

UNE METHODE HYBRIDE D'AIDE A L'EVALUATION

H. Omrani^{1,2}, L. Ion-Boussier¹, A. Awasthi¹

P. Trigano²

¹EIGSI 26 rue de Vaux de Foletier, 17041
La Rochelle cedex1, France
[hichem.omrani](mailto:hichem.omrani@eigsi.fr), [luminita.ion](mailto:luminita.ion@eigsi.fr), [anjali.awasthi](mailto:anjali.awasthi@eigsi.fr),
[loic.delaitre](mailto:loic.delaitre@eigsi.fr) }@eigsi.fr

²UMR CNRS 6599 HEUDIASYC, Université de
Technologie de Compiègne, BP 20529 –
60205 Compiègne Cedex, France
ptrigano@hds.utc.fr

RESUME : *Un choix cohérent des projets à mettre en œuvre pour l'amélioration de la mobilité urbaine nécessite une évaluation a priori des impacts environnementaux et socio-économiques et fait intervenir des experts dans l'ingénierie de trafic, l'urbanisme ou encore des décideurs au niveau local. Cette évaluation est rendue difficile par le caractère incomplet, imprécis des informations, par la nature qualitative de certains indicateurs et par les différences entre les degrés de connaissance des experts. Dans cet article, nous proposons une approche pour l'évaluation des impacts environnementaux et socio-économiques liés à la mobilité urbaine. Il s'agit d'une approche hybride qui se base sur l'analyse multicritères et la théorie des croyances. Ce couplage des deux théories est rarement utilisé et il s'inscrit dans le cadre de l'utilisation des outils théoriques de l'IA (Intelligence Artificielle) et la RO (Recherche Opérationnelle) pour l'évaluation de la mobilité urbaine. La théorie des croyances est utilisée afin de mieux illustrer la certitude, le doute ou l'ignorance quant à l'indicateur étudié. Ensuite l'analyse multicritères est employée pour donner une évaluation globale d'un projet tenant compte de tous ses critères et des interactions entre les critères. Nous finissons cet article, par une étude de cas afin de tester notre approche.*

MOTS-CLES : *Aide à la décision, évaluation, théorie des croyances, mobilité urbaine.*

1. INTRODUCTION

Dans le contexte de l'évolution de la mobilité urbaine, ingénieurs trafic, spécialistes dans l'aménagement du territoire et autorités locales s'accordent sur le besoin d'une gestion efficace du système de transport urbain assurant de bonnes conditions d'accessibilité aux emplois et aux services, sans que soient négligées les contraintes environnementales et financières. Or souvent le respect des contraintes environnementales (réduction des émissions locales de polluants atmosphériques ou du bruit de la circulation) qui implique que soit envisagé un usage restreint de la voiture particulière est lié au développement massif des transports publics, à leur tour conditionné par les ressources financières des agglomérations. Dans ce cadre complexe et parfois contrasté, il apparaît clairement que toute mesure de transport visant l'amélioration de la mobilité urbaine est sujette à des risques environnementaux ou financiers, et cela d'autant plus que ces mesures ont souvent des impacts à long terme. Ceci explique l'intérêt croissant pour les outils qui permettent l'évaluation des impacts des projets liés à l'amélioration de la mobilité urbaine.

Les approches les plus courantes sont celles basées sur les évaluations des capteurs ou les modèles numériques à partir des données liées au flux de trafic routier. Dans ces cas, le projet est déjà en place ou encore son évaluation ne se rapporte qu'à des indicateurs quantitatifs, négligeant les impacts sociaux (niveau d'acceptance, degré de satisfaction, etc.). Ces dernières années, nous

pouvons assister au développement des méthodes d'évaluation heuristiques comme l'Analyse Multicritères (Multi-Criteria Decision Making) (Gal et Hanne, 1999) (Roy, 1985) ou l'Analyse de Cycle de Vie (Life Cycle Analysis) (Guinee, 2002).

Dans nos travaux de recherche, nous avons proposé une approche pour l'évaluation des impacts liés à la mobilité urbaine basée sur la théorie des croyances et l'analyse multicritères (Omrani, 2007b). Dans cet article, nous nous sommes intéressés principalement à présenter la méthode proposée pour l'estimation des poids des critères et de leurs interactions.

2. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUES

Nos travaux se déroulent dans le cadre du projet SUCCESS (Smaller Urban Communities in Civitas for Environmentally Sustainable Solutions), projet pilote appartenant au programme européen (CIVITAS). Il fait intervenir trois villes (La Rochelle-France, Ploiesti-Roumanie et Preston-Grande Bretagne) et outre des préoccupations d'investissement et de trafic, les décideurs doivent intégrer les problèmes de sécurité, d'efficacité du système de transport, d'équité ou d'environnement durable. L'objectif est de mettre en place des projets d'amélioration de la mobilité urbaine (par exemple la mise en place des zones d'accès contrôlé, l'introduction des bus hybrides, la mise en place d'un parc relais etc.) et d'en évaluer les impacts regroupés en 5 catégories et sous-catégories. Chaque impact est caractérisé par un ou plusieurs indicateurs. Pour éva-

luer les projets de transport dans le projet SUCCESS, une liste non exhaustive de 28 indicateurs est associée aux impacts (par exemple : nombre de véhicules/km pour illustrer la congestion, niveau CO2 pour la qualité de l'air ou encore degré d'acceptance par la sécurité,...).

L'ensemble de ces dimensions (catégories, sous-catégories, impacts et indicateurs) constituent une grille d'évaluation hiérarchique permettant d'évaluer un projet donné et éventuellement de le comparer avec d'autres projets, afin d'en choisir le plus «approprié».

L'évaluation d'un projet est conditionnée par plusieurs aspects qui rendent la prise de décision difficile :

- certains indicateurs se voient attribués des valeurs quantitatives, d'autres des valeurs qualitatives ;
- l'estimation des indicateurs (qualitatifs ou quantitatifs) est effectuée avec des degrés de certitude différents ;
- l'évaluation d'un projet se base sur plusieurs indicateurs qui auront un poids différent (degré de pertinence) ;
- certains indicateurs sont estimés dans un cadre spatio-temporel qui est restreint (par exemple la mesure du bruit associé au trafic se fait au niveau d'une rue, dans un créneau de la journée et elle ne reproduit pas fidèlement l'évolution du bruit dans une zone le long de la journée) ;
- les valeurs mesurées de certains indicateurs sont le résultat de plusieurs activités (par exemple pour le niveau du CO2, nous devons prendre en considération la circulation automobile aussi bien que les émissions dues aux dépenses de gaz par les habitations ou encore celles issues des activités des entreprises) ;
- plusieurs experts interviennent dans l'évaluation et dans la prise de décision ; ils peuvent être spécialistes urbanisme, décideurs politiques, ingénieurs trafic, usagers, etc. Chacun a son degré de connaissance dans une catégorie (domaine d'expertise) ;
- l'intervention de plusieurs sources d'informations avec des degrés de fiabilité différents.

Par ailleurs, la prise de décision issue de l'évaluation et la comparaison des projets doit être faite à priori (avant la mise en application du projet), ce qui nécessite la prise en considération de tous les aléas, des conflits et des facteurs de pondération (degré de pertinence, degré d'expertise) avec des indicateurs de «compromis» (pour des projets à évaluation proches, le coût ou le temps de sa mise en œuvre).

Nous nous intéressons uniquement à l'évaluation d'un projet, via une démarche comparative entre la situation d'une zone urbaine avant son implémentation et celle après la mise en service.

3. DEMARCHE THEORIQUE

L'évaluation de l'efficacité d'un projet comporte deux étapes :

- l'évaluation de chaque critère à partir d'une fonction score, en prenant en compte la multitude de sources avec leurs fiabilités.

- le calcul d'un score global pour un projet de transport afin de souligner ses performances dans toutes ses phases d'implémentation (avant projet, en cours d'implémentation, ...), en prenant en compte le degré de pertinence de chaque critère et les interactions entre critères.

3.1. Principes de base

3.1.1 Evaluation par critère

Les critères d'évaluation utilisés sont de types qualitatifs ou quantitatifs. Les valeurs qualitatives sont obtenues à partir des avis des évaluateurs et des enquêtes. En revanche, les valeurs quantitatives sont obtenues à partir des capteurs de mesures, des comptages et des modèles mathématiques. Par conséquent, les données collectées à partir des sources d'information sont hétérogènes et de nature variée. Afin de combiner toutes les valeurs des critères, il devait alors les convertir sur la même échelle (échelle commune). Nous proposons d'utiliser la théorie des croyances qui est un cadre théorique général. Cette dernière est capable de gérer la variabilité des données, les aspects d'incertitude et d'imprécision.

La théorie des croyances permet de représenter la connaissance partielle de la valeur d'une variable (définie sur un cadre de discernement, ou domaine, noté par Ω) par une fonction de croyance (notées par m). Le Modèle des Croyances Transférables (MCT) est une interprétation subjectiviste de cette théorie, développée par (Smets, 2002).

Divers travaux ont mis en évidence l'intérêt de ce cadre théorique pour la résolution de problèmes de diagnostic (Vannoorenberghe et Denoëux, 2001), de reconnaissance des formes (Denoëux, 2005), de traitement d'images (Vannoorenberghe et Denoëux, 2001) ou de fusion d'informations, en aide à la décision (Dubois et al., 2001) (Xu et al., 2005). Mais, à notre connaissance, elle n'a été que tangentiellement appliquée dans le domaine de transport et de l'environnement (Guyonnet et al., 2003) (Xu et al., 2005) (Yang et al., 2005)

Après la collecte de données, le processus d'évaluation d'un critère peut être synthétisé en 3 étapes :

- affectation des fonctions de masses, par source d'information utilisée, aux niveaux d'évaluation ;
- fusion des fonctions de masses dans le cas où plusieurs sources d'information sont utilisées pour l'évaluation d'un même critère. La fusion des fonctions de masses est faite à l'aide de l'opérateur conjonctif de « Dempster-Shafer » (Shafer, 1976).
- élaboration d'une fonction « score » attribuée à chaque critère.

Etape d'affectation des masses aux hypothèses du cadre de discernement : Elle est délicate et adaptée à chaque type d'utilisation et chaque domaine d'application. Plusieurs méthodes ont été proposées pour la construction des fonctions de croyances à partir d'un ensemble d'apprentissage (Vannoorenbergh et Denoëux, 2001).

A notre connaissance, une seule équipe de recherche (Xu et al., 2005), (Yang t al., 2005) a développé une approche pour l'évaluation des impacts environnementaux mais les fonctions des masses correspondent seulement à des hypothèses singletons. Dans notre cas, pour l'évaluation d'un projet de transport et ses différents critères, notre variable d'intérêt correspond aux niveaux d'évaluation (par exemple, très faible, faible, élevé, etc.). Nous prenons en considération non seulement des ensembles singletons mais aussi des réunions d'hypothèses.

Dans notre application, nous avons choisi d'appliquer une méthode d'affectation de masses, pour chaque source d'information (Omrani et al., 2007c).

- Pour les mesures expérimentales nous utilisons une méthode basée sur la fréquence d'apparition qui tient compte des valeurs aberrantes et des données manquantes.
- Pour les enquêtes, l'affectation de masse est basée sur la fréquence d'apparition des niveaux d'évaluation selon l'ensemble des données.
- Pour les avis d'experts, nous utilisons la théorie développée par Radon (Radon, 2004). Les experts donnent leur avis selon une échelle de mesure allant de 0 à 10. A l'aide de cette échelle, des variables floues sont définies, qui indiquent le degré de perception relatif à chaque critère (e.g. degré d'acceptante, d'accessibilité, etc.).

Etape de la fusion d'informations : Dans le cas, où plusieurs sources d'information mesurent le même critère, une phase de fusion des évaluations est indispensable pour obtenir un résultat final tenant compte de toutes les sources d'informations et leurs degrés de fiabilités.

Le conflit entre les sources d'information peut être important et la manière la plus intéressante d'expliquer cet aspect de conflits est de considérer les fiabilités des sources. En effet, avant la fusion des structures de masses, la technique d'affaiblissement permet de prendre en considération la fiabilité des sources et ainsi réduire l'aspect conflictuel entre les sources (Smets et Kennes, 1994). Le coefficient d'affaiblissement est obtenu à l'aide d'une enquête à préférences déclarées auprès des experts et qui est basée sur les plans orthogonaux. Ce coefficient tient compte de l'ancienneté des données, de la qualité des données et de la fiabilité de la source d'informations (telle qu'elle est perçue par les experts interrogés). Cet aspect n'est pas développé dans ces travaux (voir (Omrani, 2007b) pour la présentation détaillée de l'approche).

Etape de l'élaboration de la fonction score : Après la fusion des informations, plusieurs règles de décision sont possibles parmi lesquelles: le maximum de crédibilité, le maximum de plausibilité, le maximum de «probabilité pignistique». Nous pouvons trouver une liste exhaustive des critères de décision dans (Denoeux, 2005). Dans le modèle des croyances transférables

(MCT), nous utilisons une approche de décision «prudente», les croyances sont transformées en probabilités pignistique (notées par $BetP$) (Smets et Kennes, 1994). La fonction permettant de créer cette probabilité est appelée «transformation pignistique » et elle définie comme suit (Eq. 1):

$$BetP(A) = \sum_{B \subseteq \Omega} \frac{|A \cap B|}{|B|} \times \frac{m(B)}{1 - m(\emptyset)}, \quad \forall A \subseteq \Omega \quad (1)$$

avec

$m(B)$ est la «part» de croyance allouée à l'hypothèse $B \in \Omega$, $|B|$ décrit le nombre des éléments dans l'ensemble B et $m(\emptyset)$ est la fonction de masse allouée pour le conflit entre les sources d'information.

Pour l'évaluation de chaque critère, nous utilisons la probabilité «pignistique» (Smets et Kennes, 1994). Nous déterminons une utilité globale pour chaque critère prenant en compte les degrés de pertinence et les valeurs de probabilités pignistiques des niveaux d'évaluation. Ces degrés de pertinence sont exprimés par une fonction d'utilité linéaire (Xu et al., 2005) relative aux niveaux d'évaluation (figure 1). D'autres fonctions d'utilité peuvent être utilisées (i.e. exponentielle etc.)

L'utilité par critère est basée sur un raisonnement «évidentielle» et elle est calculée comme suit :

$$u_i = \sum_{i=1}^m u(H_i) \times BetP(H_i) \quad (2)$$

Où : $u(H_i)$ représente l'utilité relative au niveau d'évaluation H_i ; $u(H_{i+1}) \geq u(H_i)$ si le niveau H_{i+1} est préféré au niveau H_i , cette préférence est notée comme suit : $H_{i+1} \succ H_i$ où le symbole « \succ » désigne un symbole de préférence. $u(H_1) \leq u(H_2) \leq \dots \leq u(H_m)$ pour les impacts positifs (comme le degré de satisfaction des usagers etc.) et $u(H_1) \geq u(H_2) \geq \dots \geq u(H_m)$ pour les impacts négatifs (comme la pollution atmosphérique et la nuisance sonore etc.)

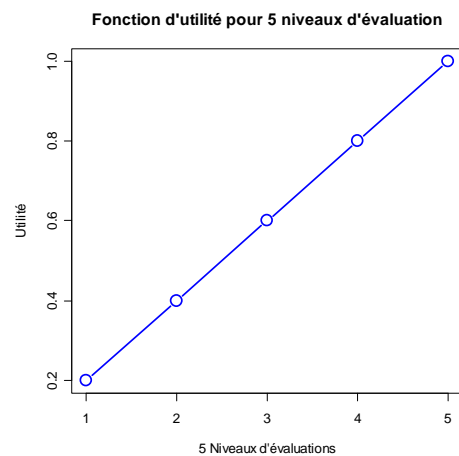


Figure 1. Fonction d'utilité linéaire

D'après l'équation (2), chaque état de critère (C_i) à l'instant (t_n) est noté $u_i(t_n)$ et chaque changement d'état

du critère (C_i) entre deux périodes (t_n) et (t_{n-1}) est noté par : $\Delta u_i = u_i(t_n) - u_i(t_{n-1})$ (3)

Nous évaluons les valeurs des critères avant et après l'implémentation d'un projet de transport. La différence entre les deux états d'avant et d'après implémentation du projet, peut être :

- positive (indiquant une amélioration) ou
- négative (indiquant une dégradation) ou
- nulle, s'il n'y a aucun changement (indiquant une stabilité).

Selon le signe de l'état de changement de critères, nous établissons trois classes notées: (classe 1, classe 2 et classe 3), désignant respectivement (amélioration, dégradation, pas de changement) comme indiqué dans le tableau 1.

Etat de changement de critère (Δu_i)	Classe	Type d'évolution : état des critères
$\Delta u_i > 0$	1	Amélioration
$\Delta u_i = 0$	2	Pas de changement
$\Delta u_i < 0$	3	Dégradation

Tableau 1 : Etat de changement

Etude de cas :

Nous présentons ici, une étude de cas, pour illustrer le principe d'évaluation par critère (tableau 2; figure 2).

Catégorie	Critères (C)	(u_1)	(u_2)	Evolution :
Environnement	Qualité de l'air (Qa.)	0.245	0.2	Dégradation (-)
Société	Nb. usagers (Nu.)	0.14	0.165	Amélioration (+)
	Satisfaction (Sa.)	0.47	0.55	
Transport	Congestion (Cg.)	0.145	0.17	Amélioration (+)

Tableau 2 : évaluation initiale (u_1) et Post-évaluation (u_2)

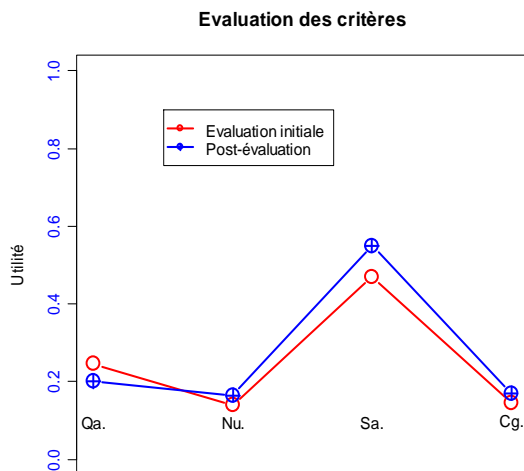


Figure 2. Evaluation de chaque critère selon deux périodes d'évaluation

La comparaison de l'état de chaque critère constitue un moyen simple et efficace pour connaître l'état de chaque critère et ainsi prendre des mesures adéquates pour l'améliorer.

3.1.2. Evaluation globale

Pour une évaluation globale d'un projet, tenant compte de tous ses critères, une agrégation est nécessaire.

Il existe plusieurs méthodes d'agrégation. Elles peuvent être classées en deux grandes familles de méthodes : méthode d'agrégation complète (avec compensation, en utilisant une fonction d'utilité) et méthode d'agrégation partielle (sans compensation) (Roy, 1985). Chaque méthode d'agrégation dépend de l'objectif et du besoin.

Généralement, les méthodes d'agrégation utilisent des poids (ou degrés d'importance) pour les critères à agréger. Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes d'estimation des poids des critères à savoir : la méthode AHP (Analytical Hierarchical Process) (Saaty, 1990), Electre, Macbeth etc. Ces méthodes sont appliquées dans plusieurs domaines pour résoudre des problématiques diverses et variées. La méthode Electre, Macbeth et AHP sont les méthodes les plus utilisées dans le comité d'analyse multicritères.

De plus, plusieurs opérateurs d'agrégations existent à savoir l'opérateur minimal, moyenne, somme pondérée (OWA) (Yager, 1993) et l'opérateur multiplicatif. Dans notre application, nous nous sommes intéressés à appliquer une méthode d'agrégation en utilisant l'intégrale de Choquet qui est un opérateur non additif. Ce dernier, a été appliqué dans plusieurs domaines d'application. Cet opérateur présente beaucoup d'avantages puisqu'il tient compte non seulement des poids des critères mais aussi de leurs interactions. Mais la problématique lors de l'utilisation de cet opérateur c'est la prise en compte des interactions qui sont difficiles à estimer.

L'intégrale de Choquet est une extension de la moyenne pondérée. Cette méthode d'agrégation considère en même temps les poids des critères et leurs interactions et, modélise d'une manière compréhensible, la redondance et les complémentarités entre critères. L'agrégation des critères par la forme 2-additive de l'intégrale de Choquet est écrite comme suit (Grabisch, 1997):

$$u = \sum_{i=1}^n \omega_i \times u_i - \frac{1}{2} \sum_{s=1}^n \sum_{t=s+1}^n I_{st} \times |u_s - u_t| \quad (4)$$

avec:

- les ω_i sont les poids des critères C_i , telle que la somme des poids est égale à 1.
- les u_i représentent les utilités relatives aux critères C_i , qui sont définies par l'équation (Eq. 2) ;
- les I_{st} représentent les interactions entre les paires de critères (C_s, C_t) et prennent leur valeur dans l'intervalle [-1,1].
 - une valeur négative est significative d'une redondance entre les deux critères ;

- une valeur positive signifie qu'il y a une complémentarité entre les deux critères ;
- une valeur nulle implique que les critères sont indépendants.

Le cas 2-additif est un bon compromis entre une moyenne pondérée et une intégrale de Choquet générale. En effet, les interactions interviennent comme des termes correctifs de la moyenne pondérée classique (cf. Eq. 4).

Après l'évaluation globale du projet, il est possible d'établir un indice d'efficacité du projet (noté par E). Par exemple pour deux phases données, notées respectivement par (ph_1) et (ph_2) , l'indice d'efficacité est donné par l'équation suivante (Eq. 5):

$$E(ph_1 \rightarrow ph_2) = \frac{u(ph_2) - u(ph_1)}{u(ph_1)} \quad (5)$$

L'estimation de l'indice d'efficacité du projet noté par «E» (Eq. 5) est égale à l'écart relatif entre les utilités notées par u (Eq. 4) entre les deux phases d'implémentations ph_1 et ph_2 . A partir de cet indice, nous pouvons conclure s'il y a eu une amélioration ou une dégradation par rapport à l'état global du projet.

Nous focalisons la suite de cet article sur la présentation d'une méthode pour estimer les poids des critères et leurs interactions.

4. ESTIMATION DES POIDS DES CRITERES

Après avoir étudié les différentes méthodes d'estimation des poids (et en particulier la méthode AHP) (Saaty, 1990), nous avons constaté les limites et les inconvénients de ces méthodes (nécessité d'avoir plusieurs alternatives, échelle ordinale (1-9), critères indépendants, absence de la gestion des aspects d'indécisions et d'ignorances liés aux opinions des évaluateurs, etc.) (Omrani, 2007b). Par conséquent, nous proposons une méthode d'estimation des poids des critères basée sur l'élicitation des évaluateurs. Elle permet de gérer les aspects d'indécision et d'ignorance liés aux opinions des évaluateurs et permet de résoudre les limites soulevés auparavant.

Soit $\{E_i, i=1, \dots, p\}$ un ensemble d'évaluateurs et $\{C_k, k=1, \dots, n\}$ un ensemble de critères dont nous voulons déterminer les poids $\{\omega_k, k=1, \dots, n\}$. Nous définissons un ensemble de degrés de pertinence que les évaluateurs utilisent pour donner leur avis vis-à-vis des degrés de pertinence de chaque critère. Cet ensemble de degré de pertinence peut être défini comme suit avec 4 niveaux :

$\Omega = \{\text{Pas Pertinent, Peu Pertinent, Pertinent, Très Pertinent}\}$. Ce choix de 4 niveaux est appliqué afin d'éliminer la valeur intermédiaire, car généralement l'être humain a tendance de choisir la valeur moyenne lorsqu'il est devant une situation d'ignorance partielle ou totale. Ce nombre de granularité peut varier de 4 à 6 niveaux voire plus.

Dans cette méthode, nous gérons l'indécision et l'ignorance relatives aux élicitations des évaluateurs. Un évaluateur peut être indécis, par exemple lorsqu'il est indifférent entre les niveaux d'évaluation {Pertinent, et Très Pertinent}. Il peut être aussi dans une situation d'ignorance totale lorsqu'il ignore l'importance d'un critère pour l'évaluation d'un projet (i.e. il ne sait pas si le critère est réellement important pour l'évaluation). Le critère dans ce cas de figure est mal connu où l'évaluateur n'a aucune connaissance sur le critère et son degré d'importance pour l'évaluation du projet. Dans ce cas de figure, il peut répondre par «Je ne Sais Pas (JSP)». L'estimation des poids des critères avec «n» niveaux de pertinence est donnée par l'équation (6):

$$\begin{cases} \omega_i = \sum_{i=1}^n (Freq(i) + I_2(i)) \times v(i) \\ I_2(i) = \sum_{j \neq i, |j| \geq 2} \frac{Freq(j)}{|j|} \end{cases} \quad (3.18) \quad (6)$$

avec :

- $v(i)$: niveau de degré d'importance ;
- $\Omega = \{1, \dots, n\} = \{\text{Pas Pertinent, } \dots, \text{Très Pertinent}\}$: ensemble de degrés de pertinence ;
- $Freq(i)$: fréquence d'apparition du degré de pertinence "i, i=1:n" ;
- $|j|$: cardinalité de l'ensemble $j \in \Omega$.

Nous avons choisi, pour la fonction $v(i)$ une fonction linéaire qui reflète le degré d'importance d'un critère. Si nous disposons de «n» niveaux de pertinence alors cette fonction est donnée par l'équation suivante:

$$v(i) = (i-1)/(n-1) \quad (7)$$

Après le calcul des poids, avec l'équation (6), une étape de normalisation (8) est nécessaire pour avoir la somme des poids égale à 1.

$$\omega_i^* = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (8)$$

Exemple :

Soit un projet donné, deux critères d'évaluation (Qualité de l'air (Qa.), Accessibilité (Ac.)) et 6 évaluateurs (E_1, \dots, E_6). Soit $\Omega = \{1, 2, 3, 4\} = \{\text{Pas Pertinent, Peu Pertinent, Pertinent, Très Pertinent}\}$ un ensemble de degrés pertinence et soit $v\{1,2,3,4\} = \{0,1/3,2/3,1\}$ (Eq. 7) les degrés d'importance des niveaux de pertinence $\{1, 2, 3, 4\}$. Supposons que nous avons le jeu d'opinions d'évaluateurs donné dans le tableau 3.

Le calcul de la fréquence d'apparition, selon l'ensemble de degrés de pertinence, est donné dans le tableau 4.

Critères	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Qa.	1	2	3	3	3	JSP
Ac.	1	{1,2}	3	3	3	1

Tableau 3. Opinions des évaluateurs

Critères	1	2	3	4	{1,2}	JSP
Qa.	1/6	1/6	3/6	0	0	1/6
Ac.	2/6	0	3/6	0	1/6	0

Tableau 4. Fréquence d'apparition

Le calcul de la probabilité pignistique, selon la théorie des croyances, est donné dans le tableau 5. La transformation pignistique issue de jeux de masses (Eq. 1) permet de distribuer l'ignorance et l'indécision sur les degrés de pertinence singletons. Par conséquent avec cette transformation, une gestion de l'Ignorance et l'Indécision (noté par l'indice I_2 dans l'équation 6) est traitée afin d'obtenir un jeu de probabilité et ainsi nous pouvons appliquer les théories de la décision classique (i.e. théorie de l'utilité).

Critères	1	2	3	4
Qa.	5/24	5/24	13/24	1/24
Ac.	5/12	1/12	6/12	0

Tableau 5 : Probabilité pignistique

Les poids des critères {Qa.} et {Ac.} sont donnés dans le tableau 6. Ils valent respectivement 0.56 et 0.44, après l'étape de normalisation.

Critères	Poids après normalisation
Qa.	0.56
Ac.	0.44

Tableau 6 : Poids des critères

Nous notons qu'il est possible d'étendre cette approche en rejetant certains critères jugés non pertinents avant l'estimation de leur poids en utilisant le «risque pignistique» (Denoeux, 2005).

5. ESTIMATION DES INTERACTIONS ENTRE LES CRITERES

5.1. Principes

Les interactions entre critères sont difficiles à estimer, même s'il existe déjà des méthodes (voir synthèse dans (Grabisch et al., 2006)). Ces dernières sont généralement appliquées pour des problèmes de classification et elles nous semblent inadaptées pour l'estimation des interactions entre les critères environnementaux et socio-économiques. Nous proposons une méthode permettant d'estimer les interactions existantes entre les critères à partir des connaissances des experts du domaine.

Nous notons que les indices d'interaction notés par (I) prennent leurs valeurs dans l'intervalle [-1,1]. Une valeur négative est significative d'une redondance entre les critères. Deux critères C_1 et C_2 sont redondants si la satisfaction de l'un des critères est suffisante pour avoir un effet significatif sur l'évaluation globale. Une valeur positive signifie qu'il y a une complémentarité entre les deux critères. La satisfaction simultanée des critères C_1 et C_2 est nécessaire pour avoir un effet sur l'évaluation globale. Ainsi dans une telle configuration, pour le

projet «Parc Relais» avec un nombre faible des usagers mais un degré de satisfaction élevé, le projet ne serait être bien évalué globalement, c'est à dire que ces deux critères sont complémentaires.

L'intégrale de Choquet (Grabisch et al., 2006) est un outil théorique général pour le traitement des problèmes multicritères avec prise en compte de phénomène d'interaction entre des critères. Mais, la difficulté agit dans l'estimation de ces indices d'interaction lors de l'utilisation de ce modèle théorique. Les paramètres de l'intégrale de Choquet ne peuvent pas être fixés à priori. (Kojadinovic, 2004) a proposé de déterminer ces paramètres à partir de la notion d'entropie. (Grabisch, 1997) a proposé le concept de la mesure k-additive et quelques méthodes pour l'estimation des indices d'interaction entre les critères.

Ces méthodes sont appliquées dans des problèmes de classement et ne sont pas adaptées et adéquates dans notre application. Elles ne présentent pas une solution générale pour tous les problèmes d'analyse multicritères. Par conséquent, nous proposons une approche pour modéliser et quantifier les interactions entre un ensemble de critères. Notre approche est basée sur la théorie des croyances et l'élucation des experts et traite les aspects d'indécision et d'ignorance.

5.2. Approche proposée pour l'estimation des interactions entre les critères

Soient $\{E_i, i=1, \dots, p\}$ un ensemble d'évaluateurs et $\{C_k, k=1, \dots, n\}$ un ensemble de critères. Nous proposons de déterminer les indices d'interactions $\{I_{ij}, i, j=1, \dots, n\}$ qui existent entre les paires des critères. Nous définissons un ensemble de niveaux d'interaction dont les évaluateurs utilisent pour évaluer les interactions entre les critères. Cet ensemble des niveaux d'interaction peut être défini comme suit : $\Omega = \{\text{Interaction Négative Élevée } (-2), \text{ Interaction Négative Faible } (-1), \text{ Pas d'Interaction } (0), \text{ Interaction Positive Faible}, \text{ Interaction Positive Élevée } (2)\}$.

Par le même principe que l'estimation des poids des critères, nous traitons l'indécision et l'ignorance relatives aux avis des évaluateurs. L'estimation des indices d'interactions entre les critères avec 5 niveaux de pertinence est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{cases} I_{ij} = \sum_{k=1}^5 \text{BetP}_{i,j}(k) \times V(k) \\ \text{BetP}_{i,j}(k) = \text{Freq}(k) + \sum_{l \neq k, |l| \geq 2} \frac{\text{Freq}(l)}{|l|} \end{cases} \quad (9)$$

avec:

- $V(k)$: niveau des degrés d'interaction
- I_{ij} : indice d'interaction
- $k \in \Omega = \{-2, -1, 0, +1, +2\} = \{\text{Interaction Négative Élevée}, \text{ Interaction Négative Faible}, \text{ Pas d'Interaction}, \text{ Interaction Positive Faible}, \text{ Interaction Positive Élevée}\}$
- $\text{Freq}(k)$: fréquence d'apparition du degré d'interaction « $k \in \Omega$ »
- $|l|$: cardinalité de l'ensemble $l \in \Omega$
- $\text{BetP}(i)$: la probabilité «pignistique»

Nous avons choisi pour la fonction V, une forme linéaire (Eq. 10) qui reflète les degrés d'importance des interactions entre les critères. Avec «n» niveaux d'importance des interactions, la fonction V est définie par l'équation suivante:

$$V(k) = \frac{2}{(n-1)} \times k \quad (10)$$

L'approche d'estimation des indices d'interactions est applicable pour un seul ou un groupe d'évaluateurs. Considérons un cas simple, ou nous avons un seul évaluateur et deux critères notés par (C₁,C₂). Nous supposons que l'évaluateur émet un avis correspondant à «Interaction Positive Faible» pour les 2 critères. En appliquant les équations (9,10), nous trouvons un indice d'interaction entre les 2 critères (C₁ et C₂) égal à (+0.5). Également, si l'évaluateur émet un avis correspondant au niveau «Interaction Négative Faible» alors dans ce cas de figure, l'indice d'interaction entre les 2 critères est égal à «-0.5».

Exemple :

Nous considérons un projet Parc Relais avec 3 critères d'évaluation (Qualité de l'air (Qa.), Accessibilité (Ac.), Niveau trafic (Nt.)). Pour estimer les degrés d'interactions entre les 3 critères, nous disposons de 2 évaluateurs (experts en trafic et en environnement) notés par (E₁,E₂).

Soit Ω l'ensemble correspondant aux 5 niveaux d'interactions suivants :

Ω = {-2,-1,0,1,2}={Interaction Négative Élevée, Interaction Négative Faible, Pas d' Interaction, Interaction Positive Faible, Interaction Positive Élevée}.

Soit V, la fonction reflétant l'importance des degrés d'interactions pour chaque paire de critères telle que :

$$V\{-2,-1,0,1,2\}=\{-1,-0.5,0,0.5,1\} \text{ (Eq. 7).}$$

Dans les tableaux 7 et 8, nous supposons le jeu de données relatives aux avis des 2 évaluateurs. Les fréquences d'apparition, selon les niveaux d'interactions, sont données dans le tableau 9. Puis, les probabilités «pignistiques» relatives aux degrés d'interaction sont données dans le tableau 10. Enfin, les indices d'interaction calculés selon les équations (6,7) sont présentés dans le tableau 11.

Critères	Qa.	Ac.	Nt.
Qa.		0	-1
Ac.	---		{1,2}
Nt.	---	---	

Tableau 7. Matrice d'avis selon l'évaluateur (E₁)

Critères	Qa.	Ac.	Nt.
Qa.		JSP	{-2,-1}
Ac.	---		1
Nt.	---	---	

Tableau 8. Matrice d'avis selon l'évaluateur (E₂)

Niveaux / Critères	-2	-1	0	1	2	-2,-1	1,2	J S P
Qa., Ac.	0	0	0	0	0	0	0	1
Qa., Nt.	0	0.5	0	0	0	0.5	0	0
Ac., Nt.	0	0	0	0.5	0	0	0.5	0

Tableau 9 : Fréquence d'apparition

Critères / Niveaux	-2	-1	0	1	2
{Qa., Ac.}	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
{Qa., Nt.}	0.25	0.75	0	0	0
{Ac., Nt.}	0	0	0	0.75	0.25

Tableau 10. Probabilité pignistique

Critères	indices d'interactions
{Qa., Ac.}	0
{Qa., Nt.}	-0.625
{Ac., Nt.}	0.625

Tableau 11. indices d'interactions

Le résultat présenté à partir de l'étude de cas montre que l'approche proposée admet plusieurs avantages. En effet, elle est facile à appliquer et capable de gérer les aspects d'indécision et d'ignorance relatifs aux élicitations des évaluateurs. Mais il est important de noter que la difficulté majeure de l'approche consiste dans la quantification des interactions. Les évaluateurs peuvent trouver des difficultés pour quantifier des éventuelles interactions entre les critères.

6. ETUDE DE CAS

Pour mieux illustrer le processus d'évaluation avec l'intégrale de Choquet, nous traitons un exemple du projet de Parc Relais implémenté à la Rochelle dans le cadre du programme SUCCESS/CIVITAS. L'ensemble de critères utilisés pour la phase initiale d'évaluation (ph₁) et la phase de post-évaluation (ph₂) sont : {Qa., Nu., Sa., Cg.}={Qualité de l'air, Nombre d'utilisateurs, degrés de satisfaction et degré de congestion}.

Il y a deux types d'information que l'utilisateur d'outil peut exploiter: l'évaluation de l'évolution de chaque critère (figure 2) et l'évaluation globale de l'efficacité du projet (figure 3). Pour déterminer un état global du projet, il existe plusieurs opérateurs d'agrégation qui peuvent être appliqués. Nous examinons ici le cas de la moyenne pondérée et l'intégrale de Choquet qui sont deux moyens d'agrégation en analyse multicritères.

Nous récapitulons les données de l'évaluation dans le tableau 12. Une évaluation globale est faite par l'intégrale de Choquet, en tenant compte des poids des critères et de leurs interactions (voir le tableau 13).

La figure 3 expose la différence entre l'agrégation par l'opérateur moyenne pondérée et l'intégrale de Choquet. Nous utilisons l'intégrale de Choquet (opérateur non additif) parce qu'elle présente un moyen plus général que la moyenne pondérée (opérateur additif). L'intégrale de Choquet est intéressante dans notre application où les poids des critères et leurs interactions sont bien quantifiés afin d'apporter une plus valeur au

processus de l'évaluation. La figure 3 expose l'intérêt de tenir compte des interactions entre les critères pour évaluer l'efficacité de projet. Enfin, nous pouvons conclure que l'application de l'intégrale de Choquet permet soit de soutenir soit d'affaiblir le score global selon l'existence des synergies ou de redondances entre les critères d'évaluation.

Dans cette étude de cas, vu les interactions prises en compte (tableau 12), le score global selon la moyenne pondérée, pour la phase de post-évaluation (ph₂), est plus important que celui calculé avec la forme 2-additive de l'intégrale de Choquet.

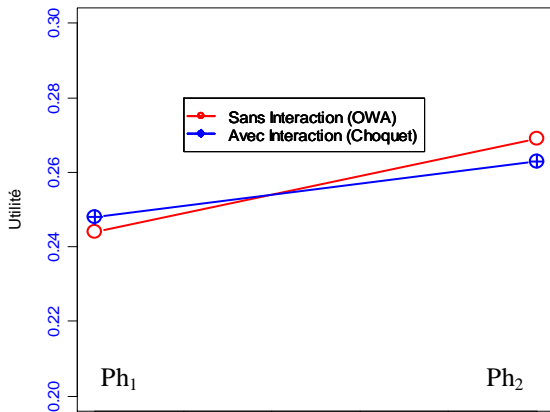


Figure 3. Evaluation globale de l'efficacité du projet

Catégorie	Critères (C)	Evaluation initiale (u ₁)	Post-Evaluation (u ₂)	Poids (w)	Indices d'interaction (I)
Environnement	Qualité de l'air (Qa.)	0.245	0.2	0.2	I(Un.,Sa.) = -0.10
Société	Nombre usagers (Nu.)	0.140	0.165	0.4	I(Cg.,Aq.) = -0.10
	Satisfaction (Sa.)	0.47	0.55	0.25	
Transport	Congestion (Cg.)	0.145	0.17	0.15	I(Aq.,Sa.) = +0.15

Tableau 12. Evaluation initiale et post-évaluation

évaluation globale (sans interaction)		évaluation globale (avec interaction)	
évaluation initiale (u ₁)	Post-évaluation (u ₂)	évaluation initiale (u ₁)	post-évaluation (u ₂)
0.244	0.269	0.248	0.263

Tableau 13. Evaluation globale avec et sans interaction

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La demande de déplacements en ville ne cesse d'augmenter ces dernières années et avec elle, la prise de conscience sur les impacts environnementaux ou socio-économiques néfastes, sans une réelle maîtrise du développement et de la gestion du système de transport urbain. Dans cet article, nous proposons une méthodologie,

pour l'évaluation des impacts liés à la mobilité urbaine, basée sur la théorie de l'analyse multicritères et la théorie des croyances. Son intérêt réside dans sa capacité de combiner d'une manière efficace l'information issue d'experts différents, même dans le cas des données incertaines et imprécises.

L'approche permet non seulement d'évaluer des indicateurs et des projets, mais également de faire le choix entre plusieurs projets à mettre en place.

Afin de tester notre approche, nous avons évalué le projet Parc Relais, mis en place à La Rochelle, dans le cadre d'un projet européen pour l'amélioration de la mobilité urbaine et les résultats nous semblent concluants.

Enfin, nous notons que ces propositions théoriques sont exploitables non seulement pour l'évaluation d'un projet de transport, mais aussi pour toute application utilisant l'analyse multicritères, le phénomène d'interaction, des bases de données hétérogènes et des sources d'informations diverses et hétérogènes (évaluation des produits, services, applications informatiques etc.).

Nous envisageons d'affiner davantage la modélisation des avis d'experts (système de notation par intervalle,..), tout en tenant compte de leurs degrés de connaissance qui réunit des critères comme: la fiabilité de la source d'information, la flexibilité de la décision, l'intérêt personnel à l'étude et l'expérience antérieure.

Une plate-forme web interactive pour la prise de décision collaborative est au stade prototype pour l'aide à l'évaluation (Omrani et al., 2007a). L'outil est baptisé DeSSIA (Decision Support System for Impacts Assessment) et il permet la collecte et l'exploration de données en se basant sur l'approche proposée.

REFERENCES

- Denoeux T., 2005. Application du formalisme des Fonctions de Croyance en fusion d'informations et en Classification, rapport, INRETS.
- Dubois D., Grabisch M., Prade H. et Smets Ph., 2001. Using the transferable belief model and a qualitative possibility theory approach on an illustrative example: The assessment of the value of a candidate. International Journal of Intelligent Systems, 16:1245-1272.
- Gal T, Hanne T, 1999. Multicriteria decision making: Advances in MCDM models, algorithms, theory, and applications. New York: Kluwer Academic Publishers.
- Grabisch M., Kojadinovic I., and Meyer P., 2006. Using the Kappalab R package for Choquet integral based multi-attribute utility theory. In Proc. Int. Conf. on Information Processing and Management of Uncertainty (IPMU'06), pages 1702_1709, Paris, France.
- Grabisch. M., 1997. k-order additive discrete fuzzy measures and their representation. Fuzzy Sets & Systems 92, 167-189.

- Guinée J.B., 2002. Handbook on Life Cycle Assessment. An operational guide to the ISO standard. London: Kluwer Academic, 704 p.
- Guyonnet D., Bourguin B., Dubois D., Fargier H. Bernard Côme, J.-P. Chilès, 2003. Hybrid Approach for Addressing Uncertainty in Risk Assessments. *Journal of Environmental Engineering* V. 129 N. 1 , p. 68-78.
- Kojadinovic I., 2004. Unsupervised Aggregation by the Choquet Integral Based on Entropy Functionals: Application to the Evaluation of Students. *MDAI* : 163-175.
- Omrani, H., Ion-Boussier, L. and Trigano P., 2007a. A Web-based Decision Support System For Impacts Assessment of urban mobility, AWIC2007 5th Atlantic Web Intelligence Conference, Fontainebleau, France, pp. 322-327, series: ASC 43.
- Omrani H., 2007b. Contribution à l'aide à l'évaluation des impacts liés à la mobilité urbaine,. Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne,
- Omrani, H. and Ion-Boussier, L. and Trigano, P., 2007c. A New Approach for Impacts Assessment of Urban Mobility WSEAS Transactions on Information Science and Applications, vol. 4, num. 3, pp. 439-444.
- Radon N.J, 2004. Fuzzy and Random Set Based Introduction Algorithms, Rapport de thèse, Université de Bristol, département d'ingénierie mathématique.
- Roy B., 1985. Méthodologie multicritère d'aide la décision. Collection Gestion, Paris: Economica.
- Saaty T L., 1990. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, North-Holland, 48:9-26.
- Shafer G., 1976, A Mathematical Theory of Evidence, Princeton University Press, Princeton.
- Site CIVITAS, <http://www.civitasinitiative.org/civitas/home.cfm>
- Smets P. and Kennes R., 1994. The Transferable belief model. *Artificial Intelligence*, volume 66, pages 191-234. Zeleny M. (1990), Multiple criteria decision making. New York: McGraw-Hill.
- Smets Ph., 2002. Decision making in a context where uncertainty is represented by belief functions. In R. P. Srivastava et T.J. Mock, éditeurs, *Belief Functions in Business Decisions*, pages 17–61. Physica-Verlag, Heidelberg, Germany,=.
- Vannoorenberghe P. et Denoeux T., 2001 . Diagnostic de la pollution atmosphérique par une approche RDF utilisant les fonctions de croyance. Colloque Automatique et Environnement A&E 2001, Saint-Etienne, 4-6.
- Xu, D. L., Yang. J. B. and Wang Y. M., 2005. The ER approach for multi attribute decision analysis under interval uncertainties, *European Journal of Operational Research*.
- Yager R.R, 1993. Families of OWA operators, *Fuzzy Sets and Systems*, 59,125-148.
- Yang J. B., Wang Y. M, Xu D. L. and Chin K. S., 2005. The evidential reasoning approach for MCDA under both probabilistic and fuzzy uncertainties, *European Journal of Operational Research*.