Les Cahiers Scientifiques du Transport
pp. 111-128 N° 23/1991
Antonio MUSSO, Agostino CAPPELLI
Modèle d'analyse à objectifs multiples permettant d'évaluer des projets dans le secteur des transports

Modèle d'analyse à objectifs multiples permettant d'évaluer des projets dans le secteur des transports

Antonio MUSSO *, Agostino CAPPELLI **
Université de Salerne *
Université de la Basilicata **

1. Définition du problème

Le problème de l'adoption d'un critère valable permettant de comparer plusieurs projets dans le secteur des transports est vivement débattu à l'heure actuelle par les spécialistes de ce secteur.

A ce jour, un grand nombre de mémoires scientifiques ont analysé des aspects divers et importants des méthodes d'analyse technico-économiques existantes.

Les modèles d'optimisation utilisés traditionnellement pour opérer des choix dans le secteur public comme l'analyse coûts-bénéfices ont fait l'objet de nombreuses critiques; on a notamment incriminé le manque de transparence pour le décideur, le risque d'obtenir des résultats peu efficaces, la difficulté de prendre en compte tous les objectifs possibles, la complexité de la gestion de toutes les informations pertinentes, l'impossibilité d'apprécier tous les éléments du problème en termes quantitatifs et monétaires et la distribution des bénéfices entre toutes les composantes de la collectivité.

Dans ce contexte, on a assisté au développement de certaines techniques (à critères ou à objectifs multiples) nées au début des années 70 qui, tout en acceptant les différences entre les individus et la multiplicité des objectifs, se proposent de résoudre le problème de la synthèse d'éléments de décision hétérogènes.

Dans l'analyse à objectifs multiples ou multicritère tous les projets sous examen sont répartis selon des classifications aussi nombreuses que les objectifs envisagés et l'on attribue à chaque projet figurant dans chacune des classifications une note de valeur, ce qui permet, au terme du processus, de les additioner pour repérer le meilleur projet, à savoir celui qui aura totalisé le plus grand nombre de points.

Il est aisé de constater que, dans ce cas, on formule un jugement de valuer qu'il va falloir transformer en note de valeur grâce à un indicateur global faisant état du degré selon lequel chaque objectif est satisfait, et partant en mesure d'orienter le choix du meilleur projet en fonction du plus grand bénéfice obtenu parmi les diverses hypothèses d'intervention proposées.

Pour chaque objectif on définit donc une fonction d'utilité qui permet d'énumérer tous les autres projets en lice selon un barème adapté à l'objectif pris en considération et qui doit représenter le résultat souhaité dans une échelle de valeurs qui tend vers l'absolu.

L'une des conclusions émanant de l'adoption de ce type d'analyse est de renoncer au paradigme du caractère optimal, dans la mesure où celui-ci se prête mal à une application opérationnelle, et de le remplacer par celui de compromis acceptable qui offre au décideur des résultats satisfaisants.

L'organe habilité à prendre des décisions est l'entité politique reconnue compétente et apte à décider. Il lui appartient d'indiquer quels sont les groupes d'individus intéressés au projet, les divers points de vue et les objectifs (de nature par exemple technique, économique, financière, sociale, politique, esthétique, morale, etc...), la hiérarchie des différents objectifs, et le poids de chacun d'eux.

La pondération assume une importance cruciale dans ce genre d'analyse; parmi les procédures existantes on peut rappeler:

1) l'évaluation directe, c'est-à-dire l'assignation immédiate des priorités au moyen de la numérotation des objectifs par le décideur (méthodes de "trade-off", de classification, etc.);

2) l'évaluation indirecte, c'est-à-dire la détermination des poids sur la base d'une préférence fondée sur l'utilisation des résultats connus et des choix opérés précédemment, en vue d'en déduire les poids inconnus.

La valorisation de chaque objectif permet enfin de classifier les différents projets selon un ordre de grandeur et une numérotation au moyen d'une échelle de mesure appropriée.

Parmi les exemples possibles de ces modèles d'optimisation, on peut citer l'analyse multicritère désagrégée au terme de laquelle l'analyste prépare une série d'évaluations et d'appréciations, en renonçant à les regrouper et en confiant cette tâche à l'organe décideur [comme dans le cas de (1) la méthode française RCB - Rationalisation des choix budgétaires - ou du système anglais PPBS - Planning, Programming, Budgeting System (2)].

En revanche, parmi les méthodes multicritères agrégées, ELECTRE IV (3) est sans doute la plus élaborée (plus de douze ans séparent ELECTRE I d'ELECTRE IV); puisqu'elle permet d'agréger les critères en évitant la pondération et qu'elle a été conçue notamment pour des situations où les décideurs sont difficilement déterminables.

Cette méthode a fait l'objet d'une série de critiques (4) communes à la majorité des méthodes d'évaluation agrégées dont la limite principale est d'offrir des solutions peu objectives et souvent instables.

Le présent article présente une nouvelle formulation de la procédure multicritère dans laquelle la comparaison et la classification des projets sont effectuées grâce à un algorithme qui présente un double avantage: d'une part proposer un agencement déterminé en fonction de l'écart par rapport à la solution idéale et excluant tout recours à des jugements de valeur pour normaliser la mesure des objectifs, et d'autre part s'intégrer dans le cadre de l'évaluation finale à l'analyse coûts-bénéfices en élaborant des fonctions de stabilité de manière à orienter le décideur vers la solution "optimale" du problème.

L'article s'achève sur une application du modèle en vue de la restructuration d'un couloir ferroviaire.

2. Formalisation de la procédure

La procédure que nous proposons ci-dessous exclue le recours à des jugements de valeur inhérents au processus d'évaluation et ne fait appel qu'à une analyse mathématique ou numérique qui garantit le caractère unique et univoque de la solution proposée.

2.1 Sélection des projets

La première étape de la procédure, conformément à la méthode adoptée pour analyser les problèmes relatifs aux transports consiste à identifier les différents projets suceptibles d'être représentés soit par une seule intervention en matière d'infrastructure ou d'exploitation, soit par plusieurs interventions. Il est évident que, pour chaque projet ainsi défini, il y a lieu d'établir les caractéristiques techniques et opérationnelles et de calculer les coûts d'investissement et d'exploitation. On suppose que les projets sélectionnés retenus sont désignés par n et chaque projet par Pi.

2.2 Identification des objectifs

Lors de la sélection des projets il importe donc de définir les objectifs à atteindre, car ces derniers peuvent en effet aider à définir les projets à analyser. Dans le domaine des ouvrages d'intérêt public, l'identification des objectifs relève du décideur politique. Le technicien, de son côté, a la tâche parfois déterminante de transformer les orientations générales, indiquées souvent par l'homme politique, en objectifs spécifiques et mesurables de manière objective (indépendamment de l'unité de mesure), condition nécessaire et indispensable pour le modèle d'analyse ainsi construit. On suppose que les objectifs ou critères retenus aux fins de l'analyse sont désignés par r et chaque objectif par Oj.

2.3 Mesure des objectifs

Après avoir identifié les projets et les objectifs, la procédure exige que pour chacun des projets $(P_1,....,P_n)$ on mesure les valeurs relatives aux objectifs (O1...,Or), en les exprimant dans leur unité de mesure respective.

Il est ainsi possible de construire une matrice **M1** (projets-objectifs) exprimée par les valeurs Xi, j, où:

- i = 1,...,n indice relatif aux projets;

- j = 1,...,r indice relatif aux objectifs.

		objectifs				
		O1	O2	Oj	Or	
p	P1	X1,1	X1,2	....	X1,r	
r	P2	X2,1	X2,2	....	X2,r	
o		....	....	....	....	
j		....	....	....	....	
e	Pi	....	....	Xi,j	....	= M1
t		....	....	....	....	
s		....	....	....	....	
	Pn	Xn,1	Xn,2	....	Xn,r	

L'élément générique Xi,j de la matrice M1 représente la valeur de l'objectif j pour le projet i, exprimée dans sa propre unité de mesure. Les objectifs figurant dans la matrice seront représentés par des relations mathématiques à maximiser ou à minimiser:

Oj = Min Xi,j pour chaque i
Oj+1=Max Xi,j+1 pour chaque i

A titre d'exemple on peut penser comme objectif (j) au coût généralisé de transport et comme objectif (j+1) à l'accessibilité au système de transport.

Les objectifs pourront également être soumis à des contraintes de nature diverse, comme les valeurs de seuil établies dans le cas des agents polluants de l'atmosphère et du bruit.

2.4 Normalisation de la matrice projets-objectifs

La matrice M1 est composée par des éléments non homogènes et par conséquent non cumulables, dans la mesure où chaque objectif a été calculé dans sa propre unité de mesure. Il y a donc lieu d'amorcer un processus de normalisation qui transforme la mesure des objectifs effectuée sur les variables Xi,j en une variable adimensionnelle qui exprime le degré selon lequel un objectif donné est atteint. Dans ce but on introduit une fonction spécifique définie comme fonction d'utilité. Cette fonction, mesurée grâce à un indice adimensionnel, est caractéristique de chaque objectif et peut être exprimée sous la forme:

U = U (Oj) = [0,1]

La définition des fonctions d'utilité représente une étape délicate dans la procédure proposée. Au cours de celle-ci on court en effet le risque d'introduire des éléments d'évaluation subjective dans le processus de recherche numérique de la solution optimale. Pendant la construction de la fonction, comme cela est expliqué dans le modèle décrit au paragraphe 3, on introduit des éléments de référence objectifs qui sont indépendants du système d'analyse mis au point.

La **normalisation de la matrice M1**, grâce aux fonctions d'utilité, permet de construire une seconde matrice, **M2**, exprimée par les valeurs Ui,j:

		objectifs				
		O1	O2	Oj	Or	
p	P1	U1,1	U1,2	....	U1,r	
r	P2	U2,1	U2,2	....	U2,r	
o		....	....	....	....	
j		....	....	....	....	
e	Pi	....	....	Ui,j	....	= M2
t		....	....	....	....	
s		....	....	....	....	
	Pn	Un,1	Un,2	....	Un,r	

2.5 Recherche de la solution optimale

L'algorithme de solution du modèle se base sur la recherche de la valeur maximale de la fonction d'utilité, définie par r objectifs Oj, selon l'équation:

$$\text{Max } U (O1,\ldots,Or)$$

dans l'ensemble défini par n projets: P1,...,Pn.

Dans l'hypothèse, peu réaliste, que les différents objectifs revêtent tous pour la collectivité la même importance, c'est-à-dire qu'ils aient un poids identique (Kj = 1, pour chaque j), la valeur totale de chaque projet Pi est obtenue en additionnant tous les paramètres de la ligne i-nième de la matrice **M2**:

$$Ui = Ui,1+Ui,2+\ldots\ldots+Ui,r$$

et le meilleur projet sera identifié par la valeur **Ui=Ui max.**

En réalité l'hypothèse de l'importance égale des objectifs est très restrictive et partant, la simple procédure exposée ci-dessus est inapplicable dans la majeure partie des cas. Il faut donc supposer que les valeurs Kj des poids assignés aux divers objectifs sont différentes pour la collectivité. Toutefois, si cette dernière, ou si ses représentants, sont en mesure d'exprimer les valeurs chiffrées des poids, on pourra encore facilement repérer la solution optimale. L'évaluation se fait en calculant non plus la somme des paramètres figurant sur la ligne de la matrice **M2** mais en effectuant une combinaison linéaire de ces paramètres avec les poids:

$$Ui,k = K1*Ui,1 + K2*Ui,2 + \ldots\ldots + Kr*Ui,r$$

et le meilleur projet sera identifié par la valeur:

$$Ui,k=Ui,k \text{ max}$$

Cette deuxième hypothèse, formulée à partir des valeurs chiffrées des poids, reste encore assez optimiste.

Toutefois, le chercheur se trouvera plus fréquemment dans la situation où il ne connaît que les valeurs ordinales des poids.

Dans l'hypothèse où les représentants de la collectivité sont à même d'exprimer de manière objective l'importance relative des objectifs, on obtiendra la formalisation suivante:

$$\sum_{j=1}^{r} Kj = 1$$

$$Kj \geq 0$$

$$K1 \geq K2 \geq \ldots\ldots \geq Kr$$

En définitive, la recherche de la solution optimale passe par les étapes énoncées ci-après et décrites en détail au paragraphe 3:

I) définition d'une échelle ordinale des poids en se fondant sur les indications fournies par le décideur politique ou par la collectivité concernée;

II) association d'un premier groupe de valeurs numériques aux valeurs de pondération tout en respectant l'échelle ordinale;

III) calcul de la valeur-numérique de la fonction d'utilité de chaque projet [Ui,k] et identification de la hiérarchie des projets en fonction de la valeur décroissante de [Uj,k];

IV) modification des valeurs chiffrées attribuées aux poids pour l'éventail complet de valeurs possibles en respectant l'échelle ordinale et répétition de l'étape III;

V) construction de courbes de stabilité pour les différentes solutions identifiées et correspondant au nombre de fois où chaque solution reste optimale malgré la variation numérique des poids observée au cours de l'étape IV; dans ce cas, la stabilité est donc représentative de la probabilité qu'a chaque solution identifiée de respecter la volonté du décideur ou de la collectivité;

VI) identification de la solution optimale après comparaison des courbes représentatives de la stabilité de chacune des meilleures solutions retenues (recherche de probabilité maximale).

La procédure mise au point prévoit en outre le recours à deux fonctions de contrainte pouvant être utilisées comme éléments d'analyse discriminants, tant en termes continus que discrets, pour les raisons suivantes:

Premièrement, en matière de transport, comme en général dans le cadre de l'analyse des investissements et de la théorie des choix, la recherche de la solution optimale dans le respect de certaines contraintes budgétaires précises peut s'avérer déterminante.

Deuxièmement, l'analyse économique classique, coûts-bénéfices, peut être utilisée comme critère discriminant des projets, en retenant par exemple ceux qui présentent un taux de rentabilité interne supérieur à une valeur de seuil.

L'acceptation d'une telle contrainte implique que les objectifs de rentabilité économique priment sur tous les autres. La méthode multicritères constitue partant une procédure intégrative d'aide à la décision uniquement pour des projets ayant satisfait aux critères d'analyse économique et se substitue au critère de choix qui s'appuie sur des fonctions mathématiques à long terme (taux de rendement interne, valeur nette actuelle, etc.) pour sélectionner le meilleur projet.

3. Mise au point du modèle mathématique

La procédure décrite ci-dessus a été utilisée pour mettre au point un modèle mathématique de type séquentiel interactif qui se déroule (comme le montre le shéma du tableau 1) selon les étapes suivantes.

A. Lecture de la matrice M1, projets-objectifs, exprimée par les valeurs Xi,j propres à chaque objectif.

B. Détermination des r fonctions d'utilité, en précisant pour chaque vecteur Xj (pour i variables de 1 à n pour chaque objectif n), au choix du chercheur:

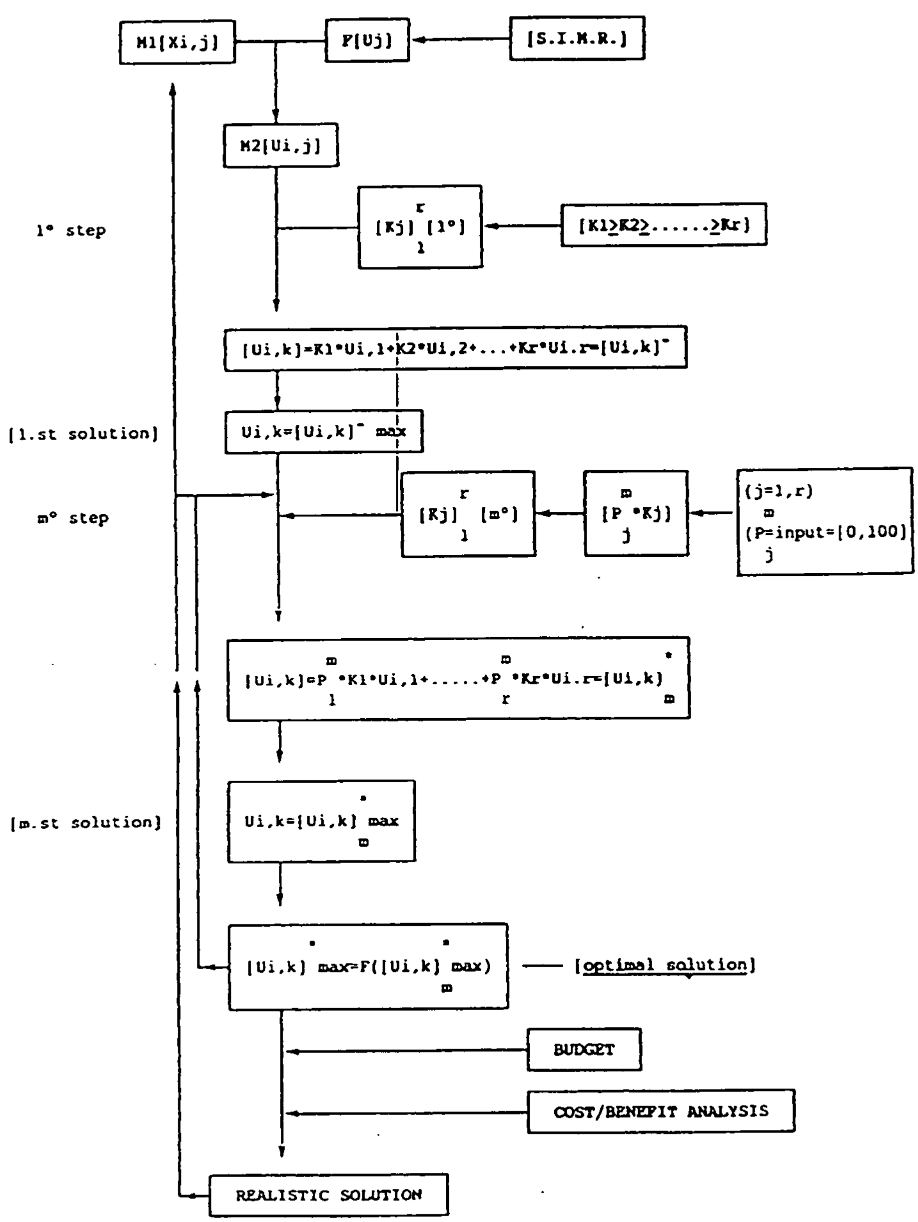
a) Uj=0 pour Xj min,

b) Uj=1 pour Xj max,

c) Uj=Uj* (y compris les valeurs 0 et 1), valeur absolue correspondant à un Xj extérieur aux valeurs calculées per la matrice M1.

La solution proposée, chaque fois que cela est possible, équivaut à l'option c). On évite ainsi de courir le risque que la fonction d'utilité dépende de l'ensemble des différents projets analysés et qu'en conséquence le processus de recherche de solution soit empreint d'un caractère relatif et non pas absolu. C'est dans ce souci que l'on a inséré dans le modèle mis on point un système d'indices moyens de référence (S.I.M.R.) qui exprime les valeurs d'utilité de l'ensemble des objectifs considérés, estimées sur la base de paramètres objectifs et de conditions de référence moyennes.

Tableau 1 - Shéma du modèle



Dans le cas des indicateurs de la qualité de l'environnement (pollution atmosphérique, nuisances dues au bruit, qualité de l'eau) nous avons introduit dans la SIMR les seuils indiqués dans la législation italienne en vigueur en 1990. Pour toutes les valeurs supérieures à ces seuils, on a supposé que Uj = 0. De même, il est possible d'assigner des valeurs de seuil minimales et/ou maximales en fonction des objectifs pris en compte par rapport à des indices de référence ou à des états de fait présumés acceptables par le décideur politique ou la collectivité.

La S.I.M.R. constitue un élément supplémentaire du modèle auquel on peut bien entendu recourir chaque fois que l'on rencontre des conditions générales analogues.

La forme de la fonction d'utilité est laissée à la discrétion du chercheur, en fonction du nombre des valeurs connues. Toute diminution de l'utilité marginale amène à choisir des fonctions asymptotiques dont la valeur d'utilité est égale à l'unité.

Si l'on choisit l'option a) ou b), ou encore l'option c) assortie d'une valeur de référence extérieure unique, le modèle calcule les valeurs d'utilité du vecteur Xj proportionnellement au champ des paramètres fixés.

C. Mise en oeuvre de la normalisation de la matrice M1 et calcul de la matrice M2.

D. Lecture des valeurs numériques des poids de première matrice en respectant l'ordre indiqué par le décideur, normalisation dans le champ (0-1) si elles sont fournies comme "score" dans n'importe quel champ, calcul de la valeur d'utilité globale de chaque projet (Ui,k) et première classification des projets.

E. Calcul de la stabilité de la solution identifiée en associant à la valeur du poids attribué à chaque objectif une probabilité d'erreur d'ampleur variable à volonté et fournie comme donnée d'entrée. Le modèle a aussi été construit dans le but d'indiquer le pourcentage de fois pendant lesquelles le projet qui présente l'utilité maximale, compte tenu de la combinaison des poids fournie comme donnée d'entrée, demeure inchangé alors que la probabilité d'erreur varie. Cette procédure permet d'élaborer les fonctions de stabilité de la solution du type de celles qui sont reproduites dans l'étude de cas mentionnée au paragraphe 4 ci-après, qui représentent la probabilité d'obtenir une solution optimale en présence d'une combination donnée de poids tout en faisant varier les pondérations sur l'échelle ordinale.

F. Identification de la solution optimale comme étant celle qui présente la plus grande stabilité, c'est-à-dire la plus haute probabilité de s'avérer la solution optimale lorsque l'on fait varier la valeur numérique des poids.

En outre, le modèle peut être utilisé en présence de contraintes budgétaires.

Si l'on veut rechercher la solution optimale qui respecte le souci de rentabilité économique, on peut recourir à l'analyse coûts-bénéfices comme analyse discriminante et ne soumettre à l'analyse à objectifs multiples que les projets faisant état d'indicateurs économiques positifs (I.R.R. supérieur à une valeur de seuil par exemple).

Auquel cas les considérations figurant à la fin du paragraphe 2 restent valables.

Dans le shéma du tableau 1 la solution multicritère qui respecte les contraintes budgétaires et le souci de rentabilité économique a été définie comme étant la "solution réaliste" car dans les économies disposant de ressources limitées (pays en développement) la solution identifiée peut s'avérer la plus réaliste puisqu'elle respecte pleinement les objectifs de développement économique.

Il peut être intéressant d'appliquer le modèle en partant de plusieurs matrices projets-objectifs qui varient en fonction du nombre des objectifs considérés. Cette analyse supplémentaire qui relève d'un test général de sensibilité met en évidence la stabilité de la solution malgré la modification des objectifs et signale par conséquent les objectifs prépondérants ainsi que le rôle joué par ces mêmes objectifs dans le processus de recherche de la solution. Cette démarche, conjuguée à l'évaluation des poids attribués aux différents objectifs est particulièrement utile pour juger des résultats obtenus grâce au modèle avec le décideur politique et les représentants de la collectivité intéressée au projet.

Cette option devient inéluctable lorsque l'on ne trouve aucune solution stable et qu'il s'avère nécessaire d'approfondir la recherche. Si ces tentatives ne débouchent sur aucune solution stable , on doit en déduire qu'aucun des projets étudiés ne répond aux objectifs retenus et que seule l'option zéro est valable (statu quo).

4. Application du modèle à l'étude d'un couloir ferroviaire

Le modèle décrit ci-dessus a été utilisé pour rechercher la solution optimale dans le cas de la restructuration d'un couloir ferroviaire.

On a estimé que le rôle et les retombées du transport ferroviaire sur l'économie nationale d'un pays ne sauraient être évalués de manière exhaustive uniquement en fonction de l'analyse coûts-bénéfices.

Cette procédure a été mise en oeuvre et intégrée à l'analyse à objectifs multiples, c'est-à-dire une analyse en mesure d'estimer et de comparer les effets globaux, tant internes qu'externes au secteur des transports, des interventions.

Les objectifs retenus aux fins de l'analyse sont énumérés ci-dessous:

- réduction du coût global d'investissement (Cr);
- réduction du coût du transport individuel (Ct);
- réduction du temps de trajet en chemin de fer (Tr);
- réduction du coût d'exploitation ferroviaire (Cf);
- réduction des accidents de la route (IMF);
- accroissement de l'emploi, (No);
- augmentation de l'accessibilité au transport ferroviaire (Ia);
- augmentation de la productivité technique de l'offre ferroviaire (Pt);
- augmentation de la productivité commerciale du transport ferroviaire (Cf/P);

Pour mesurer les objectifs, on a supposé les relations suivantes:

Cr = estimation basée sur la rédaction du projet préliminaire d'intervention;

Ct = $C + 1 \times t$

où: C = coût monétaire du transport

t = durée du trajet

l = valeur monétaire du temps

Tr = évaluation basée sur le programme d'exploitation ferroviaire

Cf = $Cp + 8.85 \times 10^3$ TK

où: Cp = coût du personnel

TK = trains x km offerts

IMF = K1 x TGM — fonction linéaire du flux de circulation routière calibrée sur les données de la situation de référence

$No = \frac{Cr \times I}{n \times Cu}$ où:

Cr = coût d'exécution du projet
I = indice indiquant l'influence de la main-d'oeuvre sur l'investissement
n = délai d'exécution
Cu = Coût annuel d'une unité de travail

$Ia = \frac{N \times Si}{S}$ où:

N = nombre des gares sur la ligne
Si = zone d'influence de la gare
S = zone d'influence de la ligne

$Pt = \frac{TK}{A}$ où:

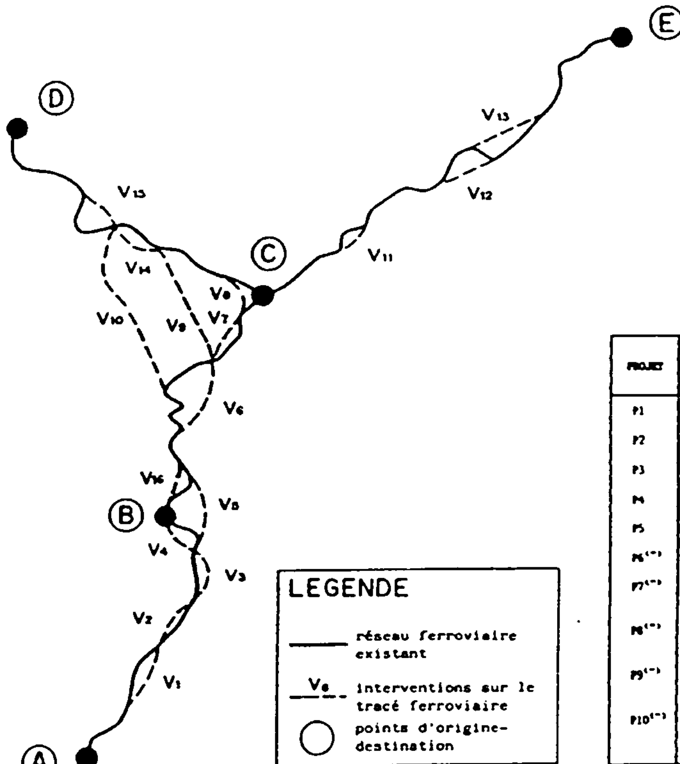
A = agents nécessaires pour assurer le service

$Cf/P = \frac{Cf}{P}$: coût d'exploitation par passager

Les deux derniers objectifs considérés: "augmentation de la productivité technique" et "augmentation de la productivité commerciale", permettent d'effectuer une analyse plus complète et non pas limitée uniquement aux seuls paramètres de coût.

Dix projets qui représentent les différents scénarios d'investissement et diverses solutions ont été examinés comme le montre la figure 1.

Figure 1 - Shéma des différents projets d'intervention sur le couloir ferroviaire



PROJET	INTERVENTION	COUT D'INVESTISSEMENT (Lit x 10^9) 1988
P1	V4 + V6 + V7 + V8 + V11 + V15	330 Mld
P2	V4 + V6 + V9 + V15	350 Mld
P3	V1 + V2 + V4 + V6 + V7 + V8 + V11 + V15	430 Mld
P4	V4 + V6 + V7 + V9 + V11 + V15	435 Mld
P5	V1 + V2 + V4 + V6 + V7 + V8 + V11 + V12 + V15	495 Mld
P6(*)	V1 + V2 + V4 + V6 + V7 + V9 + V11 + V15	530 Mld
P7(*)	V1 + V2 + V3 + V4 + V16 + V6 + V7 + V8 + V11 + + V12 + V13 + V14 + V 15	665 Mld
P8(*)	V1 + V2 + V3 + V4 + V16 + V6 + V7 + V9 + V11 + + V12 + V13 + V15	750 Mld
P9(*)	V1 + V2 + V3 + V4 + V16 + V6 + V7 + V10 + V11 + + V12 + V13 + V15	695 Mld
P10(*)	V1 + V2 + V3 + V5 + V6 + V7 + V8 + V11 + V12 + + V13 + V14 + V15	780 Mld

(*) Inclus une desserte ferroviaire avec fréquence horaire

On a calculé pour chaque projet la valeur assumée par chacun des objectifs pris en compte, en formulant deux hypothèses de prévision de la demande de transport sur le couloir ferroviaire.

Les valeurs des objectifs ont ensuite été "normalisées" pour que l'on puisse les reporter à une même unité de référence, représentative de l'utilité de chaque objectif pour la collectivité. Enfin, l'on a inséré les poids représentatifs de l'importance assumée par chaque objectif pour le décideur (ce dernier a été en mesure d'indiquer à la fois les objectifs et la valeur ordinale des poids).

Tableau 2 - Hiérarchie des différents projets obtenue grâce à l'analyse à objectifs multiples

Objectifs pris en considération	Scénario	Projet 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Statu quo (11)	N° d'essai
C_r, t_r, C_f, C_t I, M, F. I_a, N_o,	25	8	5	7	4	10	2	9	3	6	1	11	1
P_t, C_f/P	50	8	5	7	4	10	2	9	3	6	1	11	
C_r, t_r, C_f, C_t	25	6	2	7	4	9	1	10	5	8	3	11	2
I.M.F, I_a	50	6	3	7	4	9	2	10	5	8	1	11	
C_r, t_r, C_f, C_t	25	6	2	7	4	9	1	10	5	8	3	11	3
I_a	50	6	3	7	4	9	2	10	5	8	1	11	
C_r, t_r, I_a,	25	6	2	7	3	9	1	10	5	8	4	11	4
$C_f/P, C_t$	50	6	2	7	3	9	1	10	5	8	4	11	
C_r, t_r, C_f	25	6	2	7	3	9	1	10	5	8	4	11	5
I_a	50	6	2	7	4	9	1	11	5	8	3	10	
C_r, t_r, I_a,	25	5	1	7	3	9	2	10	6	8	4	11	6
C_f/P	50	5	1	7	3	9	2	10	6	8	4	11	
C_r, t_r, I_a	25	5	1	7	3	9	2	10	6	8	4	11	7
	50	5	1	7	3	9	2	10	6	8	4	11	
$C_r, t_r, C_f/P$	25	6	8	2	5	9	1	10	7	4	3	11	8
	50	6	8	2	5	9	1	10	7	4	3	11	

Le tableau 2 illustre les différentes hiérarchies obtenues dans les deux scénarios de demande envisagés (en partant de l'hypothèse d'une part de traffic réservée au chemin de fer égale respectivement à 25% et à 50% du traffic total), en introduisant au départ tous les objectifs et par conséquent des combinaisons de certains d'entre eux en vue de vérifier la stabilité du classement initial. Le tableau 3 reproduit les poids assignés aux objectifs. A la lecture du tableau 1 on peut aisément se rendre compte que le projet présentant le coût de réalisation le plus élevé (n° 10) figure initialement en tête pour les deux scénarios de demande mais qu'il ne maintient pas sa suprématie dans les autres classifications puisqu'il est concurrencé par les projets n° 6 et 2.

Tableau 3 - Poids assignés aux objectifs pour la hiérarchie du Tableau 2

Ojectifs/ n° d'essai	C_r	T_r	I_m	C_r	C_t	I	M	F	N_o	C_r/P	P_t
1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
2	1	1	0,5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	---	---	---
3	1	1	0,5	0,5	0,5	---	---	---	---	---	---
4	1	1	0,5	---	0,5	---	---	---	---	0,5	---
5	1	1	0,5	0,5	---	---	---	---	---	---	---
6	1	1	0,5	---	---	---	---	---	---	0,5	---
7	1	1	0,5	---	---	---	---	---	---	---	---
8	0,66	1	---	---	---	---	---	---	---	0,33	---

La stabilité des trois solutions possibles (projets n°2, 6 et 10) pour les huit combinaisons d'objectifs (essais 1-8) et les scénarios de répartition modale ont ensuite été étudiés.

Les résultats sont reproduits sous forme graphique dans les figures 2a et 2b en ce qui concerne l'hypotèse de répartition modale de 25% et dans les figures 2c et 2d dans le cas de l'hypothèse de répartition modale égale à 50%.

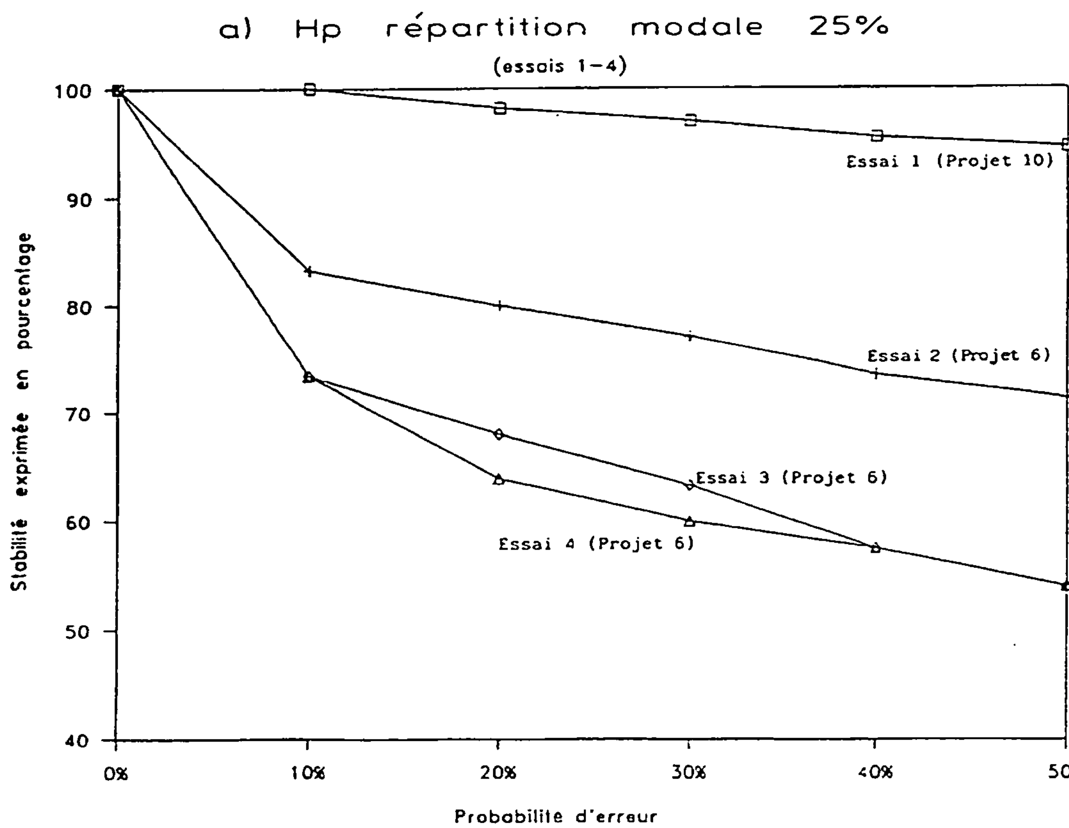


Figure 2a - Courbes de stabilité de la solution optimale

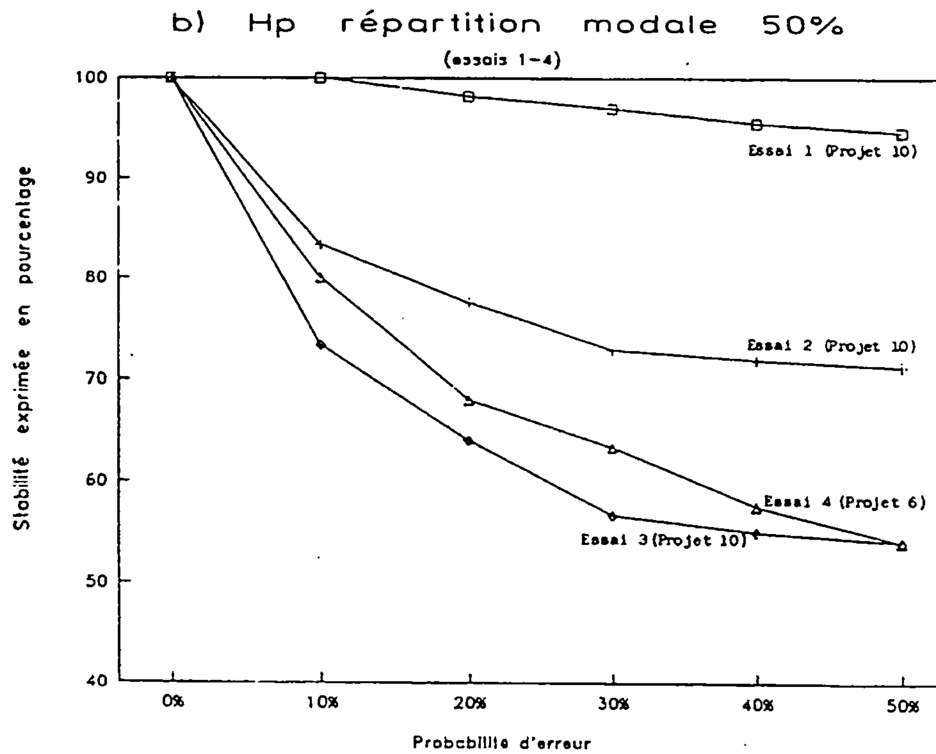


Figure 2b - Courbes de stabilité de la solution optimale

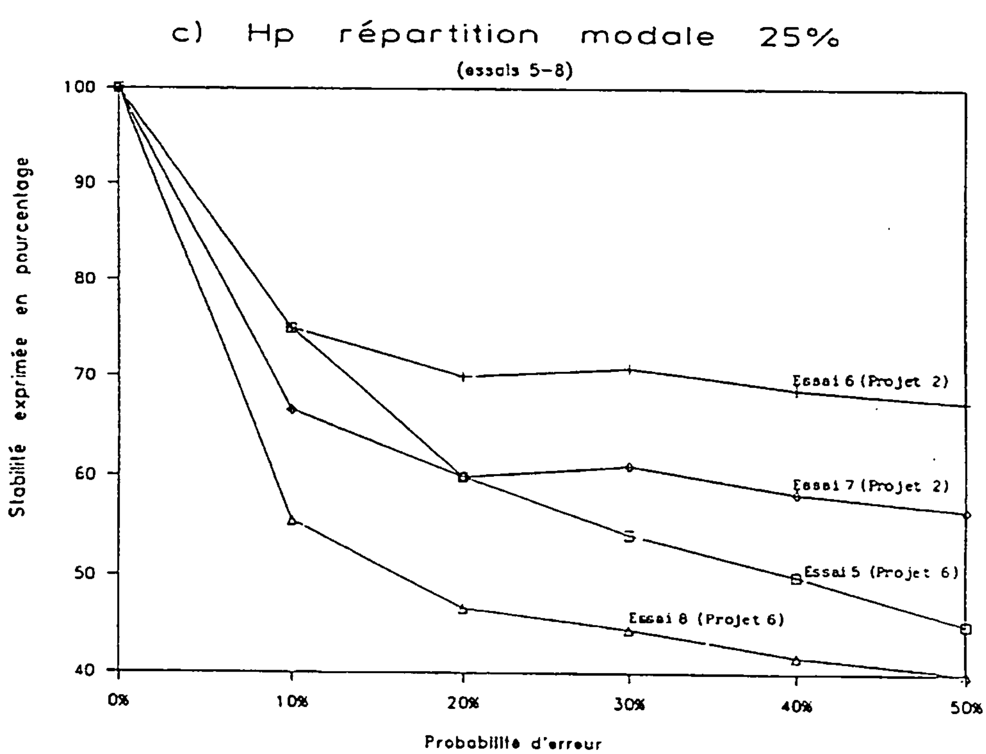


Figure 2c - Courbes de stabilité de la solution optimale

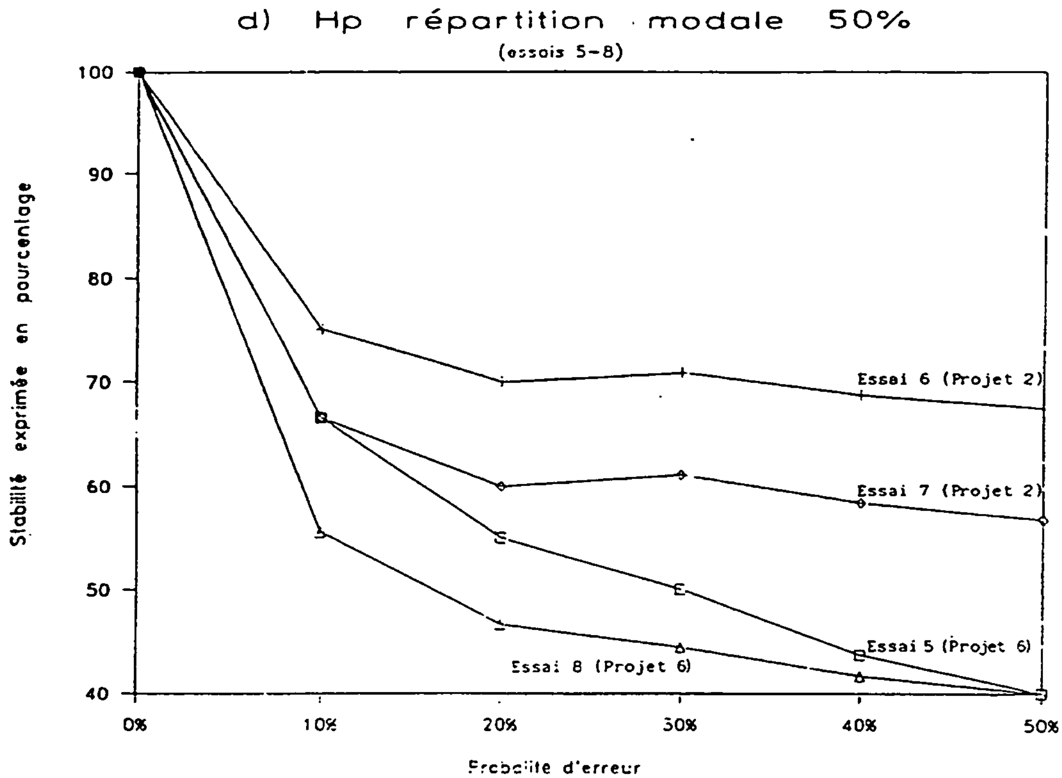


Figure 2d - Courbes de stabilité de la solution optimale

Comme on le voit, le projet n° 10, dans le premier test (tous les objectifs pris en considération) est celui qui présente la meilleure stabilité puisque lorsque la probabilité d'erreur des poids attribués aux objectifs varie jusqu'à 50%, il demeure le projet présentant une utilité maximale dans plus de 95% des cas. Le projet n° 2 présente une stabilité satisfaisante dans le sixième test, pour chacun des scénarios de répartition modale (projet excellent dans plus de 70% des cas). Le projet n° 6 est celui qui présente le niveau le plus bas de stabilité dans les différentes combinaisons envisagées. On observe aussi que la stabilité du projet n° 10 régresse lorsque le nombre des objectifs pris en considération diminue. A cet égard, il y a lieu de faire remarquer que certains objectifs indiqués par le décideur politique (Ct, Tr, IMF, No, Ia) obéissent pour l'essentiel à une volonté d'intervention (macro-objectif) identique et qu'ils oeuvrent donc de manière conjointe à la sélection du projet le plus coûteux. Ceci détermine dans le premier test la stabilité du projet n° 10 qui recule déjà dès le second test.

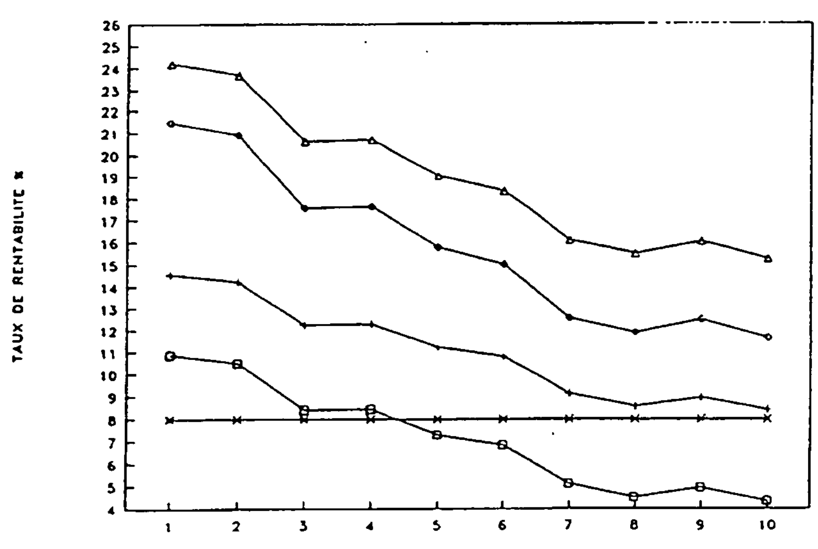
N'ayant pas repéré une solution univoque suffisamment stable à l'issue de cette première phase de sélection, il a été décidé d'introduire comme procédure d'évaluation supplémentaire l'analyse "coûts-bénéfices" afin de vérifier la rentabilité économique des projets, en particulier des solutions 10 et 2 qui obtiennent les meilleurs résultats dans l'analyse multicritère.

Tableau 4 - Analyse des bénéfices économiques offerts par les projets dans les deux scénarios de demande

Projet	Année de référence	Benéfice annuel HP. 25%	HP. 50% (Lit x 10^9)	Coût d'investissement (Lit x 10^9)
1	10	40,6	88,6	329,0
2	10	42,1	91,9	352,9
3	10	41,2	89,8	428,4
4	10	42,1	91,9	435,0
5	10	42,1	91,7	495,4
6	10	43,0	93,4	534,4
7	10	43,1	95,6	667,1
8	10	44,8	101,9	752,3
9	10	43,8	99,1	695,6
10	10	45,4	103,3	780,8

Le tableau 4 résume les valeurs du coût d'investissement et du bénéfice annuel dérivant des différents projets sous examen. En revanche, la figure 3 illustre les classifications relatives aux deux scénarios de demande: demande constante et demande croissante, en prenant comme indicateur le taux de rentabilité des investissements. Il ressort de ce graphique que dans le premier scénario (demande constante) seuls les quatre premiers projets permettent d'avoir un taux de rentabilité acceptable par le décideur politique (supérieur à 8%).

Figure 3 - Rentabilité économique à la lumière des résultats de l'analyse coûts-bénéfices des projets en fonction des différentes prévisions de la demande



□ 25% du trafic acheminé sur le réseau ferroviaire - Demande constante après l'an 2000

\+ 25% du trafic acheminé sur le réseau ferroviaire - Demande croissante après l'an 2000

◇ 50% du trafic acheminé sur le réseau ferroviaire - Demande constante après l'an 2000

△ 50% du trafic acheminé sur le réseau ferroviaire - Demande croissante après l'an 2000

D'où le choix du projet n° 2 indiqué comme étant l'une des meilleures solutions de l'analyse multicritère et retenu comme solution optimale du premier scénario de demande.

Dans le deuxième scénario de demande, caractérisé notamment par l'introduction d'une desserte ferroviaire à fréquence horaire, le meilleur projet est représenté par la solution n° 6 qui est une version améliorée de la solution n° 2 obtenue grâce à de nouvelles modifications du tracé ferroviaire se soldant par un racourcissement de la ligne et un écourtement de la durée totale du trajet.

Même si la solution représentée par le projet n° 6 ne fait pas état d'un niveau de stabilité entièrement convaincant, elle constitue néanmoins, dans la combinaison initiale des poids, le meilleur projet à 5 reprises dans le premier scénario de demande et à 3 reprises dans le second. Par ailleurs, l'autre solution possible, à savoir le projet n° 10, présente, en plus des limites susmentionnées, le coût d'exécution le plus élevé et constitue dans tous les cas de figure la pire des solutions sur le plan de la rentabilité économique.

Par conséquent, dans le cas d'espèce, la "solution réaliste" à la lumière des deux contraintes de la rentabilité et du budget, est représentée non pas par le projet optimal selon l'analyse multicritères, mais par un projet que l'on pourrait qualifier de "sub-optimal".

5. Conclusions

La procédure illustrée dans le présent article représente un instrument méthodologique permettant de comparer différents projets et d'opérer un choix.

Le fait que l'on puisse l'utiliser pour comparer en termes quantitatifs plusieurs statégies d'intervention découlant du choix de certains objectifs bien définis lui confère une grande flexibilité et une possibilité d'application pratiquement illimitée.

Les auteurs se proposent de développer la méthodologie afin d'introduire dans l'analyse des objectifs constitués par des fonctions non linéaires qui tiennent davantage compte des coûts généralisés des transports, des choix modaux et des fonctions d'utilité sociale éventuelles.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Pasquale Staffini et Stefano Ricci pour leur collaboration à l'élaboration du modèle.

BIBLIOGRAPHIE

1) Levy-Lambert, H., Guillaume, H, La rationalisation des choix budgétaires - Technique d'analyse - PUF -1971;

2) Lyden, F.J., Miller, E.G., Planning-programming-budgeting - A systems approach to management Markham Publishing Co. - Chicago 1967;

3) Hugonnard, J.C., Roy, B, "Le plan d'extension du métro en banlieue parisienne, un cas type de l'analyse multicritère" - Les cahiers scientifiques de la revue Transports - n.7;

4) Gargaillo, L, "Electre IV : une analyse multicritère agrégée limitée" - Les cahiers scientifiques du transport - n.11/12 - 1985;

5) D'Armini R. "L'analisi di fattibilità applicata alla rete di trasporto con prevalente funzione di accessibilità" Strade e Traffico n. 285, 1981;

6) Vicuna G. Organizzazione e tecnica ferroviaria - Editions CIFI - Rome 1986.