau 2.6 Ensembles de paramètres souples et sévères

ENSEMBLES DE PARAMETRES "SOUPLES"		
variables	seuils d'indifférence	seuils de préférence
TV	0.03	5.84
TA	0.05	6.59
TES	0.04	4.14
NS	0.01	0.50
ENSEMBLES DE PARAMETRES "SEVERES"		
variables	seuils d'indifférence	seuils de préférence
TV	0.00	0.03
TA	0.00	0.05
TES	0.00	0.04
NS	0.00	0.01

Seuls les paramètres associés au critère "coûts d'opération" ne figurent pas sur le tableau 2.6, ils seront calculés ultérieurement à l'aide de la méthode d'analyse multicritère. La section suivante nous présente cette méthode d'analyse.

2.6 L'analyse multicritère

2.6.1 Les généralités

Les méthodes d'analyse multicritère considèrent des problèmes du type suivant (Brans et Vincke, 1982) :

OPT $\{ c_1(a), c_2(a), c_3(a), \dots, c_n(a) \text{ ou } a \in A \}$,

où -"opt" signifie optimiser;

-a est une décision possible ou une action;

-A est un ensemble de décisions possibles ou actions;

- $c_1, c_2, \dots, c_1, \dots, c_n$ sont n critères définis sur A.

Chaque critère est une application $c_i : A \rightarrow R_i$ (l'ensemble des nombres réels associé au critère "i") qui lie à toute action $a \in A$ une évaluation $c_i(a)$. Une relation d'ordre total ($>_i$) est définie sur chaque ensemble R_i et représente les préférences du ou des décideurs. A noter que le terme "optimiser" peut être remplacé par "maximiser", "minimiser", ou les deux à la fois selon un ensemble donné d'objectifs.

Une comparaison de chacune des paires d'actions se fait ensuite de la manière suivante :

l'action "a" domine l'action "b":

ssi $c_i(a) \geq c_i(b)$, pour tous $i \in \{1,2,3,\dots,n\}$

l'inégalité étant stricte pour au moins un i,

soit $c_k(a) > c_k(b)$, ou $k \in \{1,2,3,\dots,n\}$.

Cette relation est obtenue par un principe d'unanimité

des critères : "a" domine "b" si "a" est au moins aussi bonne que "b" sur tous les critères et meilleure que "b" sur au moins un critère. Cette relation demeure très pauvre. La méthode PROMETHEE repose sur la définition de critères généralisés. Cette définition permet la modélisation des préférences du décideur et la construction d'une relation de surclassement ou d'un ordre de dominance. Une définition différente des flux de surclassement permet de construire des préordres partiels (PROMETHEE I) ou complets (PROMETHEE II) sur l'ensemble des actions, ou scénarios. La section suivante décrit en détail cette méthode d'analyse.

2.6.2 La méthode d'analyse multicritère PROMETHEE

La première étape de PROMETHEE (Brans et al., 1986) consiste à associer à chaque critère c_i une fonction de préférence $P_i : A \times A \rightarrow [0, 1]$. Cette fonction permet de modéliser les préférences du décideur sur le critère c_i : lorsque le décideur compare deux scénarios "a" et "b", $P_i(a,b)$ représente l'intensité de préférence pour le scénario "a", en ne considérant toutefois que le critère c_i . $P_i(a,b)$ est un nombre compris entre 0 et 1 et :

$$-P_i(a,b) = 0 \text{ si "a" n'est pas préféré à "b" ou si "a"}$$

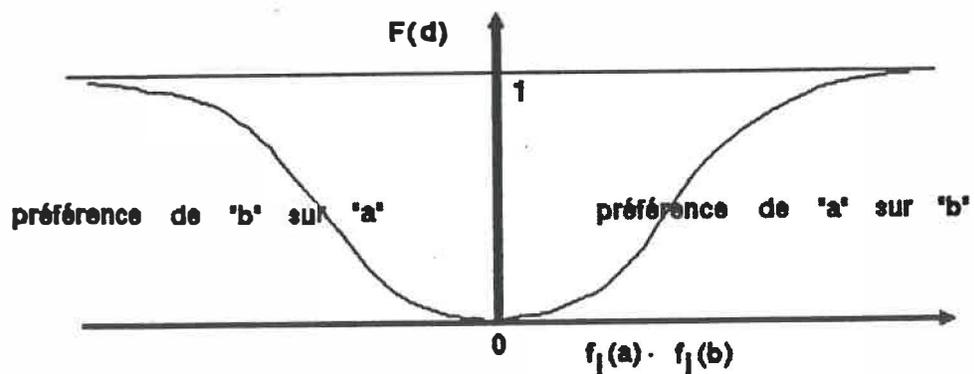
- et "b" sont indifférents,
- $P_1(a,b) \approx 0$ si "a" est faiblement préféré à "b",
 - $P_1(a,b) \approx 1$ si "a" est fortement préféré à "b",
 - $P_1(a,b) = 1$ si "a" est strictement préféré à "b".

Le couple (c_1, P_1) est appelé un critère généralisé. De façon générale, P_1 est une fonction de la différence entre $c_1(a)$ et $c_1(b)$, soit un écart:

$P_1(a,b) = P_1(c_1(a) - c_1(b))$, où $P_1(d)$ est une fonction non-décroissante qui s'annule pour $d < 0$.

De façon à donner une meilleure vision de la zone d'indifférence entre deux scénarios, la fonction du graphique 2.3 est utilisée. Selon cette fonction :

GRAPHIQUE 2.3 FONCTION GENERALE DE PREFERENCE



SOURCE : BRANS & AL (1986)

$$F_1(c_1(a) - c_1(b)) = P_1(a,b) \text{ si } c_1(a) \geq c_1(b),$$

ou

$$= P_1(b,a) \text{ si } c_1(a) < c_1(b),$$

Cette première fonction de préférence définie globalement si un scénario surclasse un autre, ou est surclassé par le premier. Cependant, pour affiner la différenciation, les auteurs de PROMETHEE suggèrent une fonction de préférence adaptée à chacun des critères d'évaluation. Leur liste de fonctions, qui n'est pas restrictive, regroupe 6 types de fonction de préférence, ou 6 types de critère généralisé (voir tableau 2.7). Les types I, II et IV sont adaptés à la modélisation de critères qualitatifs, tandis que les types III, V et VI conviennent à la représentation des critères quantitatifs.

L'association d'un critère généralisé (c_i, P_i) à chacun des critères c_i ($i = 1, 2, \dots, n$) permet la modélisation des préférences sur chaque critère. Ainsi, pour obtenir une mesure globale de ces préférences, un indice multicritère est créé :

$$\pi(a,b) = \sum_{i=1}^n w_i P_i(a,b).$$

où les w_i sont les poids associés aux critères ($w_i > 0$, $i=1, 2, \dots, n$) et représentent l'importance relative

TABLEAU 2.7 TYPES DE CRITERES GENERALES

TYPES DE CRITERES GENERALES ET PARAMETRES ASSOCIES	
<p><u>type I : critère usuel :</u></p> <p>pas de paramètres à fixer.</p>	
<p><u>type II : quasi-critère :</u></p> <p>q_i seuil d'indifférence.</p>	
<p><u>type III : critère linéaire :</u></p> <p>p_i seuil de préférence.</p>	
<p><u>type IV : critère à palier :</u></p> <p>q_i seuil d'indifférence, p_i seuil de préférence.</p>	
<p><u>type V : critère linéaire avec indifférence :</u></p> <p>q_i seuil d'indifférence, p_i seuil de préférence.</p>	
<p><u>type VI : critère gaussien :</u></p> <p>g_i seuil gaussien</p> <p>$H_i(d) = 1 \cdot \text{EXP}(-d/2 g_i^2)$</p>	

source : BRANS & AL (1986)

de ces critères. Ils sont généralement normalisés ($\sum w_i = 1$).

et $\pi(a,b)$ représente l'intensité de préférence du scénario "a" sur le scénario "b" lorsque tous les critères sont pris en considération. $\pi(a,b)$ est un nombre compris entre 0 et 1, et :

$\pi(a,b) \approx 0$ si la préférence globale de "a" sur "b" est faible,

$\pi(a,b) \approx 1$ si la préférence globale de "a" sur "b" est forte.

A partir de cet indice de préférence multicritère est définie une relation de surclassement sur "A" qui définit à l'aide de trois flux de surclassement:

$$\text{-le flux sortant } \tilde{x}^+(a) = \frac{1}{s-1} \sum_{b \in A} \pi(a,b),$$

où "s" représente le nombre de scénarios possibles et le terme $1/(s-1)$ est un facteur de normalisation.

$$\text{-le flux entrant } \tilde{x}^-(a) = \frac{1}{s-1} \sum_{b \in A} \pi(b,a),$$

-le flux net \bar{x} est la différence entre le flux sortant et le flux entrant :

$$\bar{x}(a) = \bar{x}^+(a) - \bar{x}^-(a).$$

Le flux $\bar{x}(a)$ est grand et positif si "a" est un scénario qui en moyenne surclasse les autres scénarios plutôt qu'il n'est surclassé par ces derniers. Par contre le flux $\bar{x}(a)$ est négatif si le scénario "a" est surclassé par les autres scénarios plutôt qu'il les surclasse lui-même.

A l'aide de ces flux entrant et sortant, PROMETHEE I permet de construire un préordre (c'est-à-dire une relation de dominance au sens large) partiel sur "A", un scénario "a" est d'autant meilleur que $\bar{x}^+(a)$ est grand et que $\bar{x}^-(a)$ est petit. Le préordre (P_x, I_x, R) est alors déterminé de la manière suivante :

$a P_x b$ ("a" préféré à "b") si

$$\bar{x}^+(a) \geq \bar{x}^+(b) \text{ et } \bar{x}^-(a) \leq \bar{x}^-(b),$$

(avec au moins une inégalité stricte)

$a I_x b$ ("a" et "b" indifférents) si

$$\xi^+(a) = \xi^+(b) \text{ et } \xi^-(a) = \xi^-(b),$$

$a R b$ ("a" et "b" incomparables) si

"a" n'est pas préféré à "b",

"b" n'est pas préféré à "a",

"a" n'est pas indifférent à "b".

PROMETHEE I laisse place à l'incomparabilité des scénarios, alors que PROMETHEE II ne laisse aucune place. En effet dans certaines applications il est utile de connaître un classement complet des scénarios. PROMETHEE II permet de construire un préordre complet (P_{II}, I_{II}) sur "A" en utilisant le flux net multicritère :

$a P_{II} b$ si $\xi(a) > \xi(b)$,

$a I_{II} b$ si $\xi(a) = \xi(b)$.

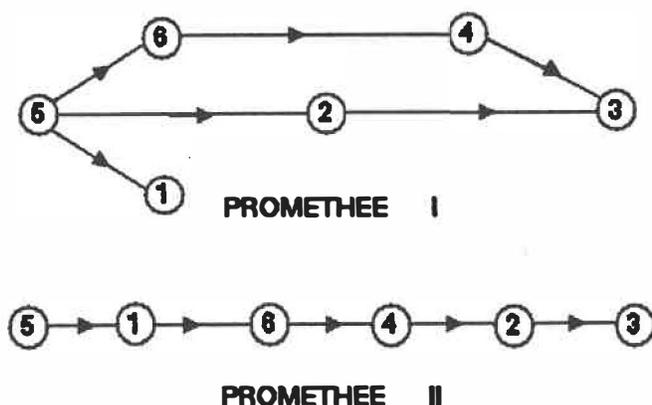
L'information fournie par PROMETHEE II est plus facile à interpréter dans certains cas, mais est moins riche en information que celle fournie par PROMETHEE I.

La procédure d'évaluation complète selon la méthode d'analyse multicritère PROMETHEE est donc la suivante :

- 1-détermination du type de critère généralisé à associer à chacun des critères d'évaluation;
- 2-détermination des seuils associés à chacun des critères généralisés;
- 3-pour chaque paire de scénarios, et par critère, calcul des écarts et des $F_j(a,b)$;
- 4-pour chaque paire de scénarios, calcul des $\pi(a,b)$;
- 5-pour chaque scénario, calcul du \bar{I}^+ et du \bar{I}^- ;
- 6-au besoin, calcul des flux net (\bar{I});
- 7-présentation des résultats, soit un classement des scénarios allant du meilleur au pire des compromis.

La figure 2.2 présente un exemple de résultats de préordres partiels et complets obtenus avec PROMETHEE.

FIGURE 2.2 FLUX DE SURCLASSEMENT SELON PROMETHEE



Selon ces exemples la méthode PROMETHEE I détecte que les scénarios #4 et #6 sont très différents du #2 (incomparable), toutefois en exigeant la construction d'un préordre complet, cette information est masquée. Ces préordres peuvent cependant être modifiés selon l'importance relative que l'on accorde aux différents critères et/ou aux objectifs. Par conséquent il est nécessaire d'effectuer une analyse de la sensibilité du classement final obtenu à une variation de chacun des paramètres. Ceci est le sujet de la prochaine section.

2.7 L'analyse de sensibilité des résultats

L'application d'une méthode d'analyse multicritère pour évaluer des scénarios de transport nécessite la détermination de plusieurs paramètres auxquels l'attribution d'une valeur a une influence sur le classement final des éléments évalués. Cette influence est mesurée en ajustant à la hausse et à la baisse la valeur de chacun des paramètres pris séparément. Cette opération d'ajustement des paramètres s'appelle "perturbation", elle permet :

- de quantifier un intervalle de stabilité du résultat pour chacun des paramètres, l'intervalle de stabilité $[y,z]$ signifie que la valeur du paramètre concerné peut varier de "y" à "z" sans que le classement des scénarios ne soit modifié;
- d'identifier la nature du paramètre (seuils, poids) auquel le résultat est le plus sensible, c'est-à-dire celui ou ceux dont une faible variation amène une modification au classement final des scénarios;
- d'identifier le ou les paramètre(s) auquel (auxquels) le résultat est particulièrement sensible.

L'analyse de sensibilité d'un classement peut comporter la perturbation :

- des poids des critères;
- des poids des objectifs;
- des seuils de préférence des critères;
- des seuils d'indifférence des critères.

2.7.1 La perturbation des poids des critères

Trois contraintes sont considérées concernant la perturbation des poids, à savoir :

- I-la valeur des poids est nulle ou positive;
- II-la somme des poids est 1 (par convention);
- III-la valeur des poids non-perturbés conserve la même proportionnalité.

La dernière contrainte permet de maintenir l'importance relative établie avant la perturbation entre les poids non-ajustés. Chaque poids peut varier entre les valeurs 0 et 1 (voir annexe).

Par conséquent selon les 3 contraintes, si nous avons les trois $w_1=0.5$, $w_2=0.3$ et $w_3=0.2$, une variation de w_1

nécessite une modification de la valeur des poids w_2 et w_3 . En effet une hausse de la valeur du poids w_1 doit être compensée par une baisse correspondante pour le groupe de poids w_2-w_3 de façon à répondre à la deuxième contrainte. Cependant concernant la troisième contrainte, la valeur qui compense la hausse du poids w_1 est redistribuée proportionnellement entre les poids non-perturbés. Ainsi selon les poids w_1 , w_2 et w_3 , si w_1 subit une hausse de 25%, donc une augmentation de 0.125, l'ensemble des poids excepté w_1 doit être diminué de la même quantité :

$$\text{pour diminuer le poids } w_2 \quad 0.3 - (0.125 * (0.3/(0.3+0.2)))=0.225$$

$$\text{pour diminuer le poids } w_3 \quad 0.2 - (0.125 * (0.2/(0.3+0.2)))=0.150$$

Ainsi concernant les contraintes :

$$\text{-contrainte I} \quad 0.625 (0.5 + 0.125) > 0;$$

$$0.225 > 0;$$

$$0.150 > 0.$$

$$\text{-contrainte II} \quad 0.625 + 0.225 + 0.150 = 1.000$$

$$\text{-contrainte III} \quad w_2/w_3 \text{ avant la perturbation de } w_1=1.5$$

$$w_2/w_3 \text{ après la perturbation de } w_1=1.5$$

Les trois contraintes sont respectées. Cette approche de la perturbation des poids des critères peut également être utilisée pour la perturbation des poids des objectifs d'évaluation, avec cependant certaines nuances.

2.7.2 La perturbation des poids des objectifs

La perturbation des poids des critères est possible en faisant varier un poids à la fois. En effet, selon cette approche seule l'importance relative du critère perturbé est modifiée, l'importance relative des autres critères entre eux demeure inchangée. Cependant à l'égard des objectifs il s'agit de perturber le poids global d'un groupe de critères, sans modifier ni l'importance relative des critères externes au groupe, ni l'importance relative des critères entre eux à l'intérieur du groupe.

La perturbation des poids des objectifs s'effectue selon les mêmes principes que ceux relatifs aux critères. Mais ici le poids du critère "exploitant" est celui de l'objectif "minimiser les coûts d'opération", alors que la somme des autres poids représente le poids du deuxième objectif. L'unique différence avec la perturbation des poids des critères est que la hausse de poids d'un objectif est distribuée proportionnellement parmi les poids des

critères représentatifs de ce même objectif. Par conséquent, selon la contrainte II, la hausse du poids de l'un des objectifs entraîne une diminution du poids du second objectif, donc des poids des critères relatifs à ce dernier. Ainsi selon les valeurs suivantes:

OBJECTIFS	POIDS DES OBJECTIFS	POIDS DES CRITERES (fictifs)
relatif à	0.5	0.25
l'exploitant		0.15
		0.10
relatif aux	0.5	0.30
usagers		0.13
		0.07

une hausse de 50% du poids relatif à l'objectif de l'opérateur entraîne pour les poids des critères concernés les augmentations suivantes:

POIDS A LA HAUSSE

$0.50 + (0.50 * 0.50) = 0.75$, donc une hausse de 0.25. Ce 0.25 est alors redistribué entre les poids des critères 0.25, 0.15 et 0.10.

0.25 devient $0.25 + (0.25 * (0.25 / (0.25 + 0.15 + 0.10))) = 0.375$

0.15 devient $0.15 + (0.25 * (0.15 / (0.25 + 0.15 + 0.10))) = 0.225$

0.10 devient $0.10 + (0.25 * (0.10 / (0.25 + 0.15 + 0.10))) = 0.150$

Le poids de l'objectif passe ainsi de 0.500 à 0.750. Cependant la contrainte II implique que le poids de l'objectif relatif aux usagers diminue de 0.25, par conséquent que les poids des critères diminuent selon leur proportionnalité:

POIDS A LA BAISSSE

0.30 devient $0.30 - (0.25 * (0.30 / (0.30 + 0.13 + 0.07))) = 0.150$

0.13 devient $0.13 - (0.25 * (0.13 / (0.30 + 0.13 + 0.07))) = 0.225$

0.07 devient $0.07 - (0.25 * (0.07 / (0.30 + 0.13 + 0.07))) = 0.035$

Le poids du deuxième objectif devient ainsi 0.250. La perturbation d'un poids relatif aux objectifs agit donc comme étant une perturbation multiple au niveau des poids des critères. La même opération effectuée sur les seuils se fait avec plus de facilité comme en témoigne la

sous-section suivante.

2.7.3 La perturbation des seuils de préférence et d'indifférence

La perturbation des valeurs associées à ce deuxième type de paramètres est faite selon l'unique contrainte que les seuils ne doivent pas être négatifs. L'opération s'effectue en ajustant séparément les 2 seuils de chacun des critères à la hausse et à la baisse jusqu'à ce que l'ordre de classement des 4 premiers scénarios soit modifié. Les variations obtenues (baisse et hausse, une à la fois) sont ensuite exprimées en pourcentage pour fin de comparaison par critère et par seuil. Les 2 valeurs obtenues sont finalement combinées pour créer un indice de la stabilité du classement final. Cet indice est expliqué à la section suivante.

2.7.4 Les intervalles de stabilité

La perturbation des paramètres permet de mesurer la stabilité du classement des scénarios tel que déterminé par la méthode PROMETHEE (voir annexe sur la pondération). Le classement est stable si après avoir effectué un ajustement sur un paramètre les éléments de celui-ci occupent toujours

le même rang. La stabilité du classement est exprimée selon l'intervalle de variation d'un paramètre. En effet en modifiant à la hausse et à la baisse la valeur d'un paramètre on détermine un intervalle pour lequel la méthode multicritère fournit un résultat inchangé par rapport au classement obtenu avec la valeur initiale du paramètre. Cet intervalle de variation est appelé "intervalle de stabilité" du résultat. Il est habituellement déterminé en ajustant un seul paramètre à la fois. Le résultat qu'il permet d'obtenir peut varier selon que la stabilité désirée est partielle ou totale. La stabilité est totale lorsqu'il y a absence de toute modification sur l'ensemble du classement après l'ajustement d'un paramètre. Cependant si la stabilité partielle est désirée alors seule l'absence de toute modification parmi les "x" premiers éléments du classement importe. Etant donné la quantité de scénarios à évaluer, la stabilité partielle est définie pour les 4 premiers éléments du classement.

Pour fin de comparaison des intervalles de stabilité entre eux, ceux-ci sont exprimés en pourcentage pour établir l'indice de stabilité suivant:

$$\text{valeur absolue} \left| \begin{array}{l} \% \text{ de perturbation à la baisse} \\ \% \text{ de perturbation à la hausse} \end{array} \right| +$$

Selon cet indice lorsque la valeur d'un intervalle est élevée pour un paramètre donné cela signifie que le classement est peu sensible à la variation de ce même paramètre. Par ailleurs une valeur basse de l'indice désigne un haut niveau de sensibilité du résultat face au paramètre concerné.

Les résultats finaux de l'analyse de sensibilité sont présentés sous forme d'un tableau où figure un intervalle de sensibilité pour chacun des paramètres qui affectera le rang des scénarios du classement établi par PROMETHEE.

Tous les éléments sont maintenant en place pour une application de la méthode PROMETHEE:

les données:

- 15 scénarios de réseaux de transport;
- 2 objectifs d'évaluation avec leurs poids respectifs;
- 4 critères d'évaluation avec pour chacun:
 - un poids;
 - un seuil d'indifférence;
 - un seuil de préférence;
 - une fonction de l'intensité de préférence.

les hypothèses concernant:

- l'ajustement temporel des indicateurs de performance;
- des poids égaux pour les objectifs d'évaluation;
- la pondération des critères d'évaluation;
- une perception équivalente ligne-réseau;
- la modélisation "souple" des préférences;
- la modélisation "sévère" des préférences;
- une fonction linéaire de l'intensité de préférence;
- une stabilité partielle sur les 4 premiers éléments du classement.

La section suivante nous fait connaître quels résultats peuvent être obtenus à l'aide de la méthode d'analyse multicritère PROMETHEE.

2.8 Les résultats possibles

La méthode d'analyse multicritère a été créée pour évaluer un ensemble d'actions possibles qui ne contient pas d'action(s) optimale(s). En effet, face à l'atteinte d'objectifs divergents ou partiellement contradictoires, la méthode fournit un classement décroissant des actions, allant du meilleur au pire des compromis.

Telle que décrite à la section 2.6.2, la méthode

PROMETHEE est basée sur une série de comparaisons par paires. Cette structure permet de court-circuiter la méthode et d'évaluer un réseau spécifique. Par conséquent la méthode peut servir à identifier le rang d'un réseau existant dans le classement d'un ensemble de scénarios possibles, alors que le rang de chacun des scénarios d'un ensemble peut faciliter l'élimination des réseaux peu performants. Il s'agit ainsi d'une opération de filtrage avant d'engager une évaluation plus poussée des scénarios performants.

La méthode permet également une représentation des valeurs réelles en jeu dans le processus d'évaluation. En effet, de par sa structure, elle calcule d'une part les coûts d'opération d'un réseau, et d'autre part un indice du niveau de service basé sur la combinaison de 4 indicateurs de performance non-pondérés.

Le chapitre suivant présente les résultats de l'application de l'analyse multicritère suite à l'évaluation de 15 scénarios de réseaux de transport.

CHAPITRE III

RESULTATS DE L'APPLICATION DE LA METHODE PROMETHEE

L'application de la méthode PROMETHEE a pour but de vérifier l'utilité de l'analyse multicritère comme instrument d'aide à la décision. Plus précisément il s'agit de s'assurer que les choix proposés par la méthode identifient explicitement les scénarios de réseau de transport à meilleur compromis, compte tenu des paramètres fixés. Pour ce faire, la méthode est utilisée à deux fins. D'une part, elle sert à filtrer l'ensemble des scénarios de réseau en éliminant les moins performants, c'est-à-dire ceux qui, comparés aux autres, présentent à la fois un faible niveau de service et des coûts d'opération élevés. D'autre part, elle est utilisée pour évaluer les scénarios conservés après le filtrage afin d'identifier les réseaux à meilleur compromis. Les opérations de filtrage et d'évaluation sont effectuées selon les combinaisons de paramètres suivantes:

- des poids égaux pour les critères et les objectifs;

- des poids pour les critères établis selon les groupes d'hypothèses présentés au chapitre précédent;

-des seuils "sévères";

-des seuils "souples".

Examinons d'abord une application de la méthode PROMETHEE à l'aide de poids égaux pour chacun des critères d'évaluation.

3.1 L'évaluation des réseaux de transport avec poids égaux

L'application de la méthode PROMETHEE à l'aide de poids égaux pour les critères a pour but d'établir une base de comparaison pour l'analyse des effets de la pondération sur le classement des scénarios.

3.1.1 L'évaluation avec poids égaux pour fin de filtrage

La méthode d'analyse multicritère est d'abord utilisée pour diminuer le nombre de scénarios de réseau soumis à l'évaluation en éliminant ceux qui ne sont pas performants. Pour des fins de filtrage l'opération est faite en considérant des poids égaux pour les critères et des seuils exprimants un maximum de sévérité quant à la différenciation des scénarios.

L'application de la méthode a permis de déterminer le classement présenté sur la figure 3.1. Le classement obtenu prend la forme d'une liste où apparaissent les numéros identificateurs des scénarios de réseau (source tableau 2.1) selon un ordre décroissant, soit du meilleur au pire des compromis. Cependant en examinant cette liste, il est difficile de départager les scénarios à conserver et ceux à éliminer. Le graphique 3.1, établi à partir des calculs de PROMETHEE, permet d'identifier avec plus de facilité la limite de différenciation des scénarios quant à leur niveau de performance. Selon celui-ci, un scénario qui serait caractérisé par la coordonnée (1,1) serait à la fois le plus coûteux et celui qui offrirait le meilleur niveau de service, établi à partir de l'indice. Cet indice est déterminé à partir de l'ensemble des critères d'évaluation associé à l'objectif des usagers. Le mode de calcul utilisé pour produire ce graphique est présenté en annexe.

Le graphique 3.1 permet de mettre en évidence que les scénarios de réseau #1, #5, #6, #9, #11, #12 et #14 surclassent les autres. La comparaison de ce résultat avec le classement donné par la méthode PROMETHEE permet de faire les observations suivantes :

- le scénario #1 est le moins coûteux pour l'exploitant, il constitue un scénario extrême car il répond

FIGURE 3.1

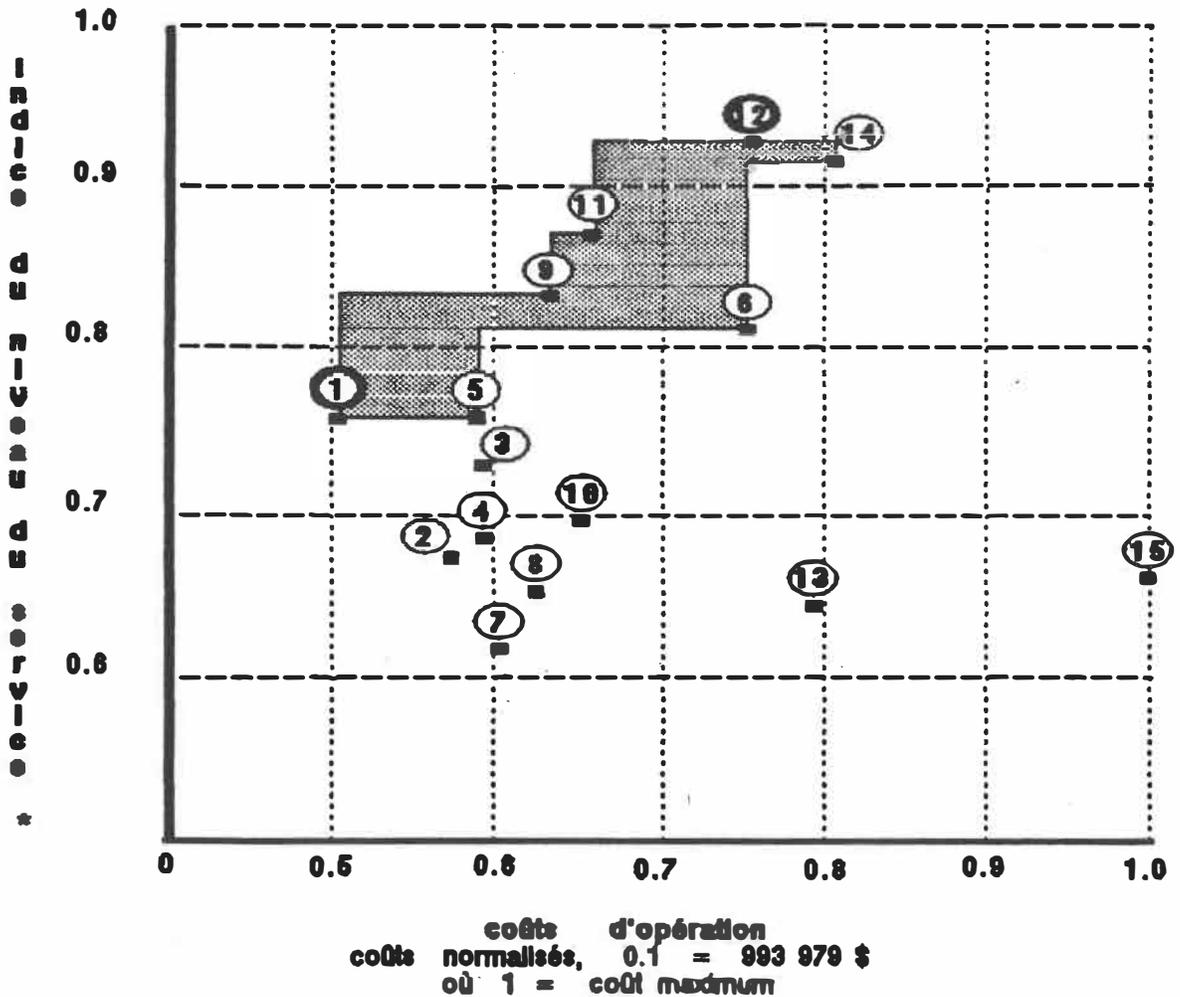
**FILTRAGE DE 15 RESEAUX
AVEC POIDS DES CRITERES EGAUX
(SELON DES PARAMETRES SEVERES)**

ordre	# de scénario
1	9
2	11
3	12
4	1
5	6
6	5
7	14
8	3
9	10
10	4
11	7
12	2
13	8
14	13
15	15

PARAMETRES UTILISES			
POIDS			
poids de l'objectif associé à l'exploitant :		0.5	
poids de l'objectif associé aux usagers :		0.5	
poids du critère TV :		0.125	
poids du critère TA :		0.125	
poids du critère TES :		0.125	
poids du critère NS :		0.125	
SEUILS			
critères	seuils d'indifférence	seuils de préférence *	
TV	0 (min.)	0.03 (min.)	
TA	0 (min.)	0.05 (min.)	
TES	0 (min.)	0.04 (min.)	
NS	0 (unité)	0.01 (unité)	
\$	0	109363	
* plus petit écart			

GRAPHIQUE 3.1

**COÛTS D'OPERATION vs INDICE DU NIVEAU DE SERVICE
(POIDS EGAUX)**



* Indice combiné : temps en véhicule, temps d'attente, temps d'entrée-sortie sur le réseau et nombre de sections utilisées (un indice de 1 signifie une valeur minimale pour chacun des critères associés à l'utilisateur, chaque critère étant considéré d'égal niveau d'importance)

- identificateur du scénario de réseau
- scénario extrême

parfaitement à l'objectif de la minimisation des coûts d'opération;

-le scénario #12 est celui qui offre le meilleur niveau de service aux usagers, il constitue un deuxième scénario extrême car il répond parfaitement à l'objectif de la maximisation des bénéfices aux usagers;

-le scénario #1 est supérieur au scénario #5 puisque pour un indice de niveau de service équivalent, le #1 est moins coûteux;

-le scénario #12 est supérieur au scénario #14 puisqu'il est à la fois moins coûteux et se caractérise par un indice de niveau de service plus élevé;

-selon la méthode PROMETHEE les scénarios #9 et #11 représentent les scénarios à meilleur compromis puisqu'ils sont en tête de classement sur la figure 3.1. Ils sont également identifiés comme tels sur le graphique car ils se situent approximativement à mi-distance entre les deux scénarios extrêmes selon les 2 dimensions;

-les scénarios les moins efficaces selon la méthode PROMETHEE se retrouvent au bas du graphique.

L'information présentée par le graphique 3.1 vient ainsi corroborer les résultats obtenus par la méthode PROMETHEE. Il est donc intéressant de noter que les réseaux les plus coûteux pour l'exploitant ne sont pas nécessairement ceux qui offrent le meilleur niveau de service aux usagers. Ainsi à partir des résultats fournis par PROMETHEE et de l'information transmise par le graphique 3.1, les scénarios qui feront l'objet d'une nouvelle évaluation sont : #1, #5, #6, #9, #11, #12 et #14.

L'opération de filtrage a aussi été effectuée en utilisant les seuils "souples". Cette opération change l'ordre des scénarios mais ceux identifiés par le premier classement demeurent en tête de liste. Ainsi ce résultat ne remet pas en question l'élimination déjà faite.

3.1.2 L'évaluation des 7 réseaux retenus

La nouvelle évaluation, de 7 scénarios plutôt que de 15, a nécessité la détermination de nouveaux paramètres. En effet, les seuils de préférence changent légèrement mais on conserve le même niveau de sévérité pour l'évaluation

des scénarios retenus après l'opération de filtrage. Cependant, il faut mentionner que l'apport d'information supplémentaire issu de la deuxième évaluation est faible, la figure 3.2 le confirme. La seule modification apportée par rapport au classement initial (sous-section précédente) est de peu d'intérêt puisqu'elle ne change pas la tête du classement.

L'application de la méthode PROMETHEE identifie donc un échantillonnage limité de réseaux à meilleur compromis. Ceci est dû à la faible quantité de scénarios réellement concurrentiels aux réseaux #9 et #11. Le tableau 3.1 permet de vérifier cette affirmation avec précision et également de comprendre pourquoi les scénarios de la sous-section précédente ont été éliminés. Ainsi, selon ce tableau on peut faire les observations suivantes:

-trois types de scénarios se présentent :

-ceux qui surclassent sans ambiguïté (soit de façon absolue) d'autres scénarios. D'une part les scénarios #6 et #9 surclassent les scénarios #7 et #8. D'autre part les scénarios #12 et #14 suclassent les scénarios #13 et #15.

-ceux qui ne surclassent pas leurs voisins selon

FIGURE 3.2

**EVALUATION DE 7 RESEAUX
AVEC POIDS DES CRITERES EGAUX
(SELON DES PARAMETRES SEVERES)**

ordre	# de scénario
1	9
2	11
3	12
4	1
5	5
6	14
7	6

PARAMETRES UTILISES			
<u>POIDS</u>			
poids de l'objectif associé à l'exploitant :		0.5	
poids de l'objectif associé aux usagers :		0.5	
poids du critère TV :		0.125	poids du critère TES : 0.125
poids du critère TA :		0.125	poids du critère NS : 0.125
<u>SEUILS</u>			
critères	seuils d'indifférence		seuils de préférence *
TV	0	(min.)	0.06 (min.)
TA	0	(min.)	0.39 (min.)
TES	0	(min.)	0.04 (min.)
NS	0	(unité)	0.01 (unité)
\$	0		218 580
* plus petit écart			

TABLEAU 3.1

VERIFICATION DES RESULTATS

 = scénario retenu par PROMETHEE
(données exprimées en valeurs moyennes)

les réseaux #1 à #5

numéro de scénario	#1	#2	#3	#4	#5
nombre de véhicules requis	49	56	58	58	59
temps total d'un voyage	59.16	59.85	60.92	59.70	57.00
- temps en véhicule	18.49	20.22	18.93	20.10	17.08
- temps d'attente	18.90	12.23	11.96	12.01	12.23
- temps d'entrée-sortie	21.76	27.40	30.03	27.59	27.69
nombre de sections utilisées	1.27	1.44	1.24	1.43	1.28

les réseaux #6 à #9

numéro de scénario	#6	#7	#8	#9
nombre de véhicules requis	59	60	61	61
temps total d'un voyage	55.11	59.22	59.60	54.46
- temps en véhicule	15.96	18.46	20.82	18.17
- temps d'attente	11.29	14.43	12.39	10.29
- temps d'entrée-sortie	28.28	26.32	26.38	26.01
nombre de sections utilisées	1.33	1.53	1.49	1.24

les réseaux #9 à #11

numéro de scénario	#9	#10	#11
nombre de véhicules requis	61	64	64
temps total d'un voyage	54.46	58.15	54.09
- temps en véhicule	18.17	17.97	18.23
- temps d'attente	10.29	13.35	9.72
- temps d'entrée-sortie	26.01	26.83	26.14
nombre de sections utilisées	1.24	1.37	1.18

les réseaux #12 à #15

numéro de scénario	#12	#13	#14	#15
nombre de véhicules requis	75	79	79	98
temps total d'un voyage	59.05	60.47	52.90	60.35
- temps en véhicule	18.32	21.33	18.58	21.40
- temps d'attente	8.51	12.53	7.84	12.05
- temps d'entrée-sortie	28.18	26.60	26.48	26.89
nombre de sections utilisées	1.03	1.49	1.13	1.43

chacun des critères d'évaluation (soit de façon relative). D'une part les scénarios #1 et #5 ne surclassent pas de façon absolue les scénarios #2, #3, #4, et d'autre part les scénarios #9 et #11 ne surclassent pas non plus le scénario #10;

-ceux qui sont surclassés de façon relative ou absolue.

-sans pondération les scénarios #1, #5, #6, #9, #11, #12 et #14 sont, de façon évidente, supérieurs aux autres, tels qu'identifiés par la méthode PROMETHEE. Ainsi, selon les variables "nombre véhicules requis", "temps moyen total de voyage" et "nombre moyen de sections utilisées", tous ces scénarios surclassent leurs concurrents;

-les scénarios #7, #8, #13 et #15 peuvent être éliminés sans aucune ambiguïté selon le tableau 3.1 et, effectivement, ils se retrouvent en fin de liste selon le classement de la méthode PROMETHEE.

-seul le scénario #3 pourrait éventuellement monter à un rang supérieur dans le classement puisque les valeurs de 2 de ses critères sont meilleures que celles des réseaux #1 et #5. Cette caractéristique se

reflète dans les résultats de PROMETHEE puisque le premier réseau qui suit les 7 meilleurs du classement est le #3. Cependant ce changement de rang ne peut s'effectuer que par l'entremise de la pondération.

-hormis le scénario #11, aucun concurrent sérieux ne pourrait venir changer le rang du scénario #9 dans le classement. Le scénario #12 est beaucoup plus coûteux en terme de véhicules requis. Alors que le scénario #6, bien qu'il ait des coûts d'opération plus élevés, offre un niveau de service inférieur.

-concernant le scénario #11, aucun concurrent sérieux ne peut venir changer son rang, à l'exception du #9;

-les réseaux #9 et #11 représentent les meilleurs compromis selon la méthode PROMETHEE parce que ce sont ceux qui surclassent le plus leurs concurrents et aussi parce que ce sont ceux qui sont le moins surclassés par l'ensemble des autres scénarios.

A l'aide d'une pondération à poids égaux, l'application de la méthode PROMETHEE a permis d'identifier que les scénarios à meilleur compromis sont par ordre d'importance les scénarios #9 et #11. A présent, examinons l'effet de la pondération à poids variés sur les résultats fournis par

la méthode PROMETHEE.

3.2 L'évaluation des réseaux de transport avec poids variés

Est-ce que la pondération joue bien son rôle de modélisation du niveau d'importance à accorder aux différents critères selon les groupes d'hypothèses avancées? Cette section apporte dans une certaine mesure des éléments de réponse.

3.2.1 L'évaluation avec poids variés pour fin de filtrage

La méthode d'analyse multicritère est à nouveau utilisée pour diminuer le nombre de scénarios de réseau à soumettre à l'évaluation. Les 15 scénarios sont soumis à la méthode PROMETHEE avec des seuils "sévéres" et 5 différents vecteurs de poids, chacun constitué à partir de plusieurs hypothèses.

La figure 3.3 présente le classement obtenu pour chacun des vecteurs de poids établi au chapitre 2. La supériorité des scénarios identifiés comme tel lors du premier filtrage est maintenue, et cela malgré la diversité de poids soumis à la méthode. En effet les scénarios se retrouvant en tête

FIGURE 3.3

**FILTRAGE DE 15 RESEAUX
AVEC POIDS DES CRITERES VARIÉS
(PAR GROUPES D'HYPOTHESES (GH))
(SELON LES PARAMETRES SEVERES)**

⊖ = Instabilité du classement

ordre		H0	GH1	GH2	GH3	GH4	GH5
1		9	11	9	9	9	11
2	#	11	9	11	11	11	9
3		12	12	12	12	12	12
4	d	1	1	1	1	1	1
5	e	6	14	6	14	14	14
6		5	3	14	5	5	3
7	s	14	5	5	6	3	5
8	c	3	6	3	3	6	6
9	é	10	10	10	10	10	10
10	n	4	4	7	4	4	4
11	a	7	2	4	7	2	2
12	r	2	7	8	2	7	8
13	l	8	8	2	8	8	7
14	o	13	13	13	13	13	13
15		15	16	15	15	15	15

PARAMETRES UTILISES					
<u>POIDS OBJECTIFS</u>					
poids de l'objectif associé à l'exploitant :				0.5	
poids de l'objectif associé aux usagers :				0.5	
<u>POIDS CRITERES</u>					
GH1	GH2	GH3	GH4	GH5	
TV = 0.063	TV = 0.083	TV = 0.071	TV = 0.066	TV = 0.055	
TES = 0.063	TES = 0.083	TES = 0.071	TES = 0.033	TES = 0.111	
TA = 0.125	TA = 0.166	TA = 0.143	TA = 0.133	TA = 0.111	
NS = 0.250	NS = 0.166	NS = 0.214	NS = 0.266	NS = 0.222	
\$ = 0.500	\$ = 0.500	\$ = 0.500	\$ = 0.500	\$ = 0.500	
(pour H0 : 0.125 pour les temps et ns, 0.5 pour les coûts)					
<u>SEUILS</u>					
critères	seuils	d'indifférence	seuils de préférence		
TV		0 (min.)	0.03 (min.)		
TES		0 (min.)	0.04 (min.)		
TA		0 (min.)	0.05 (min.)		
NS		0 (unité)	0.01 (unité)		
\$		0	100	363	

de liste suite au premier filtrage sont identifiés à nouveau tandis que les pires réseaux demeurent en fin de classement. Toutefois les effets de la pondération se font remarquer puisqu'on peut noter une instabilité dans l'ordre des scénarios pour chacune des moitiés du classement. L'analyse de cette instabilité dans l'ordre des scénarios, selon le vecteur de poids utilisé, est faite en annexe et permet de retenir principalement les remarques suivantes :

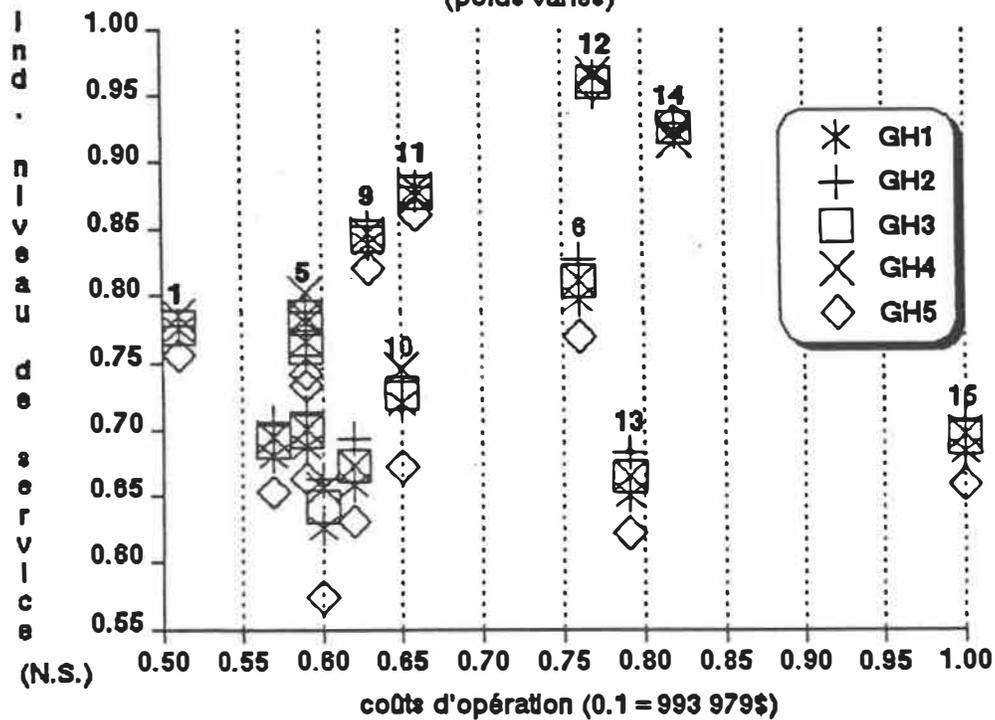
- les variations importantes de poids amènent effectivement un changement de l'ordre des scénarios;
- lorsque les variations de poids sont minimales, à savoir inférieures à 0.1, le classement obtenu est difficile à justifier;
- le peu de modifications dans le classement des scénarios situés en tête de liste s'explique par le fait que ces derniers ne rencontrent pas de concurrents assez performants pour les déclasser. En effet le manque de scénarios à meilleur compromis situés entre les deux réseaux extrêmes #1 et #12 a déjà été mentionné, il se vérifie une fois de plus.

Même en utilisant les seuils "souples" les scénarios performants demeurent en tête du classement, et cela

indépendamment du vecteur de poids utilisé. Seul l'ordre des scénarios varie selon le vecteur de poids, cependant pour des fins de filtrage, seule l'identification des premiers scénarios importe. Malheureusement l'approche graphique utilisée à la section précédente ne peut nous aider à départager les scénarios à éliminer de ceux à conserver pour une évaluation approfondie. En effet ce mode de présentation ne montre pas la différenciation fine des scénarios que fait la méthode PROMETHEE lorsque la pondération est appliquée. Le graphique 3.2 témoigne de cette faiblesse de représentation.

Les scénarios retenus pour fin d'évaluation sont : #1, #3, #5, #6, #9, #11, #12 et #14 parce que d'une part à la section précédente ils ont été identifiés comme étant performants, et que d'autre part, bien qu'ils soient dans un ordre différent selon le vecteur de poids utilisé, ils se retrouvent en tête des classements effectués par PROMETHEE. Il faut rappeler que le scénario #3 est ajouté à cette liste de réseaux devant faire l'objet d'évaluation parce que, soumis à une pondération variée, il peut devenir un meilleur concurrent des candidats #1 et #5. La section suivante présente l'évaluation de ces 8 scénarios de réseau.

GRAPHIQUE 3.2 COÛTS D'OPERATION Vs INDICE DU N.S.
(poids variés)



Les numéros servent à l'identification des scénarios de réseau.

Une valeur de 1 de l'indice du niveau de service signifie une valeur minimale pour chacun des critères : temps moyen en véhicule, temps moyen d'attente, temps moyen d'entrée-sortie et nombre moyen de sections utilisées. L'importance relative de chacun des critères varie selon les groupes d'hypothèses présentés ci-dessous.

PARAMETRES		UTILISES		
<u>POIDS</u>		<u>OBJECTIFS</u>		
poids de l'objectif associé à l'exploitant	:	0.5		
poids de l'objectif associé aux usagers	:	0.5		
<u>POIDS</u>		<u>CRITERES</u>		
GH1	GH2	GH3	GH4	GH5
TV = 0.063	TV = 0.083	TV = 0.071	TV = 0.066	TV = 0.055
TES = 0.063	TES = 0.083	TES = 0.071	TES = 0.033	TES = 0.111
TA = 0.125	TA = 0.166	TA = 0.143	TA = 0.133	TA = 0.111
NS = 0.250	NS = 0.166	NS = 0.214	NS = 0.266	NS = 0.222
\$ = 0.500	\$ = 0.500	\$ = 0.500	\$ = 0.500	\$ = 0.500
(pour H0 : 0.125 pour les temps et ns, 0.5 pour les coûts)				

3.2.2 L'évaluation des 8 réseaux retenus

Une première analyse des scénarios de réseau à l'aide des seuils "sévères" et des différents vecteurs de poids n'a pas permis de vérifier si l'opération de la pondération est pertinente. En effet, les résultats obtenus identifient un même classement de scénarios indépendamment des vecteurs de poids utilisés, soit par ordre d'importance décroissante les réseaux suivants : #1, #5, #9, #11, #12, #3, #14 et #6. Il est donc intéressant de diminuer la sévérité des seuils tel qu'établie à la section 2.6 en modifiant ces paramètres.

Les paramètres "souples" utilisés avec PROMETHEE ont permis des classements de scénarios qui sont différents selon les groupes d'hypothèses utilisés. La figure 3.4 illustre ces différences, à savoir :

- le scénario #11 est maintenant celui qui représente le réseau à meilleur compromis;
- les 4 premiers scénarios des différents classements demeurent très stables, par opposition aux réseaux de la deuxième moitié de certains classements;
- malgré l'importance du poids accordé au critère "coûts

FIGURE 3.4

**EVALUATION DE 8 RESEAUX
AVEC POIDS DES CRITERES VARIES
PAR GROUPES D'HYPOTHESES (GH)
SELON LES PARAMETRES SOUPLES**

○ = instabilité du classement

ordre	#	H0	GH1	GH2	GH3	GH4	GH5
1	d	9	11	11	11	11	11
2	e	11	9	9	9	9	9
3	s	12	12	12	12	12	12
4	c	5	5	5	5	5	5
5	é	1	14	14	14	14	1
6	n	14	1	1	1	1	14
7	a	6	3	6	6	3	3
8	r i o	3	6	3	3	6	6

PARAMETRES UTILISES				
<u>POIDS OBJECTIFS</u>				
poids de l'objectif associé à l'exploitant :			0.5	
poids de l'objectif associé aux usagers :			0.5	
<u>POIDS CRITERES</u>				
GH1	GH2	GH3	GH4	GH5
TV = 0.063	TV = 0.083	TV = 0.071	TV = 0.066	TV = 0.055
TES = 0.063	TES = 0.083	TES = 0.071	TES = 0.033	TES = 0.111
TA = 0.125	TA = 0.166	TA = 0.143	TA = 0.133	TA = 0.111
NS = 0.250	NS = 0.166	NS = 0.214	NS = 0.266	NS = 0.222
\$ = 0.500	\$ = 0.500	\$ = 0.500	\$ = 0.500	\$ = 0.500
(pour H0 : 0.125 pour les temps et ns, 0.5 pour les coûts)				
<u>SEUILS</u>				
critères	seuils	d'indifférence	seuils de préférence	
TV		0.06 (min.)	3.02 (min.)	
TES		0.04 (min.)	4.02 (min.)	
TA		0.27 (min.)	4.39 (min.)	
NS		0.01 (unité)	0.30 (unité)	
\$	218 580		8 142 635	

d'opération", le scénario extrême #1 est maintenant surclassé par les réseaux #14 et #5.

La pondération n'a donc pas introduit de grands changements dans le classement des scénarios de réseau de tête de liste, seul l'ordre des scénarios #9 et #11 est interverti. Mais avant de commenter ces résultats voyons l'effet des paramètres sur l'un des classements obtenu.

3.2.3 L'analyse de sensibilité des résultats

L'analyse de sensibilité des résultats consiste à identifier pour chacun des paramètres un intervalle de variation pour lequel le rang des quatre premiers scénarios d'un classement demeure inchangé. On modifie la valeur d'un seul paramètre à la fois. Le but de l'opération est d'identifier quels paramètres peuvent avoir le plus d'influence sur les résultats, et de mesurer l'influence exercée.

Le tableau 3.2 présente les résultats de l'analyse de sensibilité effectuée à partir du classement fait avec le vecteur de poids GH1 de la figure 3.4. Ce sont les poids et les seuils de préférence qui influencent le plus les résultats finaux puisque leurs indices de stabilité sont

tableau 3.2 Indices de stabilité des résultats

variable	variation négative		valeur de départ	variation positive		valeur de l'indice
	absolue	%		absolue	%	
POIDS						
\$	0.420	[-16%]	0.500	0.565	[+12%]	28
TV	0.000	[-100%]	0.063	0.131	[+110%]	220
TA	0.000	[-100%]	0.063	0.171	[+173%]	273
TES	0.041	[-67%]	0.125	0.258	[+107%]	174
NS	0.165	[-34%]	0.250	0.435	[+73%]	107
SEUILS D' INDIFFERENCE						
\$	* ---	[---]	218580.00	728000.000	[+333%]	333
TV	---	[---]	0.06	aucun changement		---
TA	---	[---]	0.27	aucun changement		---
TES	---	[---]	0.04	1.30	[+3150%]	3150
NS	---	[---]	0.01	0.08	[+700%]	700
SEUILS DE PREFERENCE						
\$	6432681.000	[-21%]	18142635.00	11154409.00	[+37%]	58
TV	aucun changement		3.02	aucun changement		---
TA	aucun changement		4.39	aucun changement		---
TES	1.730	[-569%]	4.02	aucun changement		569
NS	0.160	[-47%]	0.30	0.43	[+43%]	90

* ne s'applique pas

faibles. En effet plus le poids est élevé, plus la sensibilité des résultats au critère associé à ce même poids est importante. Par ailleurs un poids très faible annule l'effet des seuils d'indifférence et de préférence, à savoir approximativement inférieur à 0.1 unité. Le deuxième type de paramètres auquel le classement est le plus sensible est le seuil de préférence, dépendamment bien sûr des poids choisis. En effet, le seuil de préférence est le paramètre qui tranche, pour un critère donné, entre le surclassement d'un premier scénario par rapport à un deuxième, ou l'inverse. De plus le seuil de préférence est le paramètre qui est déterminant lors de la composition de la fonction de préférence. C'est principalement pour ces 2 raisons que ce paramètre influence autant un classement.

Ces deux types de paramètres doivent donc faire l'objet d'une attention particulière. Bien que les seuils d'indifférence et de préférence aient été choisis à partir d'une position claire, le choix des poids qui ont été utilisés laisse place à plus d'expérimentation du côté de la pondération.

3.3-Les résultats obtenus

3.3.1-L'analyse de la méthode utilisée

L'utilisation des écarts permet de différencier avec précision 2 réseaux par rapport à chacun des critères d'évaluation. Alors que les seuils sont utilisés en fonction de ces écarts, ceux-ci permettent de modéliser la décision, puisque leur signification est claire, par la détermination de l'intensité de préférence. Cependant lorsqu'il y a fusion de l'intensité de préférence associée à chacun des critères pour former l'indice de préférence multicritère, la justification des choix proposés devient douteuse. La simplicité de l'application de la méthode avec des poids égaux a néanmoins permis de corroborer les résultats obtenus à l'aide d'une représentation graphique des valeurs réelles associées aux critères pour chacun des réseaux. Ainsi la méthode est précise pour le classement des réseaux avec l'utilisation de poids égaux. Toutefois il y a complication lorsque des poids variés sont utilisés. D'abord concernant la complexité engendrée, qui rend difficile un suivi systématique de l'exécution de la méthode, ensuite par le manque de moyen pour vérifier avec exactitude si les résultats obtenus sont justifiés.

3.3.2 L'interprétation des résultats

Le tableau 3.3 présente les scénarios en tête de classement selon les différents ensembles de paramètres utilisés.

tableau 3.3 Résultats globaux

ordre		classements selon:			
		les poids égaux et les seuils		les poids variés et les seuils	
		sévères	souples	sévères	souples
1	#	9	9	1	11
2	s	11	11	5	9
3	c	12	12	9	12
4	é.	1	1	11	5

Une pondération où les poids sont égaux place le scénario #9 comme étant le réseau à meilleur compromis et le scénario #11 comme étant le deuxième meilleur, indépendamment des seuils extrêmes utilisés. Ces classements sont le reflet de la supériorité des scénarios #9 et #11 sur l'ensemble des réseaux évalués. Cette supériorité signifie, selon les principes sous-jacents à la méthode PROMETHEE, que les 2 scénarios concernés sont à la fois ceux qui surclassent le plus l'ensemble des scénarios et ceux qui sont le moins surclassés par ces derniers. En des termes moins rigoureux mais résumant pourtant très

exactement la méthode utilisée, la supériorité du scénario #9 peut être exprimée comme suit: le scénario #9 est d'un niveau de performance supérieur ou au moins égal à l'ensemble des scénarios relativement à certains critères d'évaluation, sans être trop nettement moins performant que l'ensemble des scénarios selon les autres critères considérés.

Cependant une pondération avec des poids variés a permis d'identifier de nouveaux scénarios comme étant les réseaux à meilleur compromis, soit les réseaux #1 et #11. Un maximum de sévérité quant à la fixation des seuils a permis, après l'application de la méthode, d'identifier le réseau #1. Par contre selon la fixation des seuils "souples", le scénario #11 représente la solution à meilleur compromis. Ce dernier surclasse le scénario #9 parce que le poids du critère "nombre moyen de sections utilisées" est élevé et que la valeur de ce critère pour le scénario #11 est meilleure (1.18 versus 1.24). Toutefois le rang du scénario #1 s'explique d'abord par le fait que le niveau de service qu'il offre est moyen et qu'ensuite les coûts d'opération qui le caractérisent sont minimums.

La comparaison des 2 séries de résultats, soit avec poids égaux et avec poids variés, ne permet pas de conclure à l'efficacité de cette composante de la modélisation des

préférences. Par conséquent celle-ci demeure le talon d'Achille de la méthode utilisée, d'abord concernant la justification des valeurs choisies, ensuite et surtout de la possibilité de mesurer avec précision si elle traduit bien ce que l'on désire qu'elle exprime.

Par ailleurs, les multiples applications de la méthode d'analyse multicritère ont permis d'observer que le choix des scénarios pour fin d'évaluation ne comportait pas une grande quantité de réseaux à meilleur compromis. En effet mis à part les scénarios extrêmes, c'est-à-dire les 2 réseaux qui répondent parfaitement à l'un ou l'autre des 2 objectifs, le niveau de compétitivité des autres candidats classifiés est trop faible. Cette lacune a empêché de prouver hors de tout doute l'utilité de l'application de la méthode d'analyse multicritère avec une pondération variée et la validité de la procédure de pondération.

Cependant l'efficacité de la méthode FROMETHEE ne peut être mise en doute comme moyen de filtrer un premier ensemble de réseaux à évaluer. En effet, sans pondération, la méthode utilisée a classé les réseaux selon l'ordre suivant:

- 1- l'ensemble des réseaux à meilleur compromis;

2-les deux réseaux extrêmes;

3-l'ensemble des réseaux qui ne sont pas surclassés selon tous les critères par les scénarios à meilleur compromis, c'est-à-dire ceux qui, soumis à une pondération, pourraient modifier l'ordre d'un classement;

4-en fin de liste, les réseaux qui peuvent être éliminés de la procédure d'évaluation sans ambiguïté possible.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'utilisation de l'analyse multicritère en évaluation de réseaux de transport est un instrument utile d'aide à la décision lorsque des poids égaux sont affectés aux critères. En effet le classement obtenu selon ces paramètres différencie clairement les réseaux à meilleur compromis des réseaux extrêmes ou de ceux qui sont à éliminer. Le résultat du classement a pu être vérifié à l'aide d'une présentation graphique de la valeur des critères pour chacun des réseaux évalués.

Cependant lorsque l'on fait intervenir différents vecteurs de poids dans l'exécution de la méthode, la justification des classements de réseaux obtenus devient douteuse. En effet la complexité qu'engendre l'introduction de poids variés entrave un suivi des étapes de la méthode qui permettrait de déterminer si les résultats obtenus sont exacts. En complément il serait donc nécessaire de développer une procédure permettant de vérifier si la pondération répond de façon précise à nos attentes puisqu'elle influence de manière appréciable les résultats.

Par ailleurs l'application de la méthode multicritère a permis de remarquer que l'ensemble des réseaux choisis pour

fin d'évaluation comportait trop peu de scénarios compétitifs entre eux. Par conséquent il serait adéquat d'effectuer une nouvelle analyse multicritère à l'aide de plusieurs réseaux de transport déjà classés "à meilleur compromis".

Pour ces 2 raisons l'interprétation des résultats suivants, obtenus à l'aide d'une pondération variée, doit être faite avec réserve. A l'aide de poids égaux pour les critères d'évaluation ce sont des réseaux performants avec toutefois des caractéristiques médianes de niveau de service et de coûts d'opération qui ont été proposés par la méthode utilisée. Selon l'ensemble des réseaux évalués, ils constituent un choix de compromis intéressant lorsque les réseaux extrêmes n'amènent pas de consensus entre les décideurs. Toutefois à l'aide d'une pondération variée des critères d'évaluation l'application de la méthode laisse place à plus de latitude quant à la différenciation des réseaux, malgré la difficulté de justifier les résultats obtenus. Ainsi à l'aide de seuils de préférence "sévères" le réseau à meilleur compromis est celui qui se caractérise par un minimum de coûts d'opération. Alors qu'avec des seuils de préférence "souples", c'est un réseau aux caractéristiques médianes qui est identifié par la méthode.

BIBLIOGRAPHIE

BALL R. B. (1977), "Priority Ranking of Schemes within the TRP", paper J16 presented to PTRC Summer Annual Meeting, University of Warwick, England: Planning and Transport Research and Computation Ltd. London.

BARBIER M., "Essai de rationalisation du choix des investissements de transport pour le VI^e Plan en Région Parisienne-Cahiers de l'IAURP 25, pp. 3-29, Paris.

BENAYOUN R., J. de MONGOLFIER, J. TERGNY, O. LARICHEV (1971), "Linear Programming with Multiple Objective Functions: Step Method (STEM)", Math. Programming 1(3).

BERTHIER P., B. ROY (1971), "La méthode ELECTRE II: une méthode de classement en présence de critères multiples", Note de travail 142, SEMA, Direction scientifique.

BOYCE D. E., M. D. DAY, C. McDONALD (1970), "Metropolitan Plan Making: An Analysis of Experience with the Preparation and Evaluation of Alternative Land Use of Transportation Plans", Monograph serie number 4, Regional Science Research Institute, Philadelphia, PA.

BRANS J. P., Ph VINCKE (1982), "Une méthode de surclassement basée sur des intensités de préférence", Cahier du C.E.R.O., vol. 24, nos 2-3-4.

BRANS J. P., Ph. VINCKE, B. MARESCHAL (1986), "How to Select and How to Rank Projects: The PROMETHEE Method", European Journal of Operational Research 24, pp. 228-238.

BUCHANAN J.T., H.G. DAELLENBACK (1987), "A Comparative Evaluation of Interactive Solution Methods for Multiple Objective Decision Models", European Journal of Operational Research 29, pp. 353-359.

CHAPLEAU R., B. ALLARD, M. CANOVA, "MADITUC, un modèle de planification opérationnelle adapté aux entreprises de transport en commun de taille moyenne", Centre de recherche sur les transports - Publication #265, Ecole Polytechnique de Montréal, Section Génie des Transports, juillet 1982.

CHERWONY., W., S.R. MUNDLE, B.D. PORTER, G.R. GLEICHMAN (1982), "Review for Bus Costing Procedures", Transportation Research Record no. 854, pp. 54-60, Transportation Research Board, Washington, D.C.

CURRENT J., H. MIN (1986), "Multiobjective Design of Transportation Networks: Taxonomy and Annotation", European Journal of Operational Research 26, pp. 187-201.

DAVID H. (1963), "The Method of Paired Comparisons", London : Charles Griffin and Compagny Ltd.

ECKENRODE R. T. (1965), "Weighting Multiple Criteria", Management Science, 12, no 3, pp. 180-192.

FIELDING G. J., R. E. GLAUTHIER (1976), "Distribution and Allocation of Transit Subsidies in California", Irvine, California : Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine.

FIELDING G. J., R. E. GLAUTHIER, C. A. LAVE (1977), "Development of Performance Indicators for Transit", Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.

GODARD X. (1981), "Choix des investissements" et "Objectifs et utilisation des études d'évaluation de projets", Revue Transports, volume 262, avril-mai, pp. 226-236.

GOLDEN B., T. MAGNANTI (1977), "Deterministic Network optimization : A Bibliography", Networks 7, pp. 149-183.

GOLDEN B., M. BALL, L. BODIN (1981), "Current and Future Research in Network optimization", Computers and Operations Research 8, pp. 71-81.

GIULIANO G. (1985), "A Multicriteria Method for Transportation Investment Planning", Transportation Research A, volume 19A, pp. 29-41.

GRABE W. (1978), "Choix d'un moyen de transport urbain", UITP Revue, 3, pp. 205-210.

HEATON C. (1980), "Designing a Transit Performance Measurement System", Transit Journal 6, pp. 49-56.

HILL M. (1967), "A Method for Evaluation of Transportation plans", Highway Research Record no. 180, pp. 145-167.

HILL M. (1968), "A Goals-achievement Matrix for Evaluating Alternative plans", Journal of the American Institute of Planners 34(1), pp.19-29.

HOROWITZ A. L., D. J. ZLOSEL (1981), "Transfer Penalties: Another Look at Transit Riders' Reluctance to Transfer", Transportation 10, pp.279-282.

JANARTHANAN N, J. SCHNEIDER (1987), "Multicriteria Evaluation of Alternative Transit System Designs", Department of Civil Engineering, University of Washington, Seattle, Washington.

LECLERCQ J. P. (1984), "Proposition d'extension de la notion de dominance en présence de relations d'ordre sur les pseudo-critères : la méthode MELCHIOR", R.B.ST.I.R.O, vol. 24, no 1.

MACKIE S., A. KING (1974), "Managing Uncertainty in Plan Evaluation", The Planner 60(9), pp. 37-40.

MANHEIM M. (1966), "Hierarchical Structure : A Model of Design and Planning Process", M.I.T. Report No. 7, Cambridge, MA, 227 pp.

MARESCHAL B. (1988), "Weight Stability Intervals in Multicriteria Decision Aid", European Journal of Operational Research 33, pp.54-64.

MARESCHAL B., J. P. BRANS (1988), "Geometrical Representation for MCDA", European Journal of Operational Research 34, pp. 69-77.

ROUBENS M. (1982), "Preference Relations on Actions and Criteria in Multicriteria Decision Making", European Journal of Operational Research 10, pp. 51-55.

ROY B. (1968), "Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE)", Rev. Française Automat., Informat., Recherche Opérationnelle 8.

ROY B. (1978), "ELECTRE III : un algorithme de rangement fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples", Cahier du Centre d'Etudes de Recherche Opérationnelle, vol. 20, no 1.

ROY B., HUGONNARD J.C. (1982), "Classement des prolongements de lignes de métro en banlieue Parisienne (présentation d'une méthode multicritère originale)", Cahiers du Centre d'études de recherche opérationnelle, vol. 24, nos 2-3-4.

ROY B., M. PRESENT D. SILHOL (1983), "Programmation de la rénovation des stations du métro parisien : un cas d'application de la méthode ELECTRE III", Université de Paris Dauphine, Document LAMSADE no.24.

ROY B., M. PRESENT, D. SILHOL (1986), "A Programming Method for Determining Which Paris Metro Station Should be Renovated", European Journal of Operational Research 24, pp. 318-334.

SAATY T. L. (1977), "A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures", Journal of Mathematical Psychology 15, pp. 234-281.

SAATY T. L. (1978), "Exploring the Interface Between Hierarchies, Multiple Objectives and Sets", Fuzzy Sets and Systems 1, pp. 57-68.

SCHLAGER K. (1968), "The Rank-Based Expected Value Method of Plan Evaluation", Highway Research Record no. 238, pp. 123-152.

SCHIMPELER C. C., W. L. GRECCO (1968), "The Community Systems Evaluation : An Approach Based on Community Structure and Values", Highway Research Record no. 238, pp. 153-158.

SIMPSON J. D. (1976), " Denver-Alternatives Analysis", Mass. Transit.

SOLYMOSI T., J. DOMBI (1986), "A Method for Determining the Weights of the Criteria : the Centralized Weights", Journal of European Operational Research 26, pp. 35-41.

STOPHER, P.R., L. BRANDRUP, B. LEE, S.T. PARRY (1987), "Development of a Bus Operating Cost Allocation Model Compatible with UMTA Urban Transportation Planning System Models", Transportation Research Record no. 1108, pp. 31-41, Transportation Research Board, Washington, D.C.

TALLEY W. K. (1986), "A Comparison of Two Methodologies for Selecting Transit Performance Indicators", Transportation 13, pp. 201-210.

TALLEY W. K., P. P. ANDERSON (1979), "Effectiveness and Efficiency in Transit Performance : A Theoretical Perspective", Transportation Research 15A, pp. 431-436.

TEODOROVIC D. (1985), "Multicriteria Ranking of Air Shuttle Alternatives", Transportation Research B, vol. 19B, no. 1, pp. 63-72.

THURSTONE L. (1967), "The Measurement of Values", Chicago : University of Chicago Press.

TYSON W. J. (1977), "The Role of Evaluation Indicators in Transportation Planning", *Transportation Planning and Technology* 4, pp. 37-45.

U.S. Department of Transportation (1978), "Proceedings of the First National Conference on Transit Performance", Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.

VOOGD H. (1982), "Multicriteria Evaluation with Mixed Qualitative and Quantitative Data", *Environment and Planning B* 9, pp. 221-236.

WALLENIOUS J. (1974), "Interactive Multiple Criteria Decision Methods : an Investigation and an Approach", The Helsinki School of Economics.

ZELNY M. (1976), "The Theory of the Displayed Ideal in Multiple Criteria Decision Making", Kyoto 1975, Springer-Verlag, Berlin.

ZIONTS S., J. WALLENIOUS (1975), "An Interactive Programming Method for Solving the Multiple Criteria Problem", European Institute for Advanced Studies in Management, Working paper 74-10.

MARQUE DEPOSEE

LOTUS est une marque déposée de Lotus Development Corporation.

LISTE DES ANNEXES

- A METHODES D'ANALYSE MULTICRITERE

- B PONDERATION DES CRITERES

- C EFFETS DE LA PONDERATION SUR LE CLASSEMENT DES RESEAUX

- D GRAPHIQUE DES COUTS D'OPERATION Vs L'INDICE DU NIVEAU
DE SERVICE

- E ANALYSE DE SENSIBILITE DES RESULTATS

ANNEXE A

METHODES D'ANALYSE MULTICRITERE

L'émergence des méthodes d'analyse multicritère se situe aux environs des années 60. En particulier les travaux de Hill (1967-68), Schimpeler et Grecco (1968), Schlager (1968), qui constituent des évaluations de projets à l'aide de sommes de valeurs pondérées. Il s'agit d'une première série de méthodes classiques d'analyse multicritère qui sont basées sur la théorie de l'utilité multiattribut. Cette théorie est soutenue par l'hypothèse que dans tout problème de décision il existe une fonction d'utilité (de valeur) U définie sur A (un ensemble d'actions) que le décideur désire maximiser ou minimiser. Ainsi les méthodes comportent essentiellement les étapes suivantes :

- la normalisation de la valeur de chacun des critères, pour chaque scénario à évaluer;
- la pondération de chacun des critères;
- la multiplication de la valeur normalisée du critère par le poids de celui-ci;
- pour chaque scénario, la somme de la valeur normalisée et pondérée de chacun des critères.

Bien que ces méthodes se sont affinées avec les années, soit par l'arrivée des comparaisons par paire (Saaty, 1977-78), soit par l'intégration d'une analyse de sensibilité des résultats (Mackie et King, 1974), elles demeurent simplificatrices car elles transforment des problèmes multidimensionnels en problèmes unidimensionnels.

Ainsi l'attention s'est tournée vers le développement de nouvelles méthodes d'analyse multicritère, des méthodes qui sont le moins réductrices possible face à la nature multidimensionnelle des problèmes posés. C'est en France ainsi qu'aux Pays-Bas que s'effectuent des développements intéressants sur les méthodes d'aide à la prise de décision. Plus précisément la naissance d'une deuxième série de méthodes, les méthodes de classement. La première de ces méthodes est la méthode ELECTRE. Avec la méthode ELECTRE I (Roy, 1968), l'auteur cherche à obtenir un sous-ensemble de scénarios à partir d'un ensemble de choix possibles (supposé fini). Une relation de surclassement (ou de préférence) est alors établie à partir principalement d'une analyse de concordance et de discordance, de poids pour la pondération, ainsi que de deux seuils (un pour la concordance et l'autre pour la discordance). La méthode ELECTRE I utilise simultanément une analyse de concordance et de discordance. Les résultats sont obtenus par la confrontation (intersection)

des deux analyses, sous contraintes des indices de concordance et de discordance.

ANALYSE DE CONCORDANCE-DISCORDANCE (ELECTRE)

Ainsi, selon le tableau suivant,

CRITERE	CARACTERISTIQUE	SCENARIOS						ECART
		A	B	C	D	E	F	
C1	MIN.	80.0	65.0	83.0	40.0	52.0	94.0	54.0
C2	MAX.	90.0	58.0	60.0	80.0	72.0	96.0	36.0
C3	MIN.	6.0	2.0	4.0	10.0	6.0	7.0	8.0
C4	MIN.	5.4	9.7	7.2	7.5	2.0	3.6	7.7
C5	MIN.	8.0	1.0	4.0	7.0	3.0	5.0	7.0
C6	MAX.	5.0	1.0	7.0	10.0	8.0	6.0	9.0

POUR "A SURCLASSE B"

CONCORDANCE: $1 + 1 + 1$ (voir texte qui suit)
 $= 3.0$

DISCORDANCE: $(80-65) / 54 + (6.0-2.0) / 8 + (8-1) / 7$
 $= 1.77$ (voir texte qui suit)

l'indice de concordance pour l'hypothèse "A surclasse B"

est le nombre de points de vue selon lesquels A est meilleur que B, ou équivalent à ce dernier, à savoir ici, 3 points de vue. Le terme surclasse, ou domine, signifie que les valeurs des critères de A sont meilleures (< si MIN. et > si MAX.) que celles de B pour tous les critères, ou qu'elles sont équivalentes avec au moins une valeur de A meilleure que B. Le dénombrement équivaut à une addition dans laquelle on compte "1" pour chaque point de vue concordant, c'est-à-dire où A surclasse B. Si une pondération est faite, les résultats sont ramenés à une valeur comprise entre 0 et 1, où 1 représente un cas d'unanimité quant à la supériorité de A sur B, et 0 l'inverse.

Toujours selon l'hypothèse "A surclasse B", on considère comme discordant uniquement les points de vue selon lesquels A est inférieur à B. L'écart entre la note de A et celle de B est donc calculé, et le plus grand est retenu (ce dernier est considéré comme étant l'indice de discordance). L'indice final est obtenu en divisant le plus grand écart effectif par le plus grand écart possible, le résultat étant ramené à une valeur comprise entre 0 et 1.

Une fois que les matrices de concordance et de discordance sont complétées, il s'agit de tirer une conclusion de celles-ci. Pour ce faire, deux seuils sont

définis, un de concordance (c) et un de discordance (d). Il est alors défini que A surclasse B si son indice de concordance est supérieur à " c " à la fois inférieur à son indice de discordance " d ". Les scénarios restants sont alors utilisés pour une nouvelle élimination, basée sur deux règles :

- un scénario éliminé doit être surclassé par au moins un scénario conservé;
- aucun scénario conservé ne doit surclasser un autre scénario conservé.

La théorie des graphes est utilisée pour visualiser les résultats obtenus par cette dernière élimination. Selon ce mode de représentation graphique les sommets du graphe représentent les scénarios en compétition, tandis que les arcs traduisent les relations de surclassement retenues après la sélection des seuils. La relation de surclassement traduit une modélisation de la qualification ressortant de la comparaison de deux scénarios, à savoir :

- le scénario A est préféré au scénario B ;
- le scénario A est indifférent du scénario B ;
- le scénario A est incomparable au scénario B .

Il s'agit finalement de faire varier " c " et " d " de

manière à n'obtenir qu'un sommet au graphe, car dans ce cas la décision ne fait plus aucun doute. Si cette dernière étape n'est pas possible, et que l'on se retrouve avec un sous-ensemble de scénarios à meilleur compromis, un examen supplémentaire est nécessaire pour désigner la meilleure solution. C'est l'inconvénient de la méthode ELECTRE I et c'est la raison pour laquelle a été mise au point ELECTRE II (Berthier et Roy (1971)). Cette dernière méthode bénéficie de deux innovations par rapport à l'originale, d'abord par l'apparition d'échelles, soit une par critère. Ces échelles de discordance sont de longueurs différentes pour traduire en notes les appréciations provenant de points de vue d'importance différents. La longueur des échelles varient dans le même sens que les poids attachés aux différents points de vue. L'indice de discordance est alors obtenu en divisant le plus grand écart par la longueur de la plus grande échelle.

Le deuxième élément nouveau est le paramètre de discordance (s), il joue un rôle dans le calcul de l'indice de discordance. Ce nouvel indice permet de diminuer la pénalité d'un scénario qui a un unique point de vue très discordant. On "pardonne" donc ce scénario, en retenant plutôt le deuxième scénario le plus discordant. Le paramètre " s " n'est que ce rang dans la discordance.

Aux méthodes ELECTRE I et II font suite les méthodes ELECTRE III (Roy, 1978) et IV (Hugonnard et Roy, 1982) qui représentent un progrès important selon les auteurs par rapport aux premières versions. Ce progrès se présente à un premier niveau, soit celui de la modélisation des préférences suivant chaque point de vue. En effet, les deux premières méthodes ont été créées à une époque où il semblait naturel que les préférences du décideur suivant un point de vue "e" soient représentées par un "vrai-critère", c'est-à-dire une fonction $F_e(x)$ telle que :

- x est strictement préféré à y dès que $F_e(x) > F_e(y)$;
- x est indifférent à y si et seulement si $F_e(x) = F_e(y)$.

On remarque que le saut est brusque entre l'indifférence et la préférence stricte. Pour remédier à cet inconvénient, les concepts de seuil d'indifférence et de quasi-critère sont utilisés. Rappelons que $F_e(x)$ est un quasi-critère si :

- x est strictement préféré à y lorsque $F_e(x) > F_e(y) + q_e(y)$;

-x est indifférent à y si et seulement si :

$$-F_e(x) \leq F_e(y) + q_e(y);$$

$$-F_e(y) \leq F_e(x) + q_e(x),$$

où q_e est le seuil d'indifférence (variable ou constant) associé au point de vue "e".

Mais une fois de plus le saut était trop brutal entre l'indifférence et la préférence stricte. C'est la raison pour laquelle B. Roy a introduit la notion de préférence faible, et la notion de préférence intermédiaire, entre l'indifférence et la préférence stricte. Cela traduit une hésitation entre les deux situations. Cette modification conduit à l'introduction de deux seuils, q_e^1 (indifférence) et p_e^2 (préférence), de telle sorte que :

-x est strictement préféré à y lorsque :

$$F_e(x) > F_e(y) + p_e^2;$$

-x est faiblement préféré à y lorsque :

$$F_e(y) + p_e^2(y) \geq F_e(x);$$

$$F_e(x) > F_e(y) + q_e^1(y);$$

-x est indifférent à y si et seulement si :

$$F_{\bullet}(x) \leq F_{\bullet}(y) + q_{\bullet}^{-1}(y);$$

$$F_{\bullet}(y) \leq F_{\bullet}(x) + q_{\bullet}^{-1}(x).$$

La fonction F_{\bullet} est alors appelée un pseudo-critère: cette notion est utilisée dans ELECTRE III ET IV. Toutefois, malgré les innovations apportées, ces deux méthodes font l'objet de certaines critiques. En particulier il faut mentionner que la notion de préférence faible était souvent mal comprise, autant par les théoriciens que par les praticiens, selon Roy.

Les changements entre ELECTRE I, II et ELECTRE III, IV se font à deux autres niveaux, d'abord au niveau de la construction de la relation de surclassement. En effet il faut souligner le manque de souplesse des deux premières méthodes. Une légère modification de ces paramètres pouvait conduire à une relation de surclassement totalement différente. De façon à pallier à cette lacune, les méthodes ELECTRE III, IV introduisent un surclassement fort et un surclassement faible.

Le dernier niveau de changement est celui de l'exploitation de la relation de surclassement. La méthode ELECTRE I arrivait le plus souvent en fait de résultat à un

sous-ensemble (solutions de compromis) de l'ensemble des scénarios de départ. Par contre la méthode ELECTRE II range les scénarios du meilleur au moins bon. Tandis que la méthode ELECTRE III, sans entrer dans les détails, conduit à une relation de surclassement flou, c'est-à-dire un surclassement faible, intermédiaire, ou fort. Le principal inconvénient de cette dernière méthode est toutefois le nombre de paramètres utilisés, ce qui résulte d'une grande complexité dans la détermination et l'interprétation de ceux-ci.

Finalement concernant la dernière née de la série de méthodes ELECTRE, la version IV, les principaux principes qu'elle propose constitue le fondement d'une nouvelle méthode appelée PROMETHEE.

PROMETHEE

En 1986 Brans, Vincke et Mareschal développent le premier concurrent sérieux à la famille de méthodes ELECTRE, la méthode PROMETHEE. Se voulant une nouvelle classe de méthode de classement, la méthode PROMETHEE introduit la notion de critère généralisé pour construire une relation de surclassement, et permet d'obtenir un ordonnancement partiel ou complet à partir d'un ensemble

fini d'actions possibles (scénarios). Les auteurs proposent six types de critères généralisés, ce qui selon eux, est suffisant pour la majorité des cas. Les paramètres à fixer concernant les critères généralisés ont tous une signification économique, ce qui facilite leur choix. A chaque critère d'évaluation le choix d'une fonction de préférence doit être fait. Une fois que ces choix sont faits, il s'en suit la construction d'un index de préférence qui s'effectue par une comparaison par paire de valeurs des critères entre les scénarios. L'index de préférence multicritère est défini comme étant une moyenne pondérée des résultats des fonctions de préférence :

$$\pi(a,b) = \frac{\sum_{i=1}^k \pi_i P_i(a,b)}{\sum_{i=1}^k \pi_i}$$

où $\pi(a,b)$ représente l'intensité de préférence du décideur pour l'action A, au détriment de l'action B, en considérant simultanément l'ensemble des critères. Compris inclusivement entre 0 et 1, un $\pi(a,b) \approx 0$ dénote une préférence faible de A par rapport à B, alors que 1

signifie une forte préférence. Deux ensembles de relation de surclassement permettent, une fois l'index de préférence complété, d'ordonnancer les scénarios selon un ordre partiel (PROMETHEE I) ou selon un ordre complet (PROMETHEE II). La méthode présentée considère simultanément les critères qui sont à maximiser et ceux qui sont à minimiser. Celle-ci peut donc être utilisée comme moyen de résolution d'un problème multiobjectif sans contrainte.

APPROCHES INTERACTIVES

Une troisième série de méthodes existe, elle est constituée des deux premières séries, il s'agit des méthodes interactives. Ces méthodes consistent en une alternance d'état de calcul et d'état de discussion. Le décideur précise ses préférences au planificateur, qui lui effectue les calculs et propose certaines solutions au premier. Le décideur joue deux rôles, d'une part il donne des poids aux différents critères d'évaluation, et d'autre part il apprécie les propositions issues des résultats. Parmi les méthodes de cette série, mentionnons celles de Zionts et al. (1975) et Wallenius (1974), qui utilisent la théorie de l'utilité multiattribut. Les décideurs font varier les poids de façon itérative jusqu'à l'atteinte d'une proposition satisfaisante pour eux.

SOMME PONDEREE AVEC DISTANCE MINIMALE A UN POINT IDEAL

Benayoun et al. présentent en 1971 la méthode STEM. Celle-ci est une méthode basée sur le calcul de la distance entre la valeur des différents critères et un point idéal. Chacun des critères est considéré comme étant chacun une dimension d'un espace donné. Chaque solution constitue un vecteur ligne (ou colonne). Le point idéal est une coordonnée dans un espace à n dimensions (où n est le nombre de critères d'évaluation) à partir duquel un vecteur des écarts est calculé (distance) pour chacune des solutions.

Une fois de plus les auteurs développent une méthode influencée par une variation des poids à partir des choix faits par les décideurs. En effet, si les décideurs ne sont pas satisfaits de la solution, le planificateur demande sur quel critère c_i sont-ils prêts à faire une concession d'un montant maximum de (δ_i) . A chaque itération un critère est éliminé, il y a donc un maximum de n itérations. Les méthodes utilisant un point idéal posent le problème de la détermination et de la justification des composantes de ce même point.

En 1982, Voogd propose une méthode d'analyse multicritère qu'il base sur une sommation pondérée. Toutefois il innove sur deux points; d'abord il utilise une méthode de pondération aléatoire (voir autre annexe), ensuite il traite simultanément les valeurs quantitatives et qualitatives.

La méthode présentée par Voogd est itérative, mais non interactive. Voogd attaque le problème de l'analyse simultanée des éléments qualitatifs et quantitatifs en proposant trois fonctions de standardisation. Ce sont: la somme des soustractions, la technique de la soustraction des changements d'intervalle, et la technique des intervalles additifs.

CONCORDANCE ET DISCORDANCE

En 1985, Giuliano introduit une méthode d'évaluation multicritère basée sur une analyse de concordance modifiée. L'objectif de la méthode est d'identifier les solutions à meilleur compromis. L'utilisation de l'analyse de concordance se fait de manière itérative. En effet, l'identification d'un sous-ensemble de solution à meilleur compromis s'effectue en changeant systématiquement le poids de chacun des objectifs. Les scénarios qui demeurent dans

le sous-ensemble de solutions non-dominées lorsque les poids varient sont définis comme étant les scénarios à meilleur compromis. Les changements de poids déterminent une aire de préférence pour laquelle les scénarios sont non-dominés, plus l'aire est grande pour un scénario donné, plus celui-ci est préféré. La ou les solutions trouvée(s) est (sont) satisfaisante(s) pour chacun des ensembles de poids, mais non-optimale(s) pour aucun. La méthode en est aussi une de recherche, soit la recherche de la solution qui est le plus près possible d'un point idéal prédéfini.

TOPSIS

En cette même année Teodorovic (1985) utilise une méthode basée sur la distance minimale à un point idéal et à la fois basée sur la distance maximale à la pire des solutions. La méthode est appelée TOPSIS.

La méthode TOPSIS mesure simultanément la distance (écart) entre un certain scénario (c'est-à-dire le vecteur de la valeur des critères) et d'une part une solution idéale, et d'autre part entre ce même scénario ainsi que le pire des scénarios. La méthode TOPSIS utilise des valeurs sans dimension pour la comparaison des scénarios. Ainsi la première étape de la procédure est la construction de la

matrice R suivante :

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m ((x_{ij})^2)^{1/2}}$$

En multipliant ensuite la matrice R par le vecteur colonne des poids w_j , nous obtenons la matrice normalisée. Celle-ci permet de déterminer la valeur de la solution idéale et celle de la pire solution, qui se définissent respectivement comme suit :

$$A^* = \{(\max_i v_{ij}, j \in J), (\min_i v_{ij}, j \in J'), i=1 \text{ à } m\}$$

$$= \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\}$$

$$A^- = \{(\min_i v_{ij}, j \in J), (\max_i v_{ij}, j \in J'), i=1 \text{ à } m\}$$

$$= \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}$$

où J est l'ensemble des critères qui amènent des

bénéfices (ou à maximiser), et J' l'ensemble des critères de coût (ou à minimiser).

La distance entre un scénario donné et la solution idéale (ou avec la pire solution en remplaçant v_{j^*} par v_{j^-}) se définit alors comme suit :

$$S_{i^*} = \sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_{j^*})^2, \quad i=1 \text{ à } m.$$

En calculant de la même manière S_{i^-} le rapprochement relatif entre le scénario A_i et la solution idéale est :

$$C_{i^*} = \frac{S_{i^-}}{S_{i^*} + S_{i^-}}, \quad 0 \leq C_{i^*} \leq 1, \quad i=1 \text{ à } m.$$

Le meilleur scénario est alors celui qui possède la valeur de C_{i^*} la plus élevée, c'est-à-dire celui dont le C_{i^*} est le plus près possible de la valeur 1.

La liste des méthodes d'analyse multicritère présentée dans cet annexe n'est pas exhaustive, mais demeure le reflet des principales approches utilisées en transport ou

dans d'autres champs d'intérêt. La figure de la page suivante présente les principales caractéristiques méthodologiques de ces méthodes ainsi que la problématique associée à leur utilisation.

ANNEXE B

PONDERATION DES CRITERES

Etape délicate de toutes approches multidimensionnelles, la détermination de l'importance relative des critères ou des objectifs est souvent mise de côté dans les applications multiobjectif ou multicritère. Cependant certains auteurs s'y intéressent. La détermination de l'importance relative des critères se divise en trois thèmes : la pondération, la détermination d'indices d'importance, ainsi que l'analyse de sensibilité des résultats suite à une perturbation des poids. L'émergence des techniques de pondération se situe dans les années 60. Les principaux ouvrages sur le sujet sont ceux de David 1963, Eckenrode 1965, Thurstone 1967, Zeleny 1976 ainsi que Voogd 1982. Ces ouvrages traitent spécifiquement de procédure de pondération. Alors que certains autres auteurs s'intéressent en priorité à l'analyse de sensibilité des résultats face à la pondération. Les principaux ouvrages sont: Giuliano 1985, Mareschal 1988 et Mareschal et Brans 1988.

1-PONDERATION

Les premières techniques de pondération sont de trois types (années 60) :

- les techniques de classement;
- les techniques de "qualification";
- les techniques de comparaisons successives.

1.1-techniques de classement

Chaque membre d'un juré donne un "rang" à chacun des critères figurant dans une liste. Le plus important des critères a le rang #1, le second le rang #2, et ainsi de suite. Suite à cet exercice, la pondération est établie par:

- conversion des rangs, avec "n" critères, le rang "n-1" a comme assignation le rang #1, celui de "n-2" reçoit le rang #2, ..., et le rang 0 aura le rang "n";
- détermination du rang composé. Le rang composé (R_j) pour un objectif donné est déterminé par une somme qui convertit le rang exprimé par les "m" juges :

$$R_j = \sum_{i=1}^m R_{ij}, \quad j=1, 2, \dots, n$$

- où R_j : rang composé associé au critère j ;
 R_{ij} : rang converti pour le critère j tel qu'établi
 par le juge i ;
 n : nombre de critères;
 m : nombre de juges;

Le rang composé est alors normalisé selon cette relation :

$$u_j = \frac{R_j}{\sum_{j=1}^n R_j}, \quad j=1, 2, \dots, n$$

- où u_j : poids composé ou la valeur de l'utilité
 associée à la décision des juges concernant
 le critère j .

1.2-techniques de qualification

Contrairement aux techniques d'ordonnement, les techniques de qualification sont utilisées pour obtenir un jugement individuel de la valeur des critères. La liste des

critères à être pondérés est placée dans une colonne adjacente à une échelle de variation de 0 à 10 unités. Une qualification de 0 indique qu'il n'y a pas de valeur associée au critère donné, alors qu'une qualification de 10 unités est la plus importante valeur assignée à un critère. La qualification assigné au critère j par le juge i est représenté par V_{ij} .

$$V_j = \sum_{i=1}^m V_{ij} \quad j=1, 2, \dots, n$$

Alors que la valeur d'utilité (u_j) ou du poids pour chacun des critères est déterminé de la manière suivante :

$$u_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^n V_j} \quad j = 1, 2, \dots, n$$

1.3-techniques de comparaisons successives

Cette technique comporte les étapes suivantes :

- le classement des critères selon les préférences, à savoir du critère le plus important à celui qui est le moins important;
- au plus important des critères on assigne la valeur de "1", $u'_j=1$;
- la comparaison du critère le plus important avec le deuxième critère le plus important et tous les autres, on accorde une note au deuxième critère le plus important ainsi qu'à tous les autres. L'exercice est repris pour tous les critères jusqu'à ce que l'on compare le moins important des critères et son précédent.
- suite aux comparaisons effectuées, on obtient plusieurs u'_j pour chacun des critères, ces u'_j sont finalement normalisés et déterminent les poids pour chacun des critères:

$$u_j = \frac{u'_j}{\sum_{j=1}^n u'_j}$$

En 1976 Zeleny crée la méthode d'entropie pour pondérer des critères.

1.4-méthode d'entropie

La méthode d'entropie tient compte de la valeur particulière que prennent les critères pour chaque scénario, ainsi elle donne plus d'importance aux critères dont la variation est plus grande entre les scénarios. A l'inverse lorsque les scénarios prennent des valeurs similaires pour un critère donné, l'entropie associée à ce critère est élevée et la pondération est basse, ce qui signifie que son importance est moindre. L'entropie représente en fait, selon son auteur, une mesure d'incertitude.

Supposons que D est une matrice de décision ayant " m " scénarios et " n " critères, et que c_{ij} représente la valeur du critère j pour le scénario " i ", alors la valeur du résultat d'un scénario pour le critère j peut être définie comme suit:

$$p_{ij} = \frac{c_{ij}}{\sum_{i=1}^m c_{ij}}, \text{ pour tout } i, j$$

L'entropie E_j pour un ensemble de scénarios évalués avec le critère j est alors définie comme étant :

$$E_j = - \frac{1}{\ln(m)} * \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln (p_{ij})$$

Le poids associé au critère particulier j , w_j se calcule finalement de la manière suivante :

$$w_j = \frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad \text{pour tous } j,$$

1.5-méthode de pondération aléatoire

La méthode (Voogd 1982) consiste premièrement à fixer un intervalle de variation des poids (valeur extrême) pour chacun des critères d'évaluation. A l'aide de générateurs de nombre aléatoire, des jeux de poids sont créés, toujours compris dans leurs intervalles de variation respectifs. La méthode multicritère utilisée donne alors un classement des scénarios évalués pour chacun des jeux de poids. Après

avoir répété la procédure de génération de poids et de classement des scénarios plusieurs fois, une matrice de fréquence F est produite:

-où $F_{r,i}$ représente le nombre de fois que le scénario i a été placé à la $r^{\text{ème}}$ position du classement final. L'opération se poursuit jusqu'à ce que F ne montre que des changements marginaux:

$$[F_n - F_{n-1}] < \epsilon$$

-l'exercice se termine par la construction d'une matrice de probabilité $P_{r,i}$, où $P_{r,i}$ représente la probabilité que i reçoive la $r^{\text{ème}}$ position.

$$P_{r,i} = \frac{F_{r,i}}{\sum F_{r,i}}$$

1.6-METHODE DE PONDERATION MULTIPLE

Selon cette méthode (Giuliano 1985) les intervenants et/ou décideurs sont appelés chacun à déterminer deux vecteurs de poids portant sur l'ensemble des critères, autant ceux qui les concernent que les autres. Ces vecteurs de poids sont représentatifs de la perception que

l'intervenant a du problème posé selon son système de valeur. L'objectif de la méthode est d'identifier les solutions à meilleur compromis en soumettant la méthode d'analyse multicritère à plusieurs jeux de poids. L'identification des scénarios à compromis s'effectue en changeant systématiquement le poids de chacun des objectifs ou critères d'évaluation selon les vecteurs de poids. Les scénarios qui demeurent dans le sous-ensemble de solutions non-dominées lorsque les poids varient sont définis comme étant les scénarios à meilleur compromis. Les changements de poids déterminent une aire de préférence pour laquelle les scénarios sont non-dominés, plus l'aire est grande pour un scénarios donné, plus celui-ci est préféré. Selon cette approche le scénario préféré est satisfaisant pour chacun des ensembles de poids, mais non-optimal pour aucun. L'intérêt ne porte pas ici sur la manière dont les poids sont déterminés, il n'en est fait aucunement mention, mais plutôt sur :

- la multitude de vecteurs de poids qui sont créés pour représenter la diversité et la complexité, d'une part dans la perception, et d'autre part dans les systèmes de valeur;

- l'utilisation de ces différents jeux de poids pour identifier les scénarios à meilleur compromis.

2.0-L'INDICE D'IMPORTANCE

L'indice d'importance ne fait pas partie d'un système de substitution comme le poids. Il représente un jugement qualitatif des préférences sur chacun des critères. Le but de la valeur ordinale trouvée est de représenter le degré d'importance que le décideur (ou intervenant) désire accorder à chacun des critères d'évaluation (Roy et al., 1986).

L'indice d'importance est déterminé suite aux réponses données par les décideurs à trois ensembles de questions de la forme :

- I- Est-ce que le critère c_2 est plus important, de moindre importance, ou de même importance en comparaison au critère c_1 ?

- II- Est-ce que le groupe de critères c_2 et c_3 est plus important, de moindre importance, ou de même importance en comparaison au critère c_1 ?

- III- Est-ce que le groupe de critères c_2 et c_3 est plus important, de moindre importance, ou de même importance en comparaison au groupe de critères c_1 et

c_2 ?

Après l'obtention des réponses relatives au premier type de questions nous avons le résultat suivant :

$$c_1 > c_5 > c_7 > c_3 > c_6 > \dots$$

Le résultat de la deuxième série de questions est le suivant:

$$c_1 > c_3 + c_6; \quad c_7 > c_3 + c_6;$$

$$c_1 > c_5 + c_2; \quad c_3 < c_4 + c_6;$$

....

....

Le résultat de la troisième série de questions est le suivant:

$$c_1 + c_2 < c_5 + c_4;$$

$$c_1 + c_4 = c_5 + c_6;$$

$$c_1 + c_4 > c_7 + c_6;$$

....

Suite à certaines modifications, soit une "description segmentée" (Roy et al., 1983), les inégalités s'écrivent ainsi:

$$c_2 < c_4;$$

$$c_4 + c_2 < c_6 < 2c_4 - c_2;$$

$$c_4 + c_2 < c_4 < c_6 + c_4;$$

....

La résolution de ces inégalités permet de déterminer un intervalle de variation pour l'ensemble des indices d'importance. La considération simultanée de l'ensemble des intervalles est ensuite utilisée pour créer différents vecteurs de poids. L'application d'une méthode d'analyse multicritère pour chaque vecteur de poids permet finalement de déterminer les scénarios à meilleur compromis.

ANNEXE C

Effets de la pondération sur le classement des réseaux

Les classements présentés sur la figure 3.4 sont utilisés pour démontrer l'effet des différents vecteurs de poids sur les résultats, seul les modifications effectives identifiées dans la première moitié des listes sont analysées par paire de groupes d'hypothèses.

GHO - GH1 concernant les scénarios #9 et #11

Le poids du critère "nombre moyen de sections utilisées" passe du simple au double et vient mettre à l'avant plan le scénario #11. En effet le nombre moyen de sections utilisées caractérisant le scénario #11 est de 1.18, alors que celui du scénario #9 est de 1.24.

GHO - GH1 concernant les scénarios #14, #3, #5 et #6

Le poids du critère "nombre moyen de sections utilisées" joue un rôle très important concernant le nouveau classement. Ainsi l'ordre décroissant passe de #6, #5, #14 et #3 à #14, #3, #5 et #6 puisque la valeur du critère considéré pour ces scénarios est respectivement:

nombre moyen de sections utilisées

-pour le scénario #14 :	1.13;
-pour le scénario #3 :	1.24;
-pour le scénario #5 :	1.28;
-pour le scénario #6 :	1.33.

La méthode PROMETHEE a donc classé ces scénarios par ordre décroissant d'importance en considérant en priorité le critère "nombre moyen de sections utilisées" tel que désiré.

GH1 - GH2 concernant les scénarios #14, #3, #5 et #6

Cette fois le poids du critère "nombre moyen de sections utilisées" diminue du tiers de sa valeur tandis que le critère "temps moyen d'entrée-sortie" augmente de 0.125 à 0.166. Le critère "temps moyen d'entrée-sortie" joue en conséquence un rôle majeur dans la modification du classement, ainsi PROMETHEE classe maintenant les scénarios selon ce dernier critère :

	temps moyen d'entrée-sortie
-pour le scénario #6 :	26.26 minutes;
-pour le scénario #14 :	26.49 minutes;
-pour le scénario #5 :	27.69 minutes;
-pour le scénario #3 :	30.03 minutes.

GH2 - GH3 concernant les scénarios #14, #5 et #6

Le classement des scénarios #6, #14 et #5 (GH2) passe à l'ordre suivant parce que PROMETHEE considère en priorité le critère "nombre moyen de sections utilisées" :

	nombre moyen de sections utilisées
-pour le scénario #14 :	1.13;
-pour le scénario #5 :	1.28;
-pour le scénario #6 :	1.33.

GH3 - GH4 concernant les scénarios #3 et #6

Selon le vecteur de poids GH4 le critère "nombre moyen de sections utilisées" prend sa plus forte valeur parmi les GH. Malgré la faible performance du critère "temps moyen d'entrée-sortie", l'importance du poids du critère "nombre moyen de sections utilisées" l'emporte :

	nombre moyen de sections utilisées
-pour le scénario #3 :	1.24;
-pour le scénario #6 :	1.33.

GH4 - GH5 concernant les scénarios #9 et #11

Les poids des critères "temps moyen d'entrée-sortie" et

"nombre moyen de sections utilisées" sont exprimés dans des proportions équivalentes, mais le critère "temps moyen d'attente" prend de l'importance en triplant de valeur, c'est pourquoi le scénario #11 se retrouve au premier rang.

GH4 - GH5 concernant les scénarios #3 et #5

Pour la même raison que le groupe précédent le rang du scénario #3 augmente d'une unité alors que celui du scénario #5 diminue d'une unité. PROMETHEE classe les réseaux #3 et #5 selon le critère "temps moyen d'attente" en priorité :

	temps moyen d'attente
-pour le scénario #3 :	11.96 minutes;
-pour le scénario #5 :	12.23 minutes.

ANNEXE D

GRAPHIQUE DES COUTS D'OPERATION VS L'INDICE DU NIVEAU DE SERVICE

Le but de cette forme de représentation des caractéristiques des scénarios de réseaux est double. D'abord il vise à faciliter la comparaison des scénarios entre eux, ensuite il vise à permettre de confirmer les résultats de la méthode PROMETHEE.

Pour ce faire il a fallu exprimer la valeur des critères d'évaluation sous une autre forme. Ainsi les coûts d'opération associés à un scénario donné sont exprimés comme étant un pourcentage des coûts d'opération maximum associés à l'un des scénarios. Il s'agit donc d'une normalisation entre 0 et 1, où 1 représente les coûts d'opération maximum. La normalisation s'effectue comme suit:

$$\frac{\text{valeur des coûts d'opération du scénario}}{\text{valeur maximum des coûts d'opération}}$$

La normalisation des valeurs relatives aux caractéristiques du niveau de service est plus complexe puisqu'elle considère à la fois 4 critères d'évaluation. Si chaque critère est jugé d'un niveau d'importance égal

alors chacun des critères est normalisé entre 0 et 0.25. La somme de la valeur normalisée de chacun des critères exprime l'indice du niveau de service. Plus la valeur de l'indice est élevée plus le niveau de service est élevé. Un indice de valeur "1" signifie que la valeur de chacun des critères est à son minimum. Cet indice est calculé de la façon suivante:

$$1 - \sum_{i=1}^n (2 - (\text{valeur du critère} / \text{valeur MINIMUM du critère})) * \text{poids}$$

Sans poids le "2" permet d'exprimer que la valeur minimale d'un critère donne à l'indice la valeur "1". Les autres valeurs étant plus grandes, l'indice varie entre 0 et 1.

Selon ces opérations de normalisation un scénario qui se situerait à la coordonnée (0, 1) sur le graphique 3.1 serait le réseau le plus performant compte tenu des scénarios considérés.

ANNEXE E

ANALYSE DE SENSIBILITE DES RESULTATS

Concernant la plupart des méthodes multicritères, l'importance relative des critères est établie à l'aide de poids numériques. L'utilisation de poids pose le problème de leur détermination, et celui de leur détermination, le problème de la vérification de leur influence sur les résultats. Face à ce dernier problème il est important de pouvoir étudier les effets de variations des poids sur les résultats. Mareschal (1988) et Mareschal et Brans (1988) proposent une méthode d'analyse de la sensibilité des résultats en définissant des intervalles de stabilité pour les poids des critères; tant que le poids d'un critère est maintenu dans son intervalle de stabilité, la méthode multicritère fournit un résultat inchangé par rapport au poids initial.

La stabilité est dite totale s'il y a absence de toute modification dans la relation (préférence (P), indifférence (I), incomparable (R)), après une modification des poids. Par contre, si le décideur s'intéresse plus particulièrement au début du classement, c'est-à-dire parmi les scénarios qu'il choisira, la stabilité partielle est définie de la manière suivante. Si "M" représente les scénarios parmi

lesquels le décideur prendra sa décision, et A , l'ensemble des scénarios évalués, la stabilité partielle est appelée pour un ensemble de scénarios (actions) $M \subset A$, l'absence de toute modification dans la restriction de P, I, R aux couples de scénarios $(M \times A) \cup (A \times M)$.

Soit: w_j un poids, $j=1, \dots, k$;
 w_i un poids isolé, où $1 \leq i \leq k$;
 w'_c un poids perturbé associé au critère "c",
 défini de la manière suivante:

$$w'_c = (1 + \beta) w_c;$$

$$w'_j = \alpha w_j, \quad j \neq c.$$

où β représente le pourcentage d'accroissement du poids du critère c ;

α est un paramètre introduit pour normaliser les poids perturbés.

Après de multiples transformations algébriques sur les paramètres α et β , les intervalles de stabilité vers le bas et vers le haut sont définis de la manière suivante:

$$w^-_c = w_c (1 + \beta^-_c) / \alpha^+_c;$$

$$w^+_c = w_c (1 + \beta^+_c) / \alpha^-_c;$$

Selon cette méthode, deux approches sont possibles quant à la perturbation des poids. D'abord en perturbant un poids à la fois, selon cette approche seule l'importance relative du critère "c" est modifiée. Les rapports des autres poids demeurent inchangés. Ensuite il est possible de perturber le poids global d'un groupe de critères, sans modifier ni l'importance relative des critères externes au groupe, ni l'importance relative des critères à l'intérieur du groupe. En effet, dans beaucoup de problèmes multicritères, les critères peuvent être regroupés en groupes cohérents, à savoir: critères économiques, critères techniques, politiques, ou par objectif.

Les modifications apportées aux résultats suite à la perturbation d'un seul critère ou d'un groupe de critère sont alors de trois ordres :

- inversion d'une préférence;
- préférence transformée en indifférence;
- indifférence transformée en préférence.

En plus de présenter une méthode d'analyse de sensibilité des résultats, Mareschal et Brans (1988) présentent la méthode GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Aid), pour méthode d'aide interactive par une

analyse géométrique. A partir des résultats de la méthode d'analyse multicritère PROMETHEE et à l'aide du logiciel GAIA, la méthode proposée est particulièrement utile pour évaluer l'importance accordée par le décideur aux différents critères et pour mettre en évidence les conflits existants entre les critères. Il faut noter qu'il n'est pas nécessaire de pondérer les critères pour obtenir la représentation graphique déterminée par GAIA. La méthode permet la représentation simultanée des scénarios et des critères dans un plan, et par le fait même, clarifie la compréhension du problème de décision. En effet la représentation graphique permet de visualiser simultanément:

- les scénarios à meilleur compromis;
- l'incomparabilité entre les scénarios;
- les scénarios particulièrement faibles face à un critère donné ou à un ensemble de critères;
- les critères qui ont un rôle déterminant.

La figure de la page suivante permet de visualiser un exemple de présentation graphique effectuée à partir d'une application de la méthode d'analyse multicritère PROMETHEE. L'interprétation de la représentation graphique se fait de la manière suivante :

-la longueur des axes (\bar{x}) traduit la variance associée à chacun des vecteurs. Le vecteur présenté graphiquement est une combinaison linéaire des flux unicritères, c'est-à-dire de la somme, pour un critère donné, de la valeur des écarts entre les scénarios. Le classement complet des scénarios est déterminé à partir de la longueur respective de chacun des axes.

-la distribution des axes dans le plan (u, v) est un indicateur du caractère conflictuel des critères. Les axes très rapprochés les uns des autres représentent des critères "corrélés positivement". Ainsi la figure présente trois groupes de critères dont les axes sont dirigés dans des directions différentes ($\bar{x}_3-\bar{x}_5$, $\bar{x}_2-\bar{x}_4-\bar{x}_6$ et \bar{x}_1 , \bar{x} est un flux total).

-la position d'un axe près du centre indique un bon compromis entre les tendances.

-l'incomparabilité des scénarios a aussi son interprétation graphique, toutefois ce qualificatif n'est pas explicité.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00237106 8